



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA



**Sistema de medición de vibraciones basado en Raspberry Pi para estabilización
de dispositivos de adquisición de imágenes en dron hexarotor F550**

POR

Karen Liliane Riedel Hornig

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al título profesional de Ingeniero Civil Aeroespacial

Profesores Guía:

Dr. Félix Leaman Weiffenbach

Dr. Frank Tinapp Dautzenberg

Julio 2023

Concepción (Chile)

© 2023 Karen Liliane Riedel Hornig

© 2023 Karen Liliane Riedel Hornig

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o
procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mis profesores: Dr. Félix Leaman, Dr. Frank Tinapp y José Abascal, quienes me apoyaron y guiaron durante las etapas de la realización de mi memoria.

También quiero agradecer a mis compañeros de laboratorio de aeroespacial y de vibraciones, quienes estuvieron a mi lado de una u otra manera durante el proceso de esta importante etapa.

En especial agradezco a mi familia, por su apoyo incondicional. A mi mamá por su amor, palabras de aliento y por motivarme. A mi papá por su cariño y alegría que me transmite. A Martin Riedel, mi hermano, por ser mi gran ejemplo y a Francisco Pérez, por su afecto, compañía y apoyo.

Sin duda alguna, el apoyo sincero de cada uno de ustedes me permitió terminar de buena manera con esta etapa de mi vida, pero más importante aún, disfrutar del camino que significó vivirla.

¡Gracias por todo!

Esta memoria está dedicada a mis padres, Angélica Hornig y Arturo Riedel.

Resumen

Hoy en día existen variados tipos y tamaños de drones con la capacidad de transportar diversos sensores y equipos a bordo para el cumplimiento de misiones específicas. Particularmente, en muchas aplicaciones es una práctica común integrar dispositivos de imágenes en ellos. De hecho, el desarrollo de la tecnología del sistema conjunto, dron-cámara, es un tema de gran relevancia científica-tecnológica, ya que posee diversas aplicaciones de alto impacto social y ambiental, tales como: monitoreo de recursos geológicos, hídricos y forestales, operaciones de rescate en desastres naturales, vigilancia y seguridad, entre otras. No obstante, durante el proceso del vuelo, los drones experimentan en forma natural vibraciones que surgen debido a las condiciones de vuelo y su mecánica propia, principalmente debido al movimiento de los motores y las hélices. Cuando estas vibraciones se transmiten a los sistemas de imágenes y cámaras a bordo, se generan borrosidades y desencuadre en la escena, degradando la calidad de las imágenes captadas. Dependiendo de la severidad de las vibraciones experimentadas, estas pueden generar daños en los componentes ópticos. Por esta razón, es de gran relevancia estudiar y desarrollar sistemas de estabilización con el fin de mitigar sus efectos sobre los equipos a bordo. En este trabajo, se desarrolló e implementó un sistema de medición de vibraciones en un dron hexarotor con el objetivo de caracterizar las vibraciones experimentadas por el dron durante el vuelo, con el propósito final de desarrollar una metodología de aislamiento de vibraciones mecánicas para sistemas de imágenes a bordo. En particular, en este trabajo: (i) se habilitó un dron hexarotor mediante el montaje de sus componentes, (ii) se realizaron las configuraciones de software y calibración de instrumentos del dron y (iii) se desarrolló un sistema de medición de vibraciones con una computadora Raspberry Pi y tres acelerómetros digitales triaxiales. En el desarrollo del sistema de mediciones, se realizaron las conexiones físicas entre los equipos, los programas de configuración y operación de los acelerómetros, se calibraron los instrumentos de medición y se diseñaron y fabricaron los *housing* de los componentes. Una vez implementado el sistema de mediciones en el dron, se realizaron pruebas experimentales de vuelo, registrando las aceleraciones en tres ejes en tres fases de vuelo: *hovering*, desplazamiento horizontal y vertical. Finalmente, con un análisis de tiempo-frecuencia, se caracterizaron las vibraciones experimentadas por el dron a modo de identificar las componentes de frecuencias que deben ser aisladas con el método de estabilización mecánica.

Palabras claves: Dron, vibrometría, estabilización de vibraciones, análisis tiempo-frecuencia

Abstract

Nowadays, drones have proven to be versatile aircraft that are produced in different shapes, types and sizes. Usually, drones are equipped with various sensors to fulfill mission-specific duties. In this regard, at present is a common practice to mount imaging devices on drones. The development of the drone-camera systems technology is a subject of great relevance in scientific and technological areas because it can be utilized in several applications with high social and environmental impact such as: monitoring of natural resources such as mineral, water and forest resources; rescue operations in natural disasters, surveillance and security, among others. However, during a flight drones exhibit vibrations caused by flight conditions and their own mechanics, the latter mainly due to the movement of the motors and propellers. When flight vibrations are transmitted to the imaging devices onboard, their image quality is degraded by motion blur and scene misframing. Furthermore, depending on the severity of the vibration, they could cause physical damage to the imaging device's optical components. For this reason, it is of great importance to study and develop mechanical stabilization systems to mitigate the effects of vibrations on the onboard equipment. In this work, a vibration measurement system is developed and implemented in a hexarotor drone to characterize the vibrations experienced by the drone over time in a flight. This corresponds to the first step in developing a mechanical vibration isolation methodology for onboard imaging systems. In this work an F550 model hexarotor drone was assembled, its operational software was configured, and its flight-aid instrumentation was calibrated. Furthermore, a vibration measurement system was developed with a Raspberry Pi computer and three triaxial digital accelerometers. Particularly, the physical and electrical connections between the equipment were set up, the accelerometer operation software was developed, the accelerometer's calibration was performed, and the onboard accelerometer housing components were designed and constructed. The measurement system was implemented in the hexarotor drone, and a verification test was conducted. Subsequently, flight tests were conducted with the measurement system onboard to record the accelerations in the three axes for three different flight phases: hovering, horizontal displacement and vertical displacement. Finally, the vibrations experienced by the drone were characterized using a time-frequency analysis to identify the frequency components that must be isolated with a mechanical stabilization system.

Keywords: Drone, vibrometry, vibration stabilization, time-frequency analysis.

Tabla de Contenidos

Tabla de Contenidos	iii
Lista de Tablas	v
Lista de Figuras	vi
Glosario	xii
CAPÍTULO 1: Introducción.....	1
1.1 Planteamiento del problema y solución propuesta	1
1.2 Estado del arte	2
1.3 Objetivos.....	4
1.4 Hipótesis	4
1.5 Metodología.....	4
CAPÍTULO 2: Montaje del dron DJI modelo F550	6
2.1 Descripción del dron F550 y sus componentes	6
2.2 Montaje del dron F550	13
2.3 Configuraciones y calibración del dron F550.....	13
CAPÍTULO 3: Desarrollo del sistema de medición de vibraciones	16
3.1 Descripción de componentes	16
3.2 Conexiones físicas, eléctricas y electrónicas	22
3.3 Comunicación Wi-Fi con la RPi.....	23
3.4 Programas de configuración y operación de los acelerómetros	25
3.5 Calibración de los acelerómetros.....	27
3.6 Diseño de housing de los acelerómetros y la RPi.....	30
3.7 Diseño de placas de unión de los housing con dron F550.....	32
3.8 Implementación del sistema de medición de vibraciones al dron F550	32
3.9 Verificación del sistema de medición de vibraciones	33
CAPÍTULO 4: Pruebas de vuelo con sistema de medición de vibraciones	34
4.1 Diseño de pruebas de vuelo	34
4.2 Registro y base de datos de vibraciones	34
4.3 Resultados.....	37
4.4 Análisis de resultados	45
CAPÍTULO 5: Análisis técnico-económico	49
5.1 Análisis técnico.....	49
5.2 Análisis económico.....	51

CAPÍTULO 6: Conclusiones	52
Bibliografía.....	55
Anexo A: Pasos para el montaje del dron F550	57
Anexo B: Procedimiento de soldadura de pines.....	60
Anexo C: Implementación de las conexiones entre los acelerómetros y la RPi	61
Anexo D: Programas de medición de vibraciones	62
Anexo E: Diseño de housing y placas de unión	69
Anexo F: Verificación del sistema de medición de vibraciones	77
Anexo G: Gráficas de altura de las pruebas de vuelo realizadas	79
Anexo H: Gráficas de resultados de los acelerómetros MMA8452 y MSA301	86
Anexo I: Resultados de espectrogramas del acelerómetro digital MPU6050.....	104

Lista de Tablas

Tabla 1. Especificaciones técnicas del dron F550 [14].	7
Tabla 2. Especificaciones técnicas principales del autopiloto modelo HKPilot32 de Hobbyking [16].	10
Tabla 3. Estado de la conexión entre las radio de telemetría según indicador del color y estado del LED.	11
Tabla 4. Especificaciones técnicas principales de la RPi modelo 4B de 2 [GB] para el desarrollo del sistema de medición de vibraciones.	18
Tabla 5. Especificaciones técnicas principales de los acelerómetros digitales utilizados en el desarrollo del sistema de medición de vibraciones: MMA8254, MPU6050 y MSA301.	19
Tabla 6. Características comunes de los pines de los acelerómetros MMA8452, MPU6050 y MSA301.	22
Tabla 7. Configuración de parámetros relevantes en el inicio de los códigos de programación de medición de aceleración de los acelerómetros seleccionados.	27
Tabla 8. Resultados de los valores de la pendiente y ordenada de origen de las curvas de calibración para los acelerómetros digitales seleccionados.	29
Tabla 9. Registro de los metadatos de la pruebas de vuelo para los 3 días de medición.	35
Tabla 10. Registro de los datos de muestreo asociados al sistema de medición de vibraciones de cada prueba de vuelo.	36
Tabla 11. Aceleraciones máximas y valores RMS máximos registrados con el acelerómetro MPU6050.	46
Tabla 12. Sistema de valores utilizado en la selección de un acelerómetro digital.	49
Tabla 13. Tabla comparativa entre los acelerómetros digitales MMA8452, MPU6050 y MSA301.	50
Tabla 14. Análisis de alternativas en la selección de un acelerómetro digital.	50
Tabla 15. Evaluación económica de la implementación del sistema de medición de vibraciones.	51

Lista de Figuras

Figura 1. Fuentes de vibración en UAVs y métodos de estabilización [8].	2
Figura 2. Dron F550 seleccionado para el estudio empírico de las vibraciones experimentadas durante el vuelo [14].	6
Figura 3. Componentes del dron F550 [15].	7
Figura 4. Distribución y sentido de giro de los motores.	8
Figura 5. Autopiloto modelo HKPilot32 de HobbyKing, que se encuentra equipado en el dron F550.	9
Figura 6. Partes de las radios de telemetría, utilizadas en el dron F550.	11
Figura 7. Dron hexarotor F550 a utilizar en las prueba de vuelo.	13
Figura 8. Interfaz gráfica del software Mission Planner de ArduPilot.	14
Figura 9. Interfaz gráfica de selección de firmware del controlador del autopiloto. En recuadro rojo se marca el firmware seleccionado correspondiente a un hexarotor.	15
Figura 10. Gráfica de altura correspondiente al vuelo de verificación de funcionamiento del dron F550.	15
Figura 11. Computador Raspberry Pi 4B seleccionado para el desarrollo del sistema de mediciones de vibraciones.	17
Figura 12. Layout de pines de la placa RPi. En el desarrollo del sistema de mediciones de vibraciones se utilizan pines de alimentación de 3.3 y 5 [V], de transmisión de datos (SDA, SCL) y tierra.	17
Figura 13. Layout, dimensiones y orientación del módulo Sparkfun del acelerómetro digital MMA8452 utilizado en el sistema de medición de vibraciones.	20
Figura 14. Layout, dimensiones y orientación del módulo GY-521 del acelerómetro digital MPU6050 utilizado en el sistema de medición de vibraciones.	21
Figura 15. Layout, dimensiones y orientación del módulo Adafruit del acelerómetro digital MSA301 utilizado en el sistema de mediciones de vibraciones.	22
Figura 16. Conexiones físicas entre la RPi y los acelerómetros MMA8452, MPU6050 y MSA301, con cables hembra a hembra. Las conexiones de color rojo, verde, amarillo y negro indican conexión a pin de 3.3 [V], SDA, SCL y GND respectivamente.	23
Figura 17. Interfaz del programa PuTTY para acceder a la conexión con la RPi de forma remota.	24
Figura 18. Interfaz del terminal de PuTTY conectado al usuario de la RPi.	25
Figura 19. Diagrama de flujo del programa realizado en Thonny con Python para medición de aceleración con los acelerómetros seleccionados.	26
Figura 20. Montaje del equipo utilizado en la calibración de los acelerómetros digitales.	28
Figura 21. Curvas de calibración de los ejes X, Y y Z del acelerómetro digital MMA8452.	28
Figura 22. Curvas de calibración de los ejes X, Y y Z del acelerómetro digital MPU6050.	29
Figura 23. Curvas de calibración de los ejes X, Y y Z del acelerómetro digital MSA301.	29
Figura 24. Housing de la RPi.	30
Figura 25. Housing diseñado en el programa Fusion 360, de los acelerómetros MPU6050, MMA8452 y MSA301.	31

Figura 26. Impresión 3D del sistema de housing de la RPi y los acelerómetros digitales seleccionados.	31
Figura 27. Placas de unión para la conexión entre los housing de los acelerómetros y el dron F550.	32
Figura 28. Escena de las pruebas experimentales: a) Pista de despegue y aterrizaje b) Estación en tierra.	34
Figura 29. Estructura gráfica de la base de datos de las aceleraciones medidas durante las pruebas de vuelo.	37
Figura 30. Procedimiento de análisis para determinar el espectro RMS por bandas de frecuencia de 50 [Hz] y el espectrograma.	39
Figura 31. Gráfica de aceleraciones medidas en la prueba de vuelo 5, registradas con el acelerómetro digital MPU6050, en vuelo estático durante tramo de 8 [s] de medición.	40
Figura 32. Gráfica de aceleraciones medidas en la prueba de vuelo 5, registradas con el acelerómetro digital MPU6050, en vuelo horizontal durante tramo de 8 [s] de medición.	40
Figura 33. Gráfica de aceleraciones medidas en la prueba de vuelo 4, registradas con el acelerómetro digital MPU6050, en vuelo vertical ascendente durante tramo de 8 [s] de medición.	41
Figura 34. Gráfica de aceleraciones medidas en la prueba de vuelo 4, registradas con el acelerómetro digital MPU6050, en vuelo vertical descendente durante tramo de 8 [s] de medición.	41
Figura 35. Gráfica del espectro RMS por bandas de frecuencias de la prueba de vuelo 5, registradas con el acelerómetro digital MPU6050, en vuelo estático durante tramo de 8 [s] de medición.	42
Figura 36. Gráfica del espectro RMS por bandas de frecuencias de la prueba de vuelo 5, registradas con el acelerómetro digital MPU6050, en vuelo horizontal durante tramo de 8 [s] de medición.	42
Figura 37. Gráfica del espectro RMS por bandas de frecuencias de la prueba de vuelo 4, registradas con el acelerómetro digital MPU6050, en vuelo vertical ascendente durante tramo de 8 [s] de medición.	43
Figura 38. Gráfica del espectro RMS por bandas de frecuencias de la prueba de vuelo 4, registradas con el acelerómetro digital MPU6050, en vuelo vertical descendente durante tramo de 8 [s] de medición.	43
Figura 39. Espectrograma de 60 [s] de medición con el acelerómetro digital MPU6050, de la prueba de vuelo 5 en vuelo estático en el eje Z.	44
Figura 40. Espectrograma de 60 [s] de medición con el acelerómetro digital MPU6050, de la prueba de vuelo 5 en vuelo horizontal en el eje Z.	44
Figura 41. Espectrograma de 60 [s] de medición con el acelerómetro digital MPU6050, de la prueba de vuelo 4 en vuelo vertical en el eje Z.	45
Figura 42. Espectrograma para vuelo horizontal con descripción detallada de los tramos de vuelo.	47
Figura 43. Espectrograma durante prueba de vuelo vertical con descripción detallada de los tramos de vuelo.	48

Glosario

3D	:	Tridimensional
ADC	:	Del inglés, <i>Analog Digital Converter</i>
CDIO	:	Concebir, Diseñar, Implementar y Operar
ESC	:	Del inglés, <i>Electronic Speed Controller</i>
F550	:	FlameWheel 550
FIR	:	Del inglés, <i>Finite Impulse Response</i>
FPV	:	Del inglés, <i>First Person View</i>
GND	:	Del inglés, <i>Ground</i>
GPIO	:	Del inglés, <i>General Purpose Input/Output</i>
GPS	:	Del inglés, <i>Global Positioning System</i>
I2C	:	Del inglés, <i>Inter integrated circuits</i>
IMU	:	Del inglés, <i>Inertial measurement unit</i>
KF	:	Del inglés, <i>Kalman Filter</i>
LED	:	Del inglés, <i>Light Emitting Diode</i>
LiPo	:	Del inglés, <i>Lithium-ion Polymer battery</i>
MEMS	:	Del inglés, <i>Micro-ElectroMechanical System</i>
psk	:	Del inglés, <i>password</i>
RC	:	Radio Control
RMS	:	Del inglés, <i>Root Mean Square</i>
RTL	:	Del inglés, <i>Return to Launch</i>
RPi	:	Raspberry Pi
SCL	:	Del inglés, <i>System Clock</i>
SDA	:	Del inglés, <i>System Data</i>
SSH	:	Del inglés, <i>Secure Shell</i>
SSID	:	Del inglés, <i>Service Set Identifier</i>
STFT	:	Del inglés, <i>Short-time Fourier transform</i>
TDF	:	Transformada Discreta de Fourier
TF	:	Transformada de Fourier
UAV	:	Del inglés, <i>Unmanned Aerial Vehicle</i>
UdeC	:	Universidad de Concepción
USB	:	Del inglés, <i>Universal Serial Bus</i>

Símbolos

b	:	La ordenada de origen
e	:	Exponencial
F_s	:	Frecuencia de muestreo
g	:	Unidad de fuerza de gravedad o gramos según corresponda al caso
hh	:	Horas hombre
j	:	Unidad imaginaria
k	:	El valor actual de la frecuencia
m	:	El valor de la pendiente de la recta
N	:	La cantidad de muestras de tiempo
n	:	La muestra de tiempo actual
t	:	Tiempo
X	:	La señal en el dominio de la frecuencia
x	:	La señal en el dominio del tiempo
\in	:	Pertenece
$^\circ$:	Grado
$=$:	Igual
\pm	:	Más o menos
$>$:	Mayor que
$<$:	Menor que

Letras griegas

Δ	:	Diferencia
μ	:	Micro
π	:	Pi
Σ	:	Sumatoria

CAPÍTULO 1: Introducción

1.1 Planteamiento del problema y solución propuesta

Un dron corresponde a un vehículo aéreo no tripulado (*Unmanned Aerial Vehicle*, UAV) controlado de manera remota, que es capaz de mantenerse en el aire en vuelo nivelado de forma autónoma. El desarrollo de la tecnología de un dron es un tema de gran relevancia en la actualidad, ya que posee gran potencial en diversas áreas científico-tecnológicas de alto impacto social y ambiental. Gracias al avance y desarrollo tecnológico, el uso de cámaras en UAV se ha convertido en una parte integral del sistema, cuya aplicabilidad es muy variada, siendo algunas: supervisión y monitorización de incendios forestales [1], monitoreo de recursos hídricos [2], captura de imágenes y video para vigilancia y seguridad [3,4], mecanismos para prevención de riesgos laborales [5], búsqueda de personas en desastres naturales [6], entre otras. Debido a lo indispensable de la captura de datos, es de gran relevancia que las imágenes sean claras y de alta calidad, que las distorsiones en la información sean nulas o en porcentajes poco significativos, de tal forma que se asegure la efectividad de la misión de los UAVs.

Durante el vuelo de un dron se producen diferentes tipos de vibraciones de amplitud y frecuencia variable, dependiendo del entorno al que está expuesto. En general, independiente de su diseño, en un dron se generan vibraciones por las partes mecánicas móviles como las hélices y motores, por maniobras de estabilización y vuelo, por fuerzas aerodinámicas y otras inesperadas de gran magnitud como el viento. Según [7], las vibraciones producto de las hélices y motores son de baja amplitud y alta frecuencia (>0.35 Hz) y las vibraciones causadas por maniobras de vuelo son de frecuencia menor a 0.35 Hz y alta amplitud. Estas vibraciones se transmiten por la estructura del dron afectando al resto de equipos adosados a éste, afectando negativamente a cámaras y otros sensores.

Cuando las vibraciones son transmitidas a las cámaras a bordo, se producen borrosidades en la imágenes del tipo *motion blur* y desencuadre de la escena, alterando la definición de las imágenes resultantes. Esto dificulta el mapeo de la escena como también el reconocimiento de patrones (*pattern recognition*) y seguimiento de *targets* en las imágenes. Además, las vibraciones pueden afectar los componentes ópticos de las cámaras y eventualmente generar daños en estos, por lo que es de gran interés estudiarlas y desarrollar formas de mitigarlas.

Para poder implementar un sistema de estabilización que permita mitigar las vibraciones experimentadas por la cámara de un dron durante su vuelo, se requiere conocer las características del sistema dinámico. El uso de acelerómetros digitales a bordo que operen durante el vuelo, es una forma empírica de recabar información de las vibraciones experimentadas en el dron. Gracias a los avances tecnológicos, que han permitido reducir las dimensiones, peso y consumo de los componentes electrónicos, se pueden desarrollar sistemas de medición de vibraciones a bordo, por medio del uso de tarjetas de adquisición de datos, microcontroladores y/o microcomputadores de propósito general disponibles en el comercio. Un dispositivo atractivo para estos fines, es la plataforma Raspberry Pi (RPI), que corresponde a un computador pequeño con sistema operativo Linux que permite la conexión de sensores y actuadores a través de sus entradas digitales. Las ventajas del uso de la RPI

son: su bajo costo, su tamaño compacto y liviano, que permite programación personalizable y que posee una estructura eficiente y adaptable. En particular, el sistema operativo de RPi permite implementar herramientas de visualización y análisis con el uso de varios lenguajes de programación y conectar actuadores y sensores, como los acelerómetros. De esta manera, a través de un sistema de medición de vibraciones basado en la plataforma Raspberry Pi y acelerómetros a bordo, es posible registrar en el tiempo las vibraciones mecánicas, que experimentada el dron hexarotor durante el vuelo. Así, con la ayuda de un sistema de medición de aceleración a bordo, sería posible determinar parámetros del sistema dinámico dron-cámara de gran interés en el desarrollo de una metodología de mitigación de vibraciones.

En este trabajo, se propone un sistema de medición de vibraciones y se presenta un estudio preliminar de las vibraciones de un dron hexarotor para estabilización mecánica de dispositivos de adquisición de imágenes durante el vuelo. Las vibraciones experimentadas por el dron se caracterizan de forma empírica en tres distintas fases de vuelo que son de uso común en las operaciones de drones, siendo estas vuelo estático, de desplazamiento horizontal y vertical. A partir de los resultados, se realiza un análisis, en el cual, se utiliza la transformada de Fourier, espectros RMS por bandas de frecuencia y el espectrograma para caracterizar las señales vibratorias. Los resultados de este análisis son clave para determinar las amplitudes y componentes de frecuencias de las vibraciones que se desean mitigar y, de esta forma, guiar el desarrollo de una metodología de aislamiento vibraciones del tipo mecánica-pasiva para mejorar la calidad de imágenes capturadas durante un vuelo.

1.2 Estado del arte

A continuación, se presenta un análisis del estado del arte respecto a los sistema de estabilización de imagen en UAVs. Existen distintos métodos que se han desarrollado para la estabilización de las imágenes captadas por UAVs y pueden ser clasificados en tres grandes categorías, siendo estas: (i) estabilización óptica, (ii) estabilización digital y (iii) estabilización mecánica. En la Figura 1, se presentan las principales fuentes de vibraciones en UAVs y los respectivos métodos de estabilización.

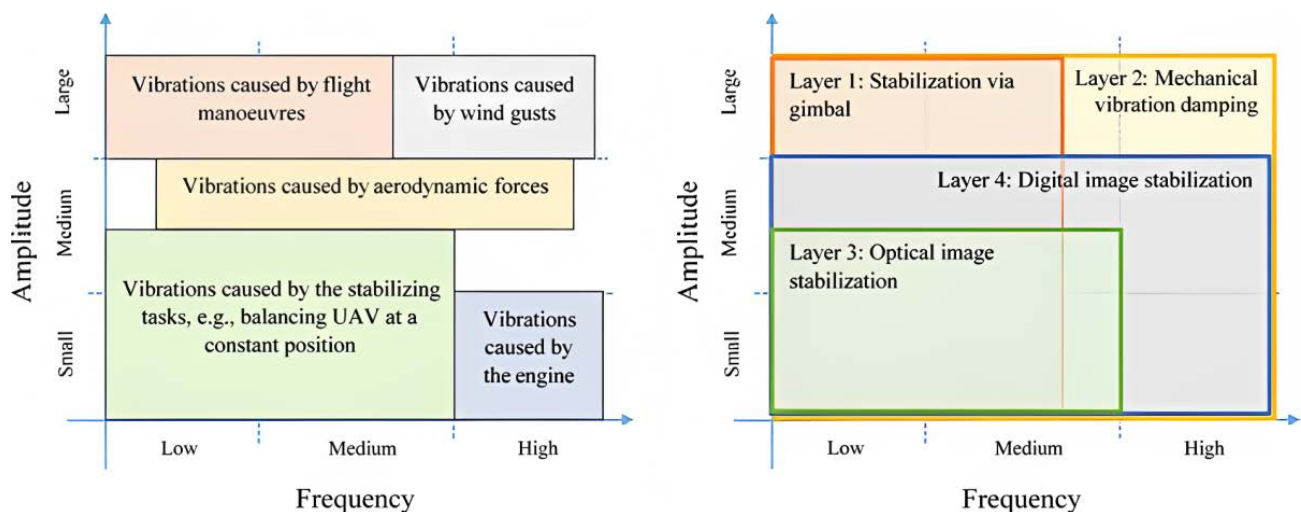


Figura 1. Fuentes de vibración en UAVs y métodos de estabilización [8].

La categoría (i) se basa en la modificación del camino óptico de la cámara mediante desplazamiento del lente o el sensor y la inclinación del módulo, teniendo buen rendimiento únicamente para bajas

amplitudes de vibración [8]. La categoría (ii) corrige la imágenes digitalmente con algoritmos complejos a través de una estimación de la variación de posición de la cámara y posterior corrección por alineamiento. Sin embargo, este método presenta la limitante del campo de visión captado por la cámara. De hecho, de presentarse vibraciones con gran amplitud, se puede perder el rastro de un punto de referencia [9]. En la estabilización mecánica, categoría (iii), todo el módulo de la cámara es controlado por un sistema mecánico para contrarrestar el desplazamiento producto de las vibraciones. En esta categoría, se distinguen dos métodos dependiendo de las características del mecanismo de mitigación utilizado: pasivo y activo. La ventaja de esta categoría de métodos de estabilización es que puede operar bien para todo el dominio frecuencia-amplitud, permitiendo compensar diferentes tipos de vibraciones [8].

En [10], Park et al., proponen un método de estabilización de imagen óptico basado en el uso de filtro de respuesta de impulso finito (*Finite Impulse Response*, FIR) como alternativa a uno basado con filtro Kalman (*Kalman Filter*, KF), que presenta un rendimiento deficiente debido a ajustes incorrectos en los parámetros del modelo. Si bien, el método con filtro FIR es más robusto que el anterior (KF), ambos presentan la problemática del rango de aplicabilidad. Los métodos ópticos, tienen la capacidad de desempeñarse bien para vibraciones de baja y alta frecuencia, no así para perturbaciones de gran amplitud como maniobras de vuelo.

En [11], Guido et al., presentan una metodología para obtener datos de seguimiento de vehículos en movimiento a partir de procesamiento de video con tecnología UAV. En el trabajo utilizaron estabilización de imagen del tipo digital, permitiendo demostrar el potencial y utilidad de los UAV para estos fines. No obstante, como trabajo futuro consideran importante tener en cuenta otros parámetros mecánicos para eliminar errores debido a movimientos incontrolados o vibraciones producto del viento y los motores del UAV.

En [12], Li et al., proponen un sistema de mitigación de vibraciones en micro UAVs del tipo estabilización mecánica pasiva y digital basado en simulaciones y mediciones reales de las aceleraciones experimentadas por un micro UAV. Como resultado obtienen una mejora de hasta un 97% en la reducción de la amplitud de las vibraciones implementando amortiguadores mecánicos del tipo Kyosho Zeal sheet y un filtro digital pasa bajo.

En [8], Verma et al., desarrollan un sistema de aislamiento activo para aislar la cámara de un dron de las vibraciones experimentadas durante el vuelo. El sistema de aislamiento se desarrolló con dos etapas: (i) aislamiento con plataforma Stewart y (ii) aislamiento del tipo pasivo con amortiguamientos convencionales de caucho. Reportaron como resultado que el sistema de aislamiento propuesto exhibió un buen desempeño en regiones de baja y alta frecuencia.

En resumen, el análisis de literatura evidencia que, los sistemas de estabilización son necesarios para mitigar las vibraciones experimentadas por la cámara de un dron durante el vuelo y que pueden ser implementados de forma conjunta, de modo de complementar el rango operativo de los métodos de estabilización utilizadas. Varios métodos, funcionando en conjunto, pueden cubrir el área para el cual el otro método tiene un rendimiento débil en el espectro de amplitud y frecuencia, garantizando un mejor resultado en la reducción de las vibraciones [7]. En particular, incorporar un método de

estabilización mecánica es primordial debido a que es el primer punto de acción para mitigar las vibraciones experimentadas por la cámara y además, reducir las posibilidades de daño a los componentes ópticos. Todas las reducciones alcanzadas en la etapa de estabilización mecánica contribuyen a un mejor desempeño de los sistemas de estabilización digital y óptico.

1.3 Objetivos

El objetivo general de este trabajo es caracterizar las vibraciones experimentadas por un dron hexarotor en vuelos estático a altura constante, de desplazamiento horizontal y vertical, mediante el desarrollo y la implementación de un sistema de medición de vibraciones con la plataforma Raspberry Pi y acelerómetros digitales.

Los objetivos específicos del estudio son:

1. Concebir y diseñar un sistema de medición de vibraciones en la plataforma Raspberry Pi 4 modelo B con un máximo de 3 acelerómetros digitales, incluyendo un análisis técnico-económico.
2. Implementar y operar el sistema de medición de vibraciones en el dron hexarotor a través de mediciones de vibraciones en vuelo para vuelos estático, de desplazamiento horizontal y vertical en las dependencias de la Universidad de Concepción.
3. Concebir, diseñar e implementar una base de datos de las vibraciones experimentadas por un dron hexarotor para las distintas fases de vuelo descritas previamente en plataforma digital.
4. Realizar un análisis de las vibraciones experimentadas por el dron hexarotor para las distintas fases de vuelos mencionadas previamente.

1.4 Hipótesis

Un sistema de medición de aceleración basado en un microcomputador y acelerómetros digitales a bordo, posibilita caracterizar la complejidad del comportamiento vibratorio que presenta un dron, debido a la acción conjunta de múltiples rotores en distintas fases del vuelo.

1.5 Metodología

La técnica de trabajo se basa principalmente en la metodología CDIO (Concebir, Diseñar, Implementar y Operar), que posibilita llevar los conocimientos ingenieriles de manera estructurada a la práctica. Esta metodología permite abarcar sistemas complejos de la ingeniería, con un valor agregado en un contexto moderno, basándose en el trabajo en equipos para desarrollar sistemas y/o productos [13]. En particular, para el desarrollo del proyecto y logro del objetivo general, se alcanzaron 4 resultados principales que se asocian a cada uno de los objetivos específicos respectivamente.

El primer resultado alcanzado corresponde a la concepción y diseño del sistema de medición de vibraciones con Raspberry Pi y acelerómetro. Para ello, se realizó una revisión bibliográfica, que contempló un estudio y análisis del estado del arte. Luego se seleccionaron, describieron y calibraron los componentes del sistema de mediciones, para seguidamente implementar las interfaces

electrónicas del sistema y programar en lenguaje Python las herramientas de análisis y visualización. Para esta etapa, fue necesario también diseñar y fabricar una estructura de soporte (*housing*) del sistema de medición para montar en el dron hexarotor.

El segundo resultado alcanzado corresponde a la implementación y operación del sistema de mediciones en el dron hexarotor. Esta etapa inició con la construcción del dron y diseño de piezas de soporte para el dron. Seguidamente, en esta fase de la investigación se realizaron las pruebas de vuelo y la toma de mediciones de las aceleraciones en los 3 ejes durante el vuelo del dron. Para ello, se consideró una etapa de revisión de manuales de vuelo y operación de un dron y posterior manejo del dron antes de recopilar datos de medición. Las mediciones de vibraciones se realizaron en 3 fases de vuelo: (i) vuelo estático (*hovering*), (ii) vuelo de desplazamiento horizontal de forma recta y nivelada y (iii) vuelo de desplazamiento vertical ascendente y descendente. Estas pruebas se realizaron en dependencias de la Universidad de Concepción. Una vez registradas las mediciones en las 3 fases de vuelo, se da inició a la tercera etapa.

En la tercera etapa, se contempló la concepción, el diseño y la implementación de la base de datos en una plataforma digital y así, contar con el registro de las vibraciones experimentadas por el dron hexarotor para cada fase de vuelo. El propósito de esta base de datos es la de agrupar y ordenar los datos, para posteriormente analizarlos y permitir realizar comparaciones entre ellos.

Finalmente, en la última etapa del proyecto se realiza un análisis de las vibraciones experimentadas por el dron. Para ello, primero se procesan los datos por computador, luego se realiza un análisis de la severidad vibratoria (valores RMS), las amplitudes y las bandas de frecuencias de las señales procesadas de las distintas fases de vuelo. Finalmente, se caracterizan las vibraciones mecánicas de las distintas fases de vuelo distinguiendo las características de las señales mencionadas.

CAPÍTULO 2: Montaje del dron DJI modelo F550

En la operación de un dron, es de gran importancia conocer el equipo, sus principales componentes y las partes del dron a utilizar para realizar la misión del vuelo de forma segura. En caso de presentarse algún problema, se debe detectar de forma oportuna el componente del sistema que esté fallando y realizar las correcciones necesarias.

En este capítulo, se describen las características y los componentes del dron hexarotor a utilizar para realizar el estudio de las vibraciones experimentadas durante cada vuelo de forma empírica. Además, se detalla la implementación del dron, las configuraciones de software realizadas y las calibraciones requeridas para su correcto funcionamiento.

2.1 Descripción del dron F550 y sus componentes

El dron seleccionado para realizar este estudio corresponde al dron hexarotor DJI FlameWheel 550 (F550) fabricado por la empresa DJI Innovations. Se decide utilizar este dron principalmente debido a que es posible realizar intervenciones en las conexiones físicas y acoplar equipos como sensores y cámaras. El dron F550 ofrece características de vuelo para misiones de baja altitud con espacios reducidos. Fue diseñado para todo tipo de pilotos para uso en distintas aplicaciones como entretenimiento, fotogrametría, actividades de aerodelismo, vuelo de vista en primera persona (*First Person View*, FPV), entre otras. El dron multirotor cuenta con un sistema de autopiloto modelo HKPilot32 de HobbyKing, compatible con el estándar PX4 para autopilotos, que le permite alcanzar un modo de vuelo estático y crucero, realizar movimientos de alabeo y otras maniobras de vuelo. En la Figura 2, se muestra un esquema del dron F550 de la empresa DJI Innovations seleccionado para el estudio empírico de las vibraciones experimentadas durante distintas fases de vuelo.

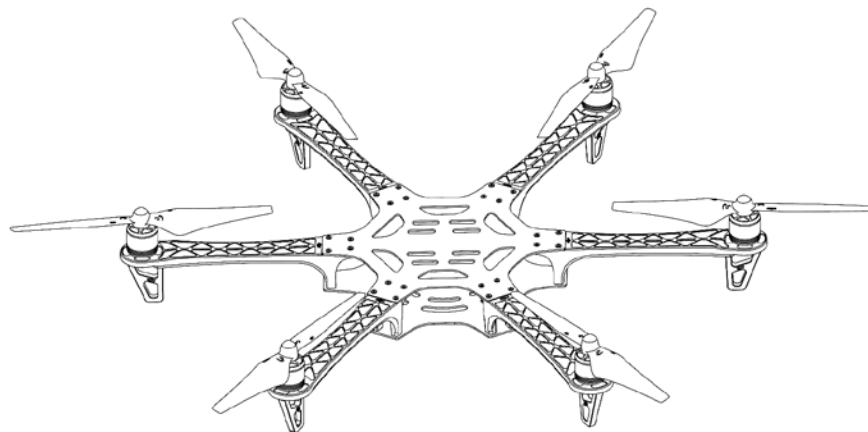


Figura 2. Dron F550 seleccionado para el estudio empírico de las vibraciones experimentadas durante el vuelo [14].

El dron F550 se compone de distintos elementos electrónicos, estructurales y aerodinámicos que le otorgan soporte, fuerza y sustentación durante el vuelo, cuyas componentes son estándar y transversales a los drones comerciales disponibles. Cada uno de los elementos del dron F550 se visualizan en la Figura 3 y se describen a continuación. En la Tabla 1, se presentan las especificaciones técnicas principales del dron F550, cuyos valores fueron obtenidos del manual de uso otorgado por DJI Innovations [14].

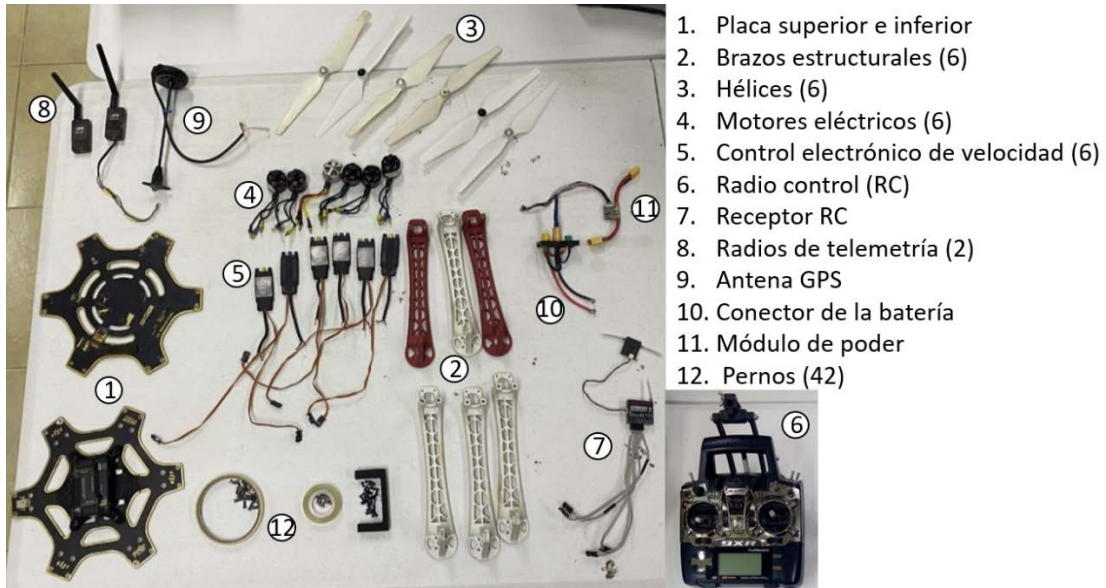


Figura 3. Componentes del dron F550 [15].

Tabla 1. Especificaciones técnicas del dron F550 [14].

Estructura	
Distancia entre ejes diagonal	550 [mm]
Peso estructural	478 [g]
Peso de despegue	1200 – 2400 [g]
ESC	
Voltaje permitido máximo	17.4 [V]
Corriente permitida máxima	20 [A]
Corriente pico permitida máxima	30 [A]
Nivel señal de entrada de modulación por ancho de pulsos (pulse-width modulation, PWM)	3.3 [V] / 5 [V]
Frecuencia de señal	30-450 [Hz]
Batería	
Peso (sin cables)	12.5 [g]
Peso (con cables)	27 [g]
Motor	
Tamaño de estator	23 x 12 [mm]
KV	960 [rpm/V]
Peso	57 [g]
Hélice	
Diámetro	9.4 [in]
Paso	5.0 [in]
Peso	13 [g]
Material	Plástico

2.1.1 Placas

Las placas corresponden al cuerpo del dron y son la parte central, ya que en ellas se ensamblan los componentes del dron y albergan el autopiloto, la batería, la antena GPS y carga útil. Para la implementación del hexarotor se requiere de dos placas, una inferior y una superior.

2.1.2 Brazos estructurales

El dron F550 corresponde a un dron de seis rotores, por lo que requiere de 6 brazos estructurales que permitan sujetar los motores y las hélices. Los brazos se unen con tornillos a la placa inferior y superior.

2.1.3 Hélices

Las hélices poseen un diseño aerodinámico, lo que permite generar la sustentación durante el vuelo del dron. El dron F550 cuenta con 6 hélices de dimensiones 9.4 x 5.0 [in] cada una, fabricadas de plástico para mantener un peso ligero. Tres hélices estándar, es decir, giran en sentido anti horario y tres hélices inversas, que giran en sentido horario.

2.1.4 Motores eléctricos

Los motores son los componentes encargados de otorgar fuerza para generar el movimiento de las hélices. El dron F550 utiliza 6 motores sin escobilla modelo E300 2212 de la empresa DJI de 920 KV para su funcionamiento, los cuales se ensamblan en los extremos de los brazos estructurales. Estos motores son más eficientes, menos ruidosos y más confiables, ya que no requieren de mantenimiento regular, que los motores con escobillas.

Cabe mencionar que, para anular los momentos generados producto de la rotación de las hélices y los motores, 3 de los rotores giran en sentido horario y los 3 restantes en sentido anti horario. Lo anterior se ilustra en Figura 4.

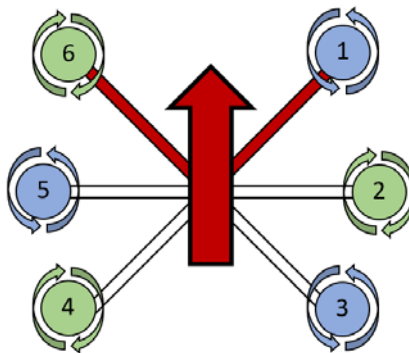


Figura 4. Distribución y sentido de giro de los motores.

2.1.5 Controlador electrónico de velocidad

Los controladores electrónicos de velocidad (*Electronic Speed Controller*, ESC) son componentes esenciales de cualquier dron ya que, como su nombre lo indica, su objetivo es variar la velocidad y dirección de un motor eléctrico. Los ESC, permiten convertir la energía de la batería de corriente continua en corriente alterna para así poder alimentar cada motor del dron. Además, pueden actuar como frenos dinámicos.

Por cada motor del dron F550 se utiliza un variador ESC modelo E300 de DJI, por lo que para el armado del dron F550 se requieren 6 ESC. Los variadores ESC, se conectan entre los motores eléctricos y el autopiloto.

2.1.6 Autopiloto

El autopiloto corresponde a un pequeño computador a bordo, que es el controlador del vuelo del dron. El autopiloto proporciona entradas y salidas de modo de conectar múltiples componentes de carácter obligatorio para el funcionamiento del dron. Como entrada de control, se conecta al autopiloto el receptor de radio control, el sensor de GPS y la unidad de administración de energía para alimentar el autopiloto. Como salida de control, se conectan los ESCs de los motores, los servos y la telemetría.

El modelo del autopiloto que utiliza el dron F550 es el HKPilot32 de HobbyKing, que corresponde a un clon de Pixhawk diseñado para aplicaciones de UAVs. El autopiloto HKPilot32 utilizado se puede apreciar en la Figura 5, el cual se encuentra ubicado en la parte central del dron sobre la placa inferior y bajo la placa superior.



Figura 5. Autopiloto modelo HKPilot32 de HobbyKing, que se encuentra equipado en el dron F550.

El controlador del vuelo HKPilot32 posee dos unidades de medición interna (*Inertial measurement units*, IMUs) que integran un giroscopio ST Micro L3GD20 y un acelerómetro ST Micro LSM303D, ambos de 3 ejes. Adicionalmente, integra un acelerómetro y giroscopio MPU6000 y un barómetro MEAS MS5611. Cabe mencionar, que estos sensores corresponden a instrumentos de vuelo con capacidades limitadas para estudiar las vibraciones que experimenta el dron durante el vuelo. A modo de permitir el correcto funcionamiento del autopiloto, el sistema se encuentra amortiguado.

Cabe mencionar, que los acelerómetros internos del autopiloto poseen una frecuencia de muestreo aproximada de 20 Hz con el objetivo de medir aceleraciones en el trayecto del vuelo. Sin embargo, para caracterizar las vibraciones debido a maniobras del vuelo es una frecuencia muy baja considerando el teorema de Nyquist. En consecuencia, no se utilizan los sensores internos del autopiloto para el análisis de vibraciones. En la Tabla 2, se presentan las características principales del autopiloto a utilizar.

Tabla 2. Especificaciones técnicas principales del autopiloto modelo HKPilot32 de Hobbyking [16].

Especificación técnica	
Licencia	Diseño de hardware abierto CC-BY-SA 3.0
CPU	180 [MHz] Cortex-M4 core
Resolución	32 [bits]
RAM	168MHZ/256 KB
GPS	Neo-7M con compás de U-blox
Alimentación	7.4 ~ 37 [V]
Sensores	
Giroscopio	ST Micro L3GD20 de 3 ejes (16 bits)
Acelerómetro/Magnetómetro	ST Micro LSM303D de 3 ejes (14 bits)
Acelerómetro/Giroscopio	MPU 6000 de 3 ejes de Invensense
Barómetro	MEAS MS5611
Dimensiones/Peso	
Tamaño	81x44x15 [mm]
Peso	33.1 [g]

2.1.7 Radio control (RC)

El radio control del dron permite realizar las maniobras del vuelo y establecer el modo de vuelo. Las maniobras del vuelo corresponden al alabeo (*roll*), cabeceo (*pitch*) y guiñada (*yaw*), donde para realizar estos los movimientos se utilizan las palancas del radio control. La palanca de la derecha del control permite realizar movimientos de alabeo cuando ésta se mueve hacia la izquierda o derecha. En consecuencia, el dron se desplazará a su izquierda o derecha respectivamente. El cabeceo, corresponde a la inclinación del dron hacia arriba o hacia abajo. Cuando se mueve la palanca de la derecha del mando hacia arriba o hacia abajo el dron se moverá hacia adelante o atrás respectivamente. La guiñada se controla con la palanca de la izquierda del control, moviendo ésta a la izquierda o derecha. Esta maniobra provocará un giro de la aeronave en sentido anti horario y horario respectivamente. Por último, la aceleración o potencia entregada por los motores del dron se puede regular moviendo la palanca de la izquierda del mando hacia arriba o abajo. Un movimiento de la palanca hacia arriba entregará mayor potencia y por el contrario un movimiento hacia abajo otorgará menor potencia.

Con el radio control también es posible establecer el modo de vuelo. Los modos de vuelo establecidos de las pruebas de vuelo son: *Alt Hold*, *Loiter*, *Stabilize* y *Return to Launch (RTL)*. La configuración de los modos de vuelo y calibración del radio control se realizan una vez armado el dron F550 y se detalla en la Sección 2.3.

2.1.8 Receptor RC

El receptor RC corresponde a un intermediario, que comunica la señal del radio control al autopiloto a bordo del dron. El receptor debe estar conectado al autopiloto y debe estar emparejado con el radio control.

2.1.9 Radios de telemetría

Las radios de telemetría son plataformas de código abierto de tamaño pequeño, livianas y bajo costo que por lo general permiten alcanzar rangos mayores a 300 [m] y pueden ser de 915 [Mhz] o 433 [Mhz]. En la Figura 6, se aprecia una de las radios de telemetría utilizadas.

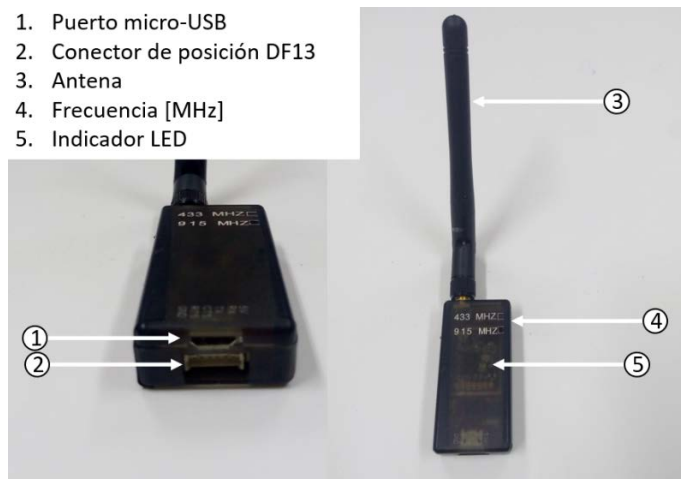


Figura 6. Partes de las radios de telemetría, utilizadas en el dron F550.

Las radios de telemetría permiten configurar una conexión entre el autopiloto y la estación terrestre, por lo que se requieren dos. Independiente de cuál, una debe ir conectada al autopiloto y la otra al computador a través de un cable USB. Para identificar el estado de la conexión se puede revisar el color de los diodos de emisor de luz (*Light Emitting Diode*, LED) en ellas. En la Tabla 3, se presentan los estados de conexión según el color y estado de los LEDs.

Tabla 3. Estado de la conexión entre las radio de telemetría según indicador del color y estado del LED.

Color del LED	Estado del LED	Estado de la conexión
Verde	Intermitente	Buscando otra radio de telemetría
	Sólido	Conexión establecida con otra radio de telemetría
Rojo	Intermitente	Transmitiendo datos
	Sólido	Modo de actualización de firmware

2.1.10 Antena GPS

La antena de Sistema de Posicionamiento Global (*Global Positioning System*, GPS) entrega información respecto de la ubicación geográfica del dron mediante el uso de satélites. El GPS es una componente fundamental para la navegación a través de puntos de referencia (*waypoints*) y vuelos autónomos. Por medio del GPS se puede establecer un punto de referencia de inicio y luego programar

el regreso automático del dron al *waypoint* de inicio. La antena GPS se ubica en la placa inferior del dron y se conecta directamente al autopiloto.

2.1.11 Batería

La batería de un dron es el dispositivo que abastece de poder al dron durante el vuelo, ya que permite almacenar energía eléctrica para luego liberarla como corriente continua y entregarle autonomía de vuelo. Existen diferentes tipos de baterías y modelos para el uso de drones. Las más utilizadas corresponden a las baterías de polímero de iones de litio (LiPo) debido a su densidad energética, potencia, peso y vida útil.

En el vuelo del dron F550 se utiliza una batería Multistar recargable tipo LiPo con capacidad de 5200 [mAh]. Las baterías LiPo a utilizar tienen 4 celdas conectadas en serie con voltaje nominal y máximo de 3.7 y 4.2 [V] por celda respectivamente. Las dimensiones de las baterías son de 142x49x29 [mm] y poseen un peso de 433 [g]. La batería LiPo va albergada en la placa superior del dron.

Cabe destacar que, durante la realización de las pruebas de vuelo, se considera tener varias baterías cargadas en 100% disponibles, a modo de contar con repuestos. Se recomienda usar las baterías dentro de un margen de 30% al 100% para no dañarlas.

2.1.12 Conector de la batería y módulo de poder

El conector de la batería y el módulo de poder, corresponden a los elementos que permite que la batería LiPo alimente el autopiloto. Se compone de conectores XT60, EC-5 y MPX 6. Al momento de conectar la batería se genera una corriente de inserción (*inrush current*). Debido a este fenómeno, momentáneamente se genera una chispa que produce alta temperatura en la conexión, favoreciendo la oxidación del metal de los conectores. En consecuencia, aumenta la resistencia eléctrica y a largo plazo el metal no conducirá la corriente. Es por esto que se cuenta con el conector MPX 6 adicional, ya que éste recibe la corriente *inrush*. Posteriormente se conecta el conector EC-5 para asegurar la conexión del circuito en todo momento.

2.1.13 Tren de aterrizaje

El tren de aterrizaje es la parte del dron que se encuentra en contacto con el suelo. En drones que trasladan carga útil, como sensores o una cámara bajo la parte inferior, es una parte esencial. Drones que no trasladan carga útil en la zona inferior pueden prescindir del tren de aterrizaje.

En este estudio es de gran relevancia contar con un espacio entre la parte principal del cuerpo del dron y el suelo para poder albergar la carga útil. Es por esto, que se considera en el diseño del dron F550 un tren de aterrizaje fijo para proteger la carga útil de cualquier impacto durante la fase de despegue y aterrizaje.

2.2 Montaje del dron F550

En esta sección, se listan los pasos principales realizados durante el montaje del dron F550. El detalle del montaje del dron F550, se describe en el Anexo A.

1. Unión de la placa inferior con los 6 brazos estructurales.
2. Instalación de los motores en los extremos de los brazos.

3. Instalación de los ESC entre la placa inferior y los motores.
4. Instalación del conector de batería.
5. Conexión del módulo de poder.
6. Instalación antena GPS y radio telemetría.
7. Instalación del autopiloto HKPilot32
8. Unión placa superior.
9. Unión del tren de aterrizaje.
10. Ubicación y conexión batería.

Una vez realizados los pasos anteriores, se finaliza el armado del dron F550. En la Figura 7, se puede apreciar el dron F550 ensamblado.



Figura 7. Dron hexarotor F550 a utilizar en las prueba de vuelo.

2.3 Configuraciones y calibración del dron F550

Al momento de volar un dron, la calibración de éste es un paso fundamental para asegurar un vuelo seguro y estable. La calibración corresponde al proceso de corregir los errores que presentan los sensores internos del dron a modo que no existan diferencias entre los datos reales que experimenta el dron y los enviados al autopiloto. Para realizar las calibraciones de los sensores internos del dron F550, primero se debe cargar el firmware al autopiloto. A modo de comunicarse con el autopiloto del dron F550, se requiere de una aplicación de software que se ejecute en un computador en tierra. Existen diferentes aplicaciones para realizar las configuraciones y calibraciones de UAVs. En este trabajo, se decide utilizar la aplicación Mission Planner, ya que es una aplicación de estación de control en tierra con múltiples funciones de proyectos de vehículos autónomos. Mission Planner puede operar como complemento de control dinámico del vehículo autónomo o simplemente para realizar configuraciones.

Algunas de las utilidades de Mission Planner se listan a continuación [17].

- Cargar el firmware en el módulo del autopiloto que controla al vehículo autónomo
- Instalar, configurar y sintonizar el vehículo para su rendimiento optimo

- Planificar, guardar y cargar misiones autónomas en el autopiloto
- Descargar y analizar registros de misiones creadas en el autopiloto

Una vez el montaje del dron ha finalizado, se conecta el autopiloto por cable USB al computador con la aplicación Mission Planner. En la Figura 8, se presenta la interfaz gráfica del software Mission Planner con el dron F550 conectado, donde se observa la zona en la cual se realizaron las pruebas de vuelo documentadas en el Capítulo 4.

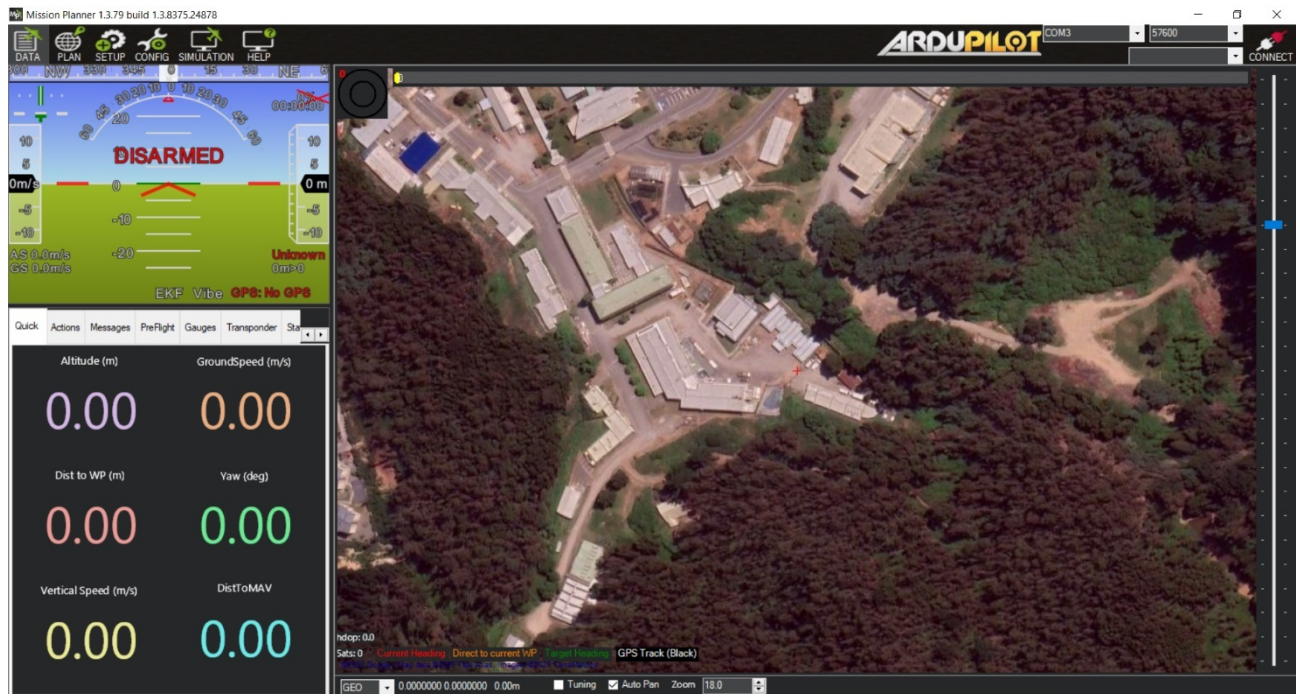


Figura 8. Interfaz gráfica del software Mission Planner de ArduPilot.

Cuando se logra la comunicación entre Mission Planner y el autopiloto HKPilot32, se carga el firmware de Ardupilot de un dron hexarotor que sea compatible con el autopiloto. La versión descargada e instalada en el autopiloto HKPilot32 corresponde a Copter V4.3.7 OFFICIAL, visible en la Figura 9.

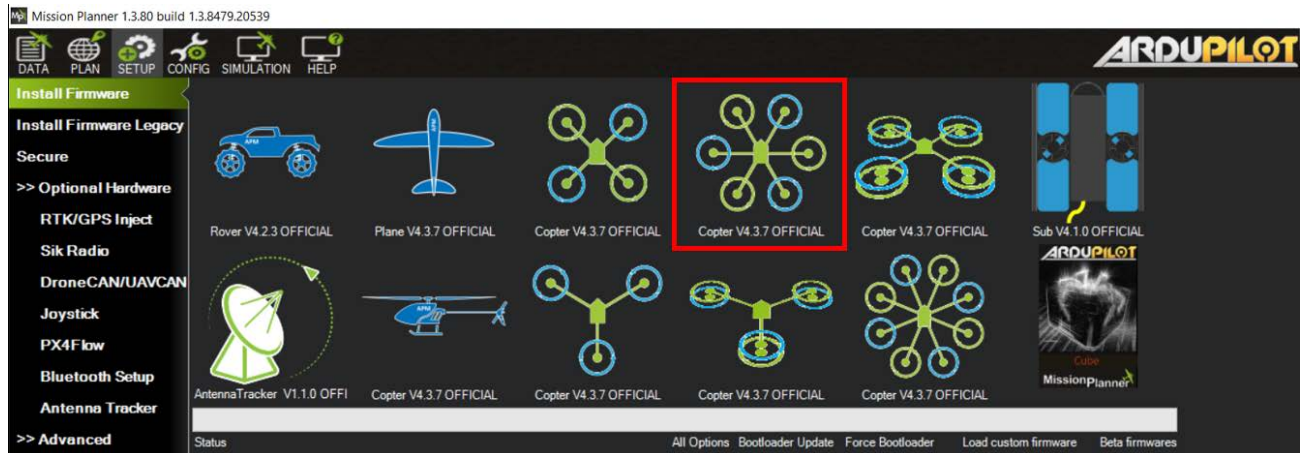


Figura 9. Interfaz gráfica de selección de firmware del controlador del autopiloto. En recuadro rojo se marca el firmware seleccionado correspondiente a un hexarotor.

Luego, se realizan las calibraciones de los sensores internos del dron F550, siguiendo los pasos indicados en el software de Mission Planner. Mediante el software, se realiza la calibración de los acelerómetros, del radio control, la brújula y el emparejamiento de las radios de telemetría. Lo anterior, se encuentra descrito y documentado en [17] (página web de Mission Planner).

Una vez realizadas las configuraciones y calibraciones se realiza un vuelo de prueba a modo de verificar el correcto funcionamiento del dron. Esta primera prueba de vuelo tiene como fin verificar que las configuraciones estén correctamente realizadas, los motores funcionen de forma adecuada, el dron se mueva en las direcciones del control y los instrumentos de vuelo internos realicen las mediciones que corresponden. La primera prueba de vuelo se realizó el 29/05/2023 y se llevó a cabo con éxito. La gráfica correspondiente a la alturas alcanzadas durante el vuelo de verificación se presenta en la Figura 10. En esta prueba de vuelo, se buscó replicar las fases de vuelo del estudio. Durante el inicio de la prueba se realizó un vuelo estático, lo que se visualiza en la Figura 10, entre los 15 [s] y 80 [s] aproximadamente. Para el intervalo de tiempo entre 200-260 [s], el desplazamiento del dron es horizontal a altura constante. Durante el último tramo de la prueba, se realizaron vuelos verticales ascendentes y descendentes.

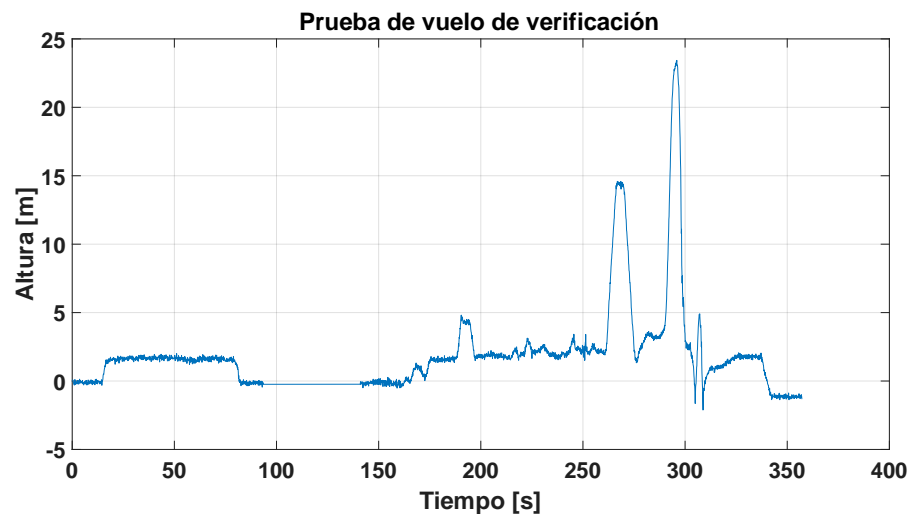


Figura 10. Gráfica de altura correspondiente al vuelo de verificación de funcionamiento del dron F550.

CAPÍTULO 3: Desarrollo del sistema de medición de vibraciones

Con el objetivo de caracterizar las vibraciones experimentadas por el dron hexarotor F550, se debe desarrollar un sistema de medición de vibraciones que permita registrar y procesar las vibraciones experimentadas por éste durante el vuelo. Según el teorema de Nyquist [18], para reconstruir las aceleraciones experimentadas durante el vuelo en todo el rango de frecuencia, la frecuencia de muestreo del sistema de mediciones debe ser al menos el doble de la componente más alta de frecuencia de la señal medida. De acuerdo con estudios, donde han realizado mediciones empíricas de las vibraciones en drones, éstos operan para un rango de frecuencia entre 0 a 250 [Hz] [10, 20]. Luego, la frecuencia de muestreo del sistema de mediciones debe ser al menos de 500 [Hz] de modo de cumplir con Nyquist.

Con el fin de cumplir con el objetivo propuesto, se desarrolla un sistema de mediciones de vibraciones basado en la plataforma RPi y acelerómetros digitales. En particular, se detallan las capacidades de los componentes electrónicos seleccionados, las conexiones físicas entre ellos y los módulos de comunicación utilizados. Además, se presentan los diagramas de flujo asociados a la programación desarrollada en la adquisición de datos de acelerómetros y la comunicación Wi-Fi entre la estación en tierra con el sistema de mediciones operando en el dron, de modo de activar el funcionamiento de los acelerómetros durante el vuelo. Posteriormente, se describe el procedimiento de calibración de los acelerómetros y el diseño y confección de los elementos de protección, unión y montura para adosar la RPi y los acelerómetros al dron F550.

3.1 Descripción de componentes

A continuación, se presenta una descripción de las componentes electrónicas seleccionadas en el desarrollo del sistema de mediciones de vibraciones. El sistema contempla una computadora RPi y 3 acelerómetros digitales modelos MMA 8452, MPU6050 y MSA301. Cabe destacar, que se decide utilizar 3 acelerómetros digitales con el fin de evaluar alternativas, comparar sus resultados y analizar su desempeño.

3.1.1 Computador RPi

La RPi corresponde a una computadora monoplaca pequeña de programación en múltiples lenguajes que permite la instalación del sistema operativo Raspberry Pi OS basado en Debian. Este modelo ofrece mayor velocidad del procesador, mejor conectividad y rendimiento, y más espacio de memoria en comparación con antiguas versiones de computadoras RPi. La RPi posee un procesador Broadcom BCM2711 quad-core de 64 [bits] con 1.5 [GHz], memoria de 2, 4 o 8 [GB] y conexión Wi-Fi. En particular, el computador a usar posee una capacidad de 2 [GB] de memoria RAM. En la Figura 11, se aprecia el computador RPi.

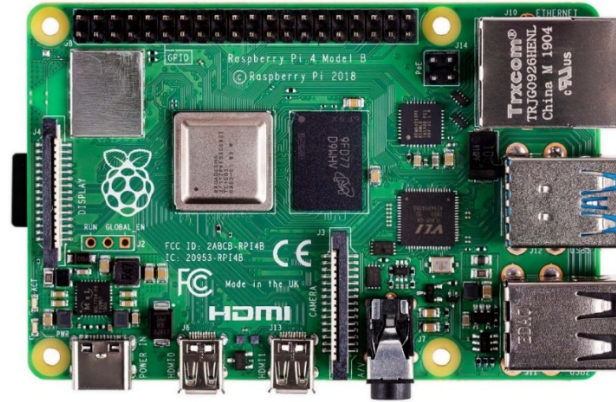


Figura 11. Computador Raspberry Pi 4B seleccionado para el desarrollo del sistema de mediciones de vibraciones.

La placa de la RPi cuenta con un sistema de entrada y salida de propósito general (*General Purpose Input/Output*, GPIO), que corresponden a la interfaz física de la computadora para múltiples aplicaciones, donde se incluye la conexión de actuadores y sensores. Esta interfaz será la utilizada en la conexión de los acelerómetros del sistema de medición de vibraciones. En la Figura 12, se presenta el *layout* de cada uno de los 40 pines existentes en la RPi indicando su funcionalidad. Los pines GPIO tienen la característica que pueden ser utilizados en una variedad de propósitos y permiten ser configurados como pines de entrada o salida mediante software. En el *layout* de pines, existen 2 pines con voltaje de 5 [V], 2 pines de 3 [V] y 8 pines de tierra (*Ground*, GND) que no permite ser configurados. Los pines de 5 [V] corresponden a entradas de alimentación y están conectados directamente a la RPi. Estos pines son utilizados para proporcionar el suministro de corriente al sistema completo, es decir, a la propia computadora RPi y los acelerómetros conectados. La alimentación proveniente de la RPi tiene una capacidad de 1.5 [A].

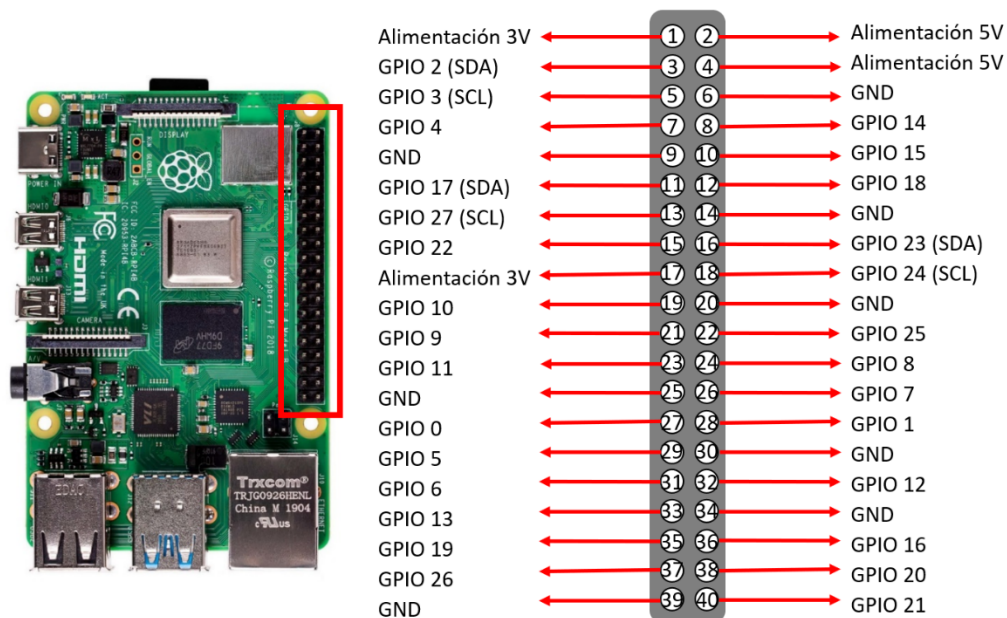


Figura 12. Layout de pines de la placa RPi. En el desarrollo del sistema de mediciones de vibraciones se utilizan pines de alimentación de 3.3 y 5 [V], de transmisión de datos (SDA, SCL) y tierra.

En la Tabla 4, se listan las especificaciones técnicas de la RPi modelo 4B más relevantes.

Tabla 4. Especificaciones técnicas principales de la RPi modelo 4B de 2 [GB] para el desarrollo del sistema de medición de vibraciones.

Especificación técnica	Raspberry Pi 4B
Procesador	Broadcom BCM2711B0
CPU	1.5 [GHz] Quad core
Resolución	64 [bits]
RAM	2 [GB]
Puertos USB	2 x USB 3.0 / 2 x USB 2.0
Alimentación	5 [V] vía conector USB-C o GPIO (mínimo 3 [A])
Temperatura de operación	0-50 [°C]
Memoria	Tarjeta micro SD (32 [GB])
Sistema operativo seleccionado	Raspberry Pi OS (32 [bits]) Full
Lenguaje de programación seleccionado	Python
Capacidad máxima de alimentación	1.5 [A]
Tamaño	85x56x3 [mm]

3.1.2 Acelerómetros digitales

Los acelerómetros son dispositivos electromecánicos con transductor, que permiten medir aceleración en unidad [g] en uno o más planos. Existen diferentes tipos de acelerómetros que se clasifican según sus componentes internos, aplicaciones, banda de medición requerida y precisión deseada en la medición. En el desarrollo del sistema de adquisición de datos se contempla el uso de tres acelerómetros digitales de modo de obtener caracterizaciones de las vibraciones con tres instrumentos de medición de modelos distintos. Los acelerómetros seleccionados son de tipo capacitivos con sistema micro-electromecánico (*Micro-Electromechanical System*, MEMS), específicamente se utilizarán los modelos: MMA8452, MPU6050 y MSA301. Estos dispositivos son de bajo costo, pequeño tamaño y alta sensibilidad para un rango de frecuencia bajo. Además, poseen la ventaja, que permiten medir aceleraciones en los tres ejes X, Y y Z desde 1 [Hz]. Las especificaciones técnicas más relevantes de cada uno de los sensores utilizados se detallan en la Tabla 5. Los valores técnicos de los acelerómetros MMA8452, MPU6050 y MSA301 se obtuvieron de los *DataSheets* en [16,17,18] respectivamente. Cabe mencionar, que los tres modelos seleccionados operan en el rango dinámico deseado de ± 8 [g] y el conjunto opera en un rango de 800 a 1000 [Hz] como frecuencia de muestreo máxima, cumpliendo con el teorema de Nyquist.

Cabe destacar, que los acelerómetros MMA8452, MPU6050 y MSA301, incluyen bus de comunicación de datos con circuito inter-integrado (*Inter integrated Circuits*, I2C), facilitando el intercambio de información entre los dispositivos conectados. Cada dispositivo posee una dirección asociada al bus I2C, que puede ser leída y modificada mediante software. El bus I2C requiere únicamente de dos líneas de conexión, una de datos (*System Data*, SDA) y una de reloj (*System Clock*, SCL). La línea SDA se encargan de transportar la información entre los dispositivos y la línea SCL permite sincronizar el sistema entregando pulsos de reloj.

Tabla 5. Especificaciones técnicas principales de los acelerómetros digitales utilizados en el desarrollo del sistema de medición de vibraciones: MMA8254, MPU6050 y MSA301.

Especificación	MMA8452	MPU6050	MSA301
Resolución	8/12 [bits]	14/16 [bits]	8/10/12/14 [bits]
Resolución configurada	12 [bits]	14 [bits]	14 [bits]
Rango dinámico	$\pm 2/\pm 4/\pm 8$ [g]	$\pm 2/\pm 4/\pm 8/\pm 16$ [g]	$\pm 2/\pm 4/\pm 8/\pm 16$ [g]
Rango dinámico configurado	± 8 [g]	± 8 [g]	± 8 [g]
Ancho de banda	1-400 [Hz]	1-260 [Hz] (filtro pasa bajo)	1.95-500 [Hz]
Frecuencia de muestreo	1.56-800 [Hz]	4-1000 [Hz]	1-1000 [Hz]
Frecuencia de muestreo configurada	800 [Hz]	1000 [Hz]	1000 [Hz]
Dirección de Interfaz I2C	0x1d	0x68	0x26
Voltaje de alimentación	1.95 - 3.6 [V]	2.375-3.46 [V]	1.62 – 3.6 [V]
Consumo de corriente	6 - 165 [μ A]	500 [μ A]	180 [μ A]
Ruido espectral (SN)	99 $\left[\frac{\mu\text{g}}{\sqrt{\text{Hz}}}\right]$	400 $\left[\frac{\mu\text{g}}{\sqrt{\text{Hz}}}\right]$	300 $\left[\frac{\mu\text{g}}{\sqrt{\text{Hz}}}\right]$
Valor RMS del ruido (RMS_{noise})	1980 [μ g]	6449.8 [μ g]	6708.2 [μ g]
Temperatura de operación	-40 – 80 [°C]	-40 – 85 [°C]	-40 – 85 [°C]

La descripción detalladas de cada uno de los acelerómetros utilizados en el sistema de medición de vibraciones se presenta a continuación.

MMA8452

El acelerómetro digital MMA8452, es un sensor MEM capacitivo inteligente de tres ejes y baja potencia fabricado por la empresa Freescale Semiconductor, Inc., empaquetado en un módulo de desarrollo Sparkfun. Permite medir aceleraciones lineales con la interfaz I2C y resolución de hasta 12 [bits]. Posee funciones integradas con opciones programables flexibles, dos pines de interrupción y detección de caída libre. El rango dinámico es seleccionable con filtro de datos tipo pasa alto, pasa bajo y también medición de datos no filtrados. Las aplicaciones típicas de este sensor son: detección de orientación, de movimiento y caída libre, análisis de actividad de tiempo-real, monitoreo de impacto y vibraciones, interfaz de usuario, entre otras. La funcionalidad del acelerómetro MMA8452, incluye variadas opciones de sobre muestreo con el fin de compensar entre el consumo de corriente y la resolución basado en los requerimientos de la aplicación. Además, posee un modo adicional de bajo ruido que funciona de forma independiente a los modos de sobre muestreo para resoluciones más elevadas disponibles en escala de ± 2 , ± 4 y ± 8 [g]. En la Figura 13, se presenta el *layout* de los pines del módulo Sparkfun del acelerómetro MMA8452.

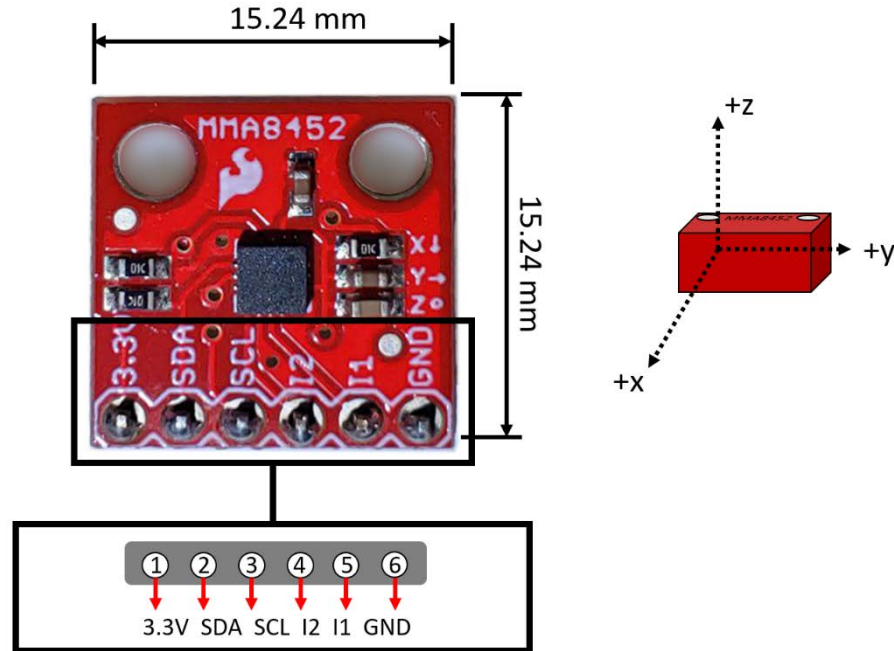


Figura 13. Layout, dimensiones y orientación del módulo Sparkfun del acelerómetro digital MMA8452 utilizado en el sistema de medición de vibraciones.

MPU6050

El sensor digital MPU6050, es fabricado por la empresa InvenSense Inc. y se encuentra integrado en el módulo GY-521. Este sensor de movimiento MEMS, posee 6 grados de libertad, ya que combina en un único chip un acelerómetro de 3 ejes, un giroscopio de 3 ejes y un procesador digital de movimiento. Algunas de sus aplicaciones más comunes son el reconocimiento de gestos, servicios basados en la localización, controles de juego basados en movimiento, sensores portátiles usables para la salud y el deporte, dentro de otras. Las características programables del acelerómetro son detección de toque, orientación y señalización, interrupciones programables por el usuario y test de autodiagnóstico. El MPU6050, cuenta con interfaz I2C, 3 convertidores análogos digitales (*Analog Digital Converter*, ADC) de 16 [bits] para digitalizar las salidas del giroscopio y 3 ADC para las salidas digitales del acelerómetro. A modo de permitir un seguimiento preciso de movimiento rápidos y lentos, tanto el giroscopio y el acelerómetro cuentan con rango dinámico programable. Adicionalmente, posee un filtro pasa bajo programable de rango entre 5 a 260 [Hz].

Respecto al funcionamiento del acelerómetro MPU6050, éste utiliza masas de pruebas separadas para cada eje. La aceleración a lo largo de un eje en particular induce el desplazamiento de la masa de prueba correspondiente al eje, y luego, los sensores capacitivos detectan el desplazamiento diferencial. Cuando el sensor está ubicado en una superficie plana, dada su orientación, los ejes X e Y medirán 0 [g] y el eje Z medirá +1 [g]. La arquitectura del MPU6050, permite reducir la susceptibilidad a variaciones debido a la fabricación y variación térmica. En la Figura 14, se presenta una imagen ilustrativa del *layout*, dimensiones y orientación de la placa del MPU6050.

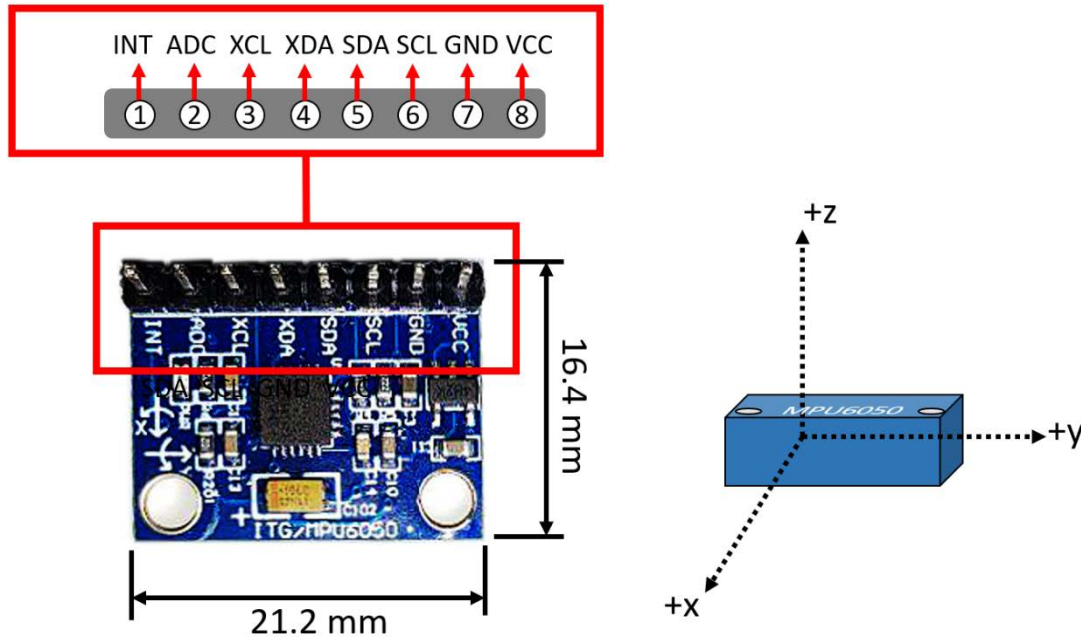


Figura 14. Layout, dimensiones y orientación del módulo GY-521 del acelerómetro digital MPU6050 utilizado en el sistema de medición de vibraciones.

MSA301

El instrumento de medición MSA301, es un acelerómetro de triple eje pequeño y bajo costo fabricado por la empresa MEMSensing Microsystems (Suzhou, China) Co., Ltd. empaquetado en un módulo de desarrollo Adafruit. Algunas de sus características corresponden a: máxima resolución de 14 [bits], rango dinámico seleccionable, medición de aceleración con ancho de banda entre 1 a 500 [Hz] y bajo consumo de voltaje. Dentro de las aplicaciones principales para las cuales fue diseñado se tiene: interfaz de usuario para teléfonos móviles y *tablets*, orientación de pantalla, reconocimientos de gestos, monitoreo de vibraciones, detección de inclinación y caída libre, dentro de otras. En la investigación, este instrumento se configuró para un funcionamiento con máxima resolución de 14 [bits], rango dinámico de ± 2 [g] inicialmente y luego ± 8 [g] y frecuencia de muestreo de 1000 [Hz] con banda de ancha de 500 [Hz]. El sensor MSA301, posee 6 pines de conexión, siendo estos dos de fuente de alimentación (V_{IN} y $3V_o$), dos del bus I2C, uno correspondiente al GND y un pin de interrupción. En la Figura 15, se visualiza el *layout* de la placa del acelerómetro MSA301 utilizado en el sistema de mediciones de vibraciones con sus dimensiones y orientación.

En la conexión con la RPi se utilizaron los pines de voltaje V_{in} , SDA, SCL y GND. Se utiliza el pin V_{in} como fuente de alimentación, ya que es el pin principal de poder con regulador de voltaje que permite recibir de 3 a 5 [V]. Respecto a las características eléctricas del sensor, se debe considerar que, el parámetro de tiempo de reacción corresponde a 1 [ms] en la condición en modo de poder cortado y desde la condición de apagado el parámetro de tiempo de encendido tarda 3 [ms].

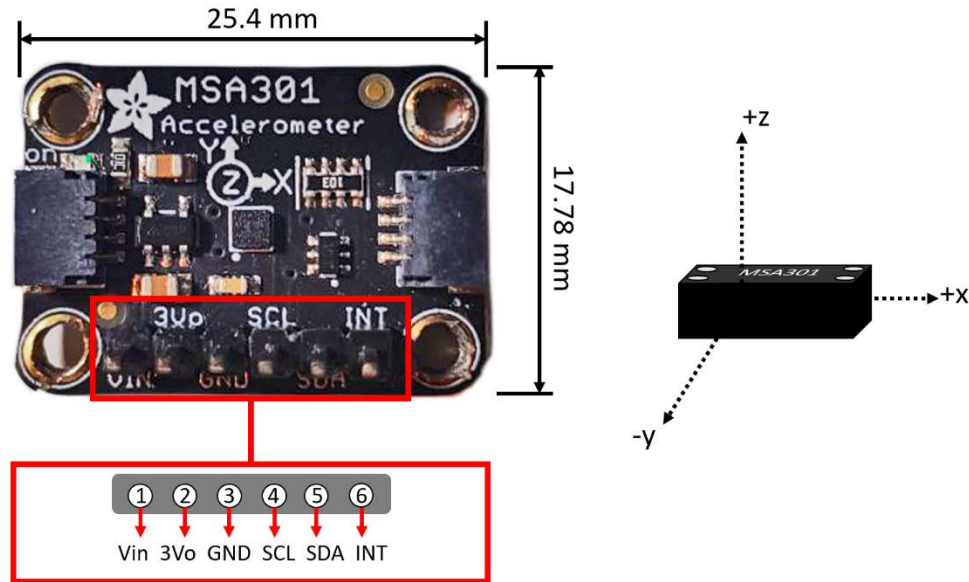


Figura 15. Layout, dimensiones y orientación del módulo Adafruit del acelerómetro digital MSA301 utilizado en el sistema de mediciones de vibraciones.

3.2 Conexiones físicas, eléctricas y electrónicas

En esta sección, se presenta la configuración de la conexión física del hardware de los acelerómetros digitales seleccionados y la RPi.

Como primer paso, antes de conectar los módulos de los acelerómetros a la RPi, se debe soldar los pines en la ubicación establecida para las placas MMA8452, MPU6050 y MSA301 respectivamente. Para todos los módulos se unen cabeceras macho rectas a las placas. El material aglutinante utilizado en la soldadura fue estaño y la temperatura de soldadura seteada fue de 280 [°C]. Los pasos a seguir de la realización de la soldadura con estaño se describen en el Anexo B. Una vez soldados el set de pines de cada acelerómetro, es posible conectar los acelerómetros a la placa de la RPi. Cada acelerómetro posee diferentes pines con propósitos distintos, sin embargo, existen algunos en común. En particular, en la conexión física entre cada acelerómetro y la RPi se requieren de 4 pines, siendo estos la fuente de alimentación, conexión a tierra, y los pines de la interfaz bus I2C (SDA y SCL). En la Tabla 6, se resumen sus funciones y características.

Tabla 6. Características comunes de los pines de los acelerómetros MMA8452, MPU6050 y MSA301.

Pin	Función	Entrada/Salida	Características
VCC, Vin, 3.3V	Fuente de alimentación	Entrada	Rango de voltaje de alimentación
SDA	Señal de datos I2C	Bidireccional	Línea de datos bidireccional. No debe superar el voltaje de la fuente de alimentación.
SCL	Señal de reloj I2C	Entrada	Señal controlada de reloj con pulso. No debe superar el voltaje de la fuente de alimentación.
GND	Ground	Entrada	Voltaje común

En la Figura 16, se visualizan de forma ilustrativa las conexiones físicas entre la RPi y los acelerómetros digitales. Las conexiones quedan ilustradas por líneas de colores que representan los cables físicos conectados entre los pines de los acelerómetros digitales y la RPi. El color rojo es asignado a las conexiones de alimentación, el color verde y amarillo a las del bus I2C de los pines SDA y SCL respectivamente y el color negro a la conexión GND. Mayor detalle de la implementación de las conexiones se presenta en el Anexo C.

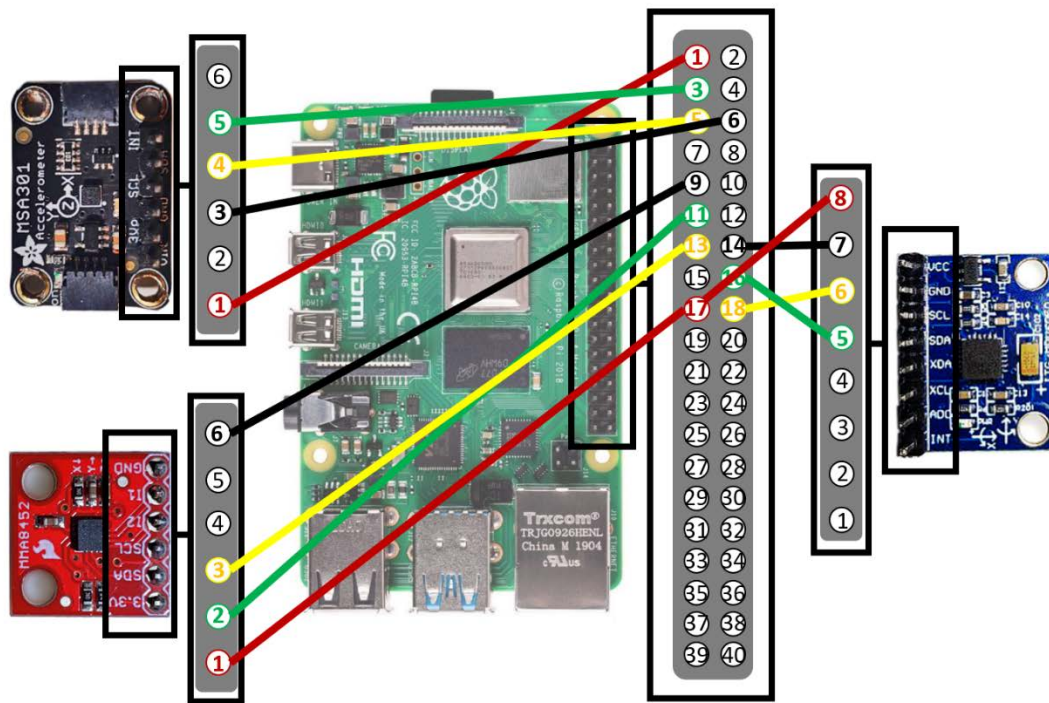


Figura 16. Conexiones físicas entre la RPi y los acelerómetros MMA8452, MPU6050 y MSA301, con cables hembra a hembra. Las conexiones de color rojo, verde, amarillo y negro indican conexión a pin de 3.3 [V], SDA, SCL y GND respectivamente.

Cabe destacar, que las conexiones físicas entre la RPi y los acelerómetros, se realizan cuando la RPi se encuentra apagada. Además, si bien, el bus I2C es serial y puede comunicarse con varios sensores conectados al mismo bus, cada acelerómetro se conecta a un puerto I2C distinto, ya que en un trabajo futuro se desean realizar las mediciones de aceleración de forma paralela.

3.3 Comunicación Wi-Fi con la RPi

Como objetivo se debe implementar y operar el sistema de medición de vibraciones en el dron F550, de modo de registrar mediciones de vibraciones durante el vuelo, por lo que es necesario desarrollar una manera de iniciar los programas de manera remota durante la misión. Con el objetivo, de obtener mayor flexibilidad y libertad del uso de los programas en la RPi, se decide configurar la comunicación con la RPi mediante Wi-Fi de forma automática y visualizar en un computador. De esta forma, una vez exista comunicación entre el computador y la RPi mediante Wi-Fi, se inicia un programa de medición a ejecutar desde el terminal en el computador en cualquier instante de tiempo. La RPi, permite acceder de forma remota a la línea de comando desde otro computador mediante conexión Wi-Fi, utilizando un intérprete de órdenes seguro (*Secure Shell*, SSH). El SSH, viene por defecto

deshabilitado, por lo que se deba habilitar. Existen dos maneras de habilitar el SSH, (1) desde la interfaz de la RPi en configuraciones o (2) creando un fichero sin extensión con el nombre ssh en la tarjeta SD de la RPi. Teniendo el SSH habilitado, se crea un nuevo fichero *wpa_supplicant.conf* en la tarjeta SD de la RPi con los datos de la Wi-Fi a la cual se desea conectar. En el fichero *wpa_supplicant.conf* se escribe el siguiente código, modificando el identificador de red (*Service Set Identifier*, SSID) y contraseña (*password*, psk) según corresponda.

```
ctrl_interface=DIR=/var/run/wpa_supplicant GROUP=netdev
update_config=1
country=CL

network={
  scan_ssid=1
  ssid=" identificador de red"
  psk=" contraseña" }
```

De esta manera, se logra habilitar el acceso a la línea de comando remoto de la RPi usando SSH y el fichero *wpa_supplicant.conf*. Luego, para acceder a la RPi desde el computador, se utiliza el programa PuTTY ingresando la dirección de IP o el nombre del dispositivo, en este caso raspberrypi. Este paso se puede apreciar en la Figura 17. Luego, se registra el nombre de la cuenta de usuario y contraseña creada en la RPi. Una vez ingresado, se logra navegar libremente por las carpetas de la RPi desde el terminal, lo que se muestra en la Figura 18.

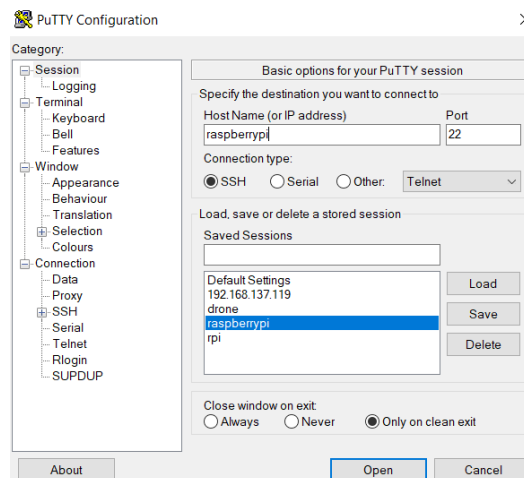


Figura 17. Interfaz del programa PuTTY para acceder a la conexión con la RPi de forma remota.

```

rpi@raspberrypi
login as: rpi
rpi@raspberrypi's password:
Linux raspberrypi 6.1.21-v8+ #1642 SMP PREEMPT Mon Apr 3 17:24:16 BST 2023 aarch64

The programs included with the Debian GNU/Linux system are free software;
the exact distribution terms for each program are described in the
individual files in /usr/share/doc/*/copyright.

Debian GNU/Linux comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY, to the extent
permitted by applicable law.
Last login: Wed May 10 09:02:56 2023 from 2800:150:107:36ab:844a:a769:ce7f:fb4a
rpi@raspberrypi:~ $

```

Figura 18. Interfaz del terminal de PuTTY conectado al usuario de la RPi.

3.4 Programas de configuración y operación de los acelerómetros

En esta sección, se describen los algoritmos informáticos empleados para la medición de aceleración con los acelerómetros seleccionados y su funcionamiento en paralelo. Para la programación se utiliza el entorno de desarrollo Thonny en la RPi, que corresponde a un programa que funciona como interprete, editor y depurador para el lenguaje de programación Python. El lenguaje Python, es de alto nivel de programación y se utiliza en distintas aplicaciones, como el desarrollo de software, automatización de tareas, machine learning, entre otras. Dada la gran versatilidad de Python y las librerías existentes, se prefiere este lenguaje para la programación.

A modo de establecer la comunicación entre la RPi y los acelerómetros se utilizan distintas librerías de Python. Las librerías corresponden a módulos de código que permiten realizar funcionalidades comunes, otorgando simplicidad en la programación. A continuación, se listan y describen brevemente las librerías utilizadas en las rutinas de captura de datos.

- **Smbus:** Entrega accesos a las funciones del bus I2C.
- **Time:** Permite utilizar funcionalidades relacionadas con el tiempo.
- **Datetime:** Su implementación permite manipular fechas y horas.
- **Math:** Módulo de Python que otorga acceso a funciones matemáticas.
- **Numpy:** Librería de computación científica, que permite generar y estructurar datos de manera eficiente.
- **Sys:** Proporciona acceso a variables y funciones del intérprete.
- **Msa301:** Librería de Python de lectura de datos del MSA301.
- **RPi.GPIO:** Otorga a Python un módulo para controlar el GPIO en una RPi.
- **Multiprocessing.pool:** Permite crear un grupo de procesos a los cuales se les puede enviar trabajo.
- **Os:** Interfaces mixtas del sistema operativo. Permite usar funciones dependientes del sistema operativo.

3.4.1 Programación de uso de los acelerómetros

En este apartado, se describe el algoritmo informático desarrollado en Python para la medición de aceleración con los sensores MMA8452, MPU6050 y MSA301. La rutina de captura de datos de cada acelerómetro queda representada mediante el diagrama de flujo, mostrado en la Figura 19.

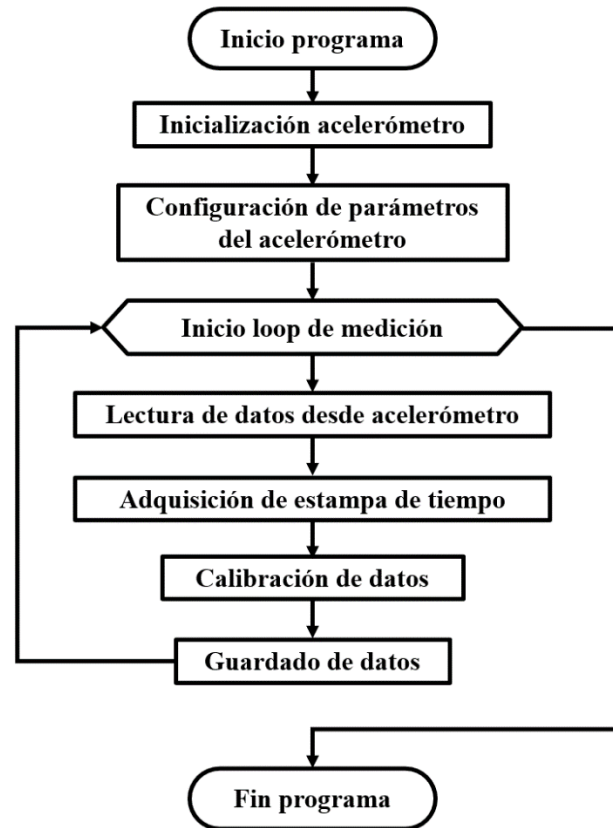


Figura 19. Diagrama de flujo del programa realizado en Thonny con Python para medición de aceleración con los acelerómetros seleccionados.

La rutina de medición de datos de estampa de tiempo y aceleración en los ejes X, Y y Z comienza con el inicio del programa, cuyo nombre de archivo dependerá del programa relativo a cada acelerómetro y corresponde a una extensión py. Seguidamente, se importan las librerías requeridas por cada módulo y se realiza la inicialización del acelerómetro respectivo. Luego, se definen las configuraciones de las distintas opciones y parámetros internos de cada acelerómetro. En la Tabla 7, se presenta un detalle de las configuraciones seteadas más relevantes del inicio de los códigos de programación. Notar, que para la configuración de parámetros se definen los parámetros asociados a la calibración, cuyo procedimiento de obtención y valores se detallan en la Sección 3.5. Posteriormente, se da inicio al *loop* de medición de aceleración. En el *loop*, se realiza la lectura de datos, la calibración de los datos y guardado de datos en un fichero de texto. Con el guardado de datos finaliza el *loop* de medición y se finaliza el programa. El código fuente del programa de los sensores MEMS: MMA8452, MPU6050 y MSA301 se encuentran en el Anexo D.

Tabla 7. Configuración de parámetros relevantes en el inicio de los códigos de programación de medición de aceleración de los acelerómetros seleccionados.

Especificación	MMA8452	MPU6050	MSA301
Librerías importadas	Smbus, time, numpy, datetime	Smbus, time, math, RPi.GPIO, sys, datetime	Msa301, time, smbus, datetime
Número de bus I2C	3	4	1
Rango dinámico	$\pm 2/\pm 4/\pm 8$ [g]	$\pm 2/\pm 4/\pm 8$ [g]	$\pm 2/\pm 4/\pm 8$ [g]
Resolución	12 [bits]	14 [bits]	14 [bits]
Frecuencia de muestreo máxima	800 [Hz]	1000 [Hz]	1000 [Hz]

3.5 Calibración de los acelerómetros

Previo a las mediciones en vuelo con el sistema de adquisición de datos de vibraciones se debe calibrar los acelerómetros digitales MMA8452, MPU6050 y MSA301. La calibración consiste en la medición de aceleraciones en cada eje de cada acelerómetro, a modo de corregir el valor medido empíricamente con el valor real.

Se realizan mediciones en cada eje, modificando el ángulo de inclinación del acelerómetro cada 10° , con el fin de recuperar los datos y generar una curva de calibración por cada eje de cada acelerómetro. Las curvas de calibración quedan expresadas según la ecuación de la recta, Ecuación (1), donde en cada curva se determinan los valores de la pendiente de la recta (m) y la ordenada de origen (b).

$$y = mx + b \quad (1)$$

En la confección del sistema de calibración se contempla el uso de un computador, la RPi, el acelerómetro a calibrar, cables de conexión hembra a hembra entre el acelerómetro y RPi, un nivel de burbuja de modo de asegurar la horizontalidad del acelerómetro para una inclinación inicial de 0° y un equipo de calibración que permita modificar la inclinación del acelerómetro cada 10° . El montaje del equipo de calibración se puede apreciar en la Figura 20, utilizando el acelerómetro MMA8452 como ejemplo.

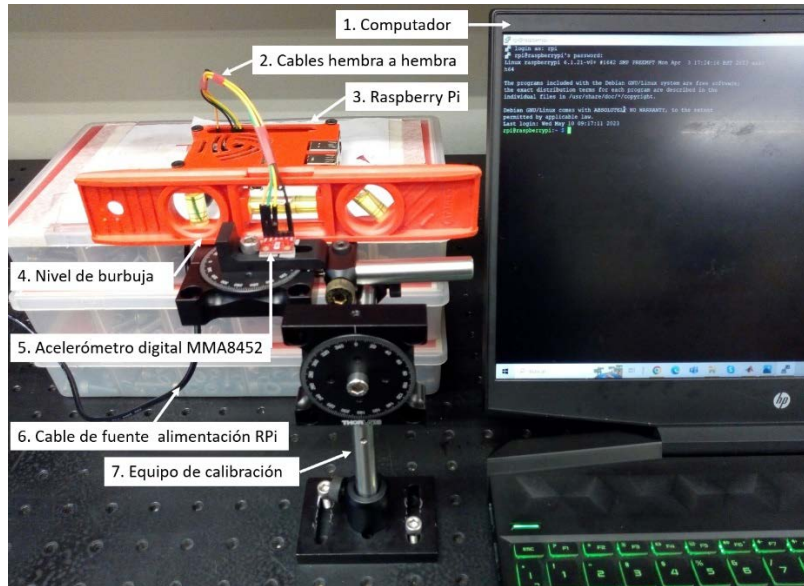


Figura 20. Montaje del equipo utilizado en la calibración de los acelerómetros digitales.

Con el registro de mediciones de aceleración de cada eje en una inclinación de cada 10° , se determinan las curvas de calibración en el eje X, Y y Z, de cada acelerómetro. En las Figuras 21, 22 y 23, se presentan las curvas de calibración del acelerómetro MMA8452, MPU6050 y MSA301 respectivamente. Los resultados de las curva de calibración de los tres acelerómetros digitales calibrados se presentan en la Tabla 8. En ella, se pueden visualizar los valores de las pendientes de la curvas en cada eje y la ordenada de origen correspondiente de los acelerómetros digitales seleccionados. Durante la calibración el eje Z, se alineó con el eje vertical normal a la superficie de la tierra y los ejes X e Y, se alinearon con el eje horizontal paralelo a la superficie de la tierra.

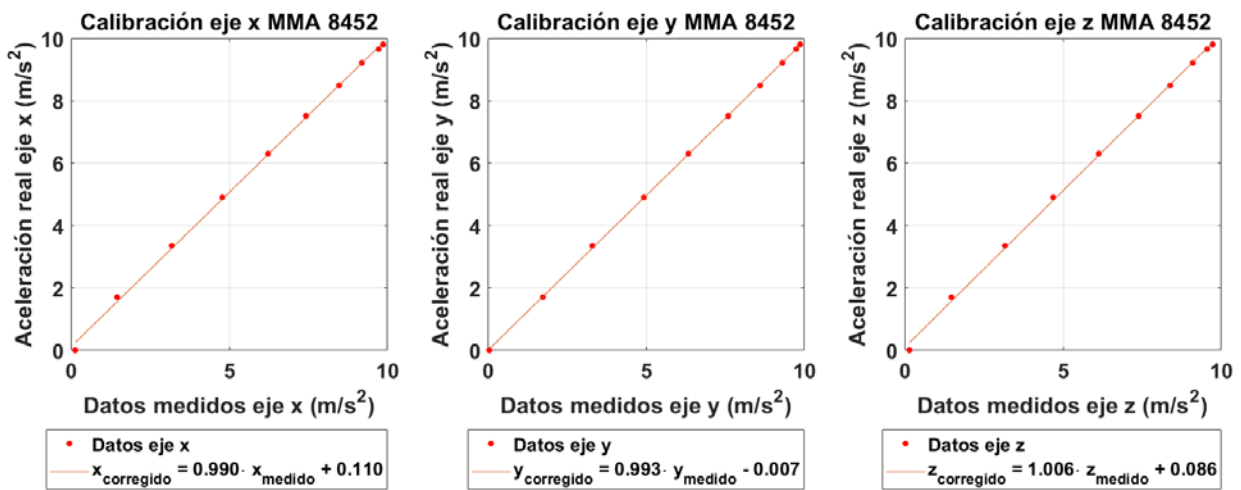


Figura 21. Curvas de calibración de los ejes X, Y y Z del acelerómetro digital MMA8452.

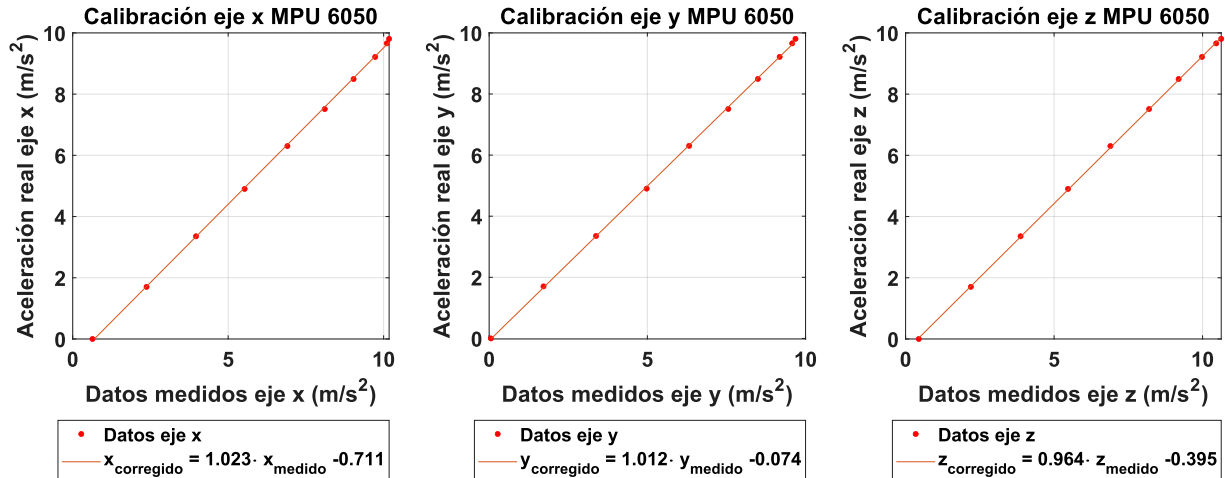


Figura 22. Curvas de calibración de los ejes X, Y y Z del acelerómetro digital MPU6050

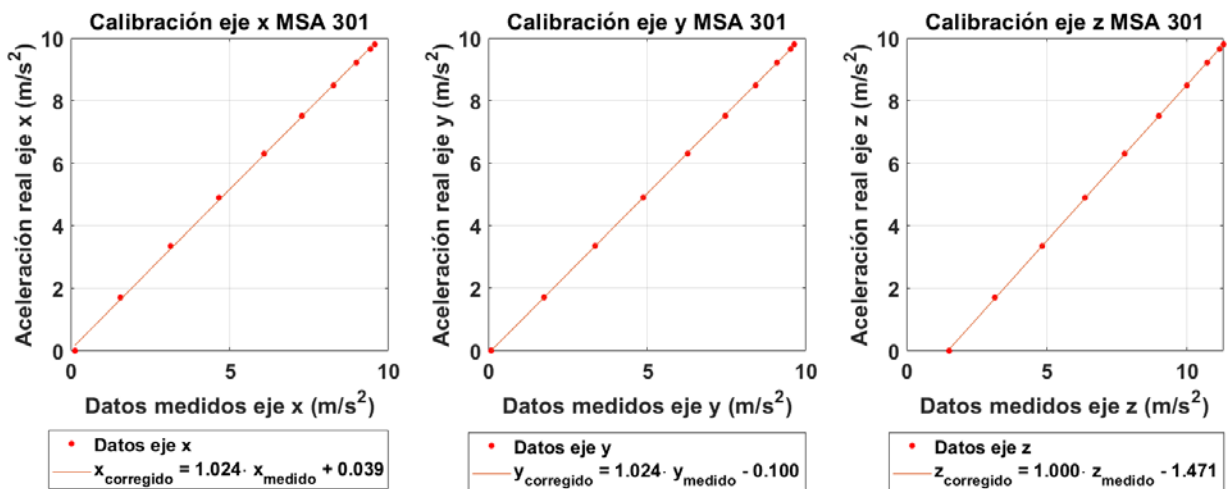


Figura 23. Curvas de calibración de los ejes X, Y y Z del acelerómetro digital MSA301.

Tabla 8. Resultados de los valores de la pendiente y ordenada de origen de las curvas de calibración para los acelerómetros digitales seleccionados.

Acelerómetros	MPU6050			MMA8452			MSA301		
	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z
Pendiente de la recta (m)									
Valores m	1.023	1.012	0.964	0.990	0.993	1.006	1.024	1.024	1.000
Ordenada de origen (b)									
Valores b	-0.711	-0.074	-0.395	0.110	-0.007	0.086	0.039	-0.100	-1.471

3.6 Diseño de housing de los acelerómetros y la RPi

A modo de realizar las pruebas de vuelo con el sistema de medición de vibraciones correctamente, se necesita proteger los componentes electrónicos y así, evitar que sufran daños o perturbaciones durante la adquisición de datos. Especialmente, se debe tener cuidado en el montaje con el fin de no comprometer las mediciones durante las pruebas de vuelo. Se diseña un *housing* de protección y

acople para la RPi y los acelerómetros digitales en el programa de diseño Fusion 360. Este programa permite generar un modelo que se pueda imprimir en impresora 3D. Como los drones multirrotores experimentan vibraciones de distintas amplitudes y frecuencias durante el vuelo, los *housing* deben ser rígidos y contar con una buena sujeción, de modo de evitar vibraciones adicionales que invaliden los datos experimentales.

Los diseños de los *housing* contemplan una base como soporte y fijación, y una tapa de protección. Los tamaños son específicos según las dimensiones de cada acelerómetro dadas sus diferencias físicas. Los aparatos electrónicos quedan apertnados a la base, con pernos de M3 y largo de 6 [mm]. A su vez, la tapa y base se unen con 4 pernos M3 y largo de 20 [mm], otorgándole rigidez a los *housing*. Los *housing* deben ser apertnados al dron, por lo que el diseño considera 4 pestañas en la base, como sujeción. En las Figuras 24 y 25, se puede apreciar el diseño del sistema de *housing* de la RPi y los acelerómetros digitales respectivamente. El detalle de las dimensiones de los *housing* se encuentra en el Anexo E.

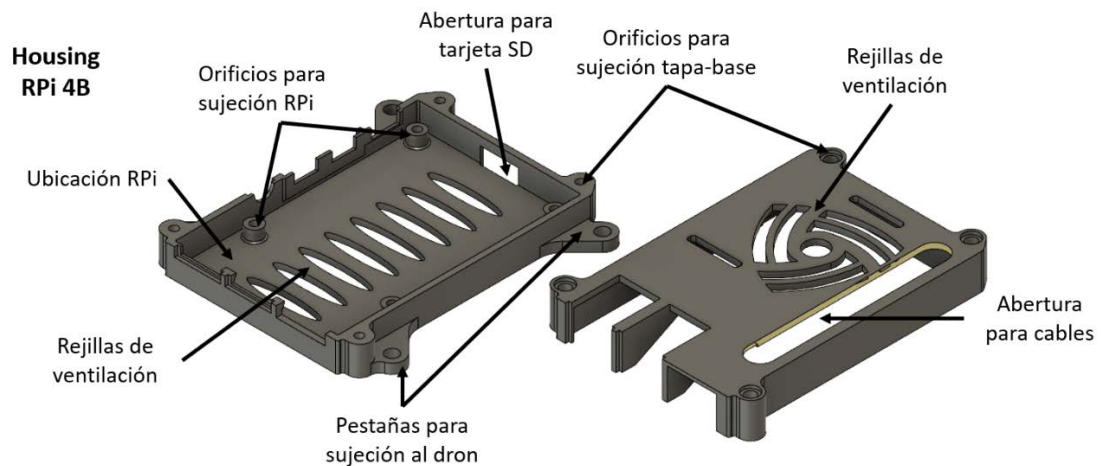


Figura 24. Housing de la RPi.

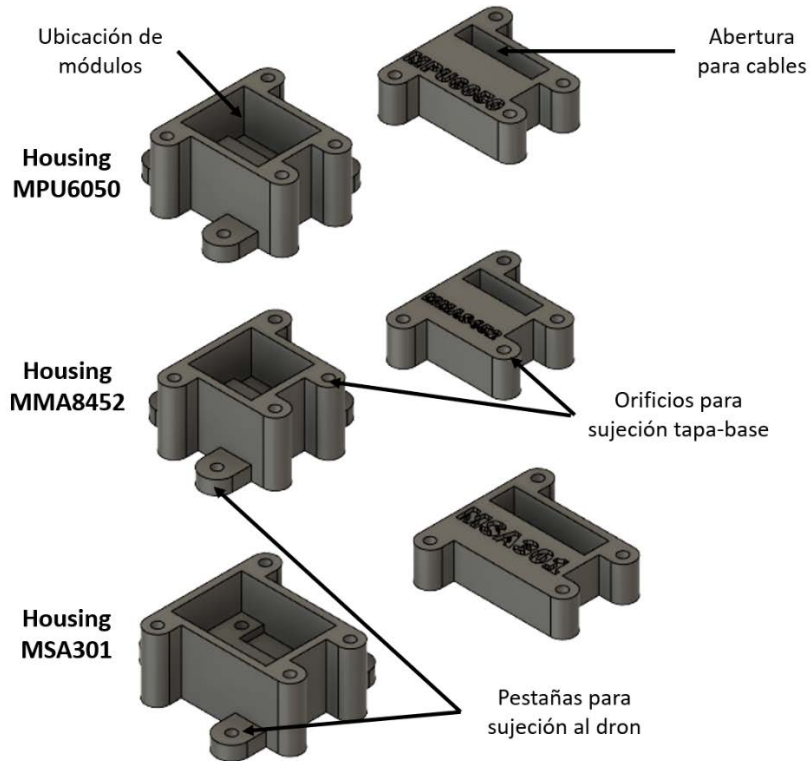


Figura 25. Housing diseñado en el programa Fusion 360, de los acelerómetros MPU6050, MMA8452 y MSA301.

Las piezas diseñadas se fabricaron mediante impresión 3D, que es un proceso de manufactura por adición. El material que se utilizó en la impresión corresponde a filamento de plástico PLA. En la Figura 26, se visualiza las impresiones realizadas del sistema de *housing* de la RPi y los acelerómetros digitales. En donde, los componentes se encuentran interconectados.

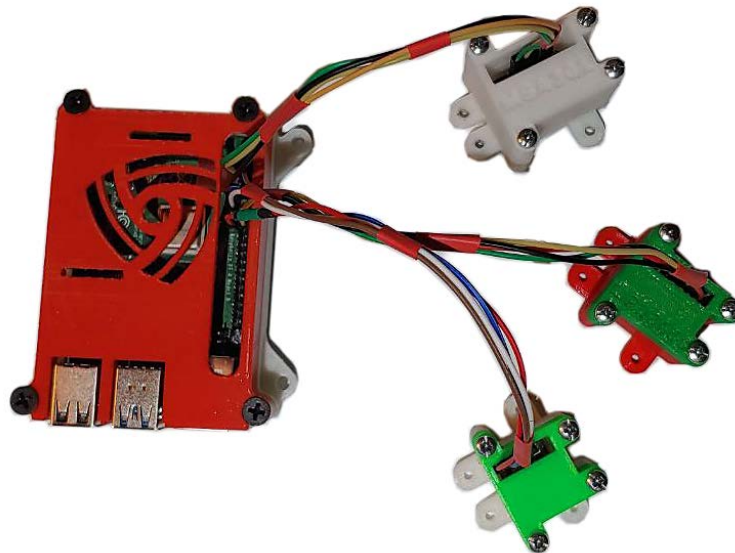


Figura 26. Impresión 3D del sistema de housing de la RPi y los acelerómetros digitales seleccionados.

Una vez desarrollado el sistema de medición de vibraciones, éste se montó al dron F550, para así poder realizar las pruebas experimentales y medir las vibraciones para las distintas fases del vuelo. En las Secciones 3.7, 3.8 y 3.9 se documenta el diseño de las piezas de unión, la implementación del sistema de medición de vibraciones al dron y las pruebas de verificación de funcionamiento del sistema de medición montado en el dron F550 respectivamente

3.7 Diseño de placas de unión de los housing con dron F550

En la conexión de los housing de los acelerómetros con el dron F550, se diseñaron tres placas que se unieron a la base del dron con un adhesivo. En la adhesión de las placas se contempló el uso de resina epóxica, de modo de asegurar la sujeción y evitar vibraciones no deseadas producto de un ensamblaje no adecuado de los componentes. En la Figura 27, se presenta el diseño de las placas de unión. El largo y ancho de las placas es variable y depende de las dimensiones del housing, que a su vez depende del tamaño de los módulos de los acelerómetros. En el Anexo E, se presenta los planos de las placas de unión. En el caso de la RPi, se utilizó como elemento de unión al dron, una placa de 4 [mm] de espesor con ocho perforaciones de 3 [mm] de diámetro. El dron F550, en su base cuenta con 4 agujeros, donde se apernó esta placa. Al igual que los *housing*, las placas de unión diseñadas se fabricaron mediante el proceso de impresión 3D y el material a utilizar en la impresión corresponde a filamento de plástico PLA.

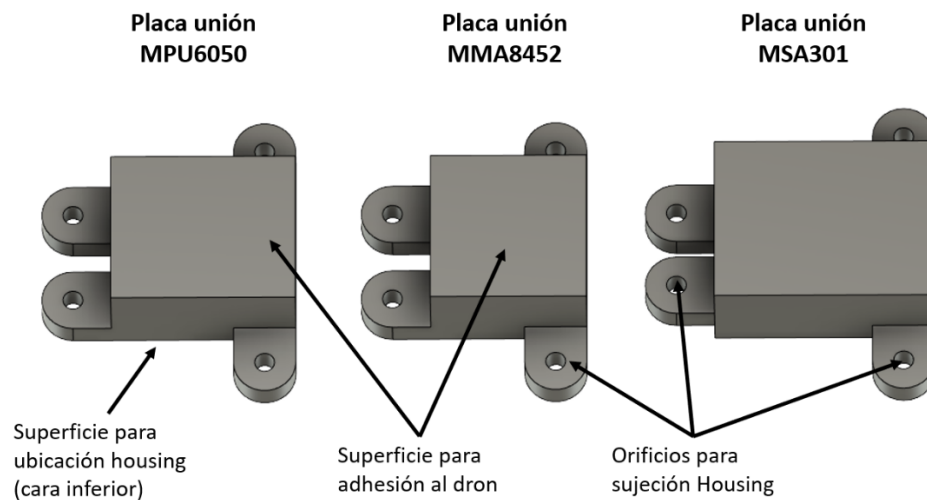


Figura 27. Placas de unión para la conexión entre los housing de los acelerómetros y el dron F550.

3.8 Implementación del sistema de medición de vibraciones al dron F550

Los pasos de la implementación del sistema de medición de vibraciones al dron F550, se listan a continuación. Cabe destacar que, para alimentar el sistema de medición de vibraciones durante el vuelo del dron se utiliza la batería LiPo Multistar como fuente de poder. La RPi requiere 5 [V] de alimentación por lo que se considera la conexión de un variador de voltaje en el dron como intermediario entre la batería y la RPi.

Procedimiento de montaje del sistema de medición al dron F550:

1. Unión apornada de la placa de la RPi al tren de aterrizaje en el centro de la placa inferior del dron F550.
2. Unión apornada del *housing* de la RPi con la RPi en la placa central.
3. Adhesión de las placas de los acelerómetros en la placa inferior del dron F550 con resina epóxica.
4. Unión apornada de los *housing* de los acelerómetros digitales con los acelerómetros.
5. Sujeción de los cables de conexión con amarra cables.
6. Conexión del variador de voltaje por cables macho-hembra a los pines de la RPi. El cable positivo se conecta al pin de alimentación de 5 [V] de la RPi y el negativo a un pin de tierra. Además, se suelda un switch ON/OFF para permitir el paso de corriente a la RPi cuando se desee.

3.9 Verificación del sistema de medición de vibraciones

Previo a las pruebas experimentales, se realizó una verificación del sistema de mediciones de vibraciones para verificar su correcto funcionamiento. En la verificación del sistema de medición de vibraciones se realizaron pruebas de medición con el sistema montado en el dron. Se realizaron 2 tipos de pruebas de verificación: (i) mediciones durante intervalos de tiempo de 30 minutos alimentando la RPi por su fuente de alimentación oficial RPi 4B tipo C de 5.1 [V] y, (ii) mediciones durante cortos periodos de tiempo con alimentación por batería y por la fuente de alimentación tipo C. Las gráficas de verificación de ambos casos se presentan en el Anexo F.

En el caso (i), no se distinguen errores evidentes en las mediciones realizadas durante un tiempo de 30 minutos que pudiesen estar asociados a la naturaleza instrumental por desplazamientos relativos de los acelerómetros.

En el caso (ii), las mediciones de aceleración se realizan con el sistema quieto, sin fuentes de vibraciones. Esto, con el objetivo de verificar si la medición realizada con alimentación por batería es consistente con la medición realizada por la fuente de alimentación oficial de la RPi. Como la batería es una fuente de poder que tiene limitaciones, se desea ver cómo éstas podrían afectar las mediciones. Se evidencia que existen leves diferencia en la medición, ya que en la alimentación por batería se pueden apreciar *peaks* en la amplitud de la aceleración medida cada cierto paso de tiempo, posiblemente atribuibles a leves variaciones en la corriente de alimentación o ruido interno de los acelerómetros. Al detectar estas diferencias, se hace indispensable eliminarlas en el post procesamiento de datos, y de esta forma evitar una interpretación equivocada de las mediciones de aceleración.

CAPÍTULO 4: Pruebas de vuelo con sistema de medición de vibraciones

En este capítulo, se detallan los procedimientos realizados durante las pruebas de vuelo, los resultados obtenidos y el análisis.

4.1 Diseño de pruebas de vuelo

Las pruebas de vuelo se realizaron en dependencias de la Universidad de Concepción, en un entorno exterior al aire libre al costado del Laboratorio de Técnicas Aeroespaciales. Se realizaron 3 días de pruebas en las siguientes fechas: (1era) 31/05/2023, (2da) 13/06/2023 y (3era) 14/06/2023. Durante las pruebas realizadas en cada día, se guardaron datos de aceleración en los 3 ejes con el sistema de mediciones de vibraciones a bordo del dron F550, en distintas fases de vuelo. Las fases de vuelo fueron: (i) vuelo estático a altura constante, (ii) vuelo horizontal a altura constante, y (iii) vuelo vertical ascendente y descendente. La elección de estas tres fases de vuelo corresponde a que son las fases de vuelo más utilizadas en las misiones de drones.

Por día de medición se realizaron al menos 1 prueba de cada fase de vuelo establecida por cada acelerómetro. La duración de la captura de datos de todas las pruebas realizadas fue de 60 [s]. Adicionalmente, se registró la temperatura ambiente y la velocidad del viento a una distancia de 2 [m] del suelo al momento de iniciar cada prueba. La velocidad del viento se midió con un anemómetro digital modelo CHY 361, cuyo rango de operación corresponde a 0.0-30.0 [m/s] con resolución de 0.01 [m/s] \pm 3% FS. La temperatura del ambiente se midió con un termómetro digital con resolución de 0.1 \pm 1 [°C] y rango de operación entre -50 [°C] y 300 [°C]. En la Figura 28 se aprecia el dron en la pista de aterrizaje y la estación en tierra.



Figura 28. Escena de las pruebas experimentales: a) Pista de despegue y aterrizaje b) Estación en tierra.

4.2 Registro y base de datos de vibraciones

En esta sección, se documentan los datos registrados durante las pruebas de medición y la confección de la base de datos de vibraciones. En la Tabla 9 se presenta el registro de los metadatos que describen las condiciones de las mediciones realizadas durante los 3 días de medición. La columna *vuelo* y *prueba* corresponden al tipo de vuelo realizado y el nombre del archivo de datos guardados respectivamente. Además, se registra la temperatura ambiente, velocidad y hora de inicio y término de la prueba del tipo de vuelo correspondiente, que considera la medición realizada con los acelerómetros digitales MMA8452, MPU6050 y MSA301. La altura indicada en [m] corresponde a un promedio de la altura máxima de vuelo durante cada prueba con respecto a la ubicación del

despegue. Este valor se calcula en base a la medición del barómetro a bordo del dron F550, que fue recuperada una vez finalizadas las pruebas de vuelo a través del programa Mission Planner. En el Anexo G, se detallan las gráficas de alturas alcanzadas en cada vuelo realizado.

Tabla 9. Registro de los metadatos de la pruebas de vuelo para los 3 días de medición.

Fecha	Vuelo	Prueba	Hora inicio	Hora término	Velocidad Viento [m/s]	Temperatura ambiente [°C]	Altura de vuelo máx. [m]
31/05	Estático	<i>Prueba_{1,alth}</i>	11:15	11:18	0.39	22.6	2.49
	Estático	<i>Prueba_{2,alth}</i>	11:19	11:23	0.51	23.6	6.12
	Horizontal	<i>Prueba_{1,h}</i>	11:30	11:33	0.11	23.8	11.05
	Horizontal	<i>Prueba_{2,h}</i>	11:36	11:38	0.16	25.6	10.59
	Vertical	<i>Prueba_{1,vert}</i>	11:45	11:49	0.39	26.7	36.28
	Vertical	<i>Prueba_{2,vert}</i>	12:03	12:05	0.85	25.5	33.18
Promedio					0.40	24.6	16.61
13/06	Vertical	<i>Prueba_{3,v}</i>	16:09	16:10	0.58	15.5	25.31
	Vertical	<i>Prueba_{3,vert}</i>	16:37	16:41	0.25	13.6	21.19
	Horizontal	<i>Prueba_{3,h}</i>	16:45	16:49	0.14	12.1	17.32
	Estático	<i>Prueba_{3,alth}⁺</i>	16:54	16:55	0.18	11.5	3.24*
Promedio					0.29	13.2	16.77
14/06	Estático	<i>Prueba_{4,alth}</i>	10:39	10:43	0.77	15.0	19.80
	Estático	<i>Prueba_{5,alth}</i>	10:44	10:47	0.30	15.4	12.19
	Horizontal	<i>Prueba_{4,h}</i>	10:51	10:55	0.82	15.7	17.79
	Horizontal	<i>Prueba_{5,h}</i>	11:17	11:21	0.63	16.6	20.48
	Vertical	<i>Prueba_{4,vert}</i>	11:25	11:19	0.60	17.1	31.40
	Vertical	<i>Prueba_{5,vert}</i>	11:33	11:37	1.02	18.9	29.23
Promedio					0.69	16.5	21.82

+ Durante esta prueba el dron F550 sufrió una colisión debido a un desajuste del compás del dron F550. Posteriormente no se realizaron más pruebas el 13/06.

*Altura alcanzada al inicio de la medición, mientras el dron mantuvo una altura estable.

En la Tabla 10, se presentan los datos relevantes asociados al sistema de medición de vibraciones. Los datos presentados son el rango dinámico configurado, el tiempo de muestreo promedio, Δt en [s], y la frecuencia de muestreo promedio, F_s en [Hz], correspondiente a la captura de datos de los acelerómetros durante cada prueba de vuelo realizada. También, se detalla el número de vueltas realizadas por prueba de vuelo (N° vueltas). En el caso de los vuelos horizontales, se considera una vuelta el trayecto de ida y regreso. En el caso de los vuelos verticales, se considera una vuelta el trayecto de ascenso y descenso. No hay número de vueltas en el caso de los vuelos estáticos.

Tabla 10. Registro de los datos de muestreo asociados al sistema de medición de vibraciones de cada prueba de vuelo.

Vuelo	Prueba	Acelerómetro	N° vueltas	g_{max}	Δt	F_s [Hz]		
Estático	<i>Prueba_{1,alth}</i>	MMA	No aplica	2g	0.00137	727		
		MPU			0.00107	938		
		MSA			0.00132	755		
	<i>Prueba_{2,alth}</i>	MMA		2g	0.00137	730		
		MPU			0.00105	951		
		MSA			0.00132	756		
	<i>Prueba_{3,alth}*</i>	MMA		8g	0.00136	734		
	<i>Prueba_{4,alth}</i>	MMA		8g	0.00137	732		
		MPU			0.00105	950		
		MSA			0.00133	755		
	<i>Prueba_{5,alth}</i>	MMA		8g	0.00137	730		
		MPU			0.00105	950		
		MSA			0.00132	757		
	Horizontal	<i>Prueba_{1,h}</i>		MMA	2	2g	0.00137	729
				MPU			0.00105	951
MSA			0.00132	757				
<i>Prueba_{2,h}</i>		MMA	2.5	2g	0.00136	736		
		MPU	3		0.00105	951		
		MSA	3		0.00132	758		
<i>Prueba_{3,h}</i>		MMA	1.5	8g	0.00137	731		
		MPU	1.5		0.00105	950		
		MSA	2		0.00132	758		
<i>Prueba_{4,h}</i>		MMA	1.5	8g	0.00136	736		
		MPU	2		0.00105	949		
		MSA	2		0.00132	758		
<i>Prueba_{5,h}</i>		MMA	1.5	8g	0.00135	739		
		MPU	2		0.00105	953		
		MSA	2		0.00132	759		
Vertical	<i>Prueba_{1,vert}</i>	MMA	2	2g	0.00137	730		
		MPU			0.00105	951		
		MSA			0.00132	758		
	<i>Prueba_{2,vert}</i>	MMA	2	2g	0.00137	730		
		MPU			0.00105	950		
		MSA			0.00132	757		
	<i>Prueba_{3,v}</i>	MPU	2	4g	0.00105	951		
	<i>Prueba_{3,vert}</i>	MMA	2	8g	0.00137	730		
		MPU			0.00105	951		
		MSA			0.00132	759		

<i>Prueba_{4,vert}</i>	MMA	2	8g	0.00136	735
	MPU			0.00105	950
	MSA			0.00132	758
<i>Prueba_{5,vert}</i>	MMA	2	8g	0.00136	736
	MPU			0.00105	950
	MSA			0.00132	758
Promedio				MMA	732
				MPU	950
				MSA	757
Desviación estándar				MMA	3.54
				MPU	3.37
				MSA	1.28

* Durante esta prueba el dron F550 sufrió una colisión debido a un desajuste del compás del dron F550, por lo que no fue posible realizar pruebas de vuelo estático con los acelerómetros MPU6050 y MSA301 el 13/06/2023.

Una vez finalizadas las pruebas de vuelo, se crea una base de datos con el objetivo de guardar de forma ordenada y eficiente los datos recopilados con el sistema de medición de vibraciones a bordo del dron F550. La base de datos se compone de 3 segmentos de información, siendo estos: (i) los metadatos que describen las condiciones de las mediciones realizadas, tal como se muestra en la Tabla 9, (ii) los datos de muestreo del sistema de medición de vibraciones, ver la Tabla 10 y (iii) los valores de aceleración registrados en las pruebas de vuelo en cada instante de tiempo por cada uno de los acelerómetros. La Figura 29 muestra cómo se estructura gráficamente la base de datos.

METADATOS		
DATOS DE MUESTREO		
DATOS MMA8452	DATOS MPU6050	DATOS MSA301

Figura 29. Estructura gráfica de la base de datos de las aceleraciones medidas durante las pruebas de vuelo.

4.3 Resultados

En esta sección, se documentan los resultados de las mediciones de vibraciones obtenidas en las pruebas de vuelo en base a los valores observados en el dominio del tiempo y también, en el dominio de la frecuencia por medio de la Transformada de Fourier (TF), espectro RMS por bandas de frecuencia y espectrograma. El objetivo del uso de estas herramientas es facilitar la identificación de las componentes de frecuencias que deben ser aisladas con el método de estabilización mecánica.

4.3.1 Transformada de Fourier

La TF, es una transformación matemática que permite convertir una función en el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia a modo de separar las componentes de frecuencia de la función original. Como resultado de la TF, se obtiene una función de frecuencia con valor complejo. Las Ecuaciones (2) y (3) corresponden a la definición matemática de la TF.

$$X[k] = DFT\{x[n]\} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j2\pi(k\frac{n}{N})} \quad (2)$$

$$x[n] = DFT\{X[k]\}^{-1} = \sum_{m=0}^{N-1} X[k] e^{j2\pi(k\frac{n}{N})} \quad (3)$$

Donde, $x[n]$ corresponde a la señal discreta en el dominio de tiempo, N la cantidad de muestras de tiempo, n la muestra de tiempo actual tal que $n \in \{0, 1, \dots, N-1\}$, $X[k]$ la señal en el dominio discreto de la frecuencia y k el valor actual de la frecuencia tal que $k \in \{0, 1, \dots, N-1\}$.

4.3.2 Espectro RMS por bandas de frecuencia

El valor RMS en la señal temporal discreta $x[n]$ se define según la Ecuación (4).

$$RMS\{x[n]\} = \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x^2[n] \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

El valor RMS en el espectro se calcula con la Ecuación (5), donde $X[k]$ corresponde a la señal en el dominio discreto de la frecuencia y N el número de puntos.

$$RMS\{x[n]\} = \left(\frac{1}{N^2} \sum_{k=1}^N |X[k]|^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Notar que si bien el valor RMS de la señal temporal $x[n]$ calculado a partir de las componentes espectrales $X[k]$, Ecuación (5), es igual al valor RMS calculado en el dominio del tiempo, Ecuación (4), el valor RMS de la señal en el dominio de la frecuencia $X[k]$ es distinto. La relación del valor RMS de la señal en el dominio del tiempo y de la frecuencia corresponde a la Ecuación (6), por Teorema de Parseval.

$$RMS\{x[n]\} = \sqrt{\frac{1}{N}} \cdot RMS\{X[k]\} \quad (6)$$

Luego, para determinar el valor RMS en una banda de frecuencia específica, se utiliza la Ecuación (5), donde la sumatoria se restringe a los componentes de frecuencia contenidos en dicha banda. Finalmente, se construye el espectro RMS por bandas de frecuencia mediante la concatenación de los valores RMS de la señal calculados en un conjunto de bandas de frecuencia de interés.

4.3.3 Espectrograma

En el análisis de las componentes de frecuencia de la señal vibratoria durante todo el periodo de medición, se utiliza la Transformada Corta de Fourier (*Short-time Fourier transform*, STFT). La STFT, consiste en una transformación matemática, que divide la señal temporal en segmentos por lo general de igual longitud temporal y aplica la Transformada de Fourier a cada uno de ellos. Como resultado, se obtiene un espectro de frecuencias por cada segmento temporal. Estos segmentos, se pueden traslapar y así, mejorar la visualización de los resultados. Una herramienta que permite mejorar la visualización de la STFT, son los espectrogramas. Un espectrograma corresponde a la representación visual de los espectros de frecuencia en función de la variable temporal. El resultado

es un mapa de intensidades en función del tiempo en [s], graficado en el eje horizontal y la frecuencia en [Hz], en el eje vertical.

4.3.4 Resultados

Los resultados se presentan a través de gráficas de aceleración medida en los tres ejes, espectro RMS por bandas de frecuencias para las aceleraciones medidas en los tres ejes y el espectrograma de la señal vibratoria durante los 60 [s] de medición. El procedimiento realizado en la obtención de las gráficas de resultados se ilustra en la Figura 30.

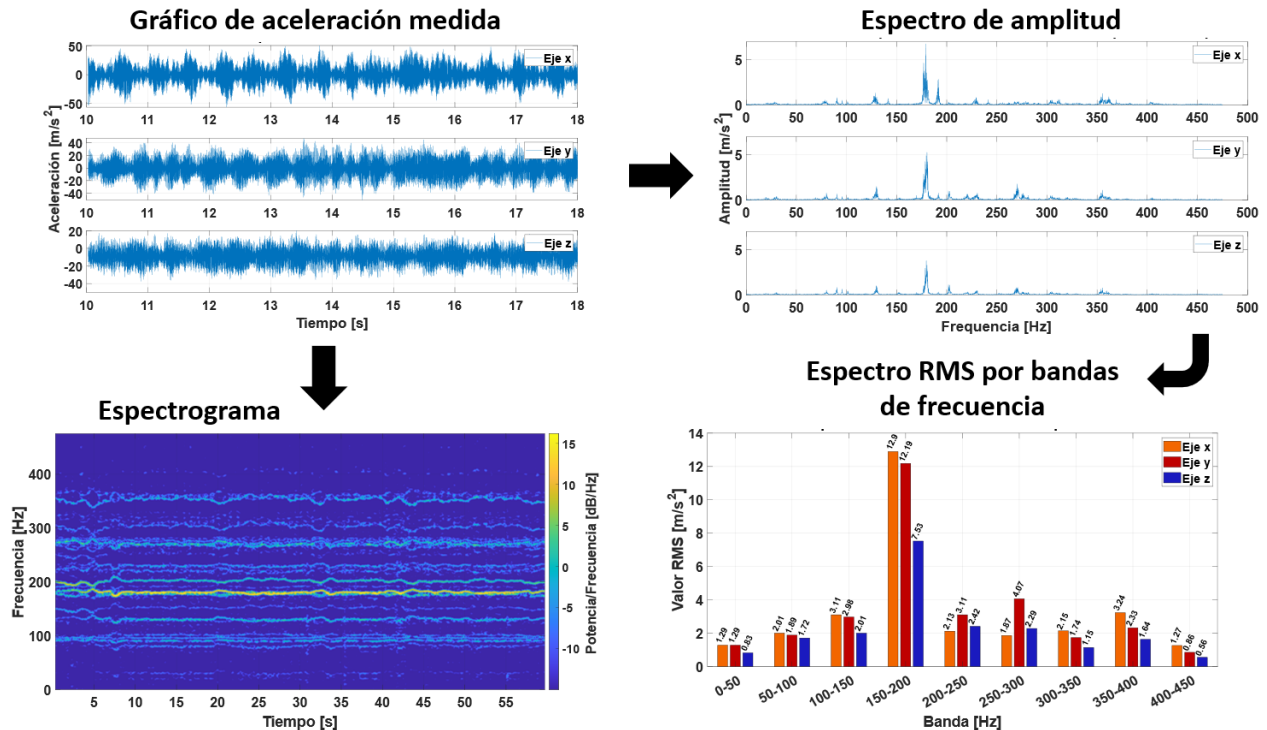


Figura 30. Procedimiento de análisis para determinar el espectro RMS por bandas de frecuencia de 50 [Hz] y el espectrograma.

En primer lugar, se selecciona el segmento de tiempo a analizar en cada modo de vuelo, considerando una ventana de tiempo estándar de 8 [s] durante la ejecución de la maniobra de vuelo, donde no existan mayores desviaciones en los datos. Se considera un tiempo estándar de análisis de 8 [s] en todas las pruebas, puesto que es el tiempo mínimo durante la realización de las maniobras de ascenso y descenso registradas. En segundo lugar, se procede a interpolar los datos en un vector de tiempo con pasos discretos regulares (Δt). Esto, con el objetivo de uniformar el muestreo de los datos obtenidos debido a las variaciones que se presentan producto del sistema de adquisición con RPi. De esta forma, se regulariza la frecuencia de muestreo de los datos, lo que es necesario para un correcto análisis con Transformada de Fourier. En tercer lugar, se aplica la Transformada de Fourier a los datos remuestreados con Δt constante y se calcula el valor RMS por bandas de frecuencia de 50 [Hz], en cada eje. En cuarto lugar, a partir de los datos interpolados se determina el espectrograma de cada fase de vuelo durante los 60 [s] de medición.

A continuación, se presentan los resultados de las gráficas obtenidas a partir de las mediciones realizadas únicamente con el acelerómetro MPU6050, ya que corresponde al acelerómetro

seleccionado para continuar con el estudio durante el trabajo futuro de tesis. Los criterios de selección en los cuales se basa este trabajo, se detallan más adelante en la Sección 5.1. En las Figuras 31, 32, 33 y 34, se observan las mediciones realizadas en un intervalo de tiempo de 8 [s] registradas por el acelerómetro digital MPU6050, para los vuelos estático, horizontal y vertical. Los resultados de las gráficas correspondientes a los acelerómetros MMA8452 y MSA301, se presentan en el Anexo H.

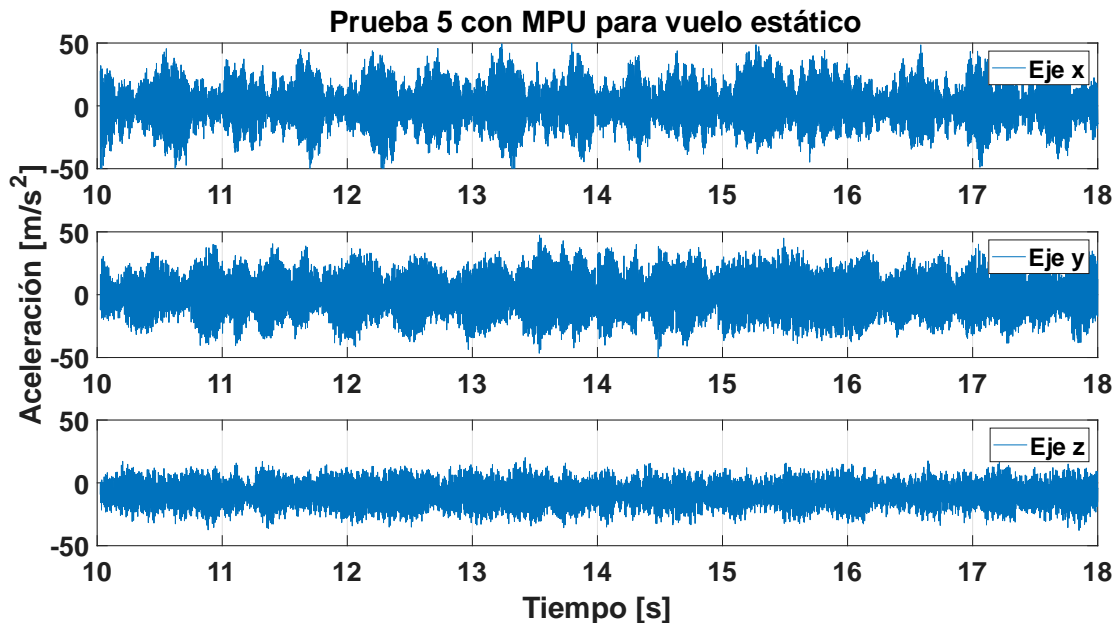


Figura 31. Gráfica de aceleraciones medidas en la prueba de vuelo 5, registradas con el acelerómetro digital MPU6050, en vuelo estático durante tramo de 8 [s] de medición.

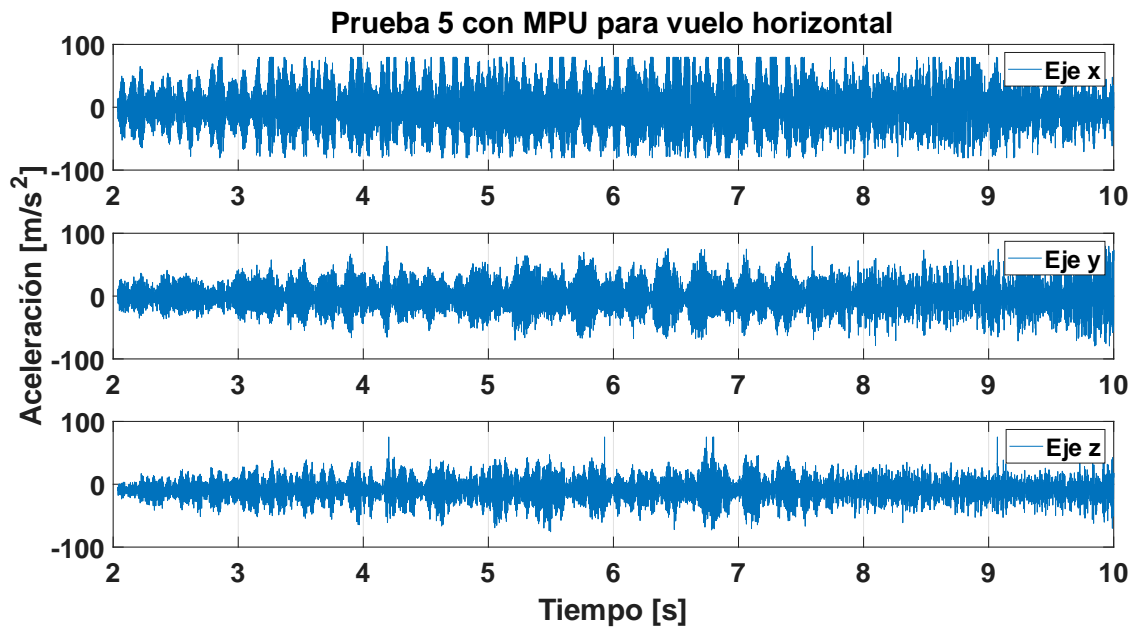


Figura 32. Gráfica de aceleraciones medidas en la prueba de vuelo 5, registradas con el acelerómetro digital MPU6050, en vuelo horizontal durante tramo de 8 [s] de medición.

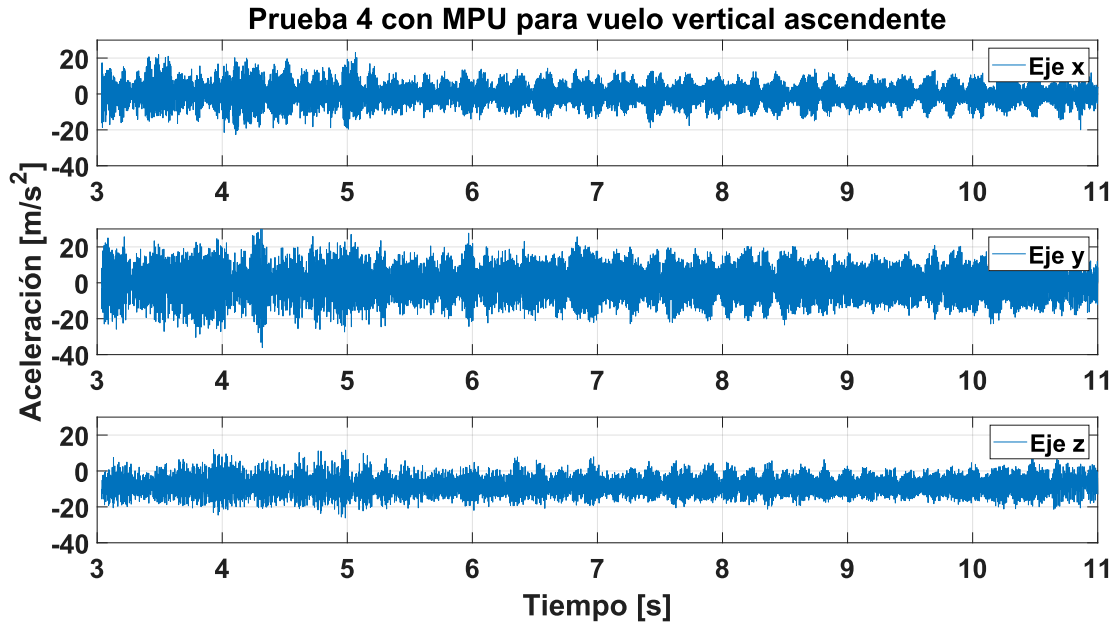


Figura 33. Gráfica de aceleraciones medidas en la prueba de vuelo 4, registradas con el acelerómetro digital MPU6050, en vuelo vertical ascendente durante tramo de 8 [s] de medición.

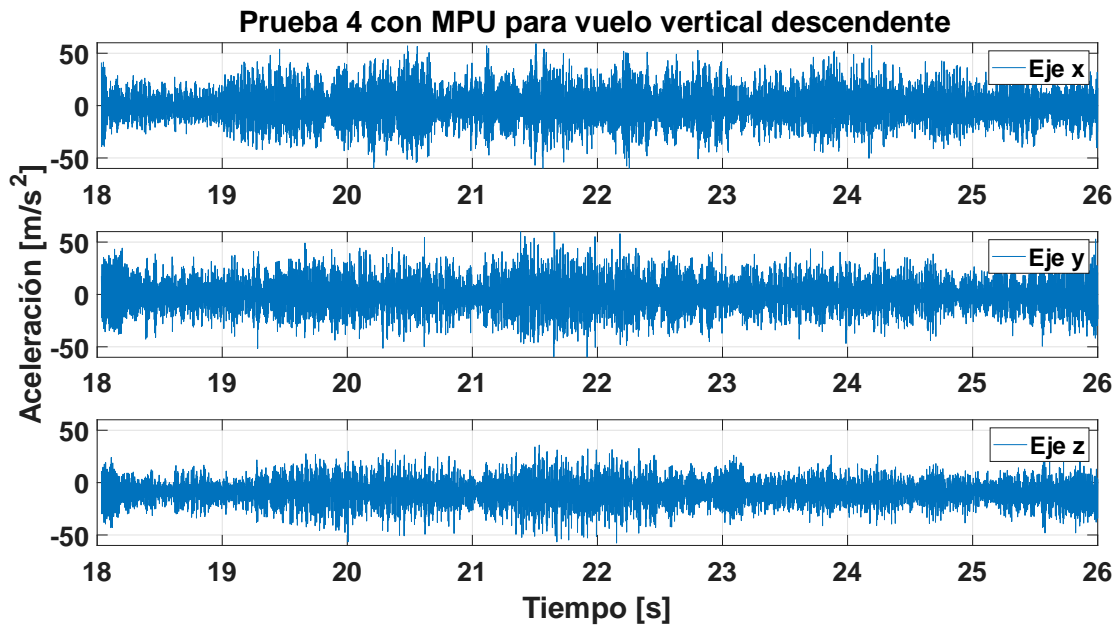


Figura 34. Gráfica de aceleraciones medidas en la prueba de vuelo 4, registradas con el acelerómetro digital MPU6050, en vuelo vertical descendente durante tramo de 8 [s] de medición.

En las Figuras 35, 36, 37 y 38, se presentan los gráficos del valor RMS alcanzado por cada banda de frecuencia en los tres ejes de las mediciones de aceleración mostradas en las Figuras 31, 32, 33 y 34 respectivamente.

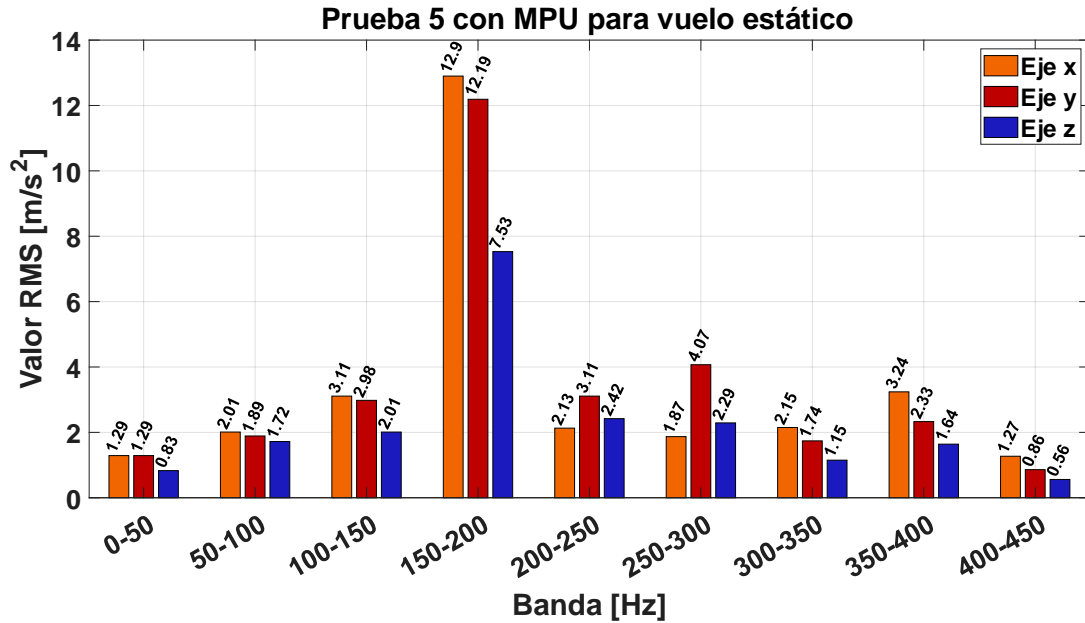


Figura 35. Gráfica del espectro RMS por bandas de frecuencias de la prueba de vuelo 5, registradas con el acelerómetro digital MPU6050, en vuelo estático durante tramo de 8 [s] de medición.

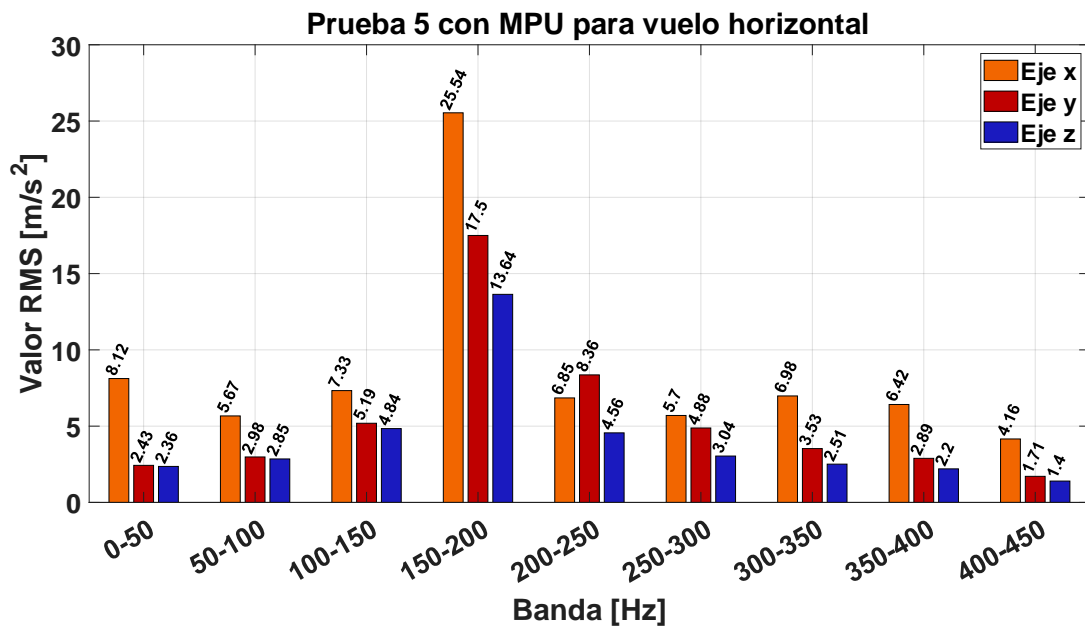


Figura 36. Gráfica del espectro RMS por bandas de frecuencias de la prueba de vuelo 5, registradas con el acelerómetro digital MPU6050, en vuelo horizontal durante tramo de 8 [s] de medición.

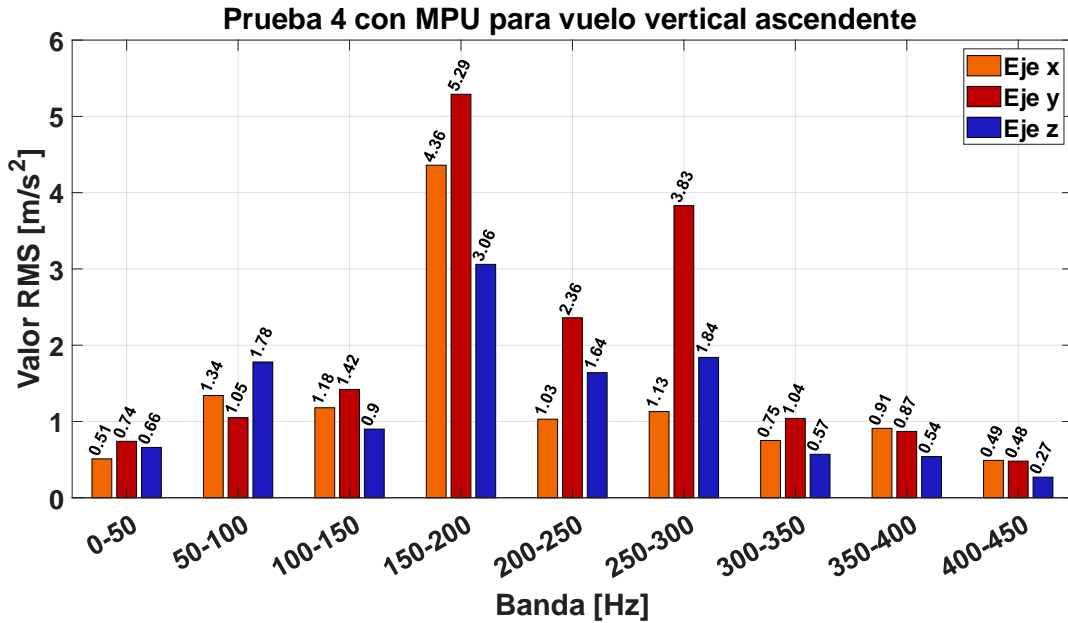


Figura 37. Gráfica del espectro RMS por bandas de frecuencias de la prueba de vuelo 4, registradas con el acelerómetro digital MPU6050, en vuelo vertical ascendente durante tramo de 8 [s] de medición.

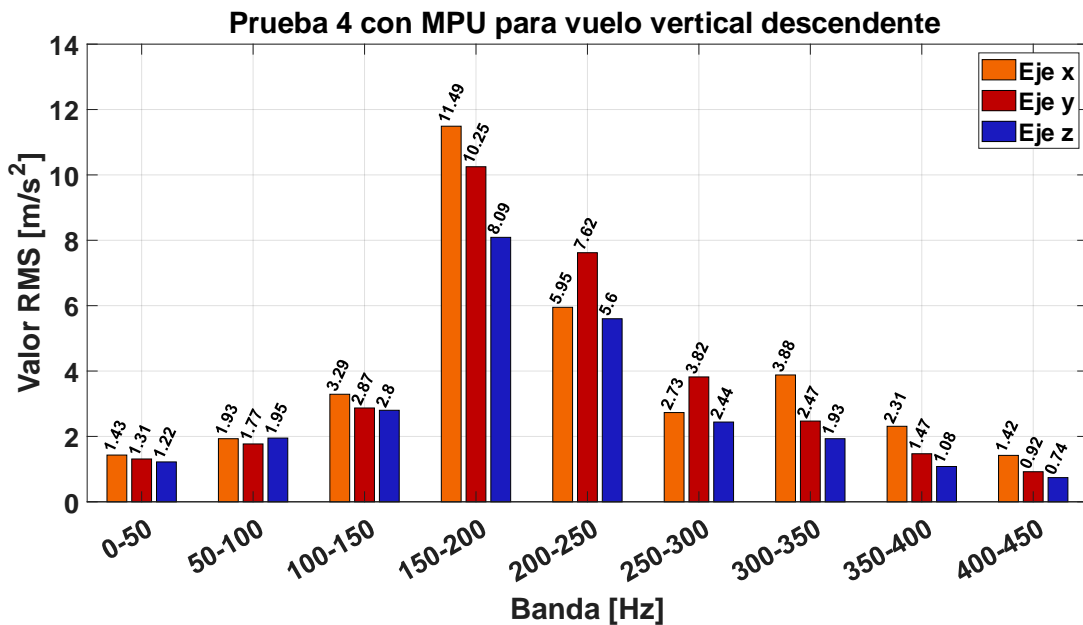


Figura 38. Gráfica del espectro RMS por bandas de frecuencias de la prueba de vuelo 4, registradas con el acelerómetro digital MPU6050, en vuelo vertical descendente durante tramo de 8 [s] de medición.

En el análisis por espectrograma de la señal vibratoria durante los 60 [s], se define una ventana de análisis con un largo determinado sobre la señal, para así calcular la Transformada Discreta de Fourier (TDF) de cada segmento de datos en la ventana. En el desarrollo de los cálculos, se divide la señal en segmentos de 512 elementos utilizando la ventana de ponderación tipo Hamming con largo igual al número de puntos de la señal divididos por cien. Estos parámetros se determinaron a base de prueba y error, permitiendo generar una visualización clara de la dinámica de la señal en el espectrograma.

Adicionalmente, se especifica un traslape aproximadamente del 99%, para que así, al dividir la señal temporal, cada segmento considere un porcentaje del anterior, generando cambios graduales en el espectro. En las Figuras 39, 40 y 41, se presentan los espectrogramas de las mediciones realizadas con el acelerómetro digital MPU6050 en el eje Z, durante las distintas fases de vuelo durante un periodo de 60 [s]. El detalle de la trayectoria de vuelo se documenta en la Sección 4.4. Los espectrogramas de las mediciones realizadas con el acelerómetro digital MPU6050 en los ejes X e Y, se presentan en el Anexo I.

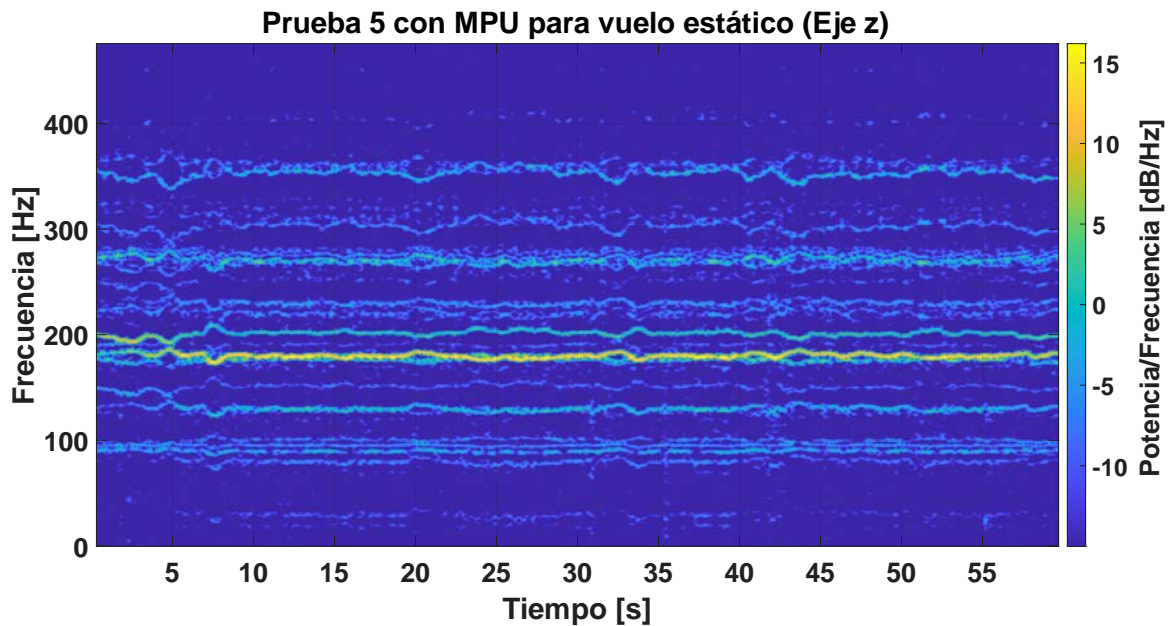


Figura 39. Espectrograma de 60 [s] de medición con el acelerómetro digital MPU6050, de la prueba de vuelo 5 en vuelo estático en el eje Z.

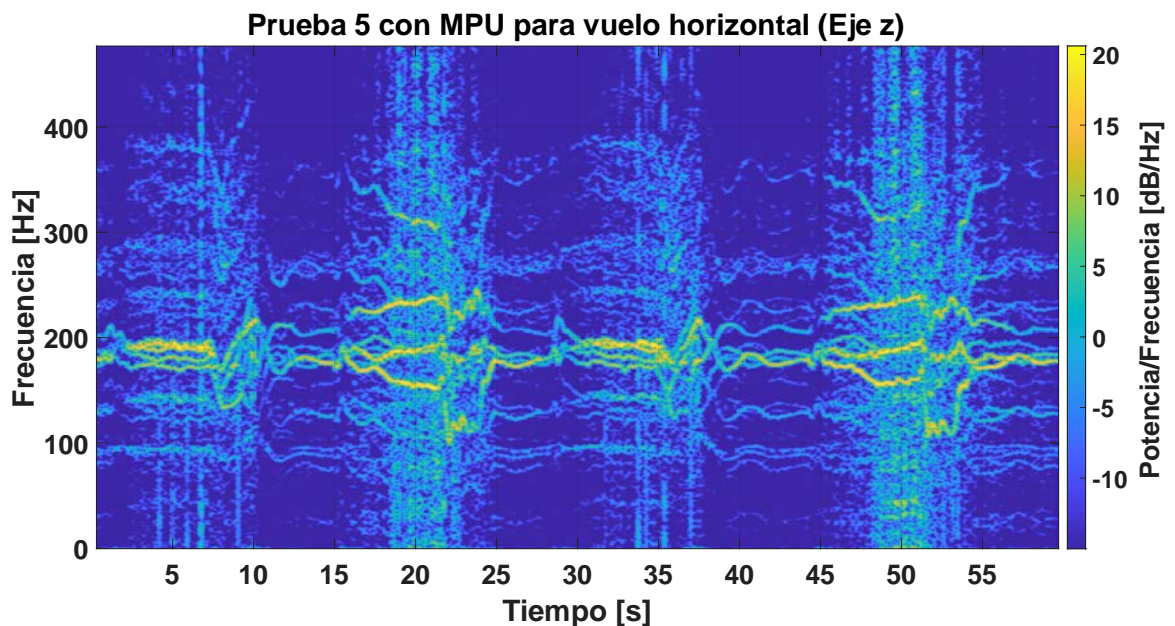


Figura 40. Espectrograma de 60 [s] de medición con el acelerómetro digital MPU6050, de la prueba de vuelo 5 en vuelo horizontal en el eje Z.

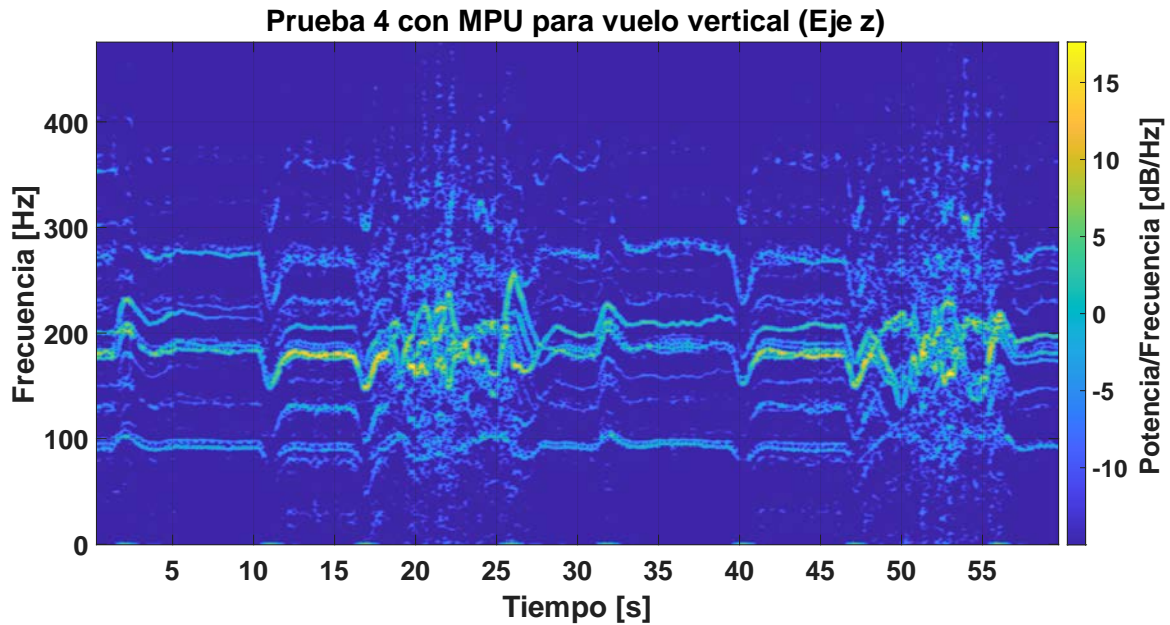


Figura 41. Espectrograma de 60 [s] de medición con el acelerómetro digital MPU6050, de la prueba de vuelo 4 en vuelo vertical en el eje Z.

4.4 Análisis de resultados

En esta sección, se reportan los valores máximos de aceleración alcanzados en las mediciones registradas por el acelerómetro digital MPU6050 mostradas en la Sección 4.3.4. Además, se analizan las componentes de frecuencia que deben ser aisladas, su energía respectiva y se entrega un análisis detallado del comportamiento de las aceleraciones experimentadas por el dron F550 durante las fases de vuelo.

A partir de las mediciones recopiladas de aceleración durante las pruebas de vuelo, es posible detectar que las aceleraciones durante las tres fases de vuelo alcanzan valores de hasta ± 8 [g]. En las primeras pruebas realizadas durante el día 31/05/2023, las mediciones se llevaron a cabo con los acelerómetros configurados en un rango dinámico máximo de ± 2 [g]. Como las aceleraciones durante el vuelo superaron este valor, los datos para estas pruebas resultaron saturados. En la siguiente prueba de vuelo, se realizó una primera medición con el acelerómetro digital MPU6050 configurado a un rango dinámico de ± 4 [g]. Nuevamente los datos se encontraban saturados, por lo que finalmente se configuraron todos los acelerómetros a ± 8 [g] en las pruebas de vuelo de los días 13/06/2023 y 14/06/2023. De los resultados presentados en la Sección 4.3.4, es posible apreciar que las aceleraciones de mayor amplitud ocurren en la banda de frecuencia entre los 150-200 [Hz], en todas las fases de vuelo en los tres ejes. Esto ocurre en las mediciones registradas por el acelerómetro MPU6050 y se puede apreciar en las Figuras 35, 36, 37 y 38, correspondientes a los espectros por bandas de frecuencia. Las aceleraciones registradas por los acelerómetros MMA8452 y MSA301, tienen una tendencia similar, donde las mayores amplitudes se presentan en la banda de frecuencia entre 150-250 [Hz]. Se concluye que las componentes de frecuencias que deben ser aisladas con el método de estabilización mecánica son entre los 150 y 250 [Hz] en los ejes X, Y y Z. De acuerdo con los resultados obtenidos, componentes de frecuencia mayores a 300 [Hz], no poseen grandes amplitudes. En la Tabla 11, se presenta un resumen de las aceleraciones máximas alcanzadas en el

dominio del tiempo y los valores del espectro RMS por banda de frecuencia máximo en los tres ejes en las tres fases de vuelo, correspondientes a las mediciones realizadas con el acelerómetro digital MPU6050.

Tabla 11. Aceleraciones máximas y valores RMS máximos registrados con el acelerómetro MPU6050.

Vuelo	Eje	Aceleración máximo ⁺ [m/s^2]	Valor RMS máximo* [m/s^2]
Estático	X	50.54	12.90
	Y	50.11	12.19
	Z	20.99	7.53
Horizontal	X	79.55	25.54
	Y	79.32	17.5
	Z	75.23	13.64
Vertical ascendente	X	26.03	4.36
	Y	39.11	5.29
	Z	34.08	3.06
Vertical descendente	X	52.04	11.49
	Y	74.29	10.25
	Z	59.97	8.09

+Las aceleración tabuladas corresponden al valor instantáneo máximo medido.

*Todo los valores RMS máximos tabulados corresponden al valor integrado de la banda de frecuencia de 150-200 [Hz].

A continuación, se analizan los resultados obtenidos en los vuelos estáticos, horizontales y verticales. En particular, se describe el comportamiento de las aceleraciones experimentadas por el dron F550, durante las maniobras de vuelo realizadas durante las distintas pruebas de vuelo.

4.4.1 Vuelos estáticos

Tal como se espera de un vuelo estático, la condición de operación de los motores es regular, lo que se refleja en el espectrograma de la Figura 39, donde se observa que las frecuencias vibratorias se mantienen sin mayores cambios durante toda la medición. Específicamente, se observan que las frecuencias más predominantes están alrededor de 180 [Hz]. Además, es posible apreciar que los motores no giran a las mismas RPM y que existen significativas variaciones en la frecuencia de rotación entre los 6 motores.

4.4.2 Vuelos horizontales

Los vuelos horizontales corresponden a lo que comúnmente se conoce como vuelo recto y nivelado. En los vuelos reportados, el dron realizó 2 vueltas en desplazamiento horizontal. La primera vuelta se realiza desde el tiempo 0 a 25 [s] y la segunda vuelta desde el tiempo 25 a 60 [s], lo que se delimita a través de una línea roja segmentada en la Figura 42. Se aprecia un comportamiento semejante respecto a las amplitudes de aceleración alcanzada en ambas vueltas. Al iniciar la prueba de vuelo, se observa un incremento en la frecuencia de la señal de aceleración registrada en el primer tramo de ida. Luego, al completar el tramo de ida los motores frenan lo que se aprecia con una disminución en la frecuencia. Finalizado el primer tramo de ida, se aprecia un tramo en que la frecuencia se mantiene regular, esto

ocurre cuando el dron está en modo de vuelo estático, *hover mode*. Nuevamente, cuando inicia el primer tramo de regreso se aprecia un aumento de la frecuencia de la señal vibratoria y al finalizar el tramo, una disminución. Lo anterior, se repite para el segundo tramo de ida y regreso. Se desprende, que existen mayores amplitudes de aceleración para los tramos de desplazamiento horizontal en comparación a los tramos de *hovering*. En la banda de frecuencia entre 150-250 [Hz], se registran los mayores valores de amplitud, que alcanzan 18.55 [dB/Hz] (aproximadamente $8.5 [m/s^2]$).

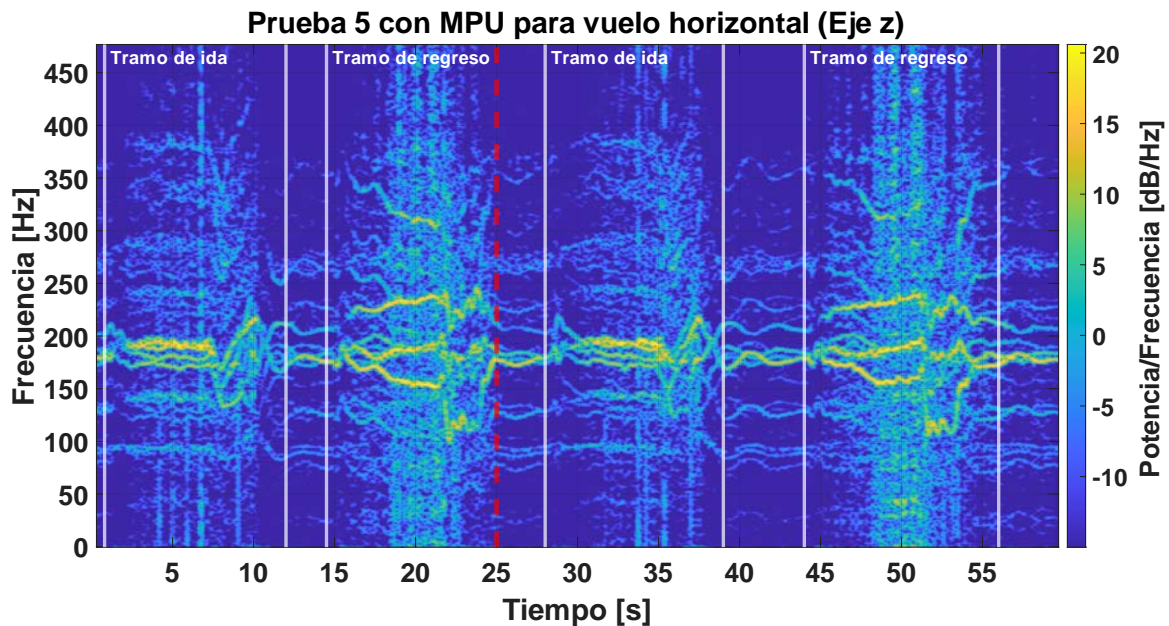


Figura 42. Espectrograma para vuelo horizontal con descripción detallada de los tramos de vuelo.

4.4.3 Vuelos verticales

A partir de las gráficas de aceleración vs tiempo, entre vuelos ascendentes y descendente, se evidencia que en los vuelos descendentes existen aceleraciones medidas de mayor amplitud que en los desplazamientos de forma ascendente del dron F550. Esto se explica debido a que, al descender el dron se encuentra con el aire que generan las mismas hélices (*downwash*) durante el descenso. Las hélices en movimiento generan perturbaciones en el flujo de aire, dejando una estela de aire turbulento bajo suyo. Esto significa que, mientras el dron descende, las hélices se enfrentan a las perturbaciones ocasionadas por su propio movimiento y trabajan con aire más turbulento. En consecuencia, existen mayores vibraciones percibidas por el dron en los tramos de descenso en comparación al ascenso, lo que se evidencia en la Figura 43. A modo de cuantificar el efecto del movimiento de las hélices sobre el aire, durante las pruebas experimentales se realizaron mediciones de la estela de viento bajo las hélices con el anemómetro CHY361. Se estimó que en promedio la velocidad bajo las hélices es de $0.85 [m/s]$ cuando el dron se encuentra en vuelo estático.

Similar al vuelo horizontal, en la Figura 43 se observa de forma más pronunciada que en el primer tramo de ascenso existe un incremento en la frecuencia de la señal de aceleración registrada. Al finalizar este tramo los motores frenan, por lo que existe una disminución en la frecuencia. Entre el tramo de ascenso y descenso el dron, se mantiene en modo de vuelo estático, por lo que la frecuencia es regular. Luego, al inicio del primer tramo de descenso, el dron debe descender por lo que disminuye

la frecuencia de giro de los motores, lo que se traduce en una disminución de la frecuencia en el espectrograma. Durante el tramo de descenso el dron, se enfrenta a las perturbaciones ocasionadas por su movimiento ascendente y se generaran irregularidades en la frecuencia. Lo anterior, se repite en el segundo tramo de ascenso y descenso. Al igual que en el vuelo horizontal, existen mayores amplitudes de aceleración en los tramos de desplazamiento vertical en comparación a los tramos de *hovering*. Es posible concluir que, para vuelos verticales, se registran los mayores valores de amplitud en la banda de frecuencia entre 150-250 [Hz].

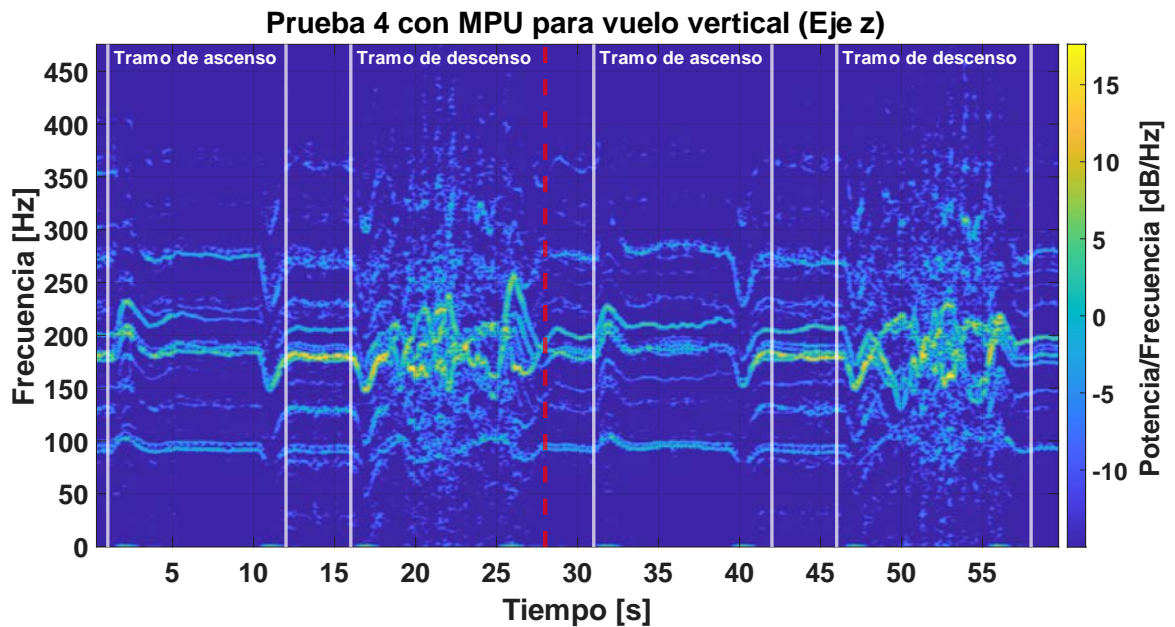


Figura 43. Espectrograma durante prueba de vuelo vertical con descripción detallada de los tramos de vuelo.

CAPÍTULO 5: Análisis técnico-económico

En este capítulo, se documenta un análisis técnico-económico del sistema de medición de vibraciones diseñado, a modo de evaluar el desempeño del sistema de medición y valorizar los costos asociados.

5.1 Análisis técnico

En esta sección, se realiza un análisis técnico de los tres acelerómetros digitales empleados en el sistema de medición de vibraciones, con el objetivo de identificar el acelerómetro más propicio en el estudio de las vibraciones del dron F550. Además, se evalúa la autonomía energética y de almacenamiento del sistema de medición.

5.1.1 Selección de acelerómetro

La selección de uno de los acelerómetros se basa en una metodología de ingeniería de sistemas, cuyas etapas son: (i) detectar un problema, (ii) diseñar un sistema de valores para el problema, (iii) sintetizar el sistema y (iv) seleccionar la mejor alternativa. En la selección de un acelerómetro, se consideran las siguientes características técnicas: frecuencia de muestreo máxima y real de operación, variación porcentual de la frecuencia de muestreo de operación, rango dinámico máximo y si tiene o no filtro análogo pasa bajo para eliminar el efecto de aliasing. Si bien los acelerómetros están diseñados para operar a cierta frecuencia de muestreo en la realidad esta frecuencia se ve reducida debido a retardos variables de la comunicación entre la RPi y los acelerómetros, por lo que se considera dentro de los criterios de selección la variación porcentual de la frecuencia de muestreo de operación. Para cuantificar las características mencionadas se diseña un sistema de valores, el cual se presenta en la Tabla 12.

Tabla 12. Sistema de valores utilizado en la selección de un acelerómetro digital.

Característica	Variable	Especificación	Valorización
F_s máxima	c_1	901-1000 701-900 Bajo 700	2 1 0
F_s de operación	c_2	901-1000 701-900 Bajo 700	4 2 0
Variación % de la F_s de operación	c_3	0-1 % Mayor a 1%	3 0
Rango dinámico máximo	c_4	16 8 Menor a 8	4 2 0
Filtro	c_5	Si No	1 0
Ancho de banda	c_6	500 Hz 400 Hz Menor a 400 Hz	2 1 0

A cada característica, se le asigna una variable c_i con $i = 1, 2, 3, \dots, 6$ y un valor según la especificación alcanzada por cada acelerómetro. A las características de mayor interés dentro del rango deseado especificado, se le asigna mayor puntaje en la columna de valorización. En la Tabla 13, se presenta la comparación entre los acelerómetros en base a los criterios mencionados.

Tabla 13. Tabla comparativa entre los acelerómetros digitales MMA8452, MPU6050 y MSA301

Criterio de selección	MMA8452	MPU6050	MSA301
F_s máxima	800 [Hz]	1000 [Hz]	1000 [Hz]
F_s promedio de operación	732 ± 3.5 [Hz]	950 ± 3.37 [Hz]	757 ± 1.28 [Hz]
Variación % de la F_s de operación	0.48%	0.35%	0.17%
Rango dinámico máximo	± 8 [g]	± 16 [g]	± 16 [g]
Filtro	Si, filtro pasa bajo	Si, filtro pasa bajo de 5-260 [Hz]	No
Ancho de banda	1-400 [Hz]	1-260 [Hz]	1.95-500 [Hz]

Para seleccionar un acelerómetro digital, es necesario crear un índice de mérito que permita evaluar la mejor alternativa en base a las características consideradas. Se decide escoger un índice de mérito equivalente a la suma directa de las valorizaciones de las características mencionadas, cuya función se presenta en la Ecuación (7). La función suma el valor de todas las características, por lo que un valor de índice que resulte mayor reflejará un mayor nivel de preferencia. En la Tabla 14, se presenta el análisis de las alternativas disponibles.

$$I_{\text{mérito}}(c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6) = \sum_{i=1}^6 c_i \quad (7)$$

Tabla 14. Análisis de alternativas en la selección de un acelerómetro digital.

Acelerómetro/Variable	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	$I_{\text{mérito}}$
MMA8452	1	2	3	2	1	1	10
MPU6050	2	4	3	4	1	0	14
MSA301	2	2	3	4	0	2	13

En bases a los criterios de selección y a través de la metodología de ingeniería de sistemas se decide continuar con el estudio con el acelerómetro digital MPU6050, puesto que satisface los requerimientos para el estudio de las vibraciones del dron F550 y corresponde, a la mejor alternativa de acuerdo con el índice de mérito planteado, ya que maximiza las características deseadas.

5.1.2 Evaluación de autonomía energética y de almacenamiento

La autonomía energética del sistema de medición de vibraciones alimentando a través de la batería LiPo Multistar corresponde a 5 horas. Esto se debe a que, por un lado, la potencia nominal de la RPi es de $5 \text{ [V]} \times 3 \text{ [A]} = 15 \text{ [W]}$, lo que equivale a un consumo de energía de 15 [Wh]. Notar que, durante la operación se consume una fracción de la potencia nominal que debe ser cuantificada, pero

a modo de mantener una evaluación conservadora y preliminar se utiliza este valor como referencia. Por otro lado, la batería es capaz de proveer un máximo de $14.8 \text{ [V]} \times 5.2 \text{ [Ah]} = 76.96 \text{ [Wh]}$. Luego, solo alimentando la RPi se tiene una autonomía de $76.96 \text{ [Wh]} / 15 \text{ [W]} \approx 5 \text{ [h]}$. Cabe mencionar, que se desprecia el consumo del acelerómetro, puesto que la potencia nominal es del orden de los [mW]. Como ejemplo, para el MPU6050 el consumo de corriente es de 500 [\mu A] y el voltaje nominal es de 3.46 [V] , luego la potencia nominal es equivalente a 17.3 [mW] .

La autonomía de almacenamiento del sistema de medición de vibraciones viene dada por la capacidad de la tarjeta SD en la RPi, que es de 32 [GB] . En el caso del acelerómetro MPU6050, un fichero de 1 minuto de datos capturados a una F_s de operación de 950 [Hz] ocupa un espacio de 4.75 [MB] . Por tanto, la autonomía de almacenamiento está dada por $32 \text{ [GB]} / 4.75 \text{ [MB/min]} \approx 115 \text{ [h]}$. Sin embargo, se debe descontar una fracción debido a la instalación del sistema operativo en la RPi. Una estimación conservadora de almacenamiento es 75% de 115 [h] equivalente 86 [h] aproximadamente.

5.2 Análisis económico

A continuación, se presenta el análisis económico del costo de implementación del sistema de medición de vibraciones en el dron hexarotor F550. En el análisis se consideran los costos de los componentes tales como: microcomputador, acelerómetros, elementos de conexión, el kit del dron F550, entre otros. En la Tabla 15, se entrega un resumen del costo contemplado por ítem. Según la Tabla 15, el costo del sistema de medición es de \$ 138.066.-, a lo que se le debe sumar el valor del kit del dron F550 y las horas correspondientes al servicio de un ingeniero en ejecución, obteniendo un total de \$ 2.067.825.-.

Tabla 15. Evaluación económica de la implementación del sistema de medición de vibraciones.

Componente	Costo [CLP]
Raspberry Pi 4B	\$ 72.317.-
Acelerómetro MMA8452	\$ 1.517.-
Acelerómetro MPU6050	\$ 3.452.-
Acelerómetro MSA301	\$ 3.600.-
Cables de conexión [40 u]	\$ 2.200.-
Filamento PLA, 1 [kg]	\$ 14.990.-
Pernos	\$ 5.000.-
Resina epóxica	\$ 10.000.-
Equipo de soldadura	\$ 24.990.-
Subtotal	\$ 138.066.-
Kit dron F550	\$ 201.759.-
Servicios de un ingeniero en ejecución	Tarifa: 1UF/hh
- Programación de módulos: 2 días (16 horas)	Total de hh estimado: 48 hh
- Diseño de housing para impresión 3D: 1 día (8 horas)	Total servicios de ingeniero: 48 UF
- Actividades de montaje: 2 días (16 horas)	(\$ 1.728.000.- UF al 25/06/2023)
- Pruebas de verificación: 1 día (8 horas)	
- Herramientas eléctricas y mecánicas incluido en tarifa	
Total	\$ 2.067.825.-

CAPÍTULO 6: Conclusiones

La literatura de métodos de estabilización de imagen en drones realza la importancia de contar con sistemas mecánicos de mitigación de vibraciones para reducir efectos de borrosidades y desencuadre de escena en las imágenes capturadas. En primer lugar, este tipo de estabilización corresponde al primer punto de acción en la reducción de las vibraciones y se puede complementar con métodos ópticos y digitales para asegurar una mejor calidad de imagen. En segundo lugar, el uso de métodos mecánicos, al reducir físicamente las vibraciones, permite proteger los componentes ópticos de los sistemas de imágenes.

En este trabajo se desarrolló, implementó, verificó y probó un sistema de medición de vibraciones a través de acelerómetros digitales para caracterizar las vibraciones que percibe un dron hexarotor en distintas fases de vuelo. Específicamente, las fases de vuelo estudiadas fueron: (i) vuelo estático a altura constante, (ii) vuelo horizontal a altura constante, y (iii) vuelo vertical ascendente y descendente. El sistema desarrollado es pequeño, desmontable, portátil y de bajo costo y consumo, por lo que es atractivo para sistemas de drones en variadas aplicaciones. Además, el sistema de adquisición de datos es de código abierto, fue programado en Python y opera online de forma remota mediante Wi-Fi.

En cuanto a la autonomía del sistema de mediciones, alimentando la RPi con una batería LiPo 5.200 [mAh] se tiene una autonomía energética de 5 horas aproximadamente y de acuerdo con las capacidades de almacenamiento de la tarjeta SD de la RPi de 32 [GB] se tienen 86 horas de almacenamiento de datos. Respecto a los costos de desarrollo del sistema de medición de vibraciones, se contempló un precio de \$ 138.066.- por concepto de equipos y materiales, a lo que se le debe sumar el valor del kit del dron y las horas correspondientes al servicio de un ingeniero en ejecución, obteniendo un total de \$ 2.067.825.-.

Por otra parte, en el sistema de medición de vibraciones, tres fueron los modelos de acelerómetros evaluados: MMA8452, MPU6050, MSA301. A partir de un análisis de ingeniería de sistema realizado, a través de un índice de mérito, se evaluaron las distintas características de los acelerómetros (frecuencia de muestreo, rango dinámico, opción de filtro digital pasa bajo, etc.) y su desempeño en las pruebas de vuelo, finalmente se recomienda el uso del modelo MPU6050 para continuar con el estudio.

A partir del sistema de medición de vibraciones desarrollado y las pruebas de vuelo realizadas, se confeccionó una base de datos que recopila los metadatos del ambiente y vuelo, parámetros de adquisición de datos y los valores de aceleración en los tres ejes. De esta forma, se cuenta con una fuente de información para analizar y determinar distintas características de las vibraciones del dron hexarotor estudiado.

Del análisis tiempo-frecuencia de las mediciones de vibraciones obtenidas en las pruebas de vuelo se concluye que:

- En base a las gráficas de las aceleraciones en el tiempo, se observa que el dron hexarotor presenta vibraciones en el rango de ± 8 [g].
- Se identifica, a partir de los espectros RMS por bandas de frecuencia, que las componentes de frecuencia de las vibraciones que se presentan en la estructura del dron y que se deben aislar mecánicamente, están preponderantemente en el rango de 150-250 [Hz].
- Se detectó que los motores no giran a las mismas RPM, existiendo significativas variaciones en la frecuencia de giro entre los 6 motores, claramente distinguible en los espectrogramas. Así mismo, se detectan familias de armónicos y sub-armónicos, posiblemente atribuibles a la rotación de los motores.
- Se detectó, a partir de los espectrogramas, tanto en las pruebas de desplazamiento verticales como en los horizontales, que las amplitudes de las componentes de frecuencia identificadas fueron mayores que en el caso de los vuelos estáticos. Además, se detectó que el valor de frecuencia asociado a estos pruebas, no permanece regular a diferencia del vuelo estático, donde se observa que las frecuencias vibratorias se mantienen sin mayores cambios durante la medición.
- Se detectó, a partir de los espectrogramas que, en condiciones de turbulencia, que se generan por ejemplo cuando un dron se encuentra con su propia estela, las vibraciones del dron se acentúan y las componentes de frecuencia son irregulares. Este comportamiento irregular producto de la estela se observó durante la ejecución de las pruebas de vuelo y se cuantificó por medio de un anemómetro digital, determinando una velocidad promedio de 8 [m/s] para la medición de la velocidad del aire bajo la hélice cuando el dron está en modo estático.
- Finalmente, y a modo general, se observa que los resultados obtenidos son consistentes con lo reportado en la literatura, que indica que las principales fuentes de vibración están asociadas al giro de los motores y las hélices.

De lo anterior, se valida la hipótesis de investigación que plantea que: *“Un sistema de medición de aceleración basado en un microcomputador y acelerómetros digitales a bordo, posibilita caracterizar la complejidad del comportamiento vibratorio que presenta un dron, debido a la acción conjunta de múltiples rotores en distintas fases del vuelo.”* Además, se cumplen los objetivos general y específicos, satisfactoriamente.

Trabajos Futuros

El sistema de medición implementado en este trabajo y, el rango de componentes de frecuencias de interés detectadas (150-250 [Hz]), son clave para guiar el desarrollo de una metodología de aislamiento de vibraciones del tipo mecánica-pasiva, con el fin de mejorar la calidad de imágenes capturadas durante un vuelo. Este tipo de estabilización es de particular interés dado que es una alternativa de baja complejidad, bajo costo y que, en comparación a métodos de compensación activos, no requiere de partes adicionales con arquitectura compleja y pesada, por lo tanto, más robusto. En un futuro, se desea determinar los parámetros del sistema dinámico dron + cámara + componentes de

aislamiento, que será modelado en conjunto como un sistema de movimiento de base con el fin de especificar las características del sistema de estabilización pasiva.

Además de la continuación natural del trabajo antes mencionada, la posibilidad de contar con un sistema de medición de vibraciones a bordo abre varias otras ramas de trabajo futuro:

- Es de interés poder relacionar las características vibratorias evidenciadas en los espectros de Fourier de las aceleraciones con la frecuencia rotacional de los ejes de los motores con el fin determinar, mediante *Computed Order Tracking*, qué componentes vibratorias están asociadas a la velocidad de rotación de los ejes.
- Dado que a partir de los espectros de Fourier de las aceleraciones es posible notar la contribución de cada rotor, resulta de interés estudiar los efectos que el control de sincronización de motores puede acarrear en la generación de vibraciones en el dron.
- La capacidad de poder medir de forma remota y en línea la vibración da pie para producir un sistema de diagnóstico online del estado del dron durante vuelo que permita mejorar la operación de los sensores a bordo.
- Con el sistema de medición de vibraciones diseñado es posible, abordar temas de estudios con relación al desbalance de las hélice, la desincronización de los motores y/o el desarrollo de estructura de multi rotor que transmita menores vibraciones.
- Dado que el sistema de medición de vibraciones es portátil y opera de forma remota mediante Wi-Fi, es posible realizar estudios de vibraciones en otros sistemas que no sean drones.
- Como el lenguaje utilizado para la programación del sistema de medición de vibraciones es modificable, esto permite “mejorar el programa” e incorporar herramientas de análisis.

Bibliografía

- [1] Á. Madridano, S. Campos, A. Al-Kaff, F. García, D. Martín, and A. Escalera, “Vehículo aéreo no tripulado para vigilancia y monitorización de incendios,” *Rev. Iberoam. Automática e Informática Ind.*, vol. 17, pp. 254–263, 2020.
- [2] A. Cabrera, “Diseño de un vehículo aéreo no tripulado (UAV) para monitorear los recursos hídricos del Parque Nacional Cajas,” 2021.
- [3] P. Baquero and R. Vásquez, “EMPLEO DE LOS UAV , EN OPERACIONES DE SEGURIDAD Y VIGILANCIA EN LAS ÁREAS ESTRATÉGICAS EN EL ECUADOR,” *Rev. Ciencias Secur. y Def.*, vol. IV, no. 4, pp. 86–100, 2019.
- [4] J. Navarro, F. Parca, and G. Mancilla, “Radar and UAV: georeferencing and airspace surveillance system,” *Visión Electrónica*, vol. 11, no. 2, pp. 190–199, 2017.
- [5] D. Chica, “Evaluación tecnológica de vehículo aéreo no tripulado (Dron) para el control de riesgos laborales en la construcción de un túnel en la ciudad de Cariamanga-Ecuador.,” 2021.
- [6] R. Llasag, D. Marcillo, C. Grilo, and C. Silva, “Human Detection for Search and Rescue Applications with UAVs and Mixed Reality Interfaces,” 2019.
- [7] J. Windau and L. Itti, “Multilayer Real-Time Video Stabilization,” in *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2011, vol. 1, no. 213.
- [8] M. Verma and C. Collette, “Active Vibration Isolation System for Drone Cameras. En: Proceedings of the 14th International Conference on Vibration Problems. Lecture in Mechanical Engineering.,” *Springer, Singapore*, pp. 1067–1084, 2021, doi: https://doi.org/10.1007/978-981-15-8049-9_67.
- [9] Z. Duric and A. Rosenfeld, “Image sequence stabilization in real time,” *Real-Time Imaging*, vol. 2, no. 5, pp. 271–284, 1996, doi: 10.1006/rtim.1996.0029.
- [10] R. Y. Park, J. M. Pak, C. K. Ahn, and M. T. Lim, “Image stabilization using FIR filters,” *ICCAS 2015 - 2015 15th Int. Conf. Control. Autom. Syst. Proc.*, no. Iccas, pp. 1234–1237, 2015, doi: 10.1109/ICCAS.2015.7364819.
- [11] G. Guido, V. Gallelli, D. Rogano, and A. Vitale, “Evaluating the accuracy of vehicle tracking data obtained from Unmanned Aerial Vehicles,” *Int. J. Transp. Sci. Technol.*, vol. 5, no. 3, pp. 136–151, 2016, doi: 10.1016/j.ijtst.2016.12.001.
- [12] Z. Li, M. Lao, S. K. Phang, M. R. A. Hamid, K. Z. Tang, and F. Lin, “Development and Design Methodology of an Anti-Vibration System on Micro-UAVs,” in *International Micro Air Vehicle Conference and Flight Competition*, 2017, pp. 223–228.
- [13] A. Robledo Acosta, “Modelo educativo ofrecido por CDIO como soporte curricular en programas académicos de la facultad de ingeniería de la Universidad Autónoma del Caribe,” 2019.
- [14] DJI, “FlameWheel 550 User Manual 2.” pp. 1–9, 2015, [Online]. Available: http://dl.djicdn.com/downloads/flamewheel/en/F550_User_Manual_v2.0_en.pdf.
- [15] M. Alveal, “Manual de implementación del RPA DJI.” 2022.
- [16] PX4 Dev Team, “HKPilot32 Flight Controller,” 2020. https://docs.px4.io/v1.9.0/en/flight_controller/HKPilot32.html#key-features (accessed Jun. 03, 2023).
- [17] ArduPilot Dev Team, “Mission Planner,” 2023. <https://ardupilot.org/planner/index.html> (accessed May 23, 2023).
- [18] M. Semeria, “Los tres teoremas: Fourier - Nyquist - Shannon,” Universidad del Centro de Estudios Macroeconómicos de Argentina (UCEMA), 2015.
- [19] C. Ge, K. Dunno, M. A. Singh, L. Yuan, and L.-X. Lu, “Development of a Drone’s Vibration, Shock, and Atmospheric Profiles,” *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 5176, 2021, doi:

- 10.3390/app11115176.
- [20] MEMSensing Microsystems Co., “MSA301 Digital Triaxial Accelerometer.” pp. 1–36, 2016, [Online]. Available: http://www.papersearch.net/view/detail.asp?detail_key=10000715.
 - [21] Freescale Semiconductor, “MMA8452Q.” pp. 1–47, 2012.
 - [22] InvenSense, “MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.3.” pp. 1–54, 2012, [Online]. Available: www.invensense.com.

Anexo A: Pasos para el montaje del dron F550

A continuación, se describe el procedimiento del montaje del dron F550.

1. Unión apernada de la placa inferior con los 6 brazos estructurales: Se utilizan 2 pernos M3 para unir cada brazo estructural a la placa. Notar, que la placa inferior tiene un receptor RC, el cual debe quedar en posición hacia arriba, según la Figura 44. Los brazos de color rojo indican la parte delantera del dron.

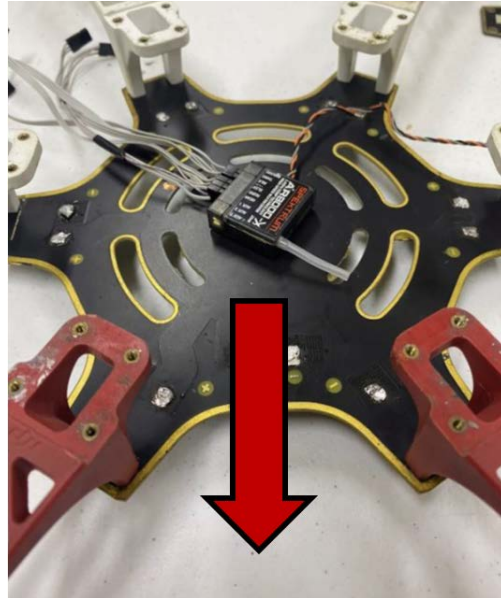


Figura 44. Placa inferior con brazos estructurales apernados con receptor RC visible [15].

2. Instalación de los motores en los extremos de los brazos: Se instala un motor por cada brazo estructural de forma intercalada de acuerdo con su sentido de giro, según la Figura 45. Es importante, mantener la referencia de la posición delantera del dron para la instalación adecuada de los motores. Teniendo los motores instalados se pueden atornillar las hélices, según corresponda por su sentido de giro, a cada uno de ellos. Sin embargo, por seguridad se mantienen los motores sin sus hélices mientras se esté manipulando el dron.

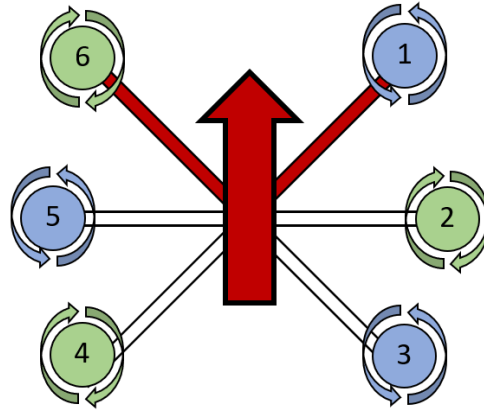


Figura 45. Distribución y sentido de giro de los motores.

3. Instalación de los ESC entre la placa inferior y los motores: Se ubica un ESC en cada brazo estructural sujetada con un amarra cables. Luego, se conectan los cables del motor a los conectores del ESC. Se suelda el cable rojo (positivo) y negro (negativo) a la placa del dron y los cables restantes se conectarán posteriormente al autopiloto. En la Figura 46, se evidencia la instalación de los ESC.

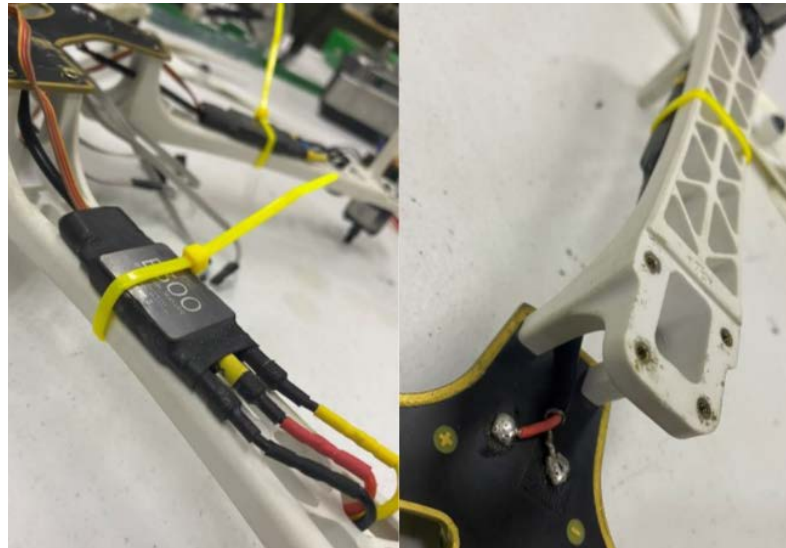


Figura 46. Instalación ESC en brazo estructurales: a) Cables de los motores conectados al ESC. b) Cables positivo y negativo de la ESC conectados a la placa inferior del dron [15].

4. Conexión batería y módulo de poder: El conector de la batería se adhiere a la placa inferior del dron con resina epóxica y se sueldan los cables rojo y negro a la placa, en el positivo y negativo respectivamente. Un extremo del conector del módulo de poder se conecta y el otro queda libre para la conexión de la batería. Adicionalmente, en el centro del módulo de poder se conecta el cable que alimenta el autopiloto. En la Figura 47 queda representado este paso.

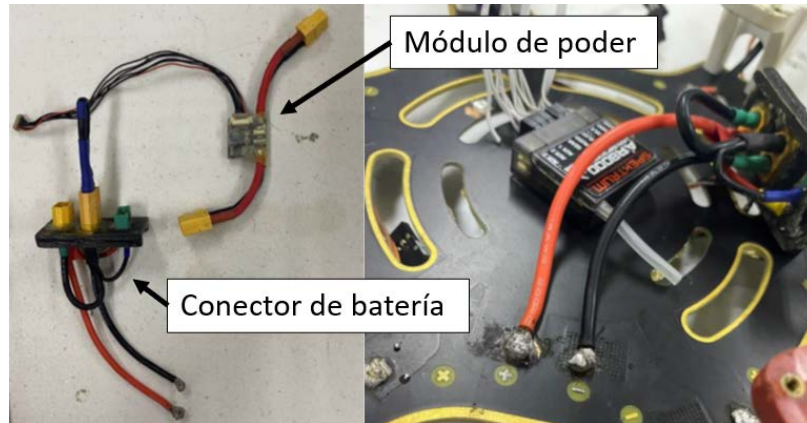


Figura 47. Implementación del conector de la batería.

5. Instalación antena GPS y radio telemetría: En un esquina de la placa inferior se atornilla la antena GPS. De forma similar, en un compartimiento, se une la radio telemetría en otra esquina de la placa inferior.
6. Instalación autopiloto: El autopiloto se adhiere al centro de la placa inferior. Luego, se debe realizar el cableado de las componentes. Se conectan los motores, el receptor RC, la antena GPS y el módulo de poder. En la Figura 48, se aprecian las conexiones al autopiloto.

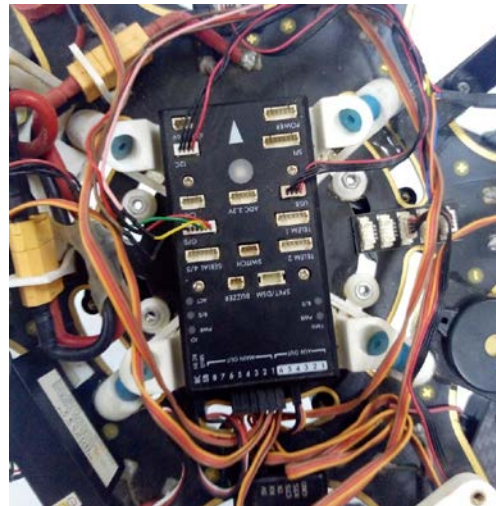


Figura 48. Implementación del Autopiloto HKPilot42 a la placa inferior del dron F550 y conexiones de cableado.

7. Instalación placa superior: Se ubica la placa superior sobre el cuerpo del dron, a modo que queden sus esquinas sobre los extremos cercanos al cuerpo del dron de los brazos estructurales. Se utilizan 4 pernos M2.5 para unir cada brazo estructural a la placa superior.
8. Instalación del tren de aterrizaje: El tren de aterrizaje va apernado a la placa inferior, para ellos se utilizan 3 pernos M3.
9. Ubicación y conexión batería: La batería queda alojada en la parte central de la placa superior y va sujeta con 2 correas de batería Multistar. Para la alimentación del sistema se conecta el conector XT60 hembra de la batería al conector XT60 macho del conector de batería previamente instalado en el dron.

Anexo B: Procedimiento de soldadura de pines

Previo a la conexión física entre los acelerómetros digitales y la RPI, se debe soldar los pines en la ubicación establecida para las placas MPU6050, MSA301 y MMA8452 respectivamente. Para todas las placas se unen cabeceras macho rectas. El material aglutinante utilizado para la soldadura fue estaño y la temperatura de soldadura seteada fue de 340 [°C]. Los pasos a seguir para realizar la soldadura con estaño se describen a continuación y el equipo de soldadura se presenta en la Figura 49.

1. Asegurar la correcta limpieza de las piezas a soldar y de la punta del soldador.
2. Calentar el soldador hasta una temperatura de 340 [°C].
3. Sujeción de acelerómetro con sistema de soporte de pinzas (tercera mano de soldar).
4. Ubicación de los pines (cabeceras macho rectas) sobre la placa del acelerómetro.
5. Calentar con la punta del soldador la zona que se va a soldar.
6. Colocar un poco de estaño en la punta del soldador.
7. Estañar unión de las piezas a soldar. Unir pin con placa en compartimiento asignado.
8. Dejar enfriar zona recientemente soldada.
9. Limpiar punta del soldador.
10. Repetir los pasos 5-9 para cada pin del set.
11. Revisión de continuidad y traspaso con multímetro digital: Se debe asegurar la continuidad eléctrica en cada pin y que no exista traspaso entre pines.
12. Repetir los pasos 1-10 para cada acelerómetro.



Figura 49. Equipo de soldadura utilizado.

Anexo C: Implementación de las conexiones entre los acelerómetros y la RPi

Para conectar cada acelerómetro a la placa de la RPi se utilizan 12 cables de puente hembra a hembra. Se utilizan 4 cables por acelerómetro, para las conexiones de los pines de alimentación, SDA, SCL y GNS. Los pines de alimentación de 3.3 [V] (pines 1 y 17, mostrados en la Figura 12) de la RPi entregan una corriente máxima disponible de 50 [mA]. Como la RPi tiene 2 pines asignado a la alimentación de 3.3 [V] se decide conectar el acelerómetro MSA301 al pin 1 y los dos acelerómetros MPU6050 y MMA8452 en paralelo al pin 17. Los acelerómetros digitales conectados en paralelo recibirán el mismo voltaje, pero corriente distribuida. Luego, se conectan los pines de tierra, se asignan los pines 6,9 y 14 (GND) de la RPi al MSA301, MMA8452 y MPU6050 respectivamente. Por último, es necesario asignar un número de bus a cada acelerómetro. Por defecto, la RPi tiene únicamente 2 pines GPIO (GPIO 2(SDA) y GPIO 3(SCL)) para el bus I2C número 1, por lo que se requiere la creación de dos bus I2C adicionales mediante software. Se utilizan los pines GPIO 17,27,23 y 24 para crear los buses crear 3 y 4 respectivamente. Notar que el bus 0 y 2 no se utilizan, ya que cumplen otra funcionalidad. Para la creación del bus 3 y 4 se modifica el archivo config en la tarjeta SD de la RPi. Se agregan las siguientes líneas de código para asignar al bus 4 los pines GPIO 23 y GPIO 24 como SDA y SCL y al bus 3 los pines GPIO 17 y GPIO 27 como SDA y SCL respectivamente.

```
%Crear bus 4 asignando pines GPIO 23 como SDA y GPIO 24 como SCL
dtoverlay=i2c-gpio, bus=4, i2c_gpio_delay_us=1, i2c_gpio_sda=23,
i2c_gpio_scl=24

%Crear bus 3 asignando pines GPIO 17 como SDA y GPIO 27 como SCL
dtoverlay=i2c-gpio, bus=3, i2c_gpio_delay_us=1, i2c_gpio_sda=17,
i2c_gpio_scl=27
```

Una vez realizada la modificación del archivo config se reinicia la RPi con todos los pines conectados. Finalizado este paso y con todas las conexiones implementadas es posible operar los acelerómetros digitales a través del software de la RPi.

Anexo D: Programas de medición de vibraciones

En este anexo se encuentran disponibles los programas de medición creados para los acelerómetros digitales MMA8452, MPU6050 y MSA301. El lenguaje de programación utilizados para todos los programas es Python.

Anexo D.1. Programa de medición de vibraciones con MMA8452

A continuación, se encuentra disponible el código de programación creado para la realización de las mediciones con el acelerómetro digital MMA8452.

```
import smbus
import time
import numpy as np
from ast import literal_eval
from datetime import datetime

bus = smbus.SMBus(3) # I2C address of the device
MMA8452Q_DEFAULT_ADDRESS = 0x1D
# MMA8452Q Register Map
MMA8452Q_REG_STATUS = 0x00 # Data status Register
MMA8452Q_REG_OUT_X_MSB = 0x01 # Output Value X MSB por transmision no lo puede
#transmitir en un solo paquete de 16 bits
MMA8452Q_REG_OUT_X_LSB = 0x02 # Output Value X LSB
MMA8452Q_REG_OUT_Y_MSB = 0x03 # Output Value Y MSB
MMA8452Q_REG_OUT_Y_LSB = 0x04 # Output Value Y LSB
MMA8452Q_REG_OUT_Z_MSB = 0x05 # Output Value Z MSB
MMA8452Q_REG_OUT_Z_LSB = 0x06 # Output Value Z LSB
MMA8452Q_REG_SYSMOD = 0x0B # System mode Register
MMA8452Q_REG_INT_SOURCE = 0x0C # System Interrupt Status Register
MMA8452Q_REG_WHO_AM_I = 0x0D # Device ID Register
MMA8452Q_REG_XYZ_DATA_CFG = 0x0E # Data Configuration Register
MMA8452Q_REG_CTRL_REG1 = 0x2A # Control Register 1
MMA8452Q_REG_CTRL_REG2 = 0x2B # Control Register 2
MMA8452Q_REG_CTRL_REG3 = 0x2C # Control Register 3
MMA8452Q_REG_CTRL_REG4 = 0x2D # Control Register 4
MMA8452Q_REG_CTRL_REG5 = 0x2E # Control Register 5
# MMA8452Q Data Configuration Register
MMA8452Q_DATA_CFG_HPF_OUT = 0x10 # Output Data High-Pass Filtered
MMA8452Q_DATA_CFG_FS_2 = 0x00 # Full-Scale Range = 2g
MMA8452Q_DATA_CFG_FS_4 = 0x01 # Full-Scale Range = 4g
MMA8452Q_DATA_CFG_FS_8 = 0x02 # Full-Scale Range = 8g
# MMA8452Q Control Register 1
MMA8452Q_ASLP_RATE_50 = 0x00 # Sleep mode rate = 50Hz
MMA8452Q_ASLP_RATE_12_5 = 0x40 # Sleep mode rate = 12.5Hz
MMA8452Q_ASLP_RATE_6_25 = 0x80 # Sleep mode rate = 6.25Hz
MMA8452Q_ASLP_RATE_1_56 = 0xC0 # Sleep mode rate = 1.56Hz
MMA8452Q_ODR_800 = 0x00 # Output Data Rate = 800Hz
```

```

MMA8452Q_ODR_400 = 0x08 # Output Data Rate = 400Hz
MMA8452Q_ODR_200 = 0x10 # Output Data Rate = 200Hz
MMA8452Q_ODR_100 = 0x18 # Output Data Rate = 100Hz
MMA8452Q_ODR_50 = 0x20 # Output Data Rate = 50Hz
MMA8452Q_ODR_12_5 = 0x28 # Output Data Rate = 12.5Hz
MMA8452Q_ODR_6_25 = 0x30 # Output Data Rate = 6.25Hz
MMA8452Q_ODR_1_56 = 0x38 # Output Data Rate = 1_56Hz
MMA8452Q_MODE_NORMAL = 0x00 # Normal Mode
MMA8452Q_MODE_REDUCED_NOISE = 0x04 # Reduced Noise Mode
MMA8452Q_MODE_FAST_READ = 0x02 # Fast Read Mode
MMA8452Q_MODE_ACTIVE = 0x01 # Active Mode
MMA8452Q_MODE_STANDBY = 0x00 # Standby Mode

#Configuraciones de escala
# 2g
#FS = 0
#aRes = 0.009574987787005374
# 4g
#FS = 1
#aRes = 0.009574987787005374*2
# 8g
FS = 2
aRes = 0.009574987787005374*4

def mode_configuration():
    """Select the Control Register-1 configuration of the accelerometer from the given
    provided values"""
    MODE_CONFIG = (MMA8452Q_ODR_800 | MMA8452Q_MODE_NORMAL | MMA8452Q_MODE_ACTIVE)
    bus.write_byte_data(MMA8452Q_DEFAULT_ADDRESS, MMA8452Q_REG_CTRL_REG1, MODE_CONFIG)
def data_configuration():
    """Select the Data Configuration Register configuration of the accelerometer from
    the given provided values"""
    DATA_CONFIG = (MMA8452Q_DATA_CFG_FS_4)
    bus.write_byte_data(MMA8452Q_DEFAULT_ADDRESS, MMA8452Q_REG_XYZ_DATA_CFG,
    DATA_CONFIG)
def read_accl():
    """Read data back from MMA8452Q_REG_STATUS(0x00), 7 bytes
    Status register, X-Axis MSB, X-Axis LSB, Y-Axis MSB, Y-Axis LSB, Z-Axis MSB, Z-
    Axis LSB"""
    data = bus.read_i2c_block_data(MMA8452Q_DEFAULT_ADDRESS, MMA8452Q_REG_STATUS, 7)

    xAccl = (data[1] * 256 + data[2]) / 16 #concatena data 1 y data 2
    if xAccl > 2047 :
        xAccl -= 4096
    yAccl = (data[3] * 256 + data[4]) / 16 # divide por 16 pq usa la mitad 2**4 de
    los 8 digitos, al dividir recupera 12 digitos
    if yAccl > 2047 :
        yAccl -= 4096
    zAccl = (data[5] * 256 + data[6]) / 16 # /16 se corren a la derecha
    if zAccl > 2047 :

```

```

zAccl -= 4096

#Parametros de calibración
m_x = 0.990
m_y = 0.993
m_z = 1.006
b_x = 0.110
b_y = -0.007
b_z = 0.086

#Escalamiento
#xAccl = 9.8*2*xAccl/(2**11-1) #la escala representa a 2g pq esta iniciada en
#esa configuración por eso x2x9.8
#yAccl = 9.8*2*yAccl/(2**11-1) #rango en m/s transformación de cuentas
#digitales a m/s
#zAccl = 9.8*2*zAccl/(2**11-1) # se divide en 2**11 pq se perdio un bit para el
#valo +- y resta -1 por el espacio
xAccl = np.round((aRes*xAccl*m_x + b_x)*1000)/1000 #*1000)/1000 para dejar 3
#decimales, no uso el ,3 pq es más lento
yAccl = np.round((aRes*yAccl*m_y + b_y)*1000)/1000
zAccl = np.round((aRes*zAccl*m_z + b_z)*1000)/1000

return {'x' : xAccl, 'y' : yAccl, 'z' : zAccl}

def mma_captura(nombre_archivo,t_max):
    n_max = 800*t_max
    a_file = open("/home/rpi/Desktop/codigos/Vuelos/MMA_" + nombre_archivo + ".txt",
"w")
    mode_configuration()
    data_configuration()
    for count in range(0,n_max,1):
        accl = read_accl()
        a_file.write(datetime.now().isoformat(sep=' ',timespec='microseconds') + ', '
+ str((accl['x'],accl['y'],accl['z']))[1:-1] + '\n') # [1:-1] elimina la ( inicial y
) final
        time.sleep(0.0008) #para evitar que se repitan datos la frecuencia de
#muestreo debe ser menor a 800 Hz
    a_file.close()

#Codigo principal
if __name__ == "__main__":
    MODE_CONFIG = (MMA8452Q_ODR_800 | MMA8452Q_MODE_NORMAL | MMA8452Q_MODE_STANDBY)
    bus.write_byte_data(MMA8452Q_DEFAULT_ADDRESS, MMA8452Q_REG_CTRL_REG1, MODE_CONFIG)
    bus.write_byte_data(MMA8452Q_DEFAULT_ADDRESS, MMA8452Q_REG_XYZ_DATA_CFG,FS)
    mode_configuration()

    print("Programa captura datos de MMA8452 v1.0 Karen Riedel")
    # ingresar nombre de archivo y tiempo
    nombre_archivo = input("Ingrese nombre de archivo: ")
    t_max = literal_eval(input("Ingrese tiempo de grabación [s]: "))

```

```

print("Grabando datos MMA...")
mma_captura(nombre_archivo,t_max)
print(";Datos guardados MMA!")

```

Anexo D.2. Programa de medición de vibraciones con MPU6050

A continuación, se encuentra disponible el código de programación creado para la realización de las mediciones con el acelerómetro digital MPU6050.

```

import smbus
import time
import math
import RPi.GPIO as GPIO
import sys
from ast import literal_eval
from datetime import datetime

DLPF_CFG      = 0x1A
PWR_MGMT_1    = 0x6B
SMPLRT_DIV    = 0x19
CONFIG        = 0x1A
GYRO_CONFIG   = 0x1B
INT_ENABLE    = 0x38
ACCEL_XOUT_H  = 0x3B
ACCEL_YOUT_H  = 0x3D
ACCEL_ZOUT_H  = 0x3F
GYRO_XOUT_H   = 0x43
GYRO_YOUT_H   = 0x45
GYRO_ZOUT_H   = 0x47
ACCEL_CONFIG  = 0x1C
bus = smbus.SMBus(4)

#Configuraciones de escala
# 2g
#aRes = 2.0/32768.0
#AFS_SEL = 0
# 4g
#aRes = 4.0/32768.0
#AFS_SEL = 1
# 8g
#aRes = 8.0/32768.0
AFS_SEL = 2
# 16 g
#aRes = 16.0/32768.0
#AFS_SEL = 3

#Parametros de calibración (frecuencia de muestreo de calibración 9.89)

```

```

m_x = 1.023
m_y = 1.012
m_z = 0.964
b_x = -0.711
b_y = -0.074
b_z = -0.395

#las señales que van a sobrevivir son hasta 260 Hz, y su frecuencia de muestreo es de
#1kHz (son señales continuas de máximo 260hz
#estoy leyendo el bus directamente, no hay librería de funciones se comunica
#directamente con el acelerómetro es constante
def MPU_Init(Device_Address):
    bus.write_byte_data(Device_Address, DLPF_CFG, 0) #no estaba seteado esta
#ustando filtro de 260 Hz anchodebanda solo va a reconstruir datos hasta 260 hz, pero
#van a salir bien
    bus.write_byte_data(Device_Address, SMPLRT_DIV, 0) #con 0 indica que frecuencia
de muestreo max es 1kHz# era , 7
    bus.write_byte_data(Device_Address, PWR_MGMT_1, 1)
    bus.write_byte_data(Device_Address, CONFIG, 0)
    bus.write_byte_data(Device_Address, GYRO_CONFIG, 24)
    bus.write_byte_data(Device_Address, INT_ENABLE, 0) #antes era , 1

def read_raw_data(addr):
    high = bus.read_byte_data(Device_Address, addr)
    low = bus.read_byte_data(Device_Address, addr+1)
    value = ((high << 8) | low)
    if(value > 32768):
        value = value - 65536
    return value

#Funciones adicionales con operaciones matemáticas extras
def dist(a, b):
    return math.sqrt((a*a) + (b*b))

def get_y_rotation(x, y, z):
    radians = math.atan2(y, z)
    return -(radians * (180.0 / math.pi))

def get_x_rotation(x, y, z):
    radians = math.atan2(x, dist(y, z))
    return -(radians * (180.0 / math.pi))

def mpu_captura(nombre_archivo,t_max):
    n_max = 1000*t_max
    a_file = open("/home/rpi/Desktop/codigos/Vuelos/MPU_" + nombre_archivo + ".txt",
"w")
    for count in range(0,n_max,1):
        acc_x = read_raw_data(ACCEL_XOUT_H)
        acc_y = read_raw_data(ACCEL_YOUT_H)
        acc_z = read_raw_data(ACCEL_ZOUT_H)

```

```

        acclX_scaled = (acc_x * aRes * 9.80665)*m_x + b_x      #equivalente a dividir
#por 1/(2**14-1) resolución de 14 bits
        acclY_scaled = (acc_y * aRes * 9.80665)*m_y + b_y
        acclZ_scaled = (acc_z * aRes * 9.80665)*m_z + b_z

        a_file.write(datetime.now().isoformat(sep=' ',timespec='microseconds') + ', '
+ str((acclX_scaled,acclY_scaled,acclZ_scaled))[1:-1] + '\n') # [1:-1] elimina la (
inicial y ) final
        time.sleep(0.00025)
        a_file.close()

#Codigo principal
if __name__ == "__main__":
    Device_Address = 0x68
    MPU_Init(Device_Address)                #Llamado a funcion de inicializacion

    #R = bus.read_byte_data(Device_Address, ACCEL_CONFIG)
    #print(R)
    bus.write_byte_data(Device_Address, ACCEL_CONFIG, (AFS_SEL << 3) )
    #R = bus.read_byte_data(Device_Address, ACCEL_CONFIG)
    #print(R)
    print("Programa captura datos de MPU6050 v1.0 Karen Riedel")
    # ingresar nombre de archivo y tiempo
    nombre_archivo = input("Ingrese nombre de archivo: ")
    t_max = literal_eval(input("Ingrese tiempo de grabación [s]: "))
    print("Grabando datos MPU...")
    mpu_captura(nombre_archivo,t_max)
    print("¡Datos guardados MPU!")

```

Anexo D.3. Programas de medición de vibraciones con MSA301.

A continuación, se encuentra disponible el código de programación creado para la realización de las mediciones con el acelerómetro digital MSA301.

```

import msa301
import time
import smbus
from ast import literal_eval
from datetime import datetime

#Parametros de calibración (frecuencia de muestreo calibración 9.92)
m_x = -1.024 #Valor negativo pq está al revés en la impresión del acelerómetro
m_y = -1.024 #Valor negativo pq está al revés en la impresión del acelerómetro
m_z = 1
b_x = 0.039
b_y = -0.1

```

```

b_z = -1.471

bus = smbus.SMBus(1)
accel = msa301.MSA301(i2c_dev=bus)
accel.set_power_mode('normal')
accel.set_range(8) #Rango de resolución del instrumento 8g
accel.set_resolution(14) #14 bits (ej.regla con mm) necesito seguir la señal
#entonces requiero todo el detalle
accel.set_output_data_rate('1000Hz') #Frecuencia de muestreo máxima seteada
accel.disable_all_interrupts()
accel.set_power_mode('normal')

def msa_captura(nombre_archivo,t_max):
    n_max = 1000*t_max
    a_file = open("/home/rpi/Desktop/codigos/Vuelos/MSA_" + nombre_archivo + ".txt",
"w")

    for count in range(0,n_max,1):

        z, y, x = accel.get_measurements() #Se invierte el x con z pq está al revés
#en la impresión del acelerómetro
        acclX_scaled = (x * 9.80665)*m_x + b_x
        acclY_scaled = (y * 9.80665)*m_y + b_y
        acclZ_scaled = (z * 9.80665)*m_z + b_z

        a_file.write(datetime.now().isoformat(sep=' ',timespec='microseconds') + ', '
+ str((acclX_scaled,acclY_scaled,acclZ_scaled))[1:-1] + '\n') # [1:-1] elimina la (
inicial y ) final
        #a_file.write(str((x,y,z))[1:-1]) # [1:-1] elimina la ( inicial y ) final
        #print(acclX_scaled,acclY_scaled,acclZ_scaled)
        time.sleep(0.0006)
    a_file.close()

if __name__ == "__main__":
    print("Programa captura datos de MSA301 v1.0 Karen Riedel")
    # ingresar nombre de archivo y tiempo
    nombre_archivo = input("Ingrese nombre de archivo: ")
    t_max = literal_eval(input("Ingrese tiempo de grabación [s]: "))
    print("Grabando datos MSA...")
    msa_captura(nombre_archivo,t_max)
    print(";Datos guardados MSA!")

```


Anexo E: Diseño de housing y placas de unión

E.1. Diseño de housing

En este apartado, se presentan los planos de dibujo correspondientes a los housing de los acelerómetros digitales. En las Figuras 50, 51, 52, 53, 54 y 55, se presentan los planos de las tapas y bases de los housing de los acelerómetros MMA8452, MPU6050 y MSA301 respectivamente.

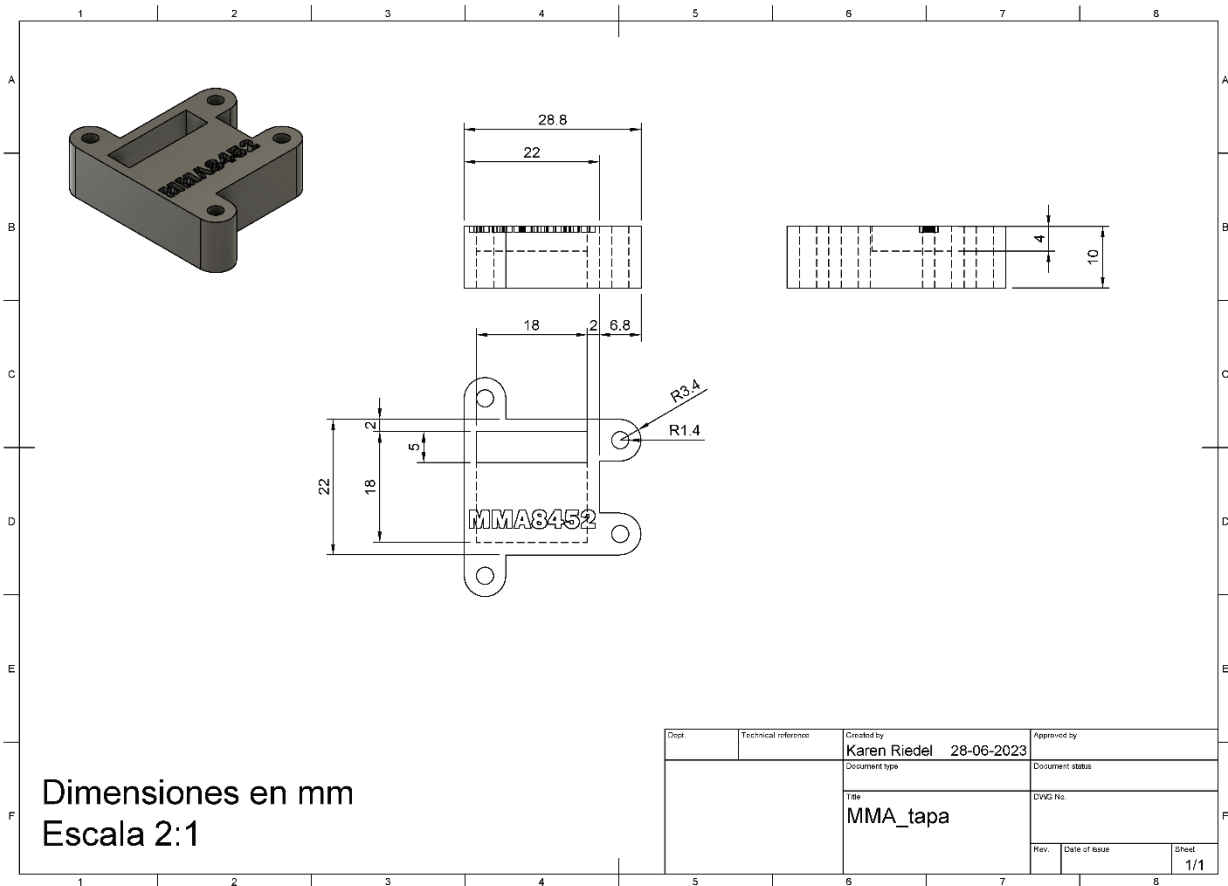


Figura 50. Plano de dibujo correspondiente a la tapa del housing del acelerómetro MMA8452.

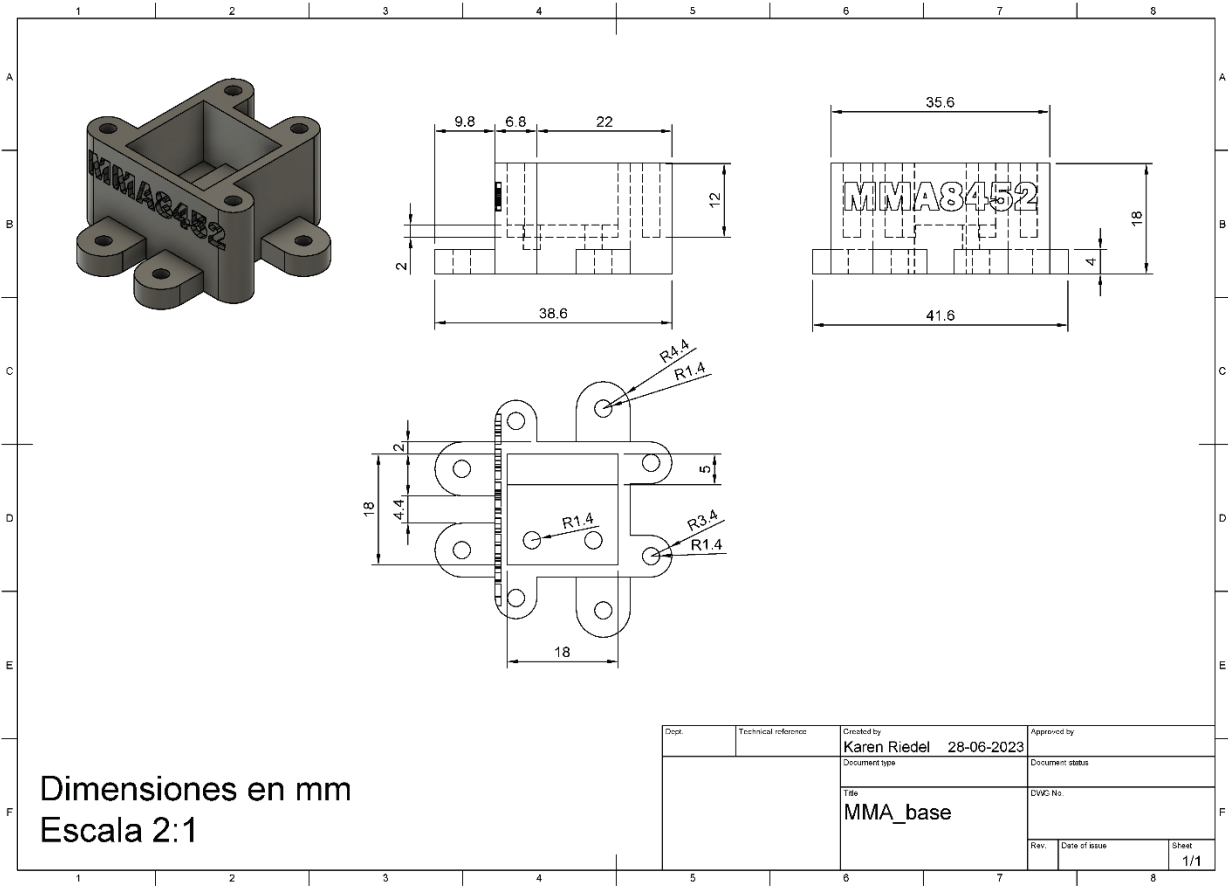


Figura 51. Plano de dibujo correspondiente a la base del housing del acelerómetro MMA8452.

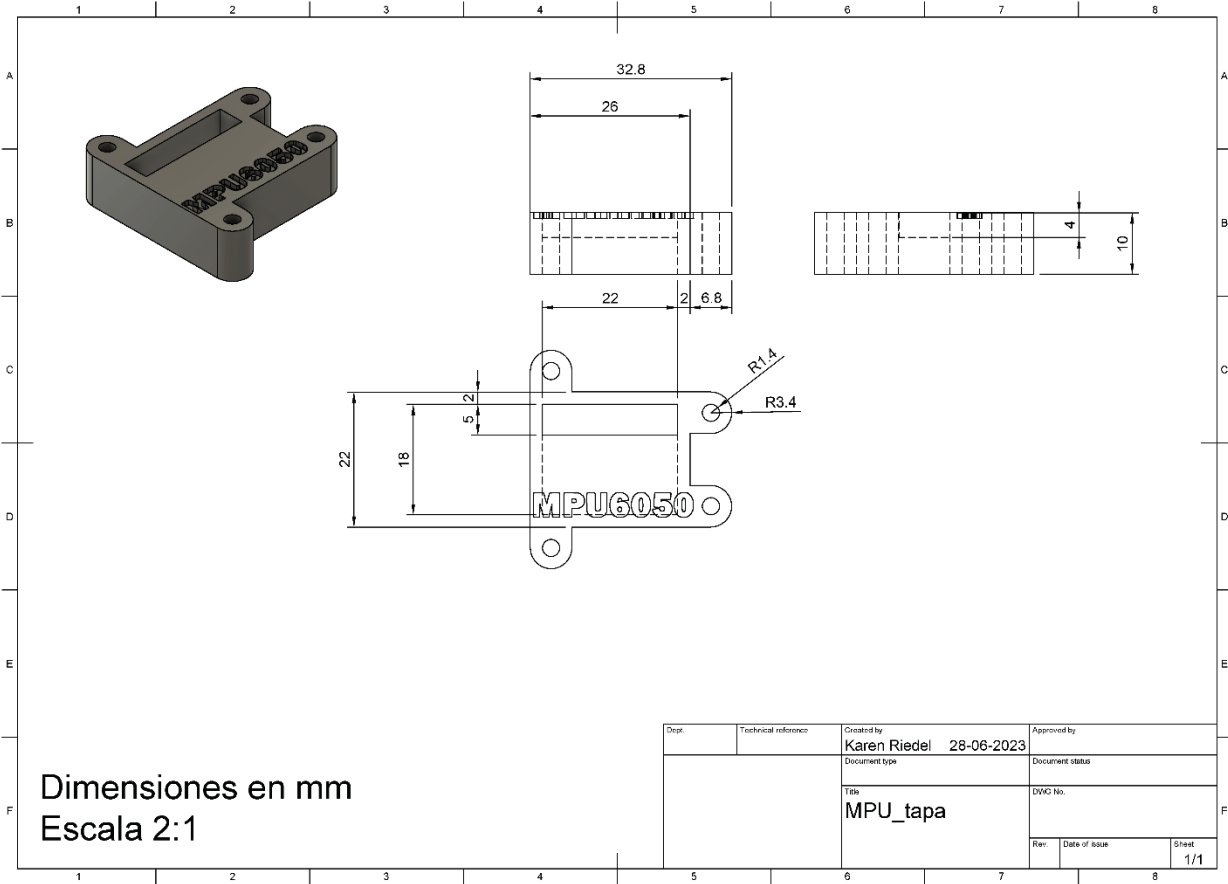


Figura 52. Plano de dibujo correspondiente a la tapa del housing del acelerómetro MPU6050.

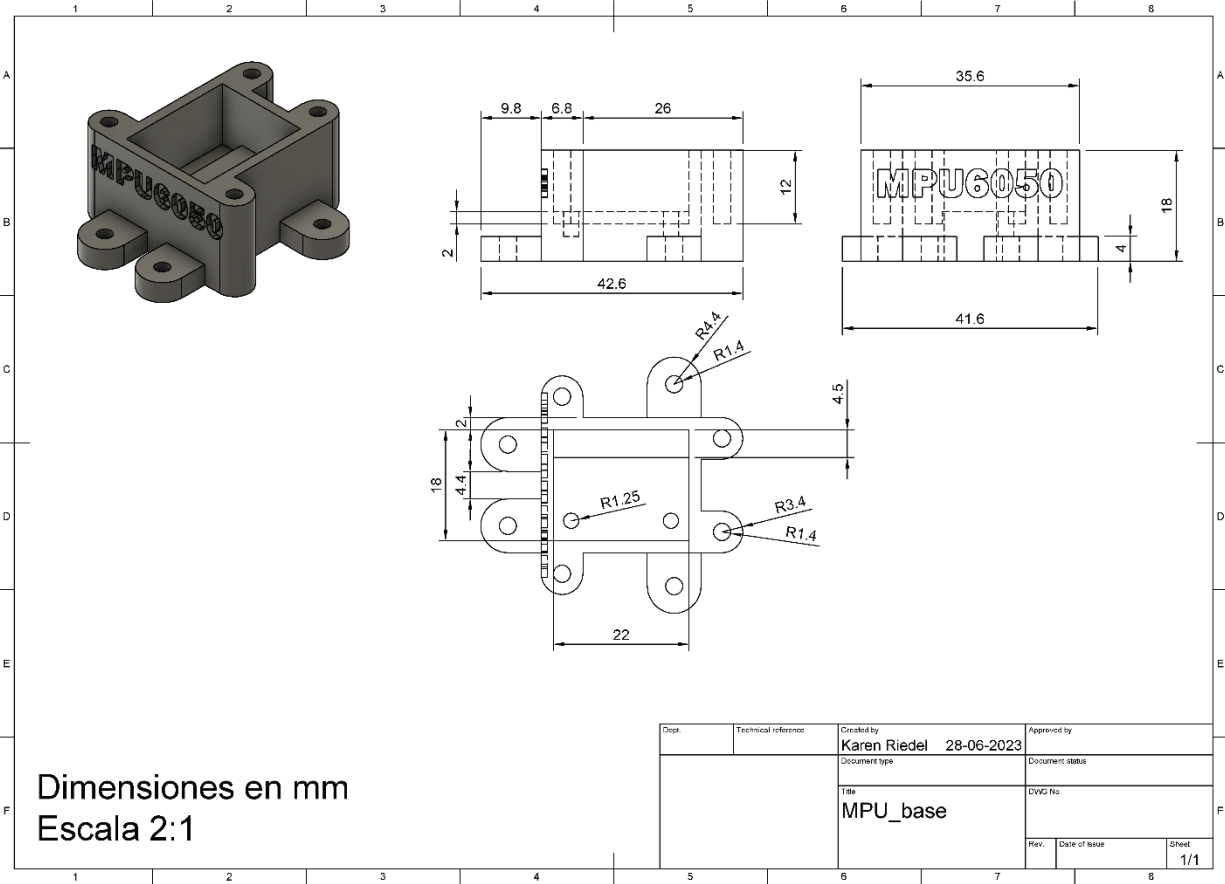


Figura 53. Plano de dibujo correspondiente a la base del housing del acelerómetro MPU6050.

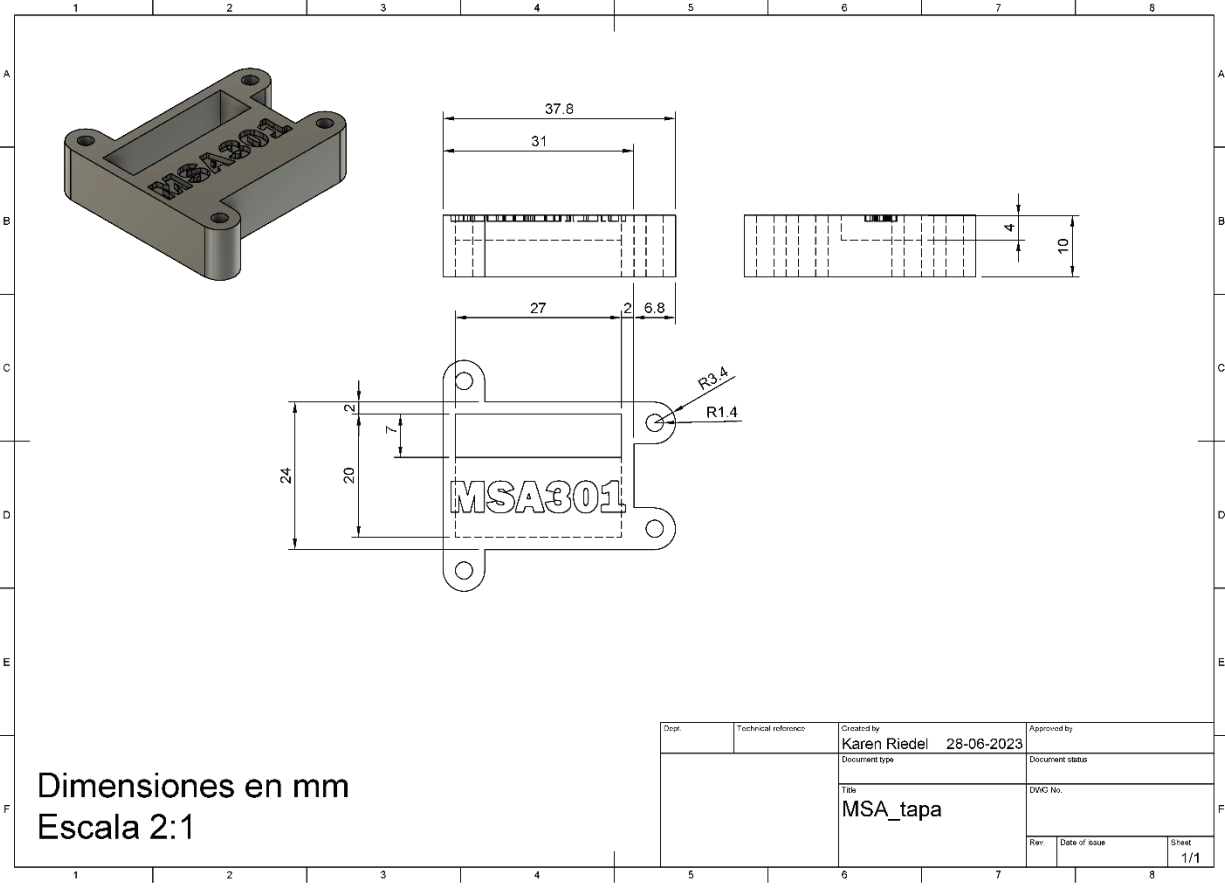


Figura 54. Plano de dibujo correspondiente a la tapa del housing del acelerómetro MSA301.

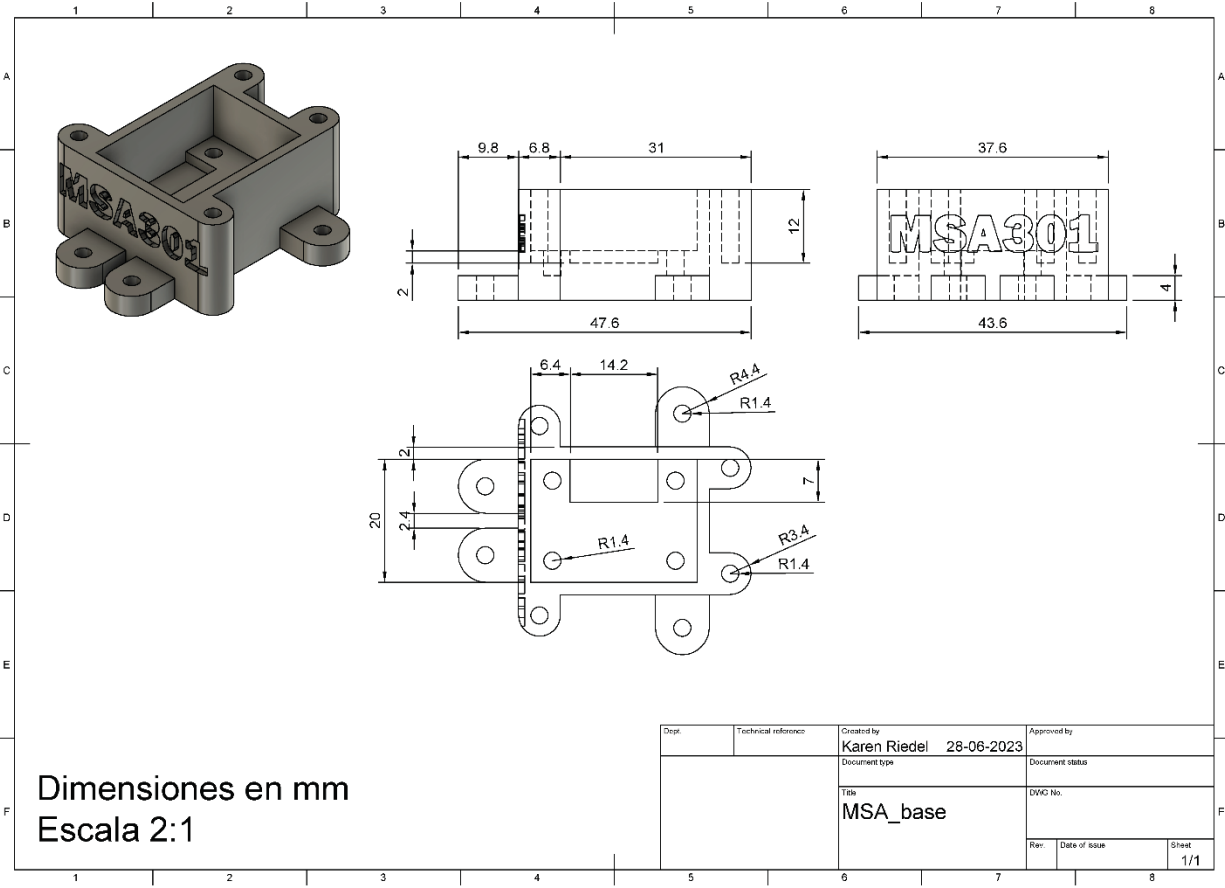


Figura 55. Plano de dibujo correspondiente a la base del housing del acelerómetro MSA301.

E.2. Diseño de placas de unión

Todas las placas de unión para el *housing* de los acelerómetros poseen una altura de 14 [mm] y 4 pestañas de sujeción en la base. Estas pestañas tienen 4 [mm] de alto y agujeros de 2.8 [mm] de diámetro para la unión con el *housing* que corresponda. La unión se realiza con pernos de 16 [mm] de largo y 3 [mm] de diámetro nominal y tuercas soldadas a las placas base con diámetro nominal de 3 [mm]. En la Figura 56, se presentan los planos correspondientes a las placas de unión de los acelerómetros digitales. En la Figura 57, se presenta el plano de la placa de unión de las RPi.

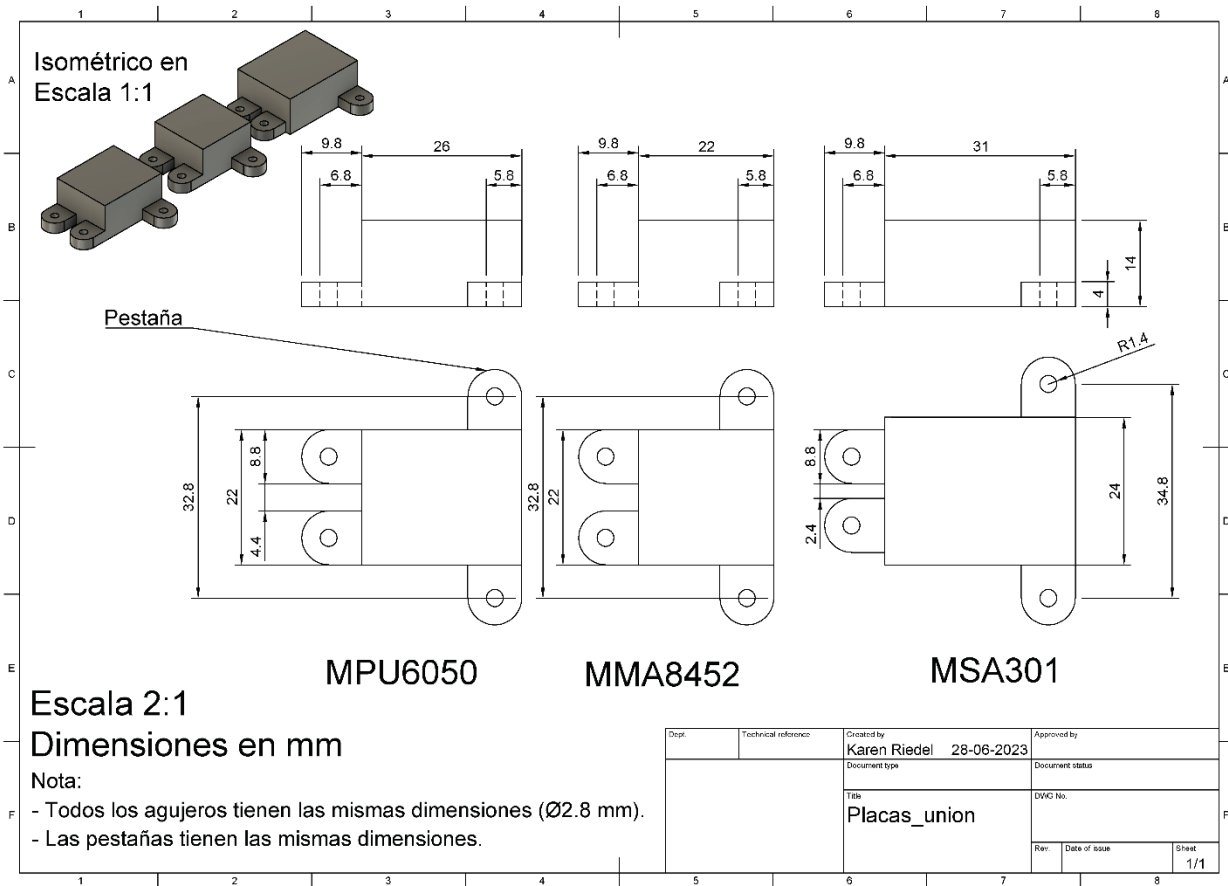


Figura 56. Planos de las placas de unión de los acelerómetros digitales.

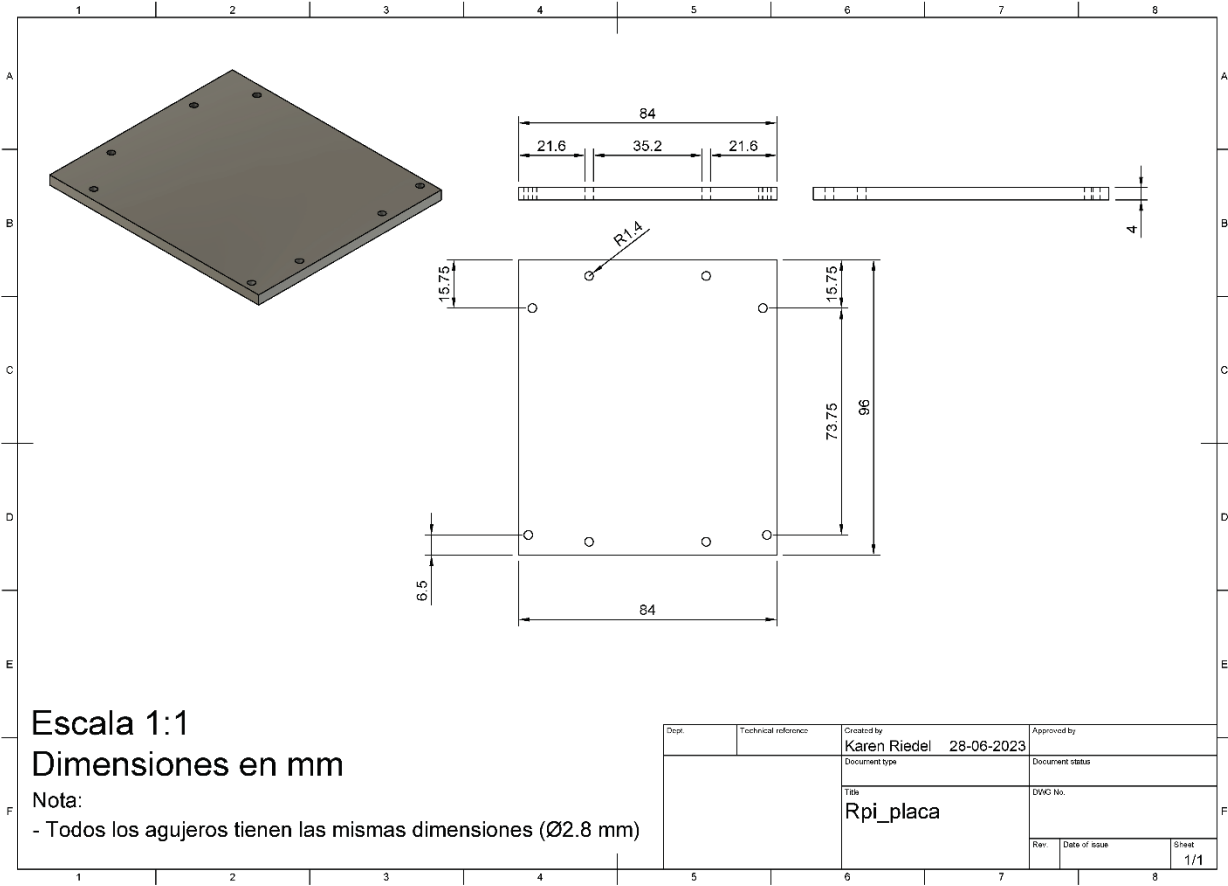


Figura 57. Plano de la placa de unión de la RPi.

Anexo F: Verificación del sistema de medición de vibraciones

Anexo F.1. Verificación de medición de vibraciones por tiempo prolongado

Se realizaron pruebas de verificación de mediciones con los tres acelerómetros en un tiempo prolongado para distinguir si existen errores en las mediciones asociados a la naturaleza instrumental por desplazamientos relativos (*drift*).

Anexo F.2. Verificación de medición de vibraciones con alimentación por batería

A modo de verificar que, al alimentar el sistema de medición de vibraciones con la batería del dron, éste reciba suficiente corriente para realizar las pruebas de medición y los resultados obtenidos sean los que corresponden se realizan las siguientes pruebas de verificación de duración corta. Durante 60 [s] se registran las aceleraciones en los 3 ejes con los 3 acelerómetros para dos casos: (i) cuando el sistema de medición es alimentado por medio de la fuente de poder oficial de la RPi, es decir directo a la energía eléctrica, y (ii) cuando el sistema es alimentado a través de la batería que alimenta al dron a través de los pines. Tras realizar mediciones para los casos (i) y (ii) se evidencia que el sistema alimentado por batería registra correctamente las aceleraciones en los 3 ejes con los 3 acelerómetros digitales. A continuación, se presentan las Figuras 58, 59 y 60, correspondientes a las mediciones realizadas de modo de verificar el correcto funcionamiento del sistema de medición de vibraciones cuando este es alimentado a través de la batería del dron para el acelerómetro MSA301, MMA8452 y MPU6050 respectivamente. Durante 60 [s] se registraron las aceleraciones con los 3 acelerómetros en los 3 ejes en dos casos: (i) alimentación por medio del adaptador de la Raspberry Pi, (ii) alimentación a través de la batería LiPo Multistar de capacidad de 5200 [mAh].

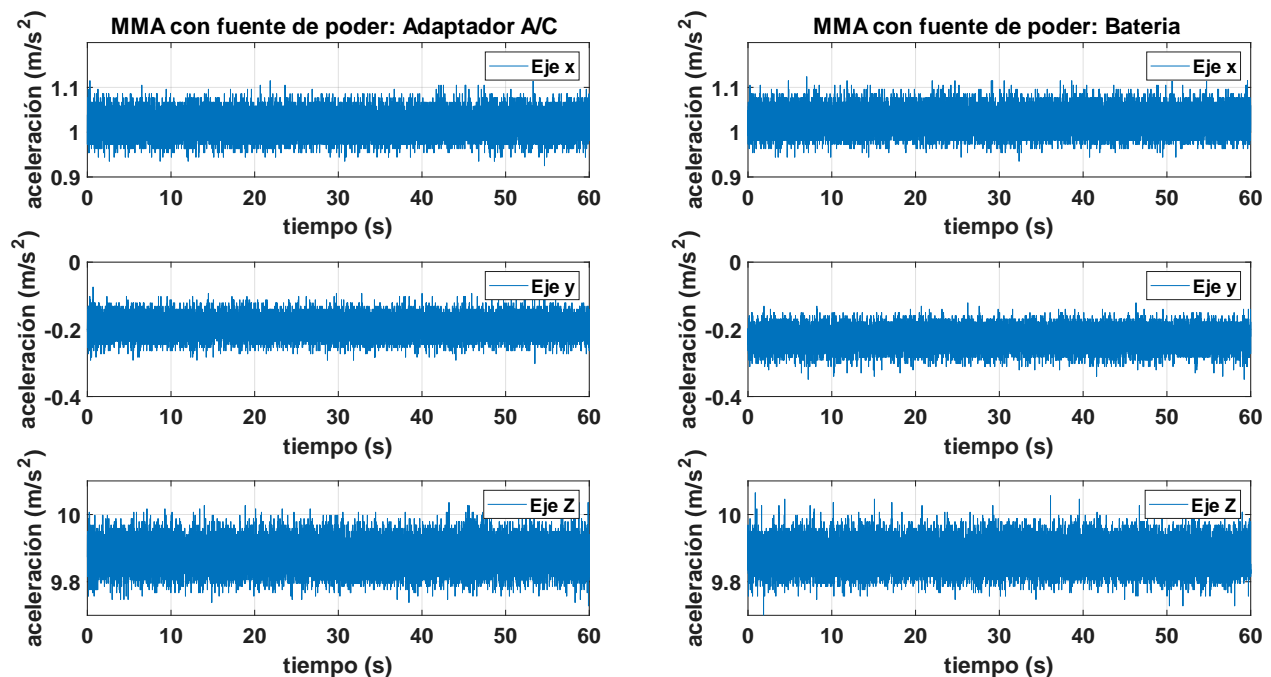


Figura 58. Medición de aceleración en los 3 ejes durante 60 [s] con el acelerómetro MMA8452, montado en el dron F550 sin movimiento de las hélices, con alimentación: (i) Adaptador A/C de la RPi, y (ii) Batería LiPo Multistar 5200 [mAh].

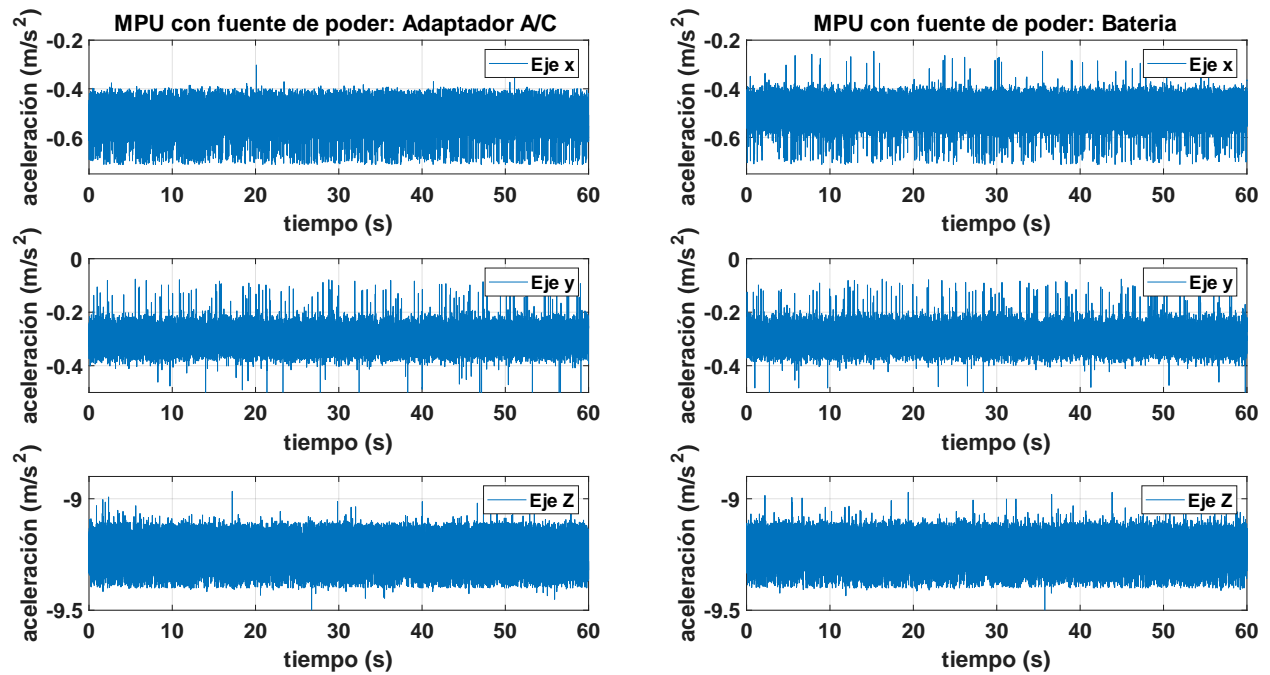


Figura 59. Medición de aceleración en los 3 ejes durante 60 [s] con el acelerómetro MPU6050, montado en el dron sin movimiento de las hélices, con alimentación: (i) Adaptador A/C de la RPi, (ii) Batería LiPo Multistar 5200 [mAh].

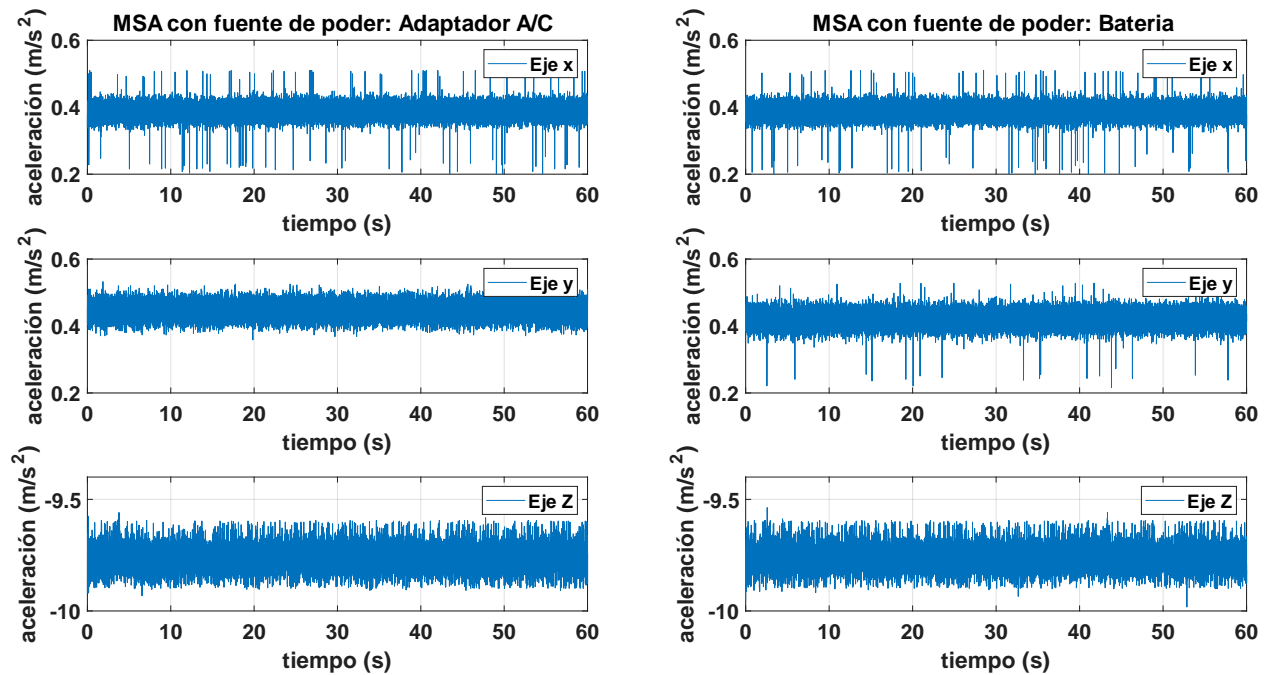


Figura 60. Medición de aceleración en los 3 ejes durante 60 [s] con el acelerómetro MSA301, montado en el dron F550 sin movimiento de las hélices, con alimentación: (i) Adaptador A/C de la RPi, y (ii) Batería LiPo Multistar 5200 [mAh].

Anexo G: Gráficas de altura de las pruebas de vuelo realizadas

En este apartado se presentan las alturas de vuelo alcanzadas mediante gráficos de altura en [m] vs tiempo en [s] de todas las prueba de vuelo realizadas. Las mediciones fueron registradas con el barómetro del autopiloto a bordo del dron F550.

Anexo G.1 Gráficas de altura: Prueba de vuelo 1 y 2

A continuación, se presentan las gráficas de la altura alcanzada en las pruebas 1 y 2 en vuelo estático, horizontal y vertical. Ambas pruebas de vuelo se llevaron a cabo el día 31/05/2023.

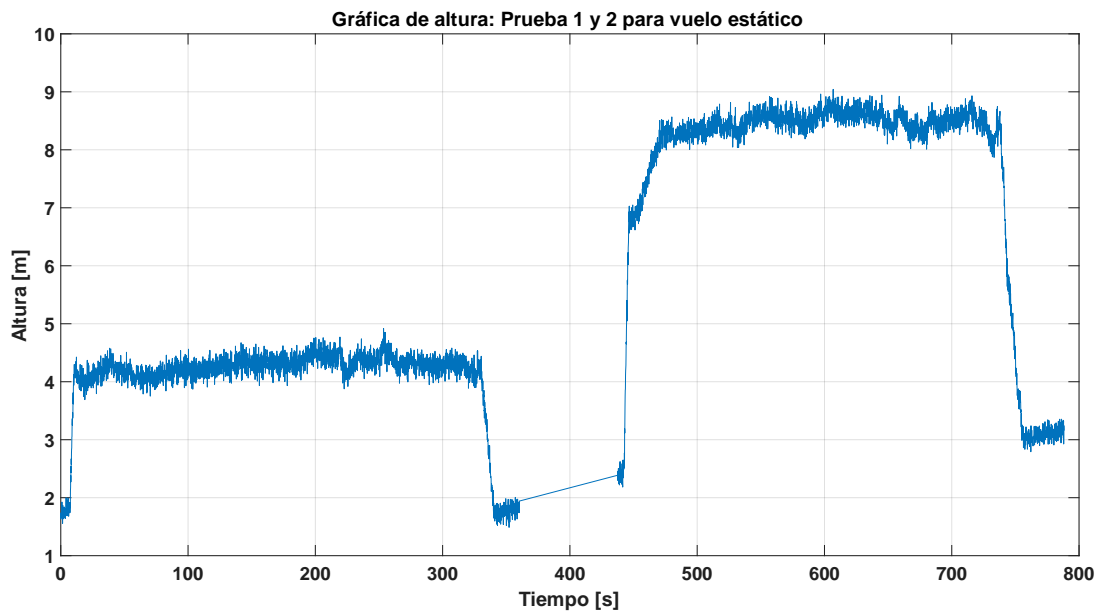


Figura 61. Gráfica de altura de las pruebas de vuelo 1 y 2, de las mediciones realizadas en modo de vuelo estático con el barómetro a bordo del dron F550.

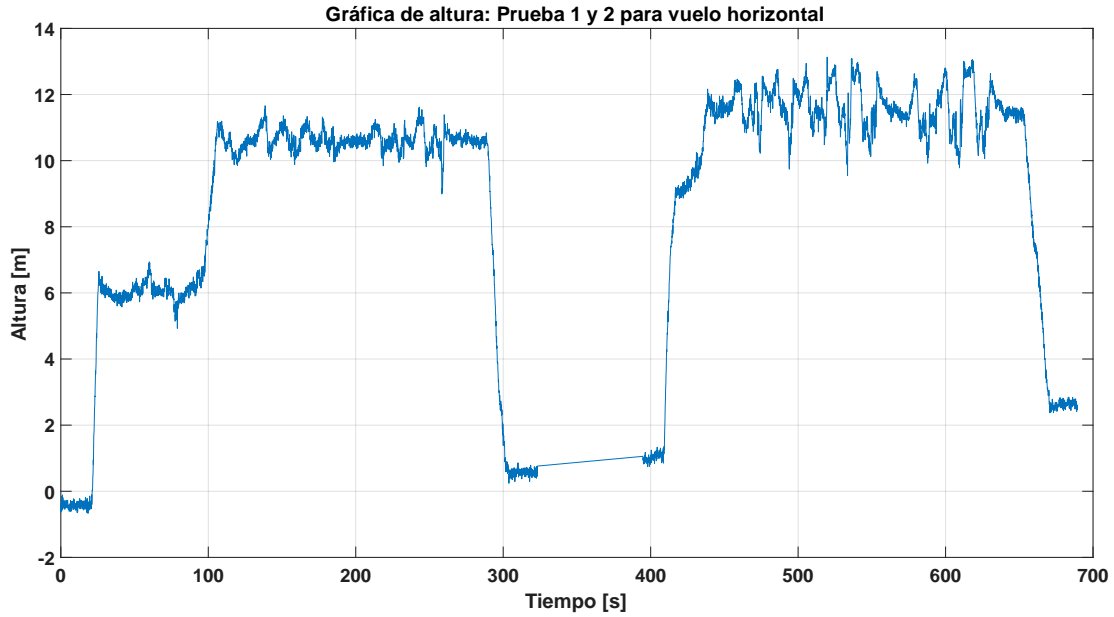


Figura 62. Gráfica de altura de las pruebas de vuelo 1 y 2, de las mediciones realizadas en modo de vuelo horizontal con el barómetro a bordo del dron F550.

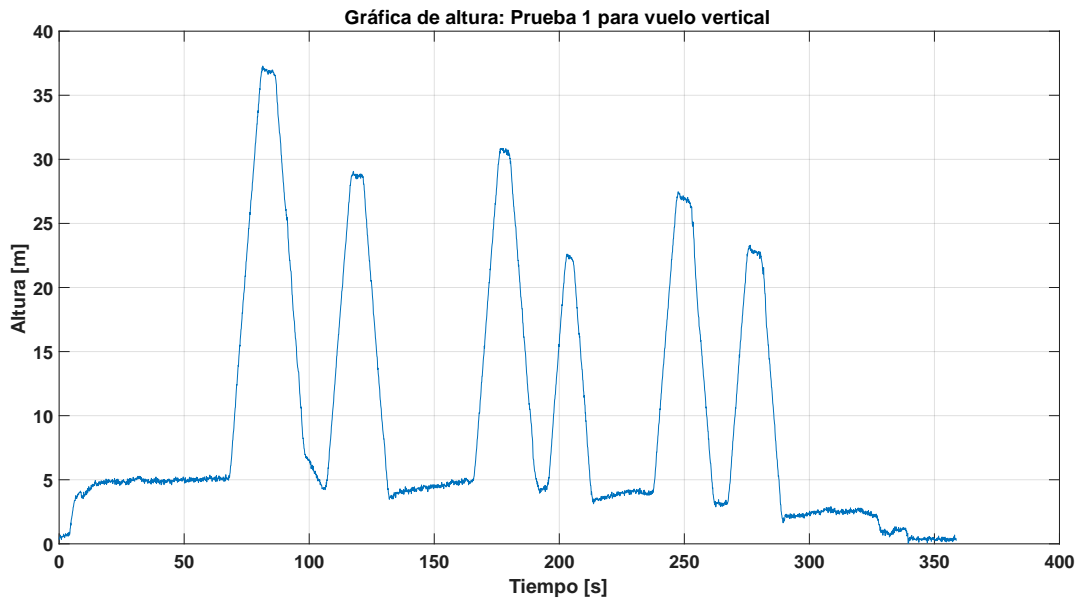


Figura 63. Gráfica de altura de la prueba de vuelo 1, de las mediciones realizadas en modo de vuelo vertical con el barómetro a bordo del dron F550.

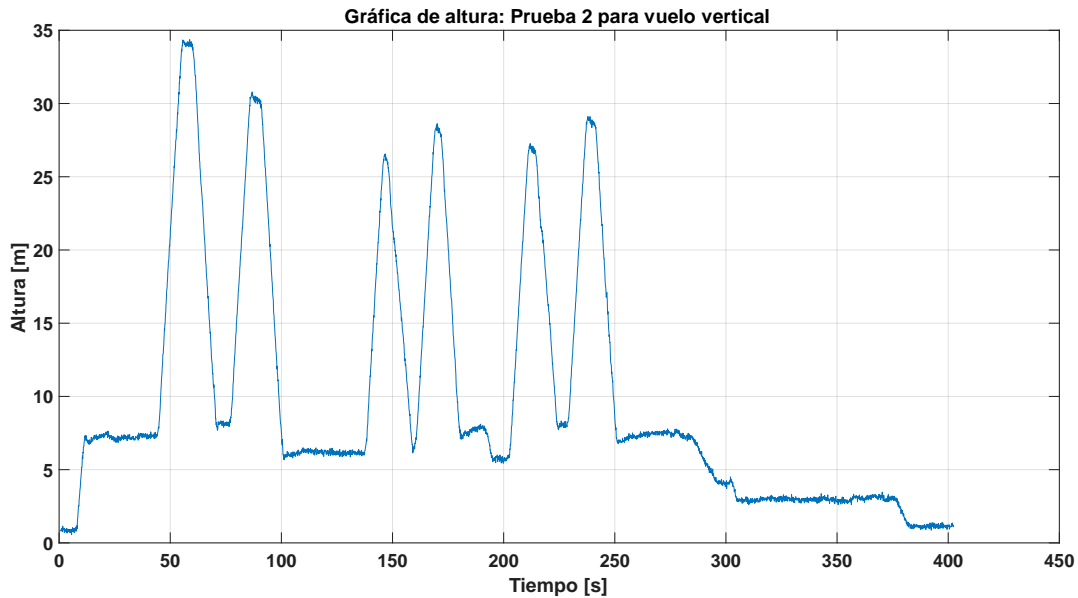


Figura 64. Gráfica de altura de la prueba de vuelo 2, de las mediciones realizadas en modo de vuelo vertical con el barómetro a bordo del dron F550.

Anexo G.2 Gráficas de altura: Prueba de vuelo 3

A continuación, se presentan las gráficas de altura para la prueba 3 realizadas el día 13/06/2023 para vuelo estático, horizontal y vertical. Cabe mencionar, que para la medición en vuelo estático una vez iniciada la captura de datos se perdió la señal GPS con el dron F550, por lo que no mantuvo un comportamiento estable en el aire invalidando la medición en modo estático. Posteriormente el dron sufrió un accidente, imposibilitando la continuación de las pruebas para el día 13/06/2023.

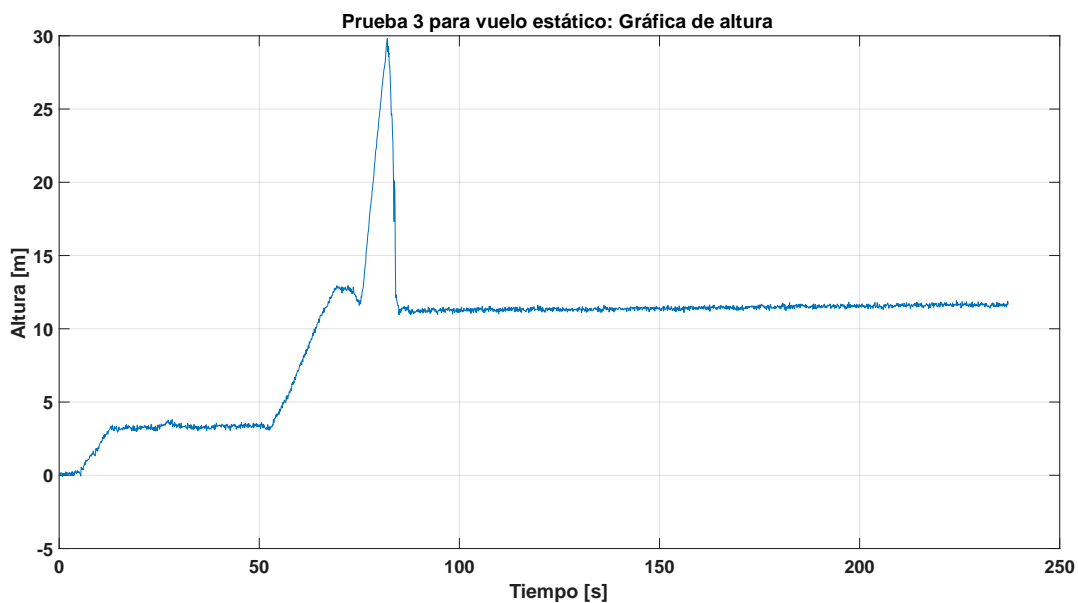


Figura 65. Gráfica de altura de la prueba de vuelo 3, de las mediciones realizadas en modo de vuelo estático con el barómetro a bordo del dron F550.

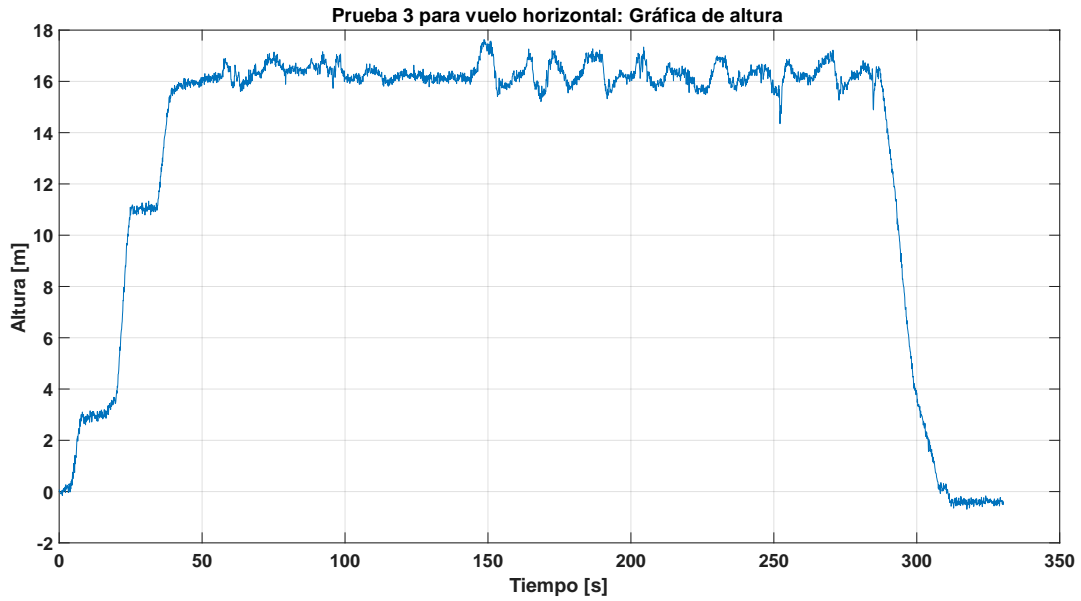


Figura 66. Gráfica de altura de la prueba de vuelo 3, de las mediciones realizadas en modo de vuelo horizontal con el barómetro a bordo del dron F550

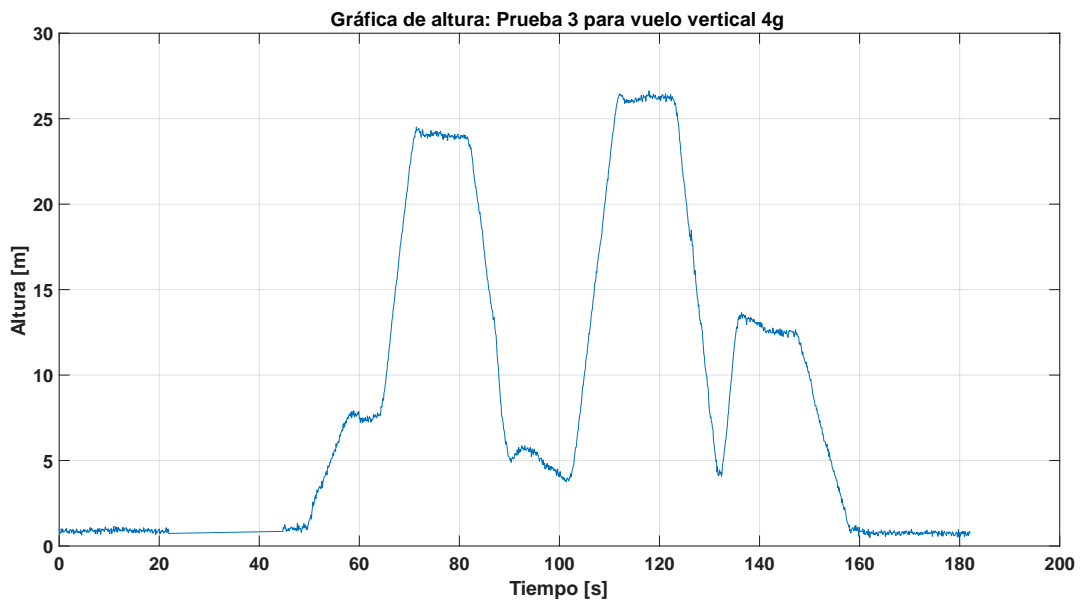


Figura 67. Gráfica de altura de la prueba de vuelo 3, de las medición realizada en modo de vuelo vertical con el barómetro a bordo del dron F550. Prueba realizada únicamente con el sensor MPU6050 del sistema de mediciones seteado a 4g.

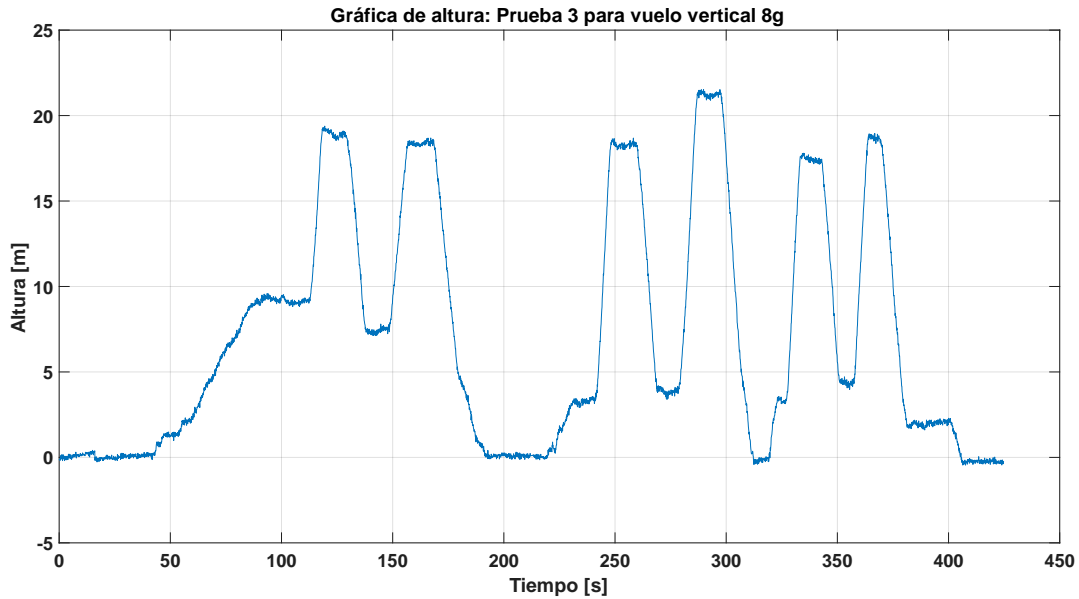


Figura 68. Gráfica de altura de la prueba de vuelo 3, de las mediciones realizadas en modo de vuelo vertical con el barómetro a bordo del dron F550.

Anexo G.3 Gráficas de altura: Prueba de vuelo 4 y 5

En las figuras presentadas a continuación se visualizan las gráficas correspondientes a la altura de vuelo alcanzada para las pruebas 4 y 5 realizadas el 14/06/2023. La Figura 69 corresponde a los vuelos para las mediciones en modo estático, las Figuras 70 y 71 corresponde al vuelo horizontal para la prueba 4 y 5 respectivamente, y las Figuras 72 y 73 corresponde al vuelo vertical para las pruebas 4 y 5 respectivamente.

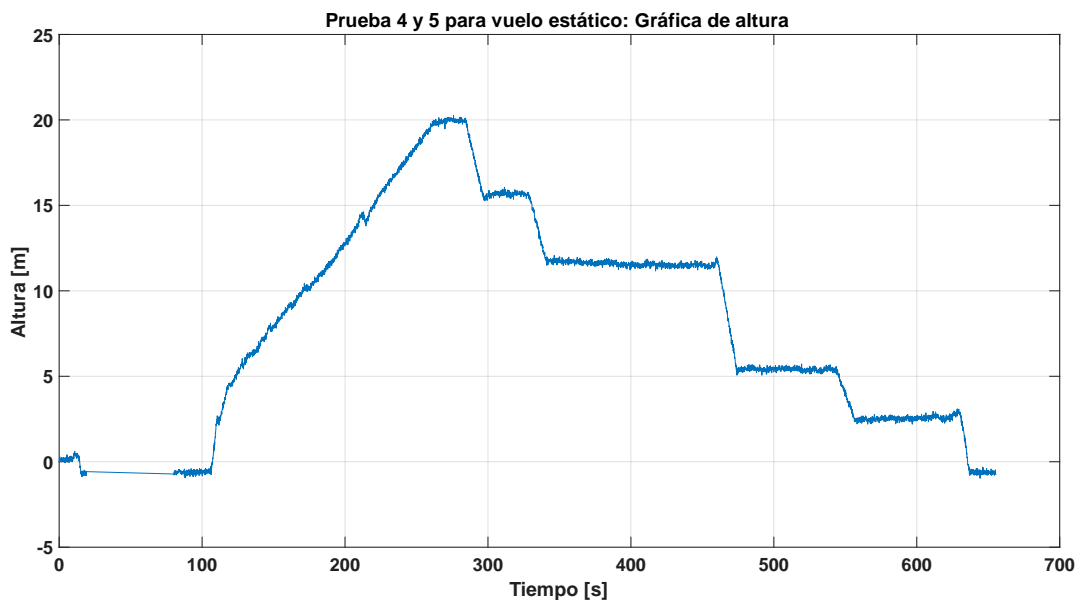


Figura 69. Gráfica de altura de las pruebas de vuelo 4 y 5, de las mediciones realizadas en modo de vuelo estático con el barómetro a bordo del dron F550.

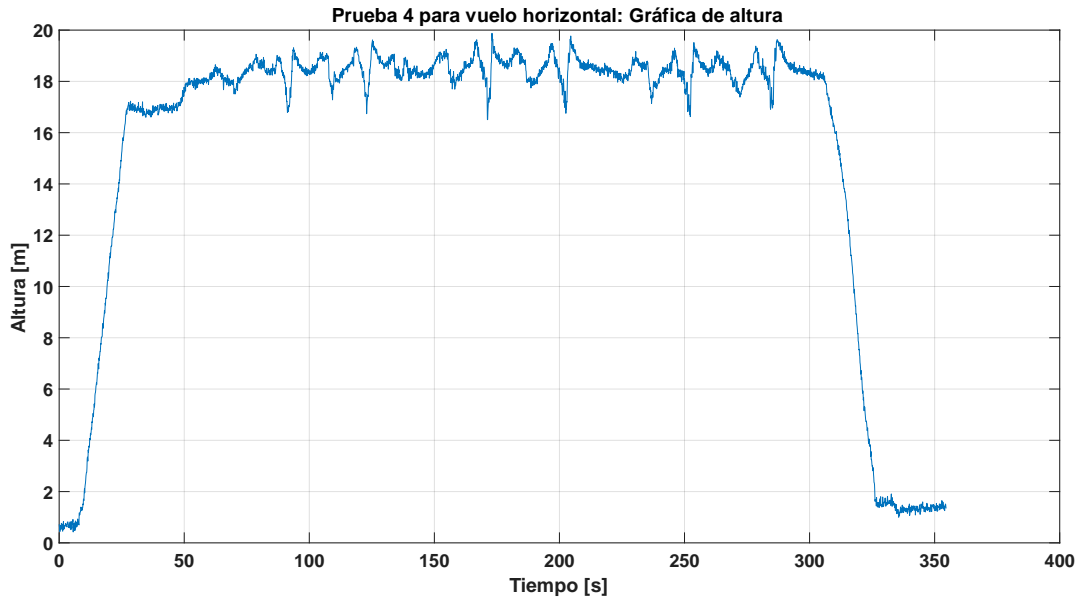


Figura 70. Gráfica de altura de la prueba de vuelo 4, de las mediciones realizadas en modo de vuelo horizontal con el barómetro a bordo del dron F550.

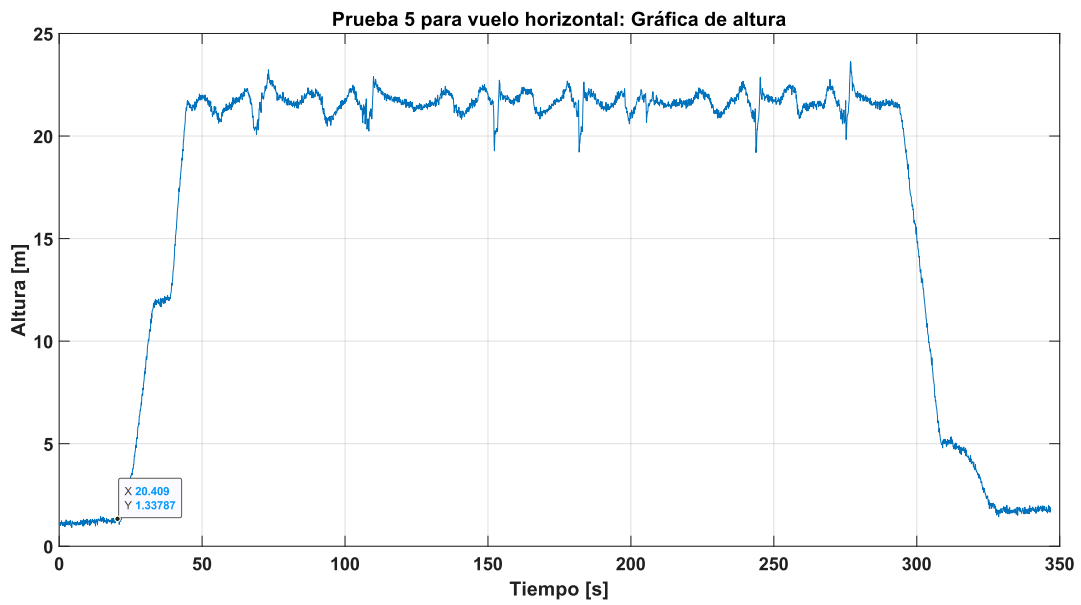


Figura 71. Gráfica de altura de la prueba de vuelo 5, de las mediciones realizadas en modo de vuelo horizontal con el barómetro a bordo del dron F550.

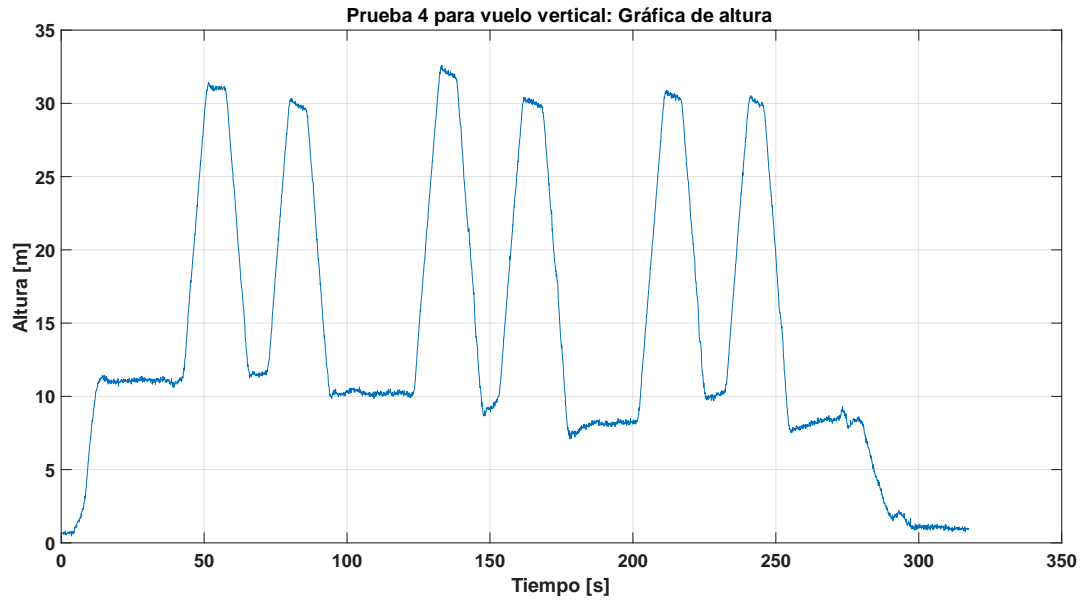


Figura 72. Gráfica de altura de la prueba de vuelo 4, de las mediciones realizadas en modo de vuelo vertical con el barómetro a bordo del dron F550.

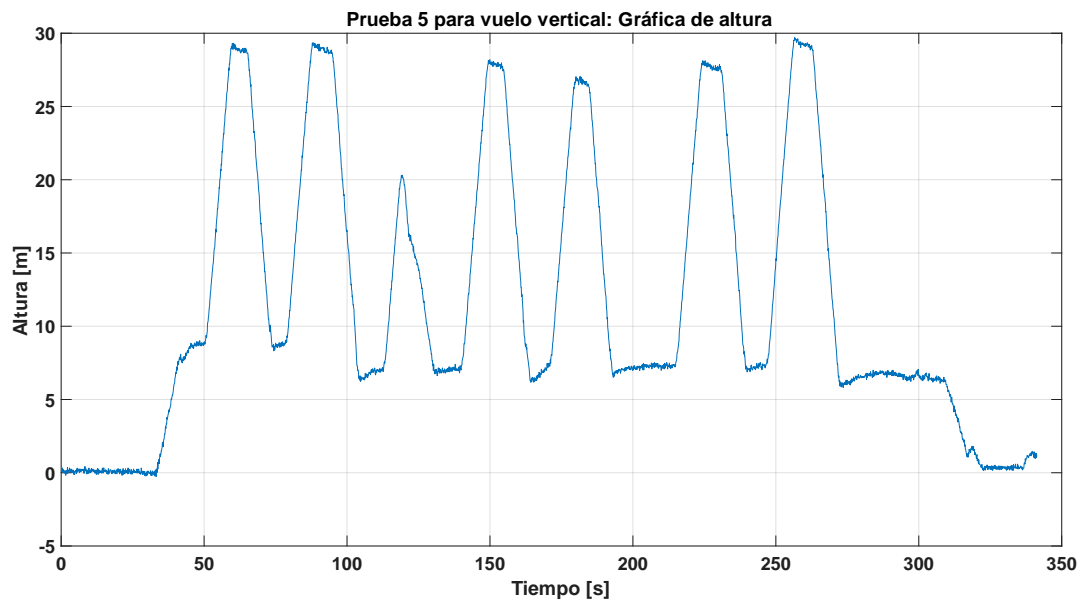


Figura 73. Gráfica de altura de la prueba de vuelo 5, de las mediciones realizadas en modo de vuelo vertical con el barómetro a bordo del dron F550.

Anexo H: Gráficas de resultados de los acelerómetros MMA8452 y MSA301

En este anexo se presentan los resultados obtenidos de las mediciones realizadas por el sistema de medición de vibraciones a bordo del dron F550 para los acelerómetros MMA8452 y MSA301. Estos se presentan a través de gráficas de aceleración medida en los tres ejes, espectro RMS por bandas de frecuencias para las aceleraciones medidas en los tres ejes y el espectrograma de la señal vibratoria durante los 60 [s] de medición. Los resultados para los datos de las aceleraciones medidas por el acelerómetro MPU6050 se presentan en la Sección 4.3.4. Durante las pruebas experimentales se recopilaron datos de 60 segundos de duración, sin embargo, para las gráficas de aceleración se selecciona el segmento de tiempo a analizar en cada modo de vuelo considerando una ventana de tiempo estándar de 8 [s]. Este segmento corresponde al periodo de interés donde ocurre la ejecución de la maniobra de vuelo y no existen mayores desviaciones en los datos. El tiempo estándar de análisis es de 8 [s] para todas las pruebas, ya que es el tiempo mínimo para la realización de las maniobras de ascenso y descenso registradas.

Anexo H.1 Resultados de las mediciones del acelerómetro digital MMA8452

1. Gráficas de aceleración MMA8452

Los resultados obtenidos de las aceleraciones registradas por el acelerómetro digital MMA8452 se muestran a continuación.

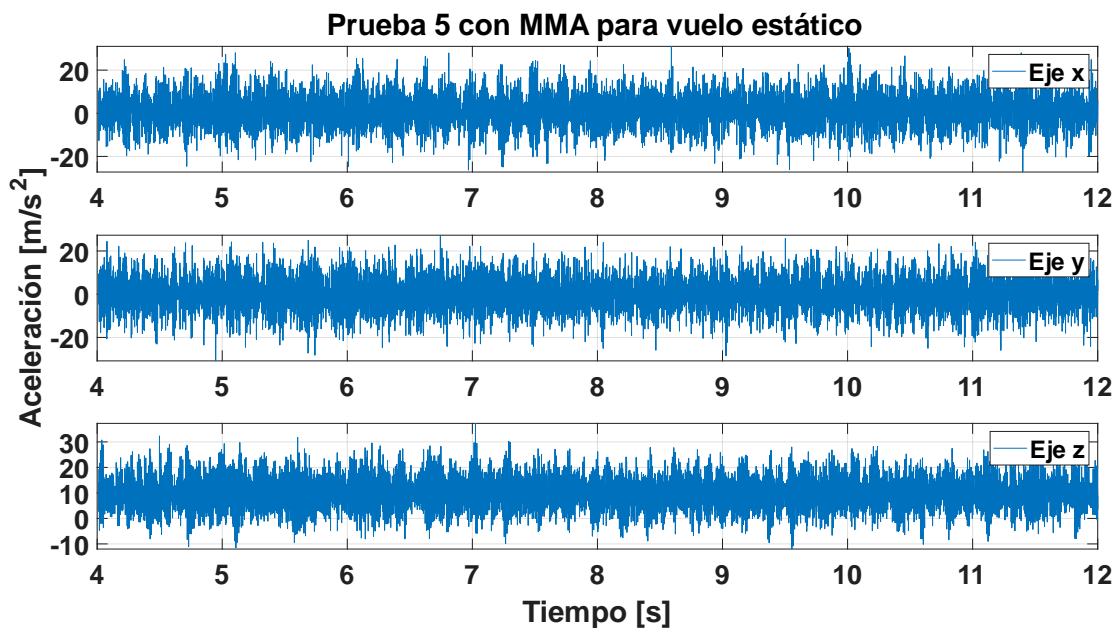


Figura 74. Gráfica de aceleraciones medidas en la prueba de vuelo 5, registradas con el acelerómetro digital MMA8452 en vuelo estático durante tramo de 8 [s] de medición.

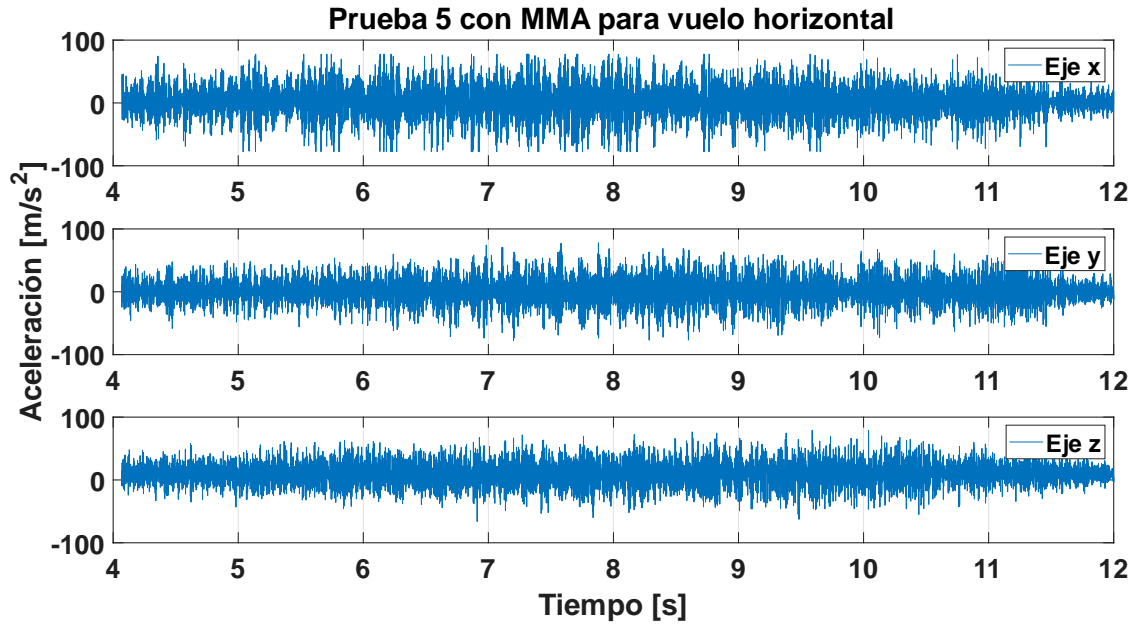


Figura 75. Gráfica de aceleraciones medidas en la prueba de vuelo 5, registradas con el acelerómetro digital MMA8452 en vuelo horizontal durante tramo de 8 [s] de medición.

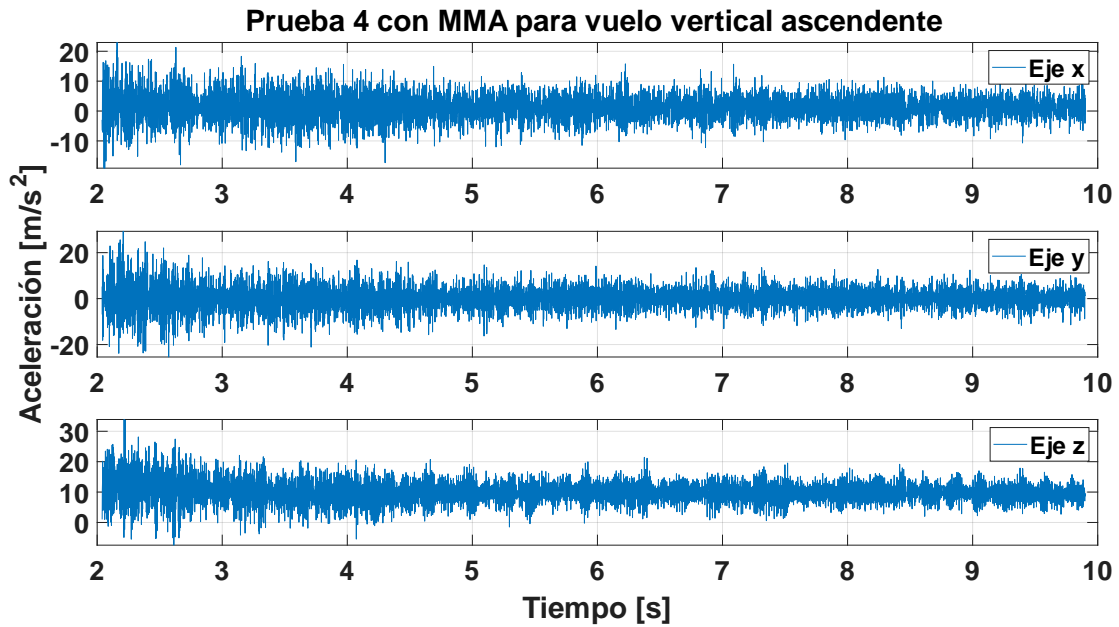


Figura 76. Gráfica de aceleraciones medidas en la prueba de vuelo 4, registradas con el acelerómetro digital MMA8452 en vuelo vertical ascendente durante tramo de 8 [s] de medición.

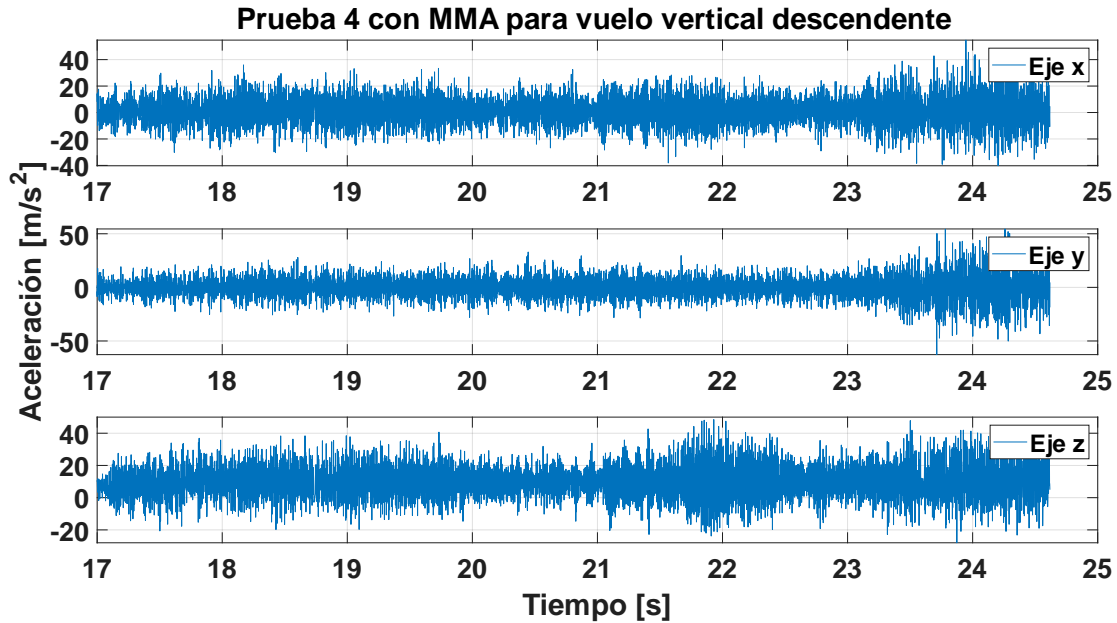


Figura 77. Gráfica de aceleraciones medidas en la prueba de vuelo 4, registradas con el acelerómetro digital MMA8452 en vuelo vertical descendente durante tramo de 8 [s] de medición.

2. Gráficas espectro RMS por bandas de frecuencias MMA8452

A continuación, se muestran los gráficos del espectro RMS por bandas de frecuencia en los tres ejes de las mediciones de aceleración correspondientes al segmento de tiempo graficado con el acelerómetro digital MMA8452.

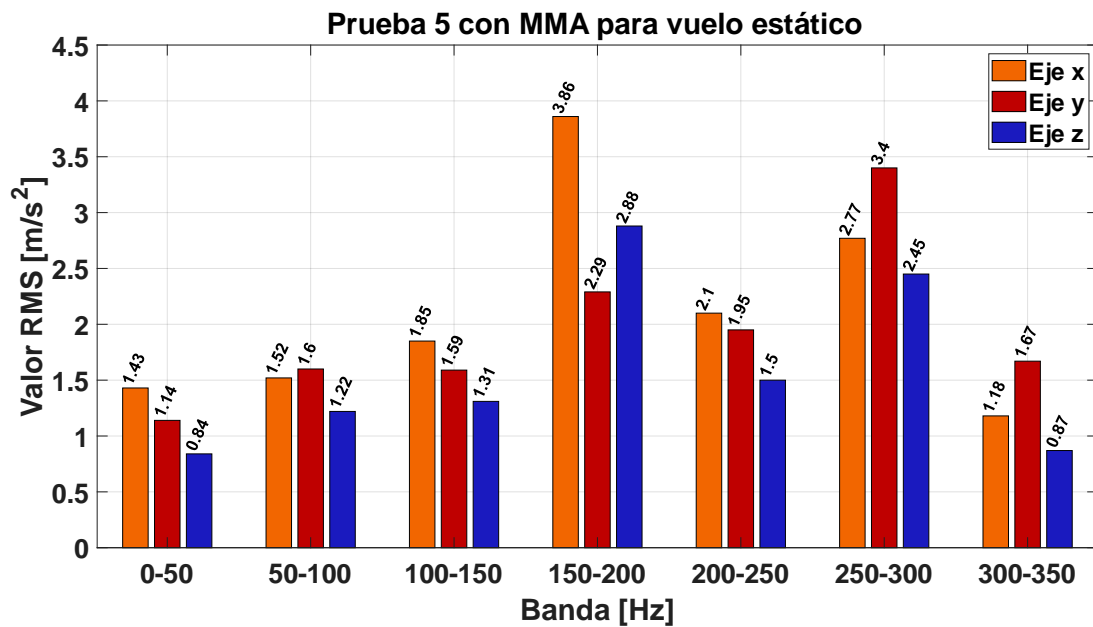


Figura 78. Gráfica del espectro RMS por bandas de frecuencias de la prueba de vuelo 5, registradas con el acelerómetro digital MMA8452, en vuelo estático durante tramo de 8 [s] de medición.

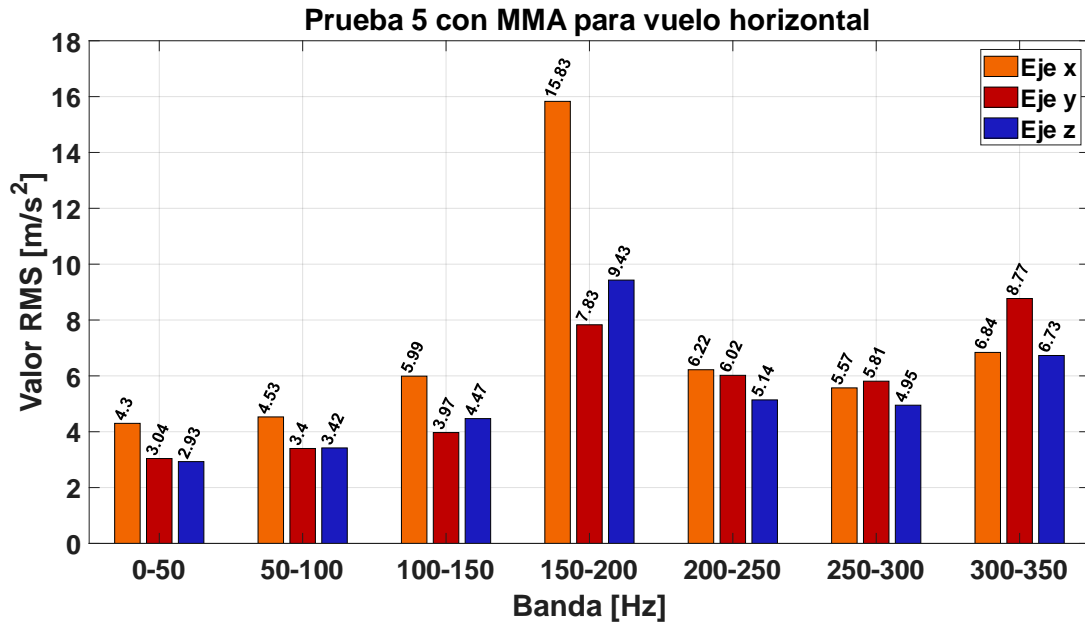


Figura 79. Gráfica del espectro RMS por bandas de frecuencias de la prueba de vuelo 5, registradas con el acelerómetro digital MMA8452, en vuelo horizontal durante tramo de 8 [s] de medición.

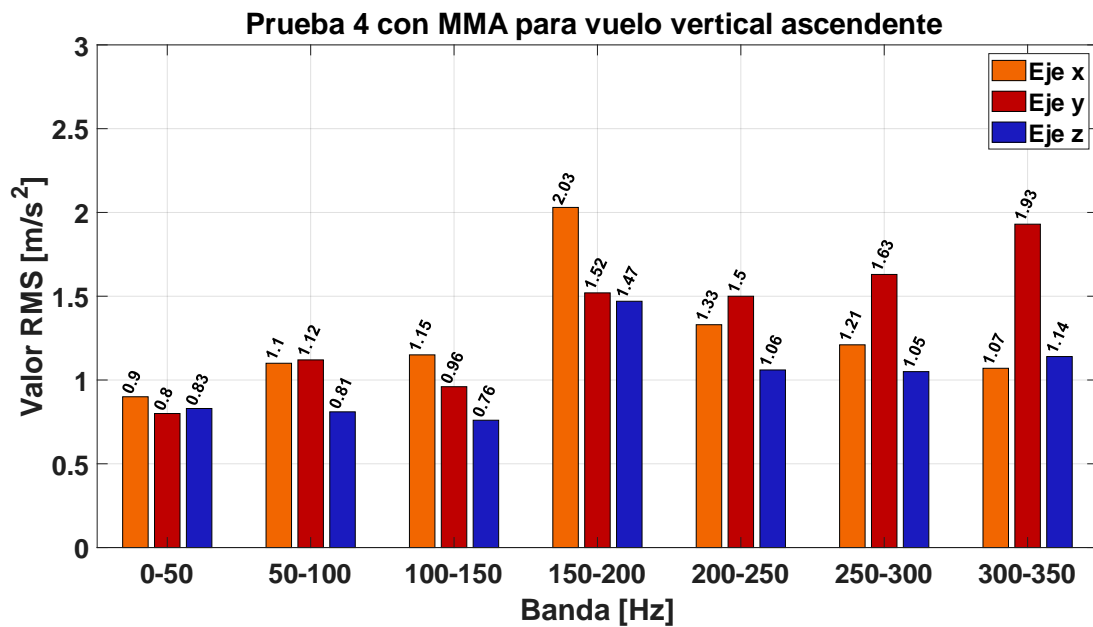


Figura 80. Gráfica del espectro RMS por bandas de frecuencias de la prueba de vuelo 4, registradas con el acelerómetro digital MMA8452, en vuelo vertical ascendente durante tramo de 8 [s] de medición.

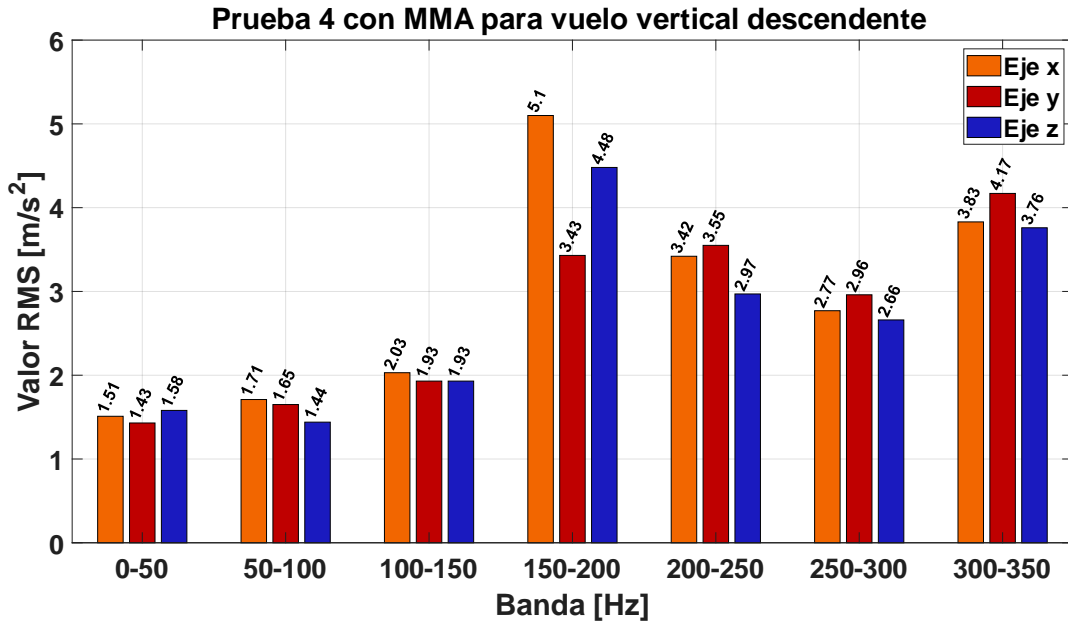


Figura 81. Gráfica del espectro RMS por bandas de frecuencias de la prueba de vuelo 4, registradas con el acelerómetro digital MMA8452, en vuelo vertical descendente durante tramo de 8 [s] de medición.

3. Espectrogramas MMA8452

Las siguientes figuras muestran el espectrograma de las mediciones registradas por el acelerómetro digital MMA8452 en las distintas fases de vuelo durante los 60 [s] de medición en los ejes X, Y y Z.

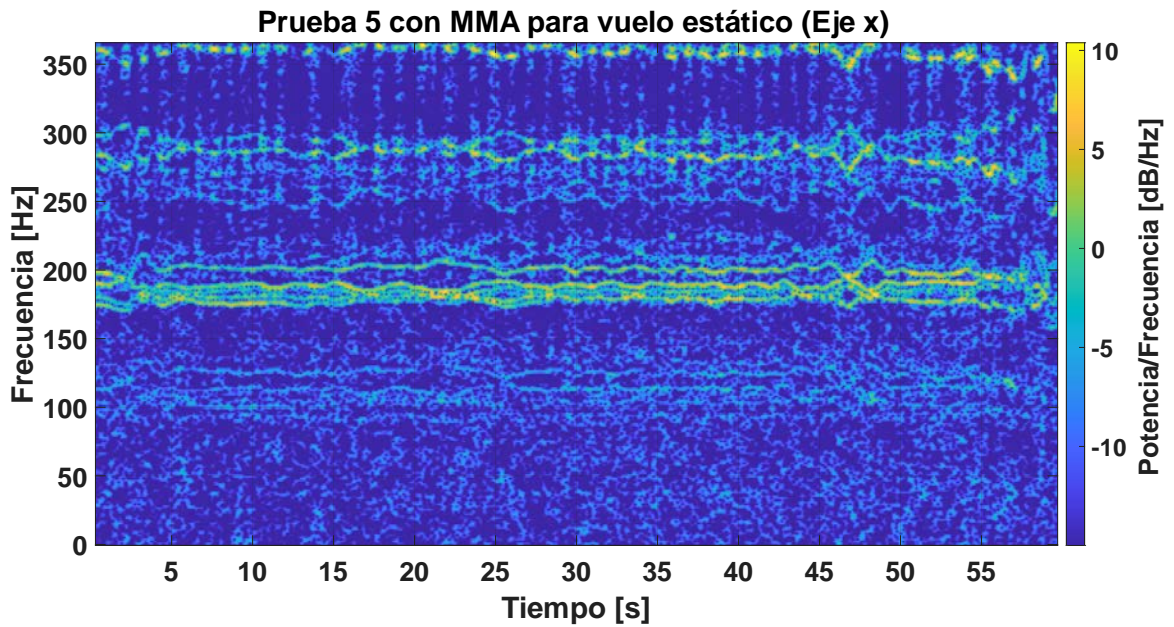


Figura 82. Espectrograma de 60 [s] de medición con el acelerómetro digital MMA8452, de la prueba de vuelo 5, en vuelo estático en el eje X.

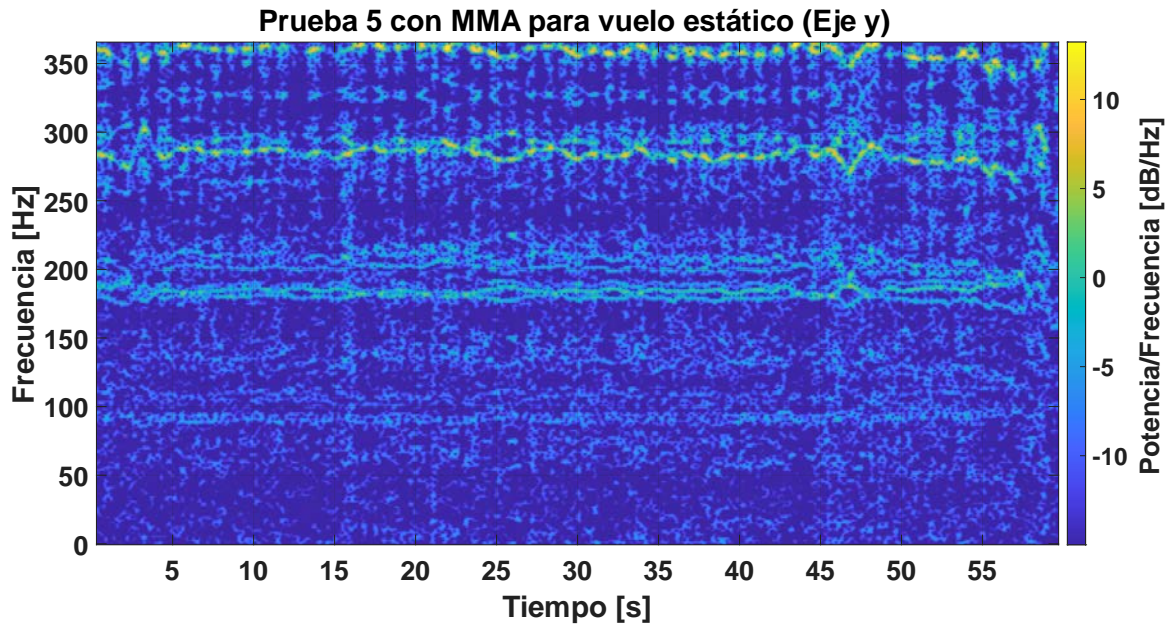


Figura 83. Espectrograma de 60 [s] de medición con el acelerómetro digital MMA8452, de la prueba de vuelo 5, en vuelo estático en el eje Y.

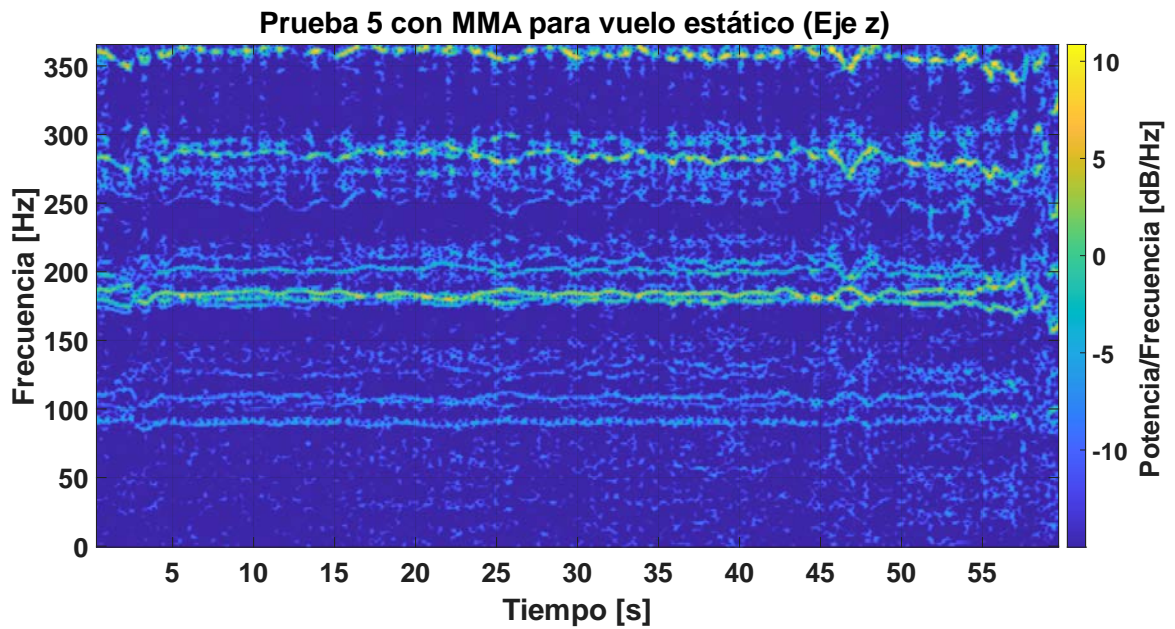
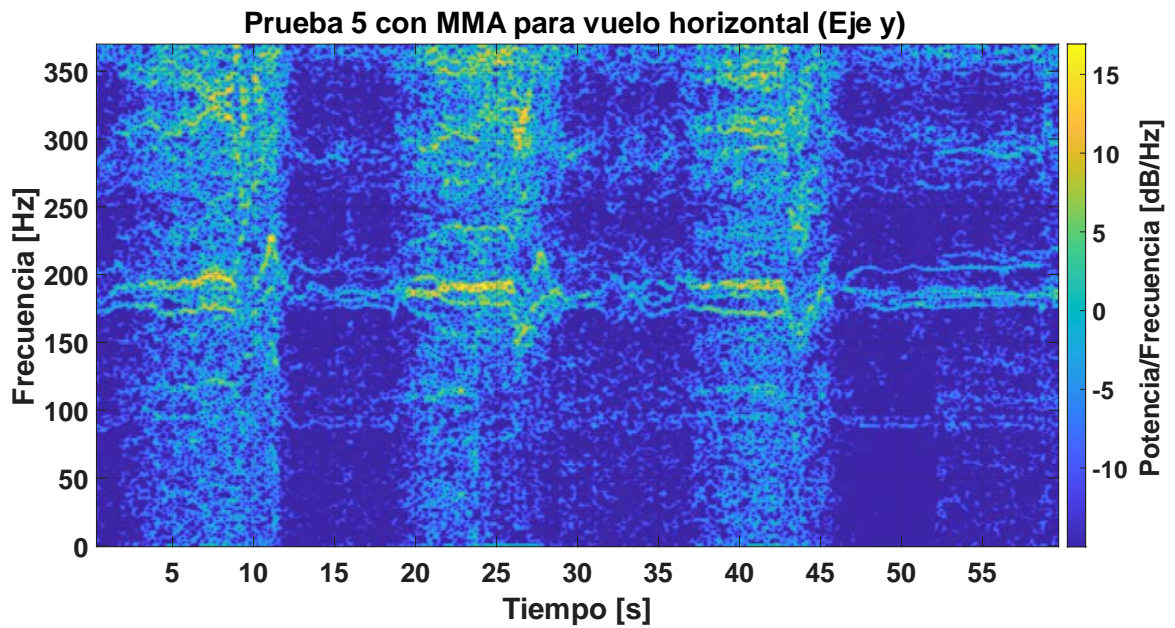
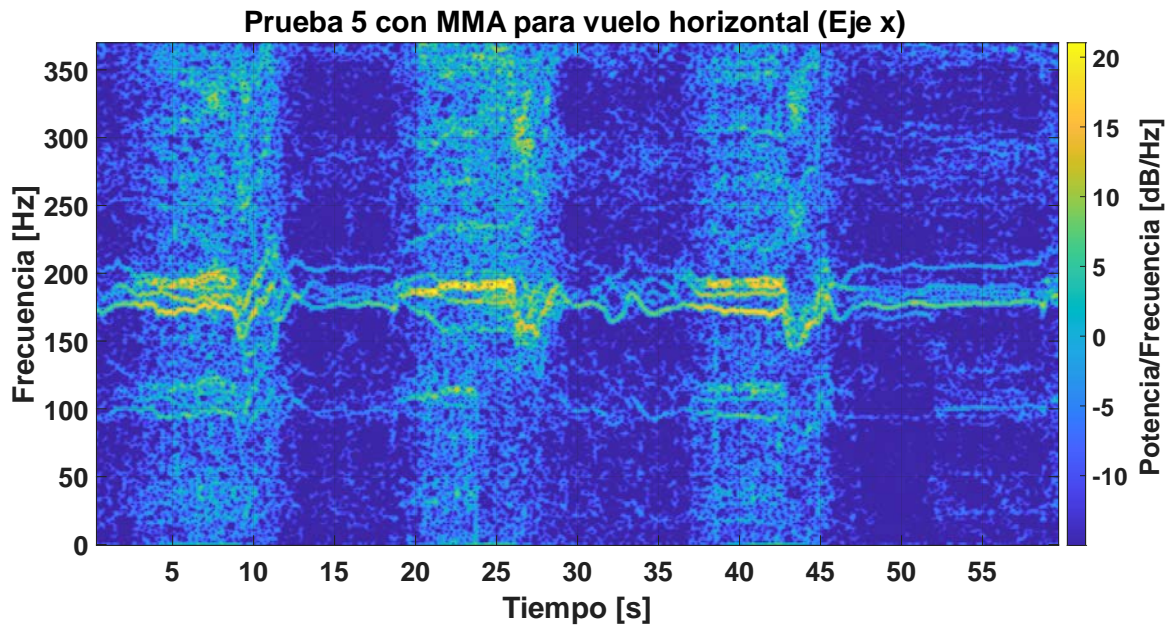


Figura 84. Espectrograma de 60 [s] de medición con el acelerómetro digital MMA8452, de la prueba de vuelo 5, en vuelo estático en el eje Z.



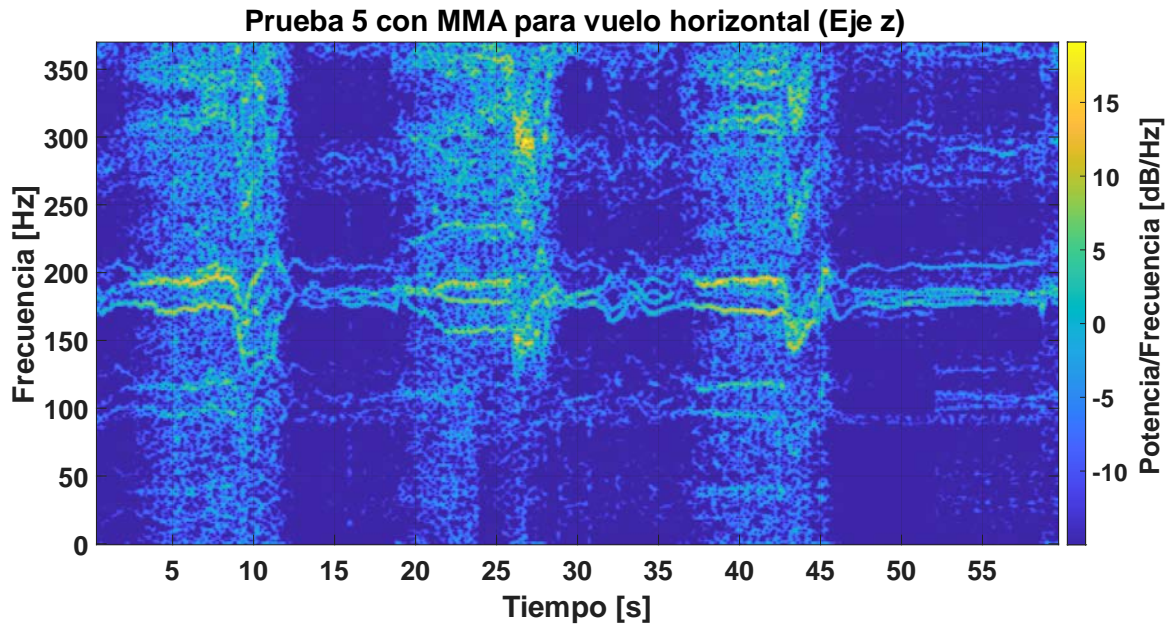


Figura 87. Espectrograma de 60 [s] de medición con el acelerómetro digital MMA8452, de la prueba de vuelo 5, en vuelo horizontal en el eje Z.

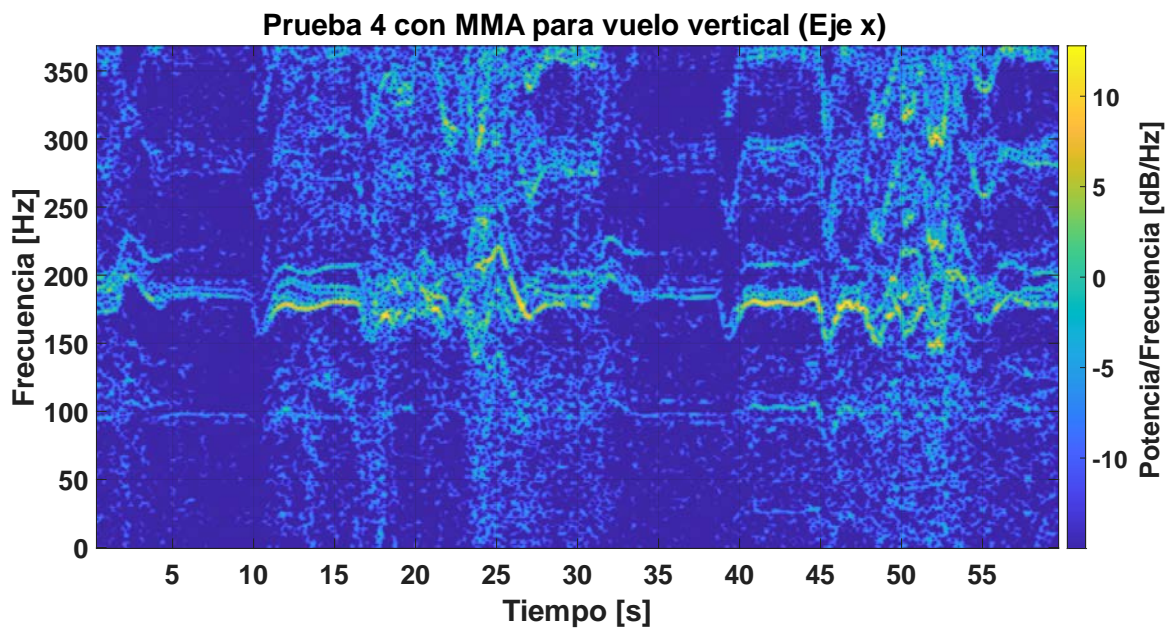


Figura 88. Espectrograma de 60 [s] de medición con el acelerómetro digital MMA8452, de la prueba de vuelo 4, en vuelo vertical en el eje X.

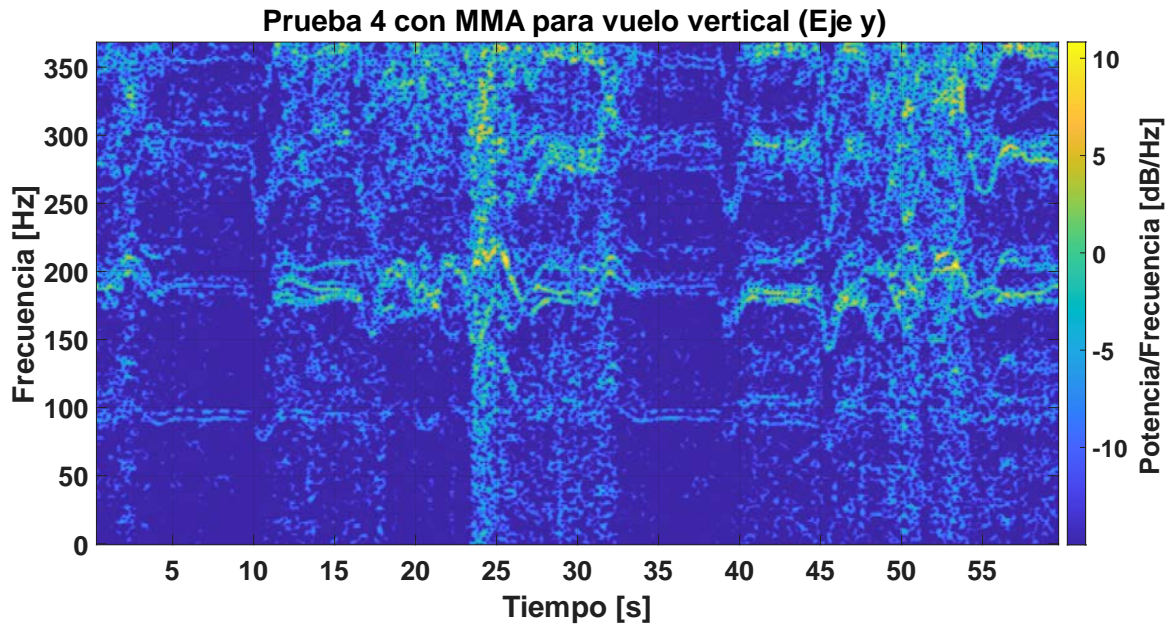


Figura 89. Espectrograma de 60 [s] de medición con el acelerómetro digital MMA8452, de la prueba de vuelo 4, en vuelo vertical en el eje Y.

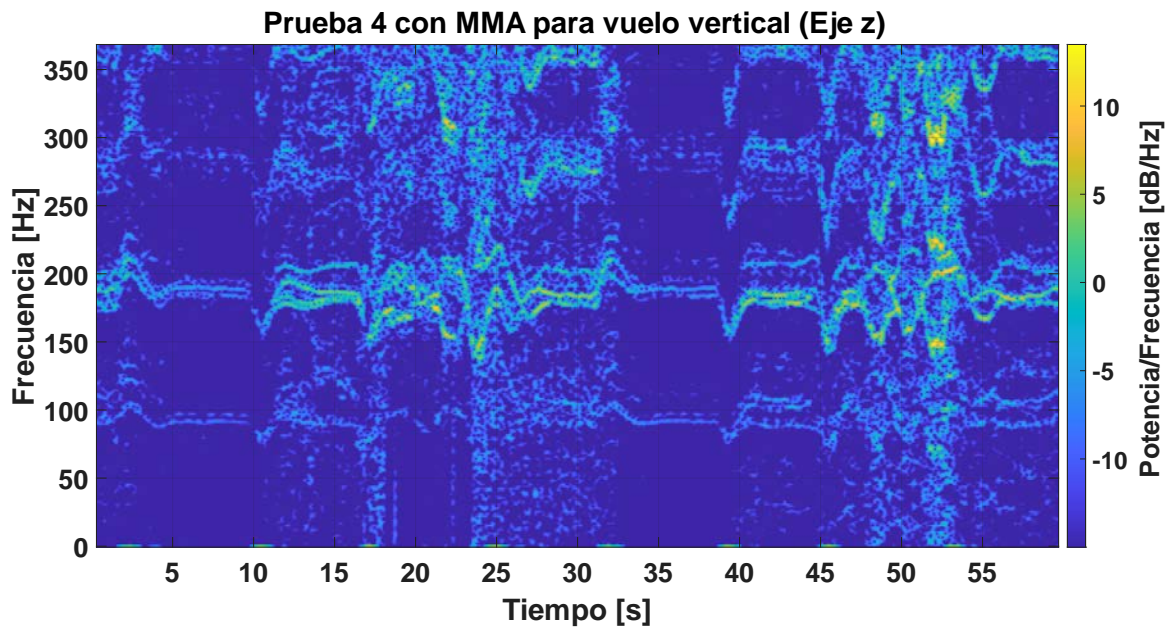


Figura 90. Espectrograma de 60 [s] de medición con el acelerómetro digital MMA8452, de la prueba de vuelo 4, en vuelo vertical en el eje Z.

Anexo H.2 Resultados de las mediciones del acelerómetro digital MSA301

1. Gráficas de aceleración MSA301

Las aceleraciones registradas por el acelerómetro digital MMA8452, se grafican a continuación en cada fase de vuelo considerando una ventana de tiempo estándar de 8 [s].

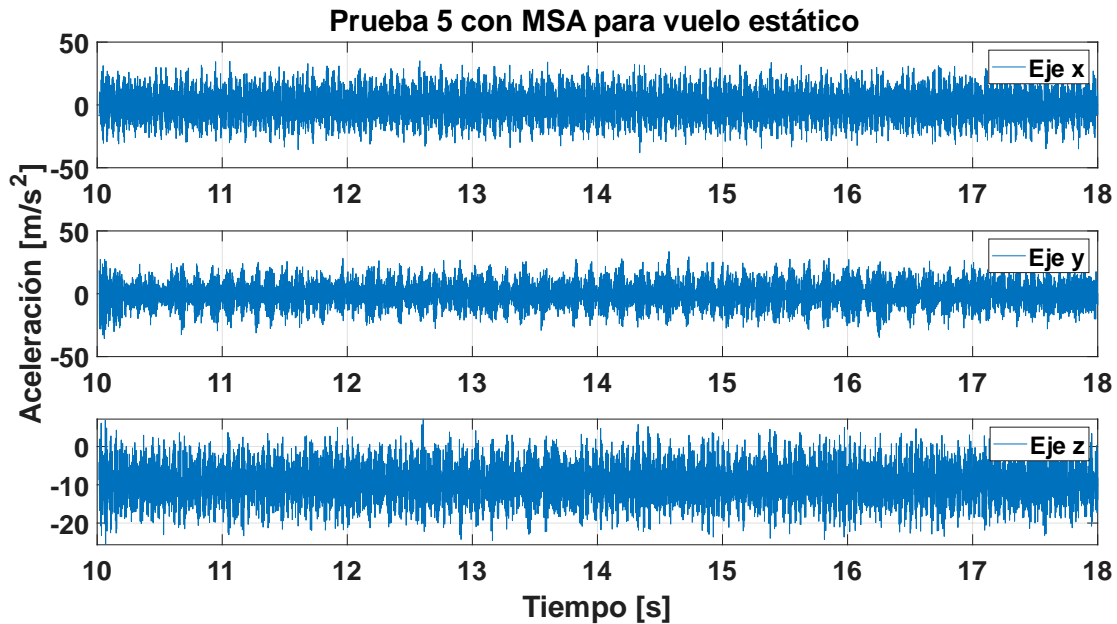


Figura 91. Gráfica de aceleraciones medidas en la prueba de vuelo 5, registradas con el acelerómetro digital MSA301, en vuelo estático durante tramo de 8 [s] de medición.

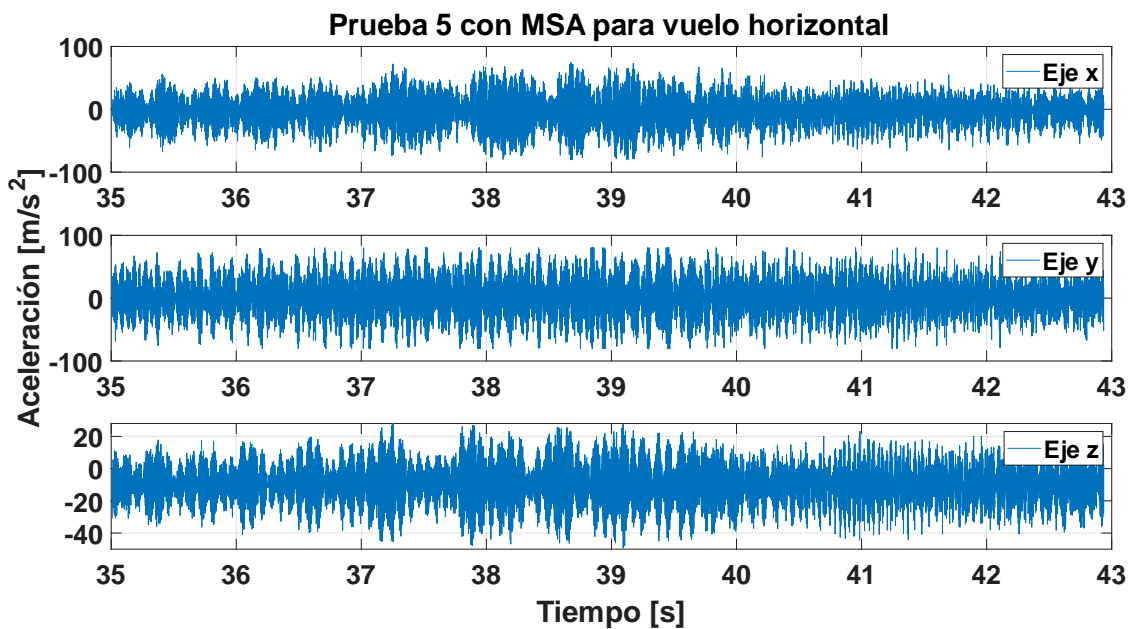


Figura 92. Gráfica de aceleraciones medidas en la prueba de vuelo 5, registradas con el acelerómetro digital MSA301, en vuelo horizontal durante tramo de 8 [s] de medición.

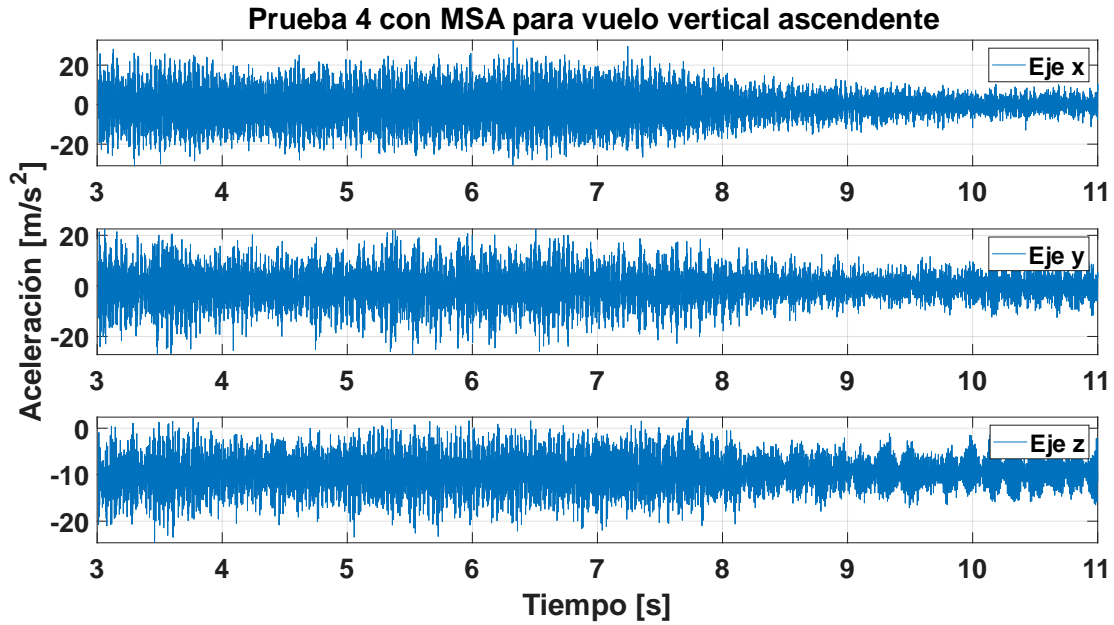


Figura 93. Gráfica de aceleraciones medidas en la prueba de vuelo 4, registradas con el acelerómetro digital MSA301, en vuelo vertical ascendente durante tramo de 8 [s] de medición.

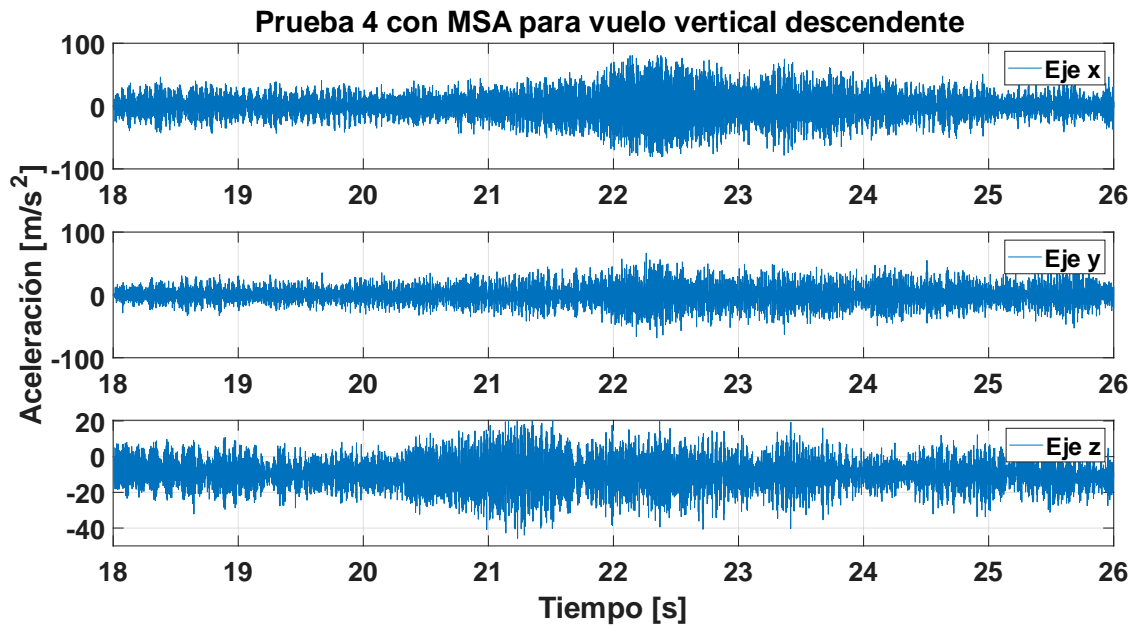


Figura 94. Gráfica de aceleraciones medidas en la prueba de vuelo 4, registradas con el acelerómetro digital MSA301, en vuelo vertical descendente durante tramo de 8 [s] de medición.

2. Gráficas espectro RMS por bandas de frecuencias MSA301

A continuación, se muestran los gráficos del espectro RMS por bandas de frecuencia en los tres ejes de las mediciones de aceleración correspondientes al segmento de tiempo graficado con el acelerómetro digital MMA8452.

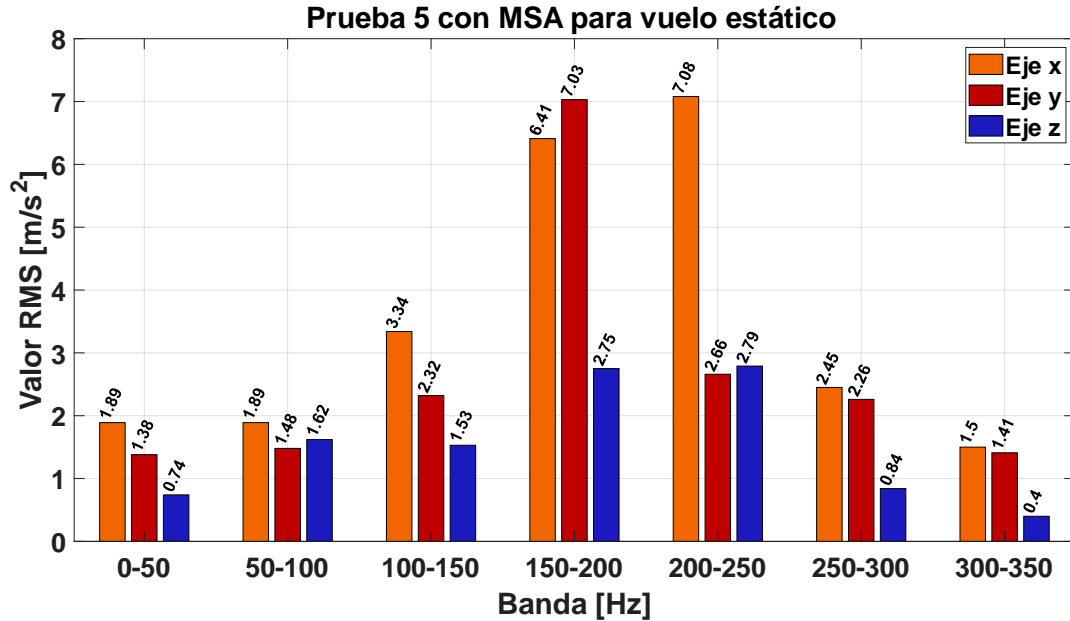


Figura 95. Gráfica del espectro RMS por bandas de frecuencias de la prueba de vuelo 5, registradas con el acelerómetro digital MMA8452, en vuelo estático durante tramo de 8 [s] de medición.

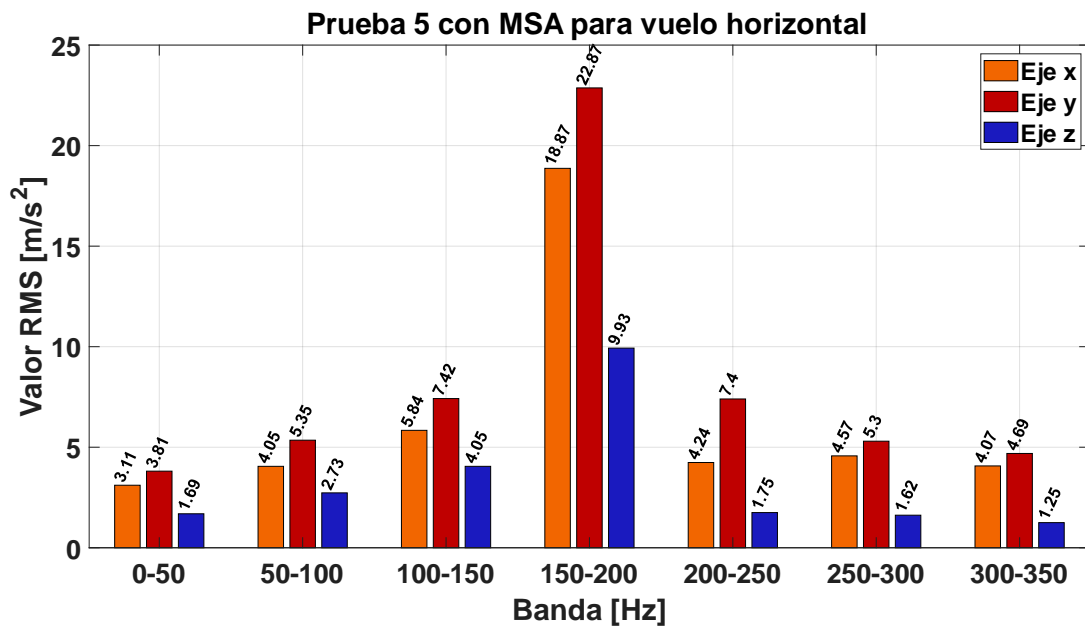


Figura 96. Gráfica del espectro RMS por bandas de frecuencias de la prueba de vuelo 5, registradas con el acelerómetro digital MMA8452, en vuelo horizontal durante tramo de 8 [s] de medición.

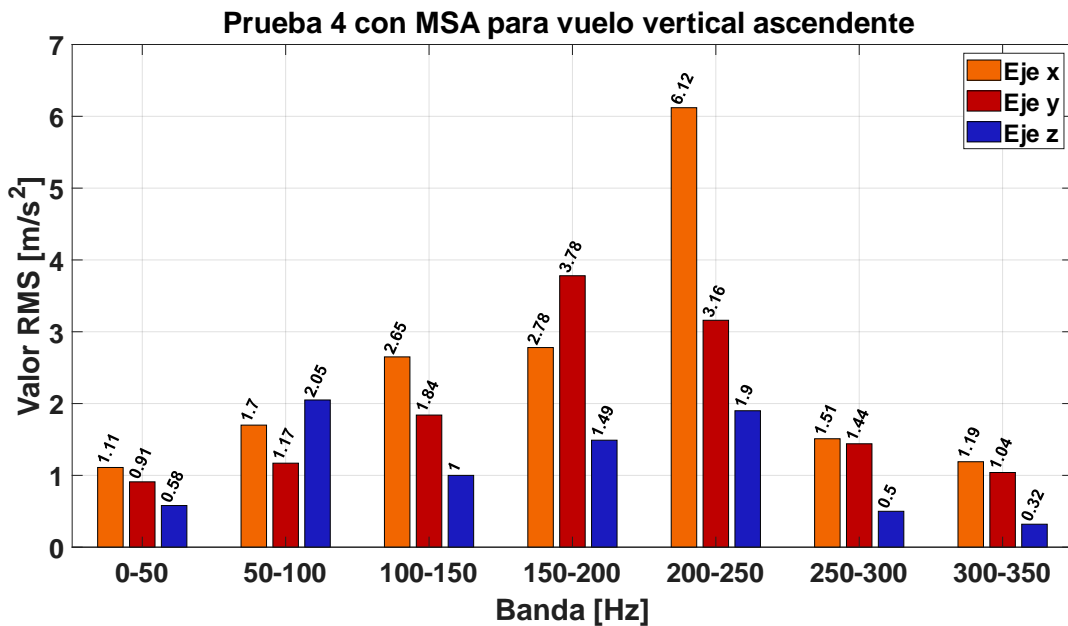


Figura 97. Gráfica del espectro RMS por bandas de frecuencias de la prueba de vuelo 4, registradas con el acelerómetro digital MMA8452, en vuelo vertical ascendente durante tramo de 8 [s] de medición.

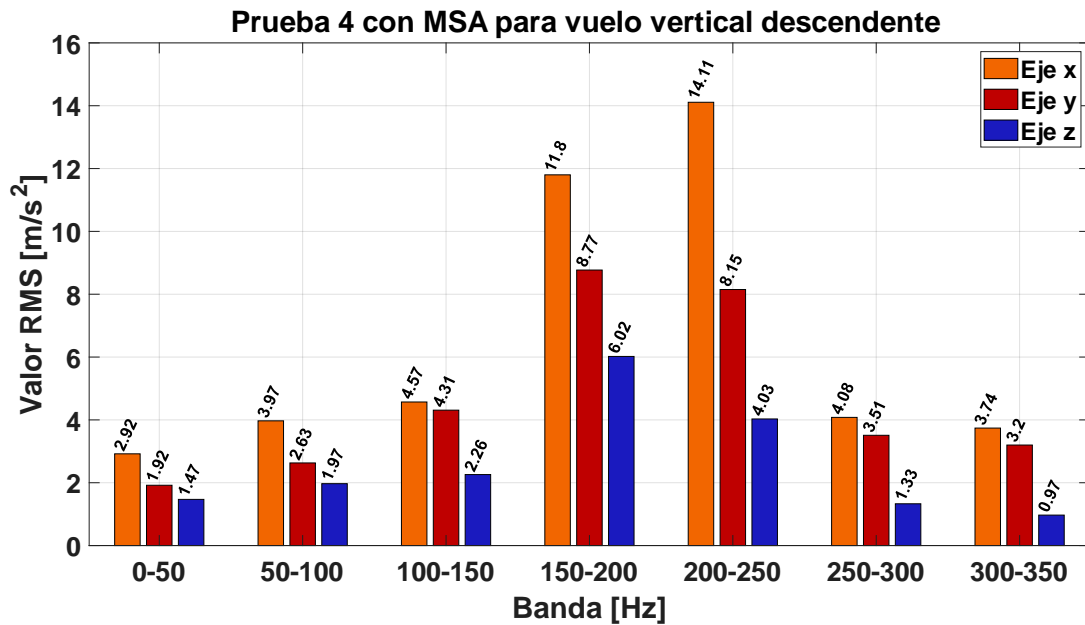


Figura 98. Gráfica del espectro RMS por bandas de frecuencias de la prueba de vuelo 4, registradas con el acelerómetro digital MMA8452, en vuelo vertical descendente durante tramo de 8 [s] de medición.

3. Espectrogramas MSA301

Las figuras presentadas a continuación muestran el espectrograma de las mediciones registradas por el acelerómetro digital MSA301 en las distintas fases de vuelo durante los 60 [s] de medición en los tres ejes.

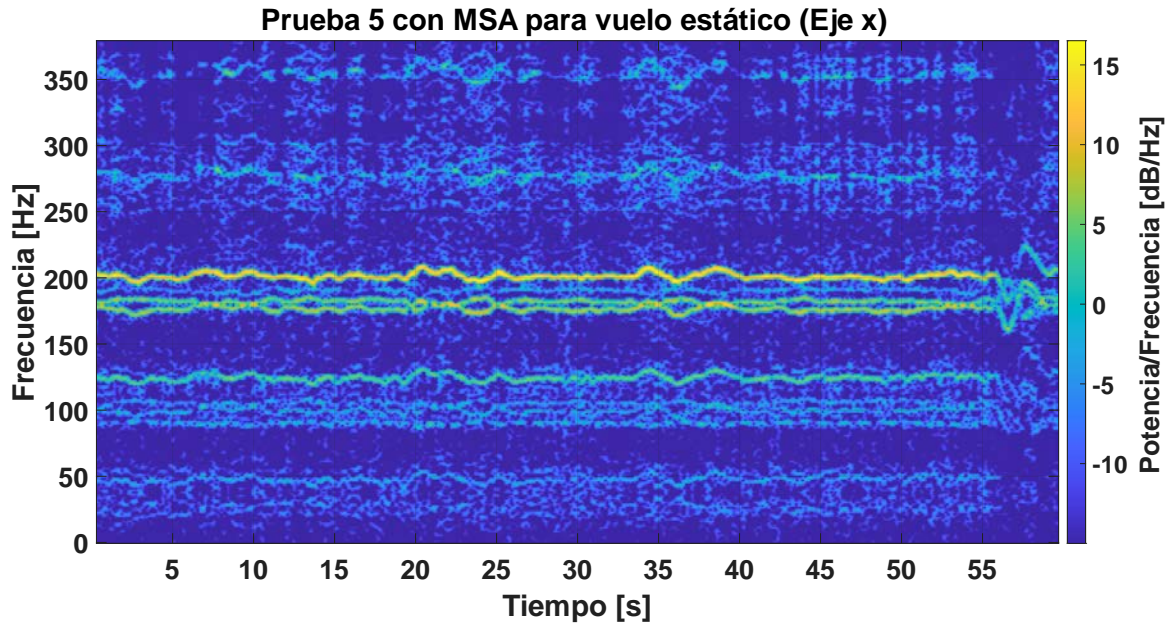


Figura 99. Espectrograma de 60 [s] de medición con el acelerómetro digital MSA301, de la prueba de vuelo 5, en vuelo estático en el eje X.

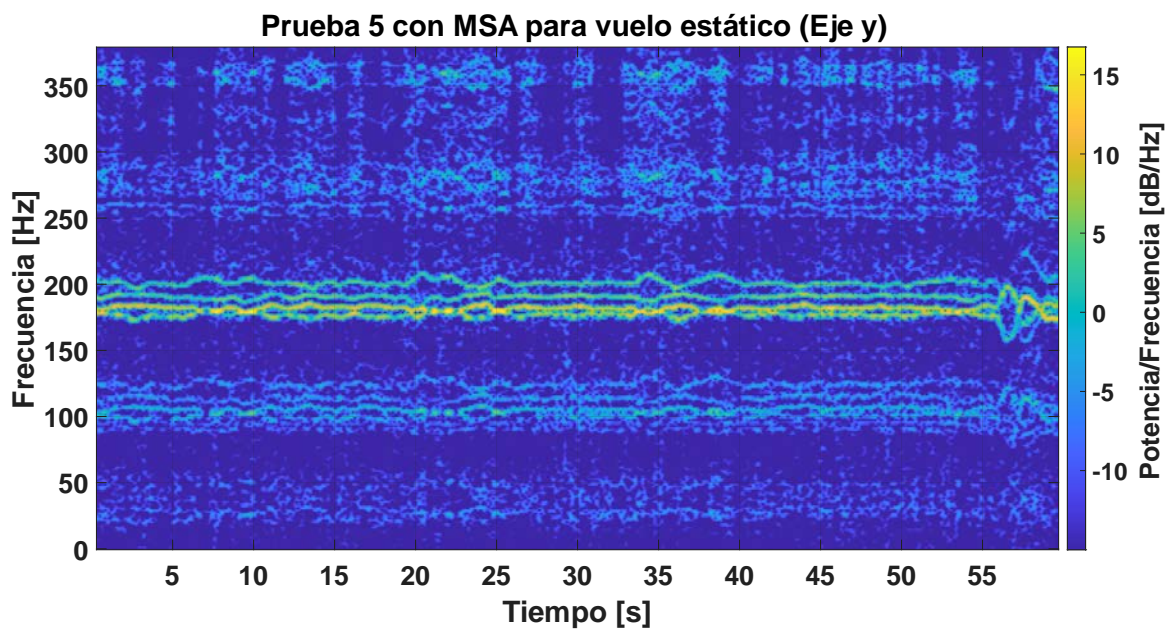


Figura 100. Espectrograma de 60 [s] de medición con el acelerómetro digital MSA301, de la prueba de vuelo 5, en vuelo estático en el eje Y.

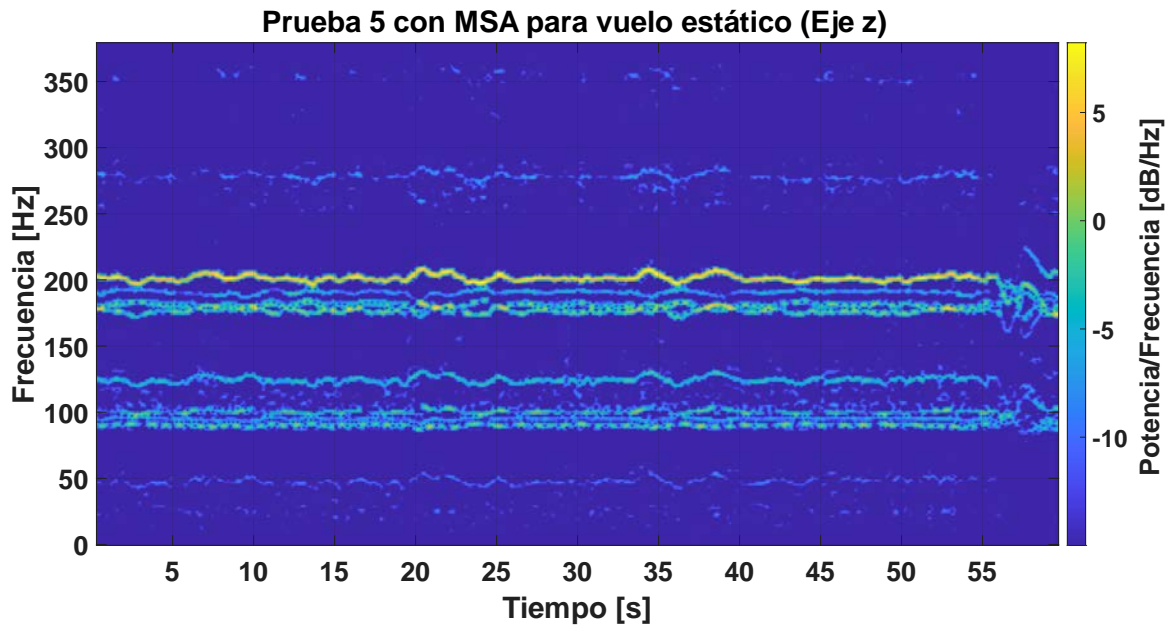


Figura 101. Espectrograma de 60 [s] de medición con el acelerómetro digital MSA301, de la prueba de vuelo 5, en vuelo estático en el eje Z.

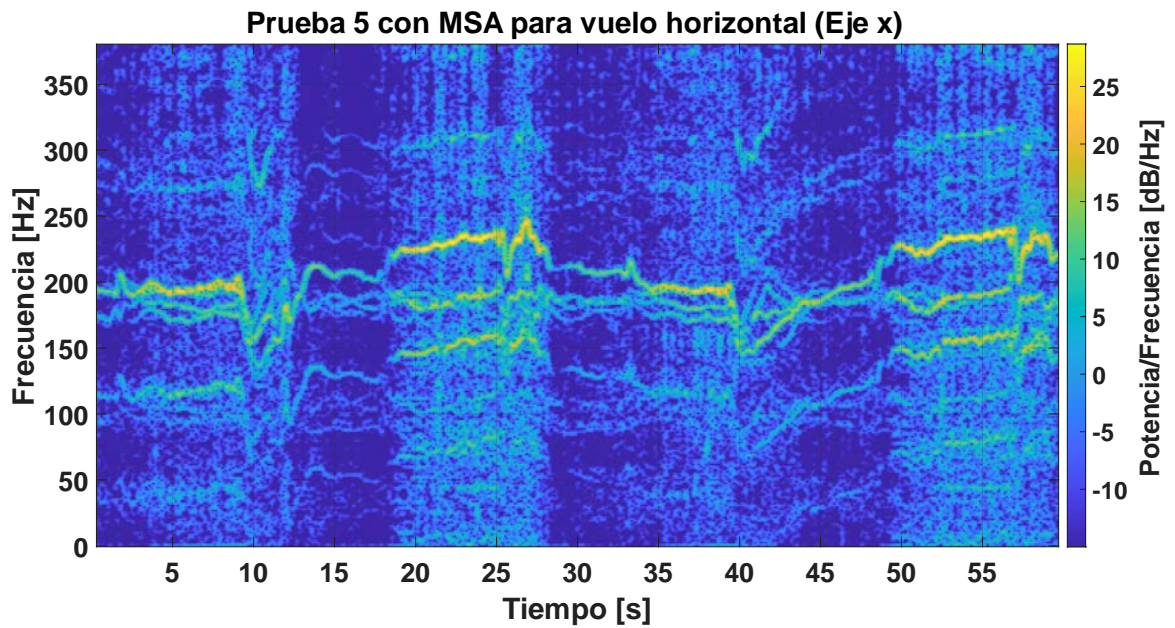


Figura 102. Espectrograma de 60 [s] de medición con el acelerómetro digital MSA301, de la prueba de vuelo 5, en vuelo horizontal en el eje X.

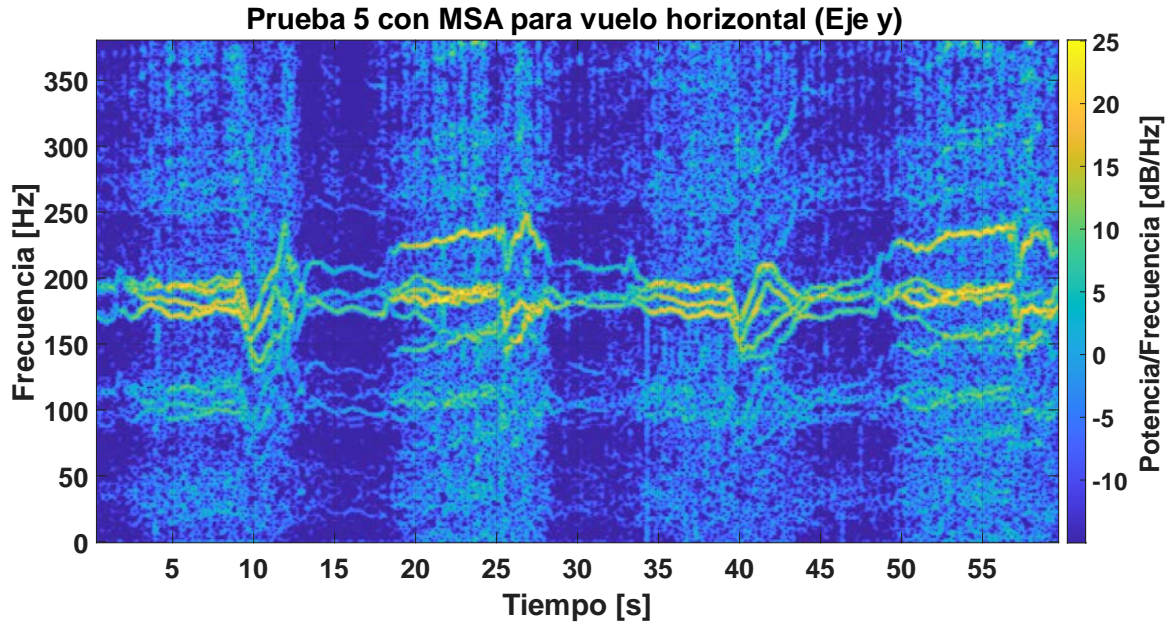


Figura 103. Espectrograma de 60 [s] de medición con el acelerómetro digital MSA301, de la prueba de vuelo 5, en vuelo horizontal en el eje Y.

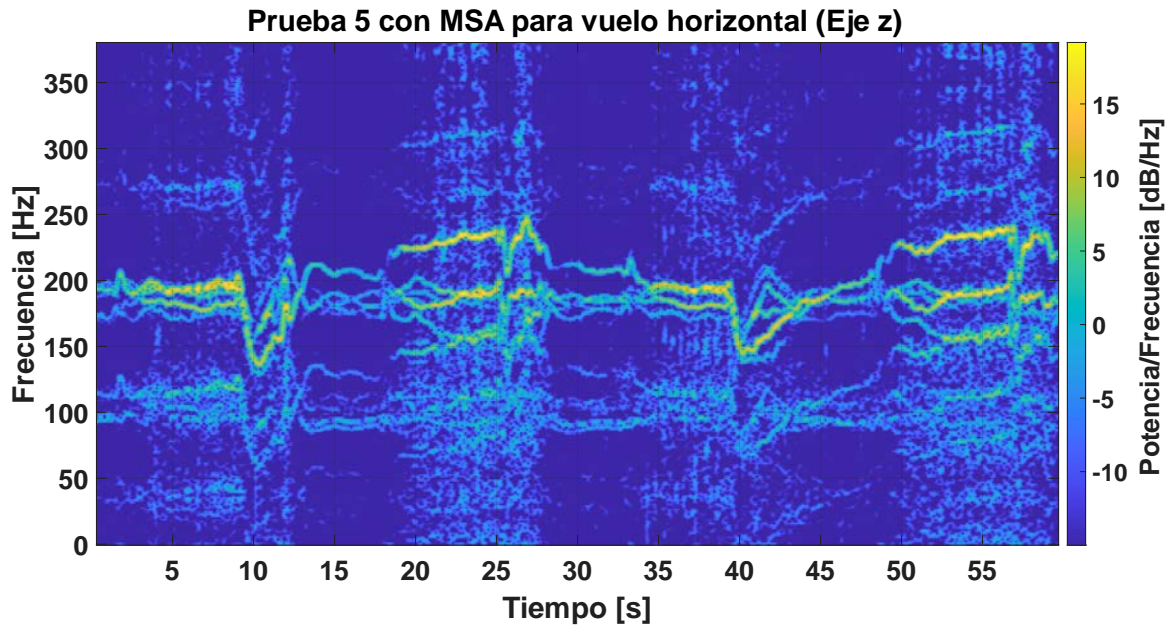
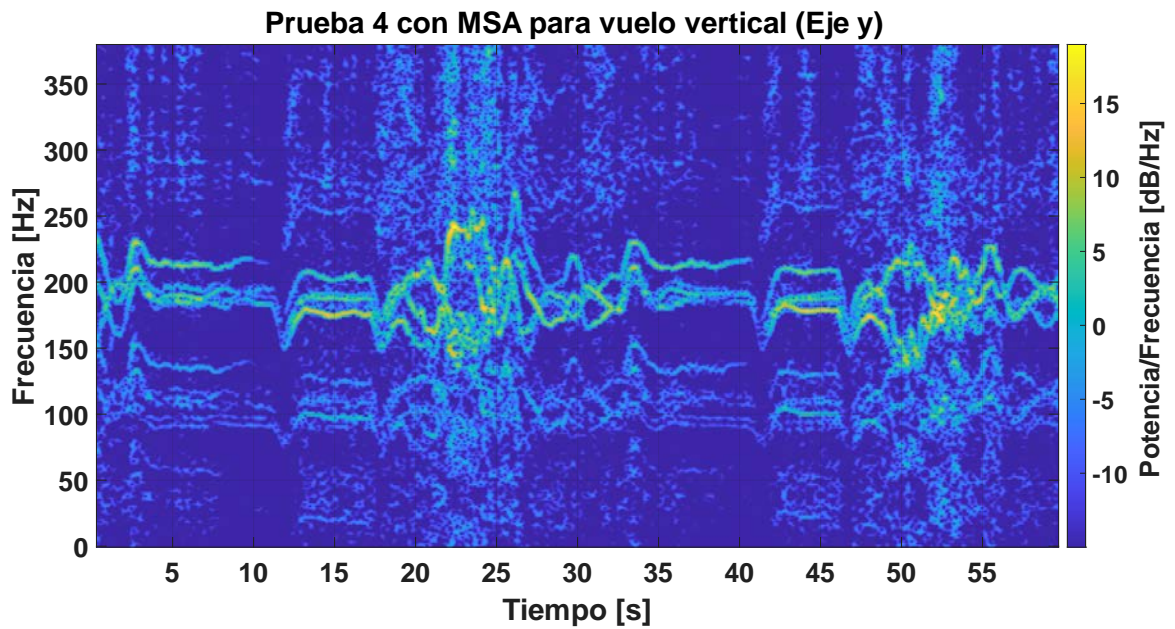
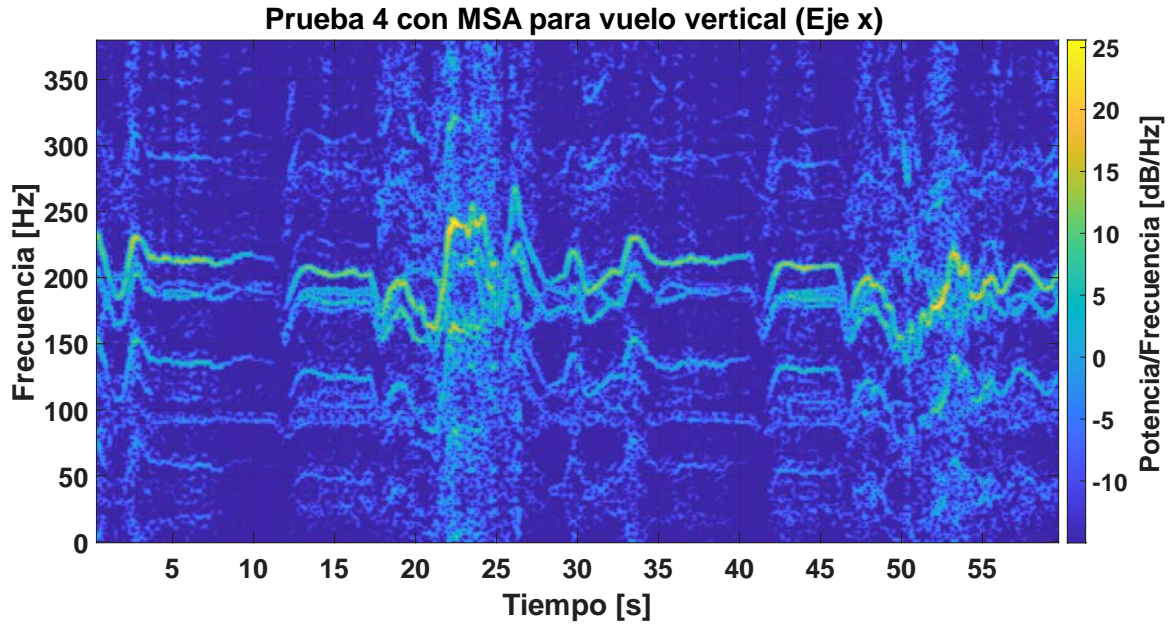


Figura 104. Espectrograma de 60 [s] de medición con el acelerómetro digital MSA301, de la prueba de vuelo 5, en vuelo horizontal en el eje Z.



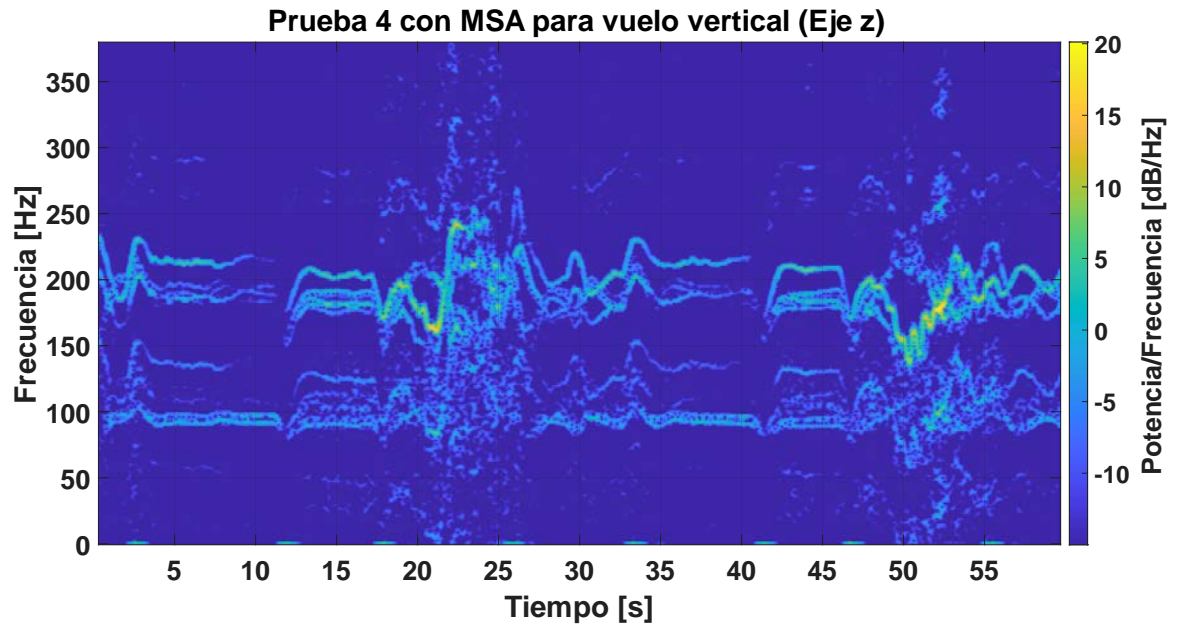


Figura 107. Espectrograma de 60 [s] de medición con el acelerómetro digital MSA301, de la prueba de vuelo 4, en vuelo vertical en el eje Z.

Anexo I: Resultados de espectrogramas del acelerómetro digital MPU6050

En el presente anexo se muestran los resultados obtenidos de las mediciones realizadas durante 60 [s] por el sistema de medición de vibraciones a bordo del dron F550 para el acelerómetro digital MPU6050 mediante los espectrogramas de la señal vibratoria para los ejes X e Y. Los resultados para los datos de las aceleraciones medidas por el acelerómetro MPU6050 en el eje Z se presentan en la Sección 4.3.4. A continuación, se presentan los espectrogramas para cada fase de vuelo.

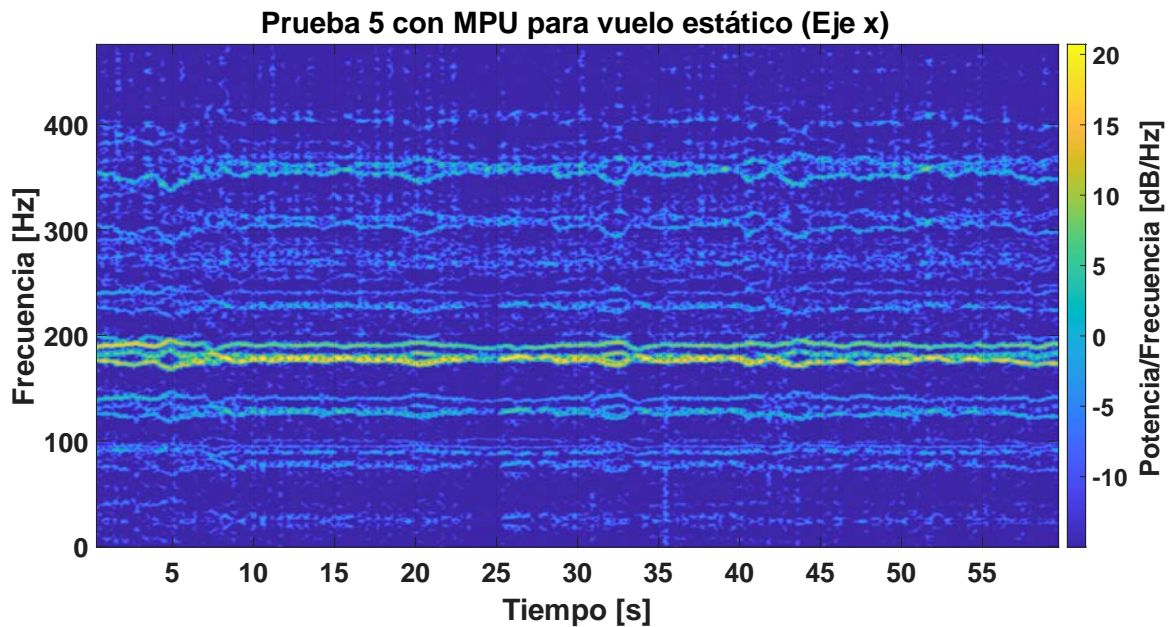


Figura 108. Espectrograma de 60 [s] de medición con el acelerómetro digital MPU6050, de la prueba de vuelo 5, en vuelo estático en el eje X.

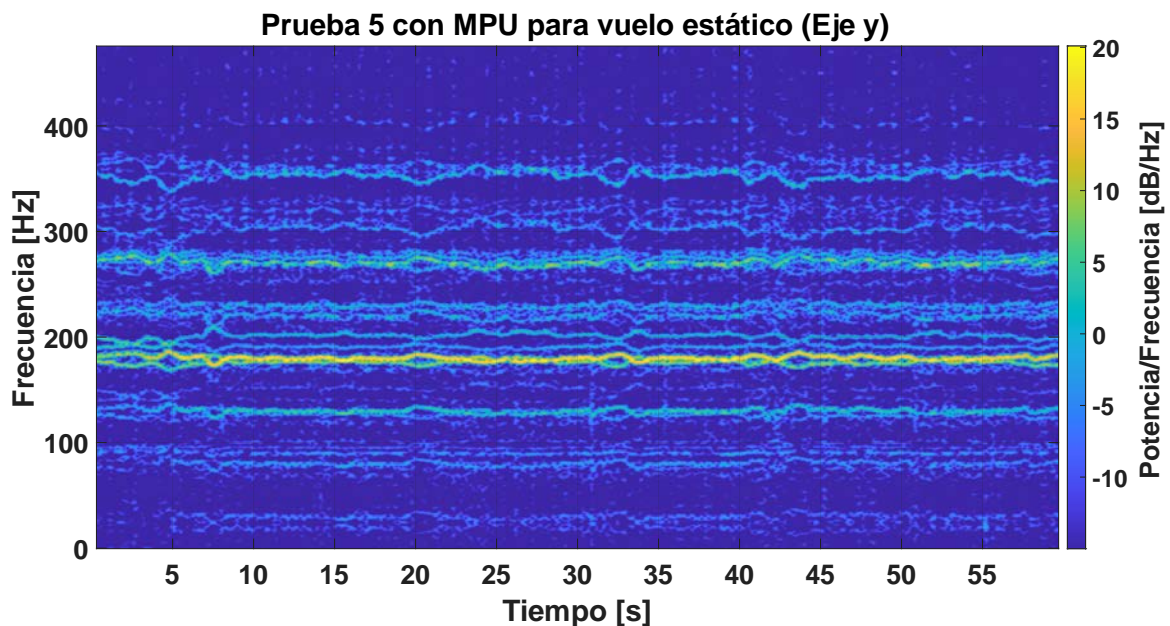


Figura 109. Espectrograma de 60 [s] de medición con el acelerómetro digital MPU6050, de la prueba de vuelo 5, en vuelo estático en el eje Y.

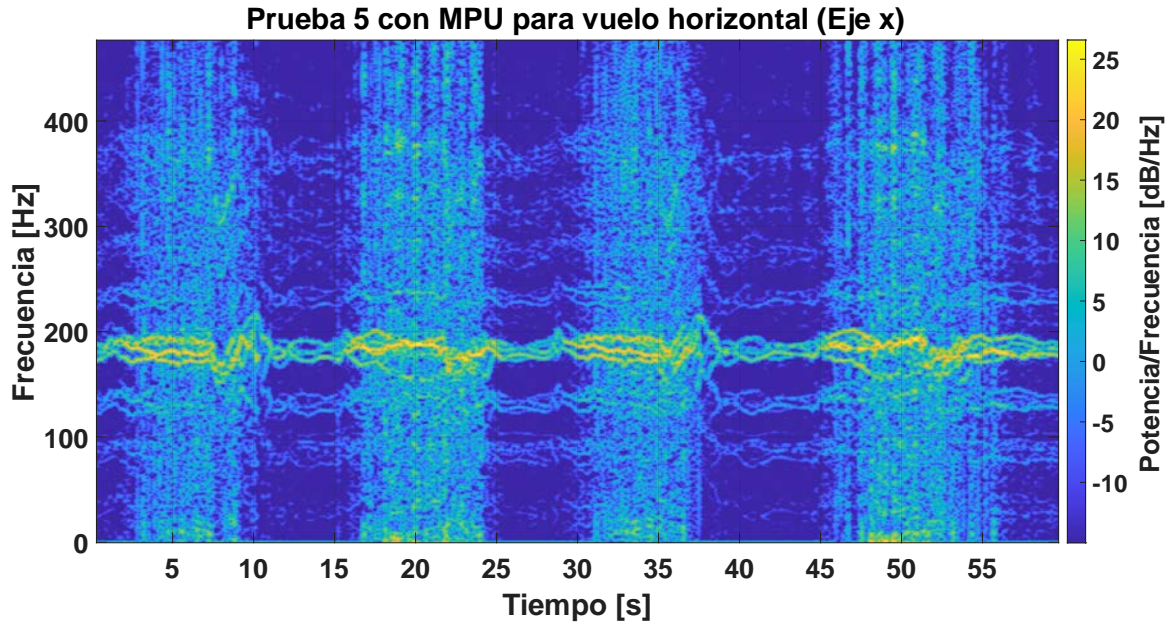


Figura 110. Espectrograma de 60 [s] de medición con el acelerómetro digital MPU6050, de la prueba de vuelo 5, en vuelo horizontal en el eje X.

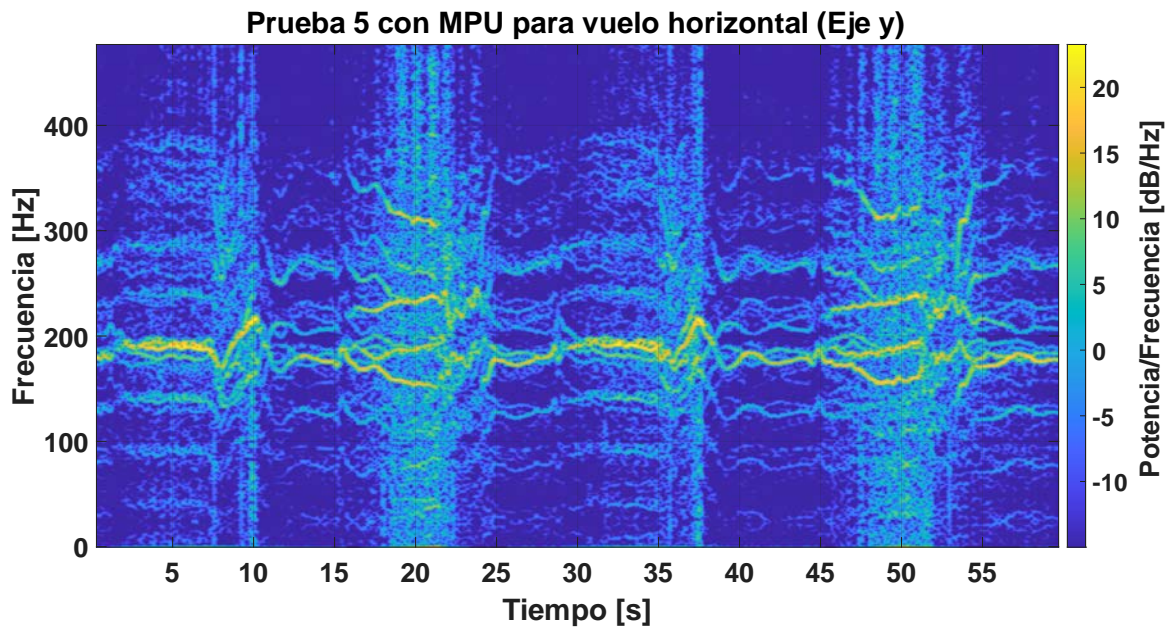


Figura 111. Espectrograma de 60 [s] de medición con el acelerómetro digital MPU6050, de la prueba de vuelo 5, en vuelo horizontal en el eje Y.

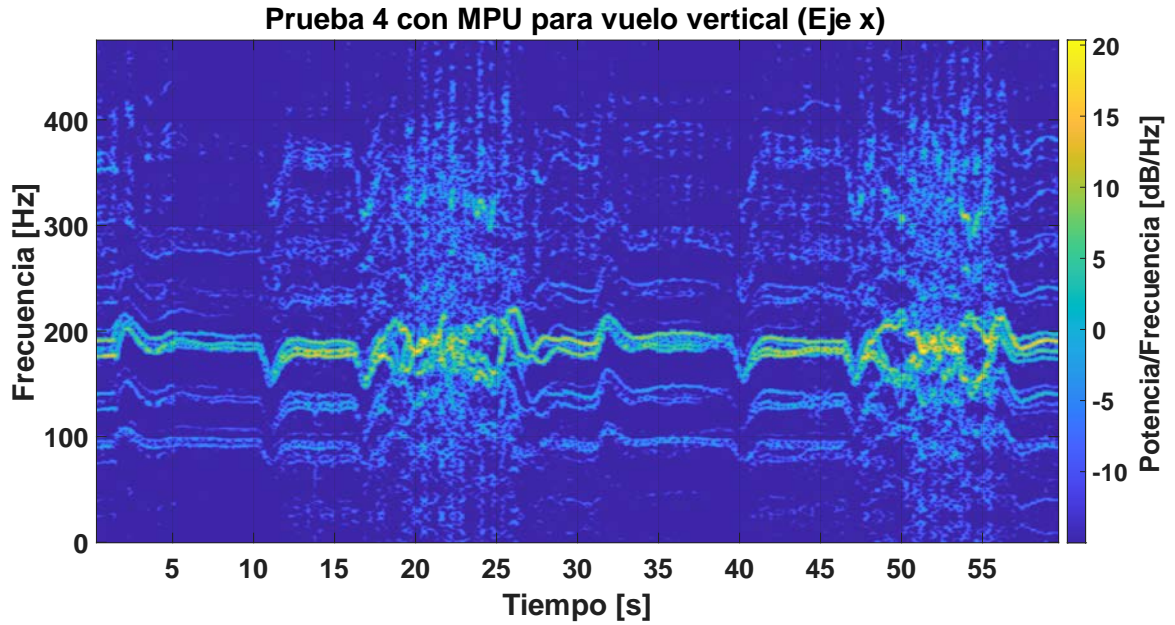


Figura 112. Espectrograma de 60 [s] de medición con el acelerómetro digital MPU6050, de la prueba de vuelo 4, en vuelo vertical en el eje X.

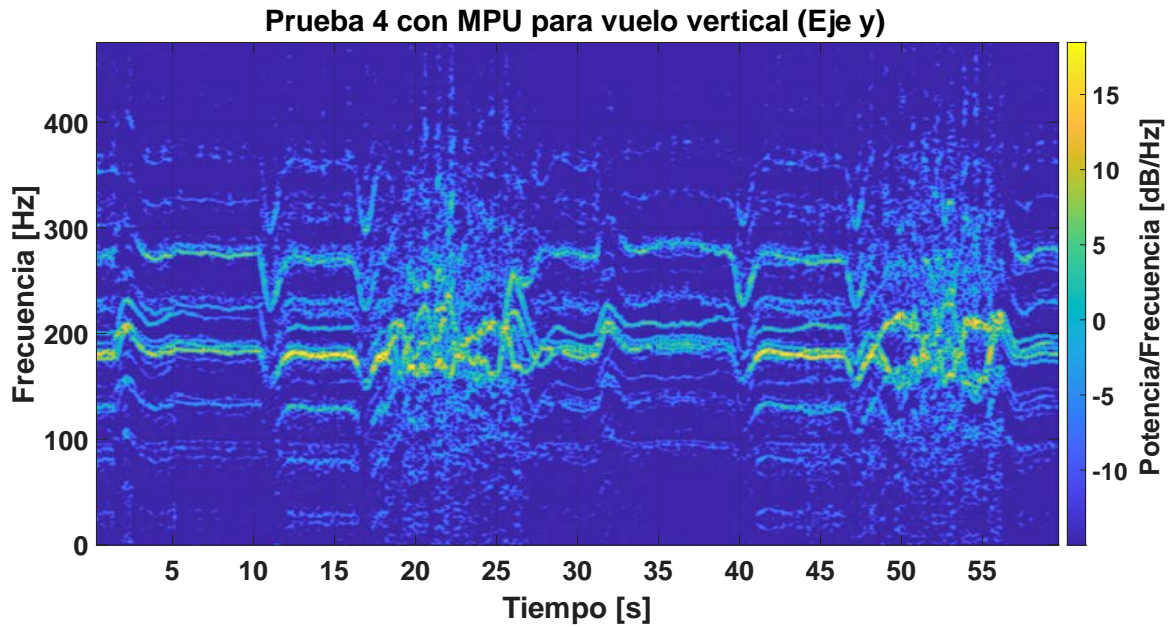


Figura 113. Espectrograma de 60 [s] de medición con el acelerómetro digital MPU6050, de la prueba de vuelo 4, en vuelo vertical en el eje Y.