



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

PROYECTO TÉCNICO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO MECÁNICO

**TEMA:**

---

MEDIDA, ANÁLISIS Y DIAGNÓSTICO DE VIBRACIONES MEDIANTE LA  
CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO BASADO EN  
SENSORES MEMS APLICADO EN MÁQUINAS ROTATIVAS PARA SU  
APLICACIÓN EN MANTENIMIENTO PREVENTIVO.

---

**Autor:** Jonathan Sebastián Torres Pérez

**Tutor:** Ing. Javier García del Valle, PhD.

**AMBATO-ECUADOR**

**2017**

## **CERTIFICACIÓN DEL TUTOR**

En calidad del tutor técnico, previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico, con el tema: **MEDIDA, ANÁLISIS Y DIAGNÓSTICO DE VIBRACIONES MEDIANTE LA CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO BASADO EN SENSORES MEMS APLICADO EN MÁQUINAS ROTATIVAS PARA SU APLICACIÓN EN MANTENIMIENTO PREVENTIVO**. Elaborado por el señor Jonathan Sebastián Torres Pérez, estudiante de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.

Certifico:

Que el presente trabajo es original de su autor.

Ha sido revisado cada uno de sus capítulos.

Es concluida y puede continuar con el trámite correspondiente.

Ambato, marzo del 2017

.....

Ing. Javier García del Valle, PhD.

## **AUTORÍA DEL TRABAJO**

Declaro que el contenido del proyecto técnico: MEDIDA, ANÁLISIS Y DIAGNÓSTICO DE VIBRACIONES MEDIANTE LA CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO BASADO EN SENSORES MEMS APLICADO EN MÁQUINAS ROTATIVAS PARA SU APLICACIÓN EN MANTENIMIENTO PREVENTIVO. Así como sus ideas, opiniones, resultados, conclusiones, son auténticos y de responsabilidad exclusiva de mi persona en calidad de autor del proyecto.

Ambato, marzo 2017.

.....  
Jonathan Sebastián Torres Pérez.

C.I. 1804971552

## **DERECHOS DE AUTOR**

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este Proyecto Técnico o parte de él, un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación según las normas de la Institución.

Cedo los derechos en línea patrimoniales del proyecto Técnico con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este Proyecto Técnico dentro de las regulaciones de la Universidad Técnica de Ambato, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Ambato, marzo 2017.

.....

Jonathan Sebastián Torres Pérez.

C.I. 1804971552



## **APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO**

Los miembros de Tribunal de Grado aprueban el informe del proyecto técnico realizado por el estudiante Jonathan Sebastián Torres Pérez de la carrera de Ingeniería Mecánica, bajo el tema: “MEDIDA, ANÁLISIS Y DIAGNÓSTICO DE VIBRACIONES MEDIANTE LA CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO BASADO EN SENSORES MEMS APLICADO EN MÁQUINAS ROTATIVAS PARA SU APLICACIÓN EN MANTENIMIENTO PREVENTIVO”.

Ambato, Abril de 2017

-----  
Ing. Mg. Susana Valencia

-----  
Ing. Mg. Christian Castro

## DEDICATORIA

*La elaboración de este proyecto va dedicado a mi familia, que influyeron incondicionalmente, en especial a mi mamá Martha y mi hermano Edison que siempre estuvieron apoyando para llegar a cumplir una de mis metas de mi vida y que siempre estarán ahí cuando más los necesite, donde todas mis metas y éxitos próximos siempre serán dedicados a ellos.*

*A mis hermanas Gabriela y Cinthya que tuvieron Fe en mí para cumplir esta etapa de mi vida.*

*A todas las personas, compañeros y sobre todo amigos que me ayudaron dándome ánimos, consejos y apoyo en momentos difíciles.*

## **AGRADECIMIENTO**

*Al señor TODO PODEROSO por darme la fuerza, valor y Fe para llegar a cumplir todas mis metas y sueños.*

*A toda mi familia, amigos, personas que estuvieron en las buenas y en las malas para la realización de este proyecto.*

*A mi Hermano Edison que siempre me apoyado en todas mis metas que me he propuesto.*

*A mi tutor Ing. Javier García del Valle. PhD, que con su ayuda, paciencia y valiosos consejos me supo guiar en la realización de este proyecto.*

*A la Universidad Técnica de Ambato y docentes de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, por haberme brindado sus conocimientos y prepararme para enfrentar los retos de mi vida profesional.*

## ÍNDICE GENERAL

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR.....	II
AUTORÍA DEL TRABAJO.....	III
DERECHOS DE AUTOR .....	IV
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO .....	V
DEDICATORIA .....	VI
AGRADECIMIENTO .....	VII
ÍNDICE GENERAL .....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS .....	X
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XII
RESUMEN EJECUTIVO.....	XVI
ABSTRACT (SUMMARY) .....	XVII
CAPÍTULO I .....	1
1. ANTECEDENTES .....	1
1.1. TEMA:.....	1
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	1
1.3. OBJETIVOS.....	2
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	2
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
CAPÍTULO II.....	3
2. FUNDAMENTACIÓN.....	3
2.1. INVESTIGACIONES PREVIAS.....	3
2.1.1. ARTÍCULOS TÉCNICOS.....	3
2.1.2. TRABAJOS DE GRADUACIÓN .....	4
2.2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	5
2.2.1. MOTORES ASÍNCRONO TRIFÁSICOS .....	5
2.2.2. VIBRACIÓN .....	7

2.2.3.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE VIBRACIÓN .....	7
2.2.4.	ANÁLISIS DE SEÑALES.....	8
2.2.5.	PROBLEMAS VIBRACIONALES .....	11
2.2.6.	ELEMENTOS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES .....	13
2.2.8.	ACELERÓMETROS MEMS .....	16
2.2.9.	TIPO DE ACCELERÓMETROS MEMS .....	17
2.2.10.	CARACTERÍSTICAS DE LOS SENSORES MEMS.....	18
2.2.11.	NORMATIVAS ISO.....	18
CAPÍTULO III.....		24
3.	DISEÑO DEL PROYECTO .....	24
3.1.	SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS .....	25
3.2.	DISEÑO ELECTRÓNICO E IMPLEMENTACIÓN INFORMÁTICA	28
3.2.1.	IMPLEMENTACIÓN INFORMÁTICA.....	29
3.3.	MODELO MATEMÁTICO.....	31
3.3.1.	ANÁLISIS DE FUERZAS .....	34
3.3.2.	ANÁLISIS DE MOMENTOS .....	35
3.3.3.	ANÁLISIS DE FUERZA CON AMORTIGUAMIENTO VISCOZO DEL SISTEMA.....	35
3.3.4.	ANÁLISIS DE LA VELOCIDAD DEL SENSOR. ....	36
3.4.	ANÁLISIS DE DATOS EXPERIMENTALES.....	36
3.4.1.	ANÁLISIS DE POSICIÓN DEL MOTOR .....	36
3.4.2.	DESCRIPCIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS .....	37
3.4.3.	DESCRIPCIÓN DE CASOS PARA MEDICIÓN.....	38
3.4.4.	MEDICIÓN DE VIBRACIONES.....	44
3.4.5.	POSICIONAMIENTO DE LA PARTÍCULA EN EL ESPACIO...76	
3.4.6.	RESULTADOS EXPERIMENTALES .....	84
3.5.	COMPARACIÓN DE MODELO MATEMÁTICO Y EXPERIMENTAL.....	89

3.5.1.	COMPARACIÓN GRÁFICA DE DATOS EXPERIMENTALES Y TEÓRICOS.....	89
3.5.2.	TABULACIÓN DE DATOS TEÓRICOS .....	114
3.5.3.	REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA COMPARACIÓN ENTRE DATOS EXPERIMENTALES Y TEÓRICOS.....	115
3.6.	MEDICIONES DE VIBRACIONES APLICADO EN RODAMIENTOS.....	119
3.7.	MATENIMIENTO PREVENTIVO Y PREDICTIVO. ....	123
3.8.	PRESUPUESTO .....	126
	CAPITULO IV.....	128
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	128
4.1.	CONCLUSIONES: .....	128
4.2.	RECOMENDACIONES: .....	129

### **ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1:	Características de tipos de acelerómetros. ....	16
Tabla 2:	Características de los sensores MEMS .....	18
Tabla 3:	Criterio de severidad, según la ISO 2372 .....	19
Tabla 4:	Criterio de severidad según la ISO 3945 .....	20
Tabla 5:	Procedimientos para evaluar vibraciones según ISO 10816.....	21
Tabla 6:	Procedimientos para evaluar vibraciones según ISO 7919.....	21
Tabla 7:	Criterio de severidad según ISO 7919. ....	23
Tabla 8:	Acelerómetros Analog Devices y sus características.....	25
Tabla 9:	Acelerómetros NXP y sus características. ....	26
Tabla 10:	Acelerómetros STMicroelectronics y sus características. ....	26
Tabla 11:	Acelerómetros Konix y sus características. ....	27
Tabla 12:	Características del motor trifásico Weg W22. ....	38
Tabla 13:	Descripción de casos sin masas excéntricas .....	40
Tabla 14:	Descripción de casos con masas excéntricas grandes.....	42

Tabla 15: Descripción de casos con masas excéntricas pequeñas. ....	44
Tabla 16: Espectros de vibración (RMS), motor balanceado sin masas excéntricas. .....	45
Tabla 17: Armónicos predominantes para pruebas en condiciones normales. ....	48
Tabla 18: Espectros de vibración (RMS), masas excéntricas grandes con h=37mm. .....	49
Tabla 19: Armónicos predominantes con masas excéntricas grandes con h=37mm. .....	52
Tabla 20: Espectros de vibración (RMS), masas excéntricas grandes con h=22mm. .....	53
Tabla 21: Armónicos predominantes con masas excéntricas grandes con h=22mm. .....	56
Tabla 22: Espectros de vibración (RMS), masas excéntricas grandes con h=15mm. .....	57
Tabla 23: Armónicos predominantes con masas excéntricas grandes con h=15mm. .....	59
Tabla 24: Espectros de vibración (RMS), masas excéntricas pequeñas con h=43mm. .....	60
Tabla 25: Armónicos predominantes con masas excéntricas pequeñas con h=43mm. .....	63
Tabla 26: Espectros de vibración (RMS), masas excéntricas pequeñas con h=35mm. .....	64
-Tabla 27: Armónicos predominantes con masas excéntricas pequeñas con h=35mm. ....	67
Tabla 28: Espectros de vibración (RMS), masas excéntricas pequeñas con h=24mm. .....	68
Tabla 29: Armónicos predominantes con masas excéntricas pequeñas con h=24mm. .....	71
Tabla 30: Espectros de vibración (RMS), masas excéntricas pequeñas con h=2mm. .....	72
Tabla 31: Armónicos predominantes con masas excéntricas pequeñas con h=2mm. .....	75

Tabla 32: Masas pequeñas sin excentricidades.....	114
Tabla 33: Masas pequeñas con excentricidades h=24mm.....	114
Tabla 34: Masas pequeñas con excentricidades h= 2mm.....	114
Tabla 35: Masas grandes sin excentricidades.....	115
Tabla 36: Masas grandes con excentricidades h=22mm.....	115
Tabla 37: Masas grandes con excentricidades h=15mm.....	115
Tabla 38: Presupuesto Adquirido para la elaboración del proyecto.....	126

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1: Base deslizante .....	6
Figura 2. 2: Espectro de frecuencia característico de desbalance.....	11
Figura 2. 3: Espectro de frecuencia característico de Desalineamiento.....	12
Figura 2. 4: Espectro de frecuencia característico de falla de rodamientos.....	13
Figura 2. 5: Transductor de Velocidad.....	14
Figura 2. 6: Transductor de Aceleración.....	14
Figura 2. 7: Transductor de proximidad.....	15
Figura 2. 8: Transductor de proximidad MEMS.....	15
Figura 2. 9: Acelerómetro LIS3DH.....	17
Figura 2. 10: Acelerómetro MMA8451 .....	18
Figura 3. 1: Flujograma de Diseño del Proyecto.....	24
Figura 3. 2: Diagrama de flujo de la Programación de los sensores.....	29
Figura 3. 3: Diagrama de flujo de la programación de interfaz gráfica y obtención de datos.....	30
Figura 3. 4: Esquema del motor.....	31
Figura 3. 5: Esquema del resorte A en estado estático.....	33
Figura 3. 6: Esquema del resorte A en movimiento.....	33
Figura 3. 7: Esquema de fuerzas que actúan en el resorte A.....	34
Figura 3. 8: Posición del sensor en el motor.....	36
Figura 3. 9: Máquinas de pruebas de polímeros.....	38



Figura 3. 10: Base metálica.....	39
Figura 3. 11: Base de Goma.....	39
Figura 3. 12: Base de Resorte .....	39
Figura 3. 13: Peso de la m1 para el desbalanceo.....	40
Figura 3. 14: Peso de la m2 para el desbalanceo.....	41
Figura 3. 15: Dimensionamiento de las excentricidades con masas grandes.....	41
Figura 3. 16: Peso de la m3 para el desbalanceo.....	42
Figura 3. 17: Peso de la m3 para el desbalanceo.....	43
Figura 3. 18: Dimensionamiento de las excentricidades con masas pequeñas. ....	43
Figura 3. 19: Banco de prueba para pruebas en condiciones normales. ....	45
Figura 3. 20: Banco de prueba con masas excéntricas grandes con h=37mm. ....	49
Figura 3. 21: Banco de prueba con masas excéntricas grandes con h=22mm. ....	53
Figura 3. 22: Banco de prueba con masas excéntricas grandes con h=15mm. ....	57
Figura 3. 23: Banco de prueba con masas excéntricas pequeñas con h=43mm....	60
Figura 3. 24: Banco de prueba con masas excéntricas pequeñas con h=35mm....	64
Figura 3. 25: Banco de prueba con masas excéntricas pequeñas con h=24mm....	68
Figura 3. 26: Banco de prueba con masas excéntricas pequeñas con h=2mm.....	72
Figura 3. 27: Mosaico 1 de las posiciones de los casos en condiciones normales.	76
Figura 3. 28: Mosaico 2, posición de pruebas realizadas en la tabla 18. ....	77
Figura 3. 29: Mosaico 3, posición de pruebas realizadas en la tabla 20. ....	78
Figura 3. 30: Mosaico 4, posición de pruebas realizadas en la tabla 22. ....	79
Figura 3. 31: Mosaico 5, posición de pruebas realizadas en la tabla 24. ....	80
Figura 3. 32: Mosaico 6, posición de pruebas realizadas en la tabla 26. ....	81
Figura 3. 33: Mosaico 7, posición de pruebas realizadas en la tabla 28. ....	82
Figura 3. 34: Mosaico 8, posición de pruebas realizadas en la tabla 30. ....	83
Figura 3. 35: Cuadro comparativo de distintos tipos de bases en condiciones normales de operación.....	84
Figura 3. 36: Cuadro comparativo de distintos tipos de bases con masas excéntricas grandes h=37mm.....	85
Figura 3. 37: Cuadro comparativo de distintos tipos de bases con masas excéntricas grandes h=22mm.....	85

Figura 3. 38: Cuadro comparativo de distintos tipos de bases con masas excéntricas grandes $h=15\text{mm}$ . .....	86
Figura 3. 39: Cuadro comparativo de distintos tipos de bases con masas excéntricas pequeñas $h=43\text{mm}$ . .....	86
Figura 3. 40: Cuadro comparativo de distintos tipos de bases con masas excéntricas pequeñas $h=35\text{mm}$ . .....	87
Figura 3. 41: Cuadro comparativo de distintos tipos de bases con masas excéntricas pequeñas $h=24\text{mm}$ . .....	87
Figura 3. 42: Cuadro comparativo de distintos tipos de bases con masas excéntricas pequeñas $h=2\text{mm}$ . .....	88
Figura 3. 43: Análisis de Fourier, de anclaje tipo goma .....	90
Figura 3. 44: Velocidad RMS, base muelle. ....	91
Figura 3. 45: Velocidad RMS, base rígida. ....	92
Figura 3. 46: Velocidad RMS, base suelta. ....	93
Figura 3. 47: Velocidad RMS, base de goma con $h=24\text{mm}$ . ....	94
Figura 3. 48: Velocidad RMS, base muelle con $h=24\text{mm}$ . ....	95
Figura 3. 49: Velocidad RMS, base rígida con $h=24\text{mm}$ . ....	96
Figura 3. 50: Velocidad RMS, base suelta con $h=24\text{mm}$ . ....	97
Figura 3. 51: Velocidad RMS, base de goma con $h=2\text{mm}$ . ....	98
Figura 3. 52: Velocidad RMS, base muelle con $h=2\text{mm}$ . ....	99
Figura 3. 53: Velocidad RMS, base rígida con $h=2\text{mm}$ . ....	100
Figura 3. 54: Velocidad RMS, base suelta con $h=2\text{mm}$ . ....	101
Figura 3. 55: Velocidad RMS, base de goma. ....	102
Figura 3. 56: Velocidad RMS, base muelle. ....	103
Figura 3. 57: Velocidad RMS, base rígida. ....	104
Figura 3. 58: Velocidad RMS, base suelta. ....	105
Figura 3. 59: Velocidad RMS, base de goma con $h=22\text{mm}$ . ....	106
Figura 3. 60: Velocidad RMS, base resorte con $h=22\text{mm}$ . ....	107
Figura 3. 61: Velocidad RMS, base rígida con $h=22\text{mm}$ . ....	108
Figura 3. 62: Velocidad RMS, base suelta con $h=22\text{mm}$ . ....	109
Figura 3. 63: Velocidad RMS, base de goma con $h=15\text{mm}$ . ....	110

Figura 3. 64: Velocidad RMS, base resorte con h=15mm. ....	111
Figura 3. 65: Velocidad RMS, base rígido con h=15mm. ....	112
Figura 3. 66: Velocidad RMS, base suelta con h=15mm.....	113
Figura 3. 67: Datos teóricos y experimentales con masas pequeñas sin excentricidad. ....	116
Figura 3. 68: Datos teóricos y experimentales con masas pequeñas con excentricidad h=24mm.....	116
Figura 3. 69: Datos teóricos y experimentales con masas pequeñas con excentricidad h=2mm.....	117
Figura 3. 70: Datos teóricos y experimentales con masas pequeñas sin excentricidad. ....	117
Figura 3. 71: Datos teóricos y experimentales con masas pequeñas con excentricidad h=22mm.....	118
Figura 3. 72: Datos teóricos y experimentales con masas pequeñas con excentricidad h=15mm.....	118
Figura 3. 73: Medición de vibraciones en banco de pruebas Torno. ....	119
Figura 3. 74: Rodamiento y pista en buen estado. ....	120
Figura 3. 75: Rodamiento y pista en mal estado. ....	120
Figura 3. 76: Medición de vibraciones en banco de pruebas “Máquina para pruebas de fatiga por rotación”.....	120
Figura 3. 77: Proyección del análisis espectral Aceleración, Velocidad vs Tiempo. .....	121
Figura 3. 78: Proyección del análisis espectral Aceleración, Velocidad vs Tiempo. .....	122
Figura 3. 79: Caso 9:3 Goma con pernos de anclaje sujetos con h 15mm.....	123
Figura 3. 80: Caso 9:1 Goma con pernos de anclaje sujetos h=37mm. ....	125
Figura 3. 81: Flujograma de mantenimiento Preventivo y Predictivo. ....	126

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

“MEDIDA, ANÁLISIS Y DIAGNÓSTICO DE VIBRACIONES MEDIANTE LA CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO BASADO EN SENSORES MEMS APLICADO EN MÁQUINAS ROTATIVAS PARA SU APLICACIÓN EN MANTENIMIENTO PREVENTIVO.”

**Autor:** Jonathan Sebastián Torres Pérez

**Tutor:** Ing. Javier García del Valle. PhD

**RESUMEN EJECUTIVO**

El presente proyecto técnico se basa en la medición, análisis y diagnóstico de vibraciones mediante la construcción de un sistema electrónico basado en Sensores Micro Electromecánicos (MEMS) aplicado en máquinas rotativas. Los acelerómetros utilizados para la realización del proyecto son LIS3DH y MMA8451. Dicho sistema cuenta con un interfaz hombre-máquina con el objetivo de dar un diagnóstico en tiempo real de la máquina en la cual se están realizando las pruebas. Junto con las mediciones experimentales, se ha desarrollado un modelo matemático en 2D con la finalidad de estudiar el efecto del desbalanceo y el tipo de anclaje en un motor asíncrono, pudiendo así comparar datos teóricos con los obtenidos mediante el sistema de medición.

El análisis matemático desarrollado por la interfaz hombre-máquina a partir de los datos experimentales consiste en la realización de la transformada rápida de Fourier (FFT). En base a estos resultados se puede calcular tanto la frecuencia como la velocidad característica de la vibración. Estos valores son comparados con los límites establecidos en diferentes normativas internacionales con el objeto de determinar un criterio de evaluación sobre el estado de la máquina.

**TECHNICAL UNIVERSITY OF AMBATO**  
**FACULTY OF CIVIL ENGINEERING AND MECHANICS**  
**MECHANICAL ENGINEERING CAREERS**

“MEASUREMENT, ANALYSIS AND DIAGNOSIS OF VIBRATIONS THROUGH THE CONSTRUCTION OF AN ELECTRONIC SYSTEM BASED ON MEMS SENSORS APPLIED IN ROTARY MACHINES FOR ITS APPLICATION IN PREVENTIVE MAINTENANCE.”

Author: Jonathan Sebastián Torres Pérez

Tutor: Ing. Javier García del Valle. PhD

**ABSTRACT (SUMMARY)**

The present technical project is based on the measurement, analysis and diagnosis of vibrations by the construction of an electronic system based on Micro Electromechanical sensors (MEMS) applied in rotary machines. The accelerometers used to carry out the project are LIS3DH and MMA8451. This system has a human-machine interface in order to give a real-time diagnosis of the machine in which the tests are being performed.

Together with the experimental measurements, a 2D mathematical model has been developed with the purpose of studying the effect of the unbalance and the type of anchorage in an asynchronous motor, thus being able to compare theoretical data with the obtaining through the measurement system.

The mathematical analysis implemented in the human-machine interface consists on the frequency domain of the data by means of the Fast Fourier Transformation. Based on this result, the peak velocity and frequency can be easily determined. These values are compared with the limits established in different international regulations in order to determine criteria evaluation on the state of the machine.

# CAPÍTULO I

## 1. ANTECEDENTES

### 1.1. TEMA:

MEDIDA, ANÁLISIS Y DIAGNÓSTICO DE VIBRACIONES MEDIANTE LA CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO BASADO EN SENSORES MEMS APLICADO EN MÁQUINAS ROTATIVAS PARA SU APLICACIÓN EN MANTENIMIENTO PREVENTIVO.

### 1.2. JUSTIFICACIÓN

Todo tipo de máquinas rotativas son ampliamente utilizadas en muchas aplicaciones industriales. De acuerdo con su uso, un sistema de monitoreo es necesario para detectar defectos con el fin de obtener un alto rendimiento y evitar problemas de funcionamiento. A pesar de que varias técnicas tales como: monitoreo de temperatura, emisión acústica, lubricantes, corriente/energía eléctrica que han sido reportadas para la detección de fallos y el diagnóstico, es tarea difícil implementar un sistema de monitoreo donde se incluya la complejidad en la estructura y el entorno de funcionamiento ruidoso.

El análisis de vibraciones ha sido un método tradicional utilizado en el diagnóstico de máquinas por décadas. Las máquinas rotativas suelen estar equipadas con componentes mecánicos complejos que oscilan, y partes acopladas que transmiten dichas oscilaciones. Para condiciones óptimas de operación, tanto la amplitud como la frecuencia de estas oscilaciones está acotada en un determinado rango. Cuando un componente de la máquina se desgasta o bien se rompe, la frecuencia y/o amplitud tiende a cambiar. Todas y cada una avería en una máquina producirá vibraciones con un distintivo en las características de las mismas. La construcción del sistema electrónico permitirá el análisis de vibraciones mencionadas anteriormente y así identificar fallas en cual se podría aplicar el tipo de mantenimiento que corresponda.

Recientemente se han desarrollado dispositivos para medir aceleración basados en Sistemas Micro Electro Mecánicos (MEMS). Para la adquisición de datos y control del estado en tiempo real mediante acelerómetros tipo MEMS, es necesario el

empleo de un microcontrolador para interactuar con un terminal de visualización y monitoreo.

En el presente estudio se propone utilizar los modelos de acelerómetros LIS3DH [1] de la marca ST y MMA8451 [2] de la marca NXP, con un microcontrolador ST-Núcleo.

### **1.3. OBJETIVOS**

#### **1.3.1. OBJETIVO GENERAL**

- Medir, analizar y diagnosticar vibraciones mediante la construcción de un sistema electrónico basado en sensores MEMS aplicado en máquinas rotativas para su aplicación en mantenimiento preventivo.

#### **1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Programar la tarjeta ST-Núcleo mediante el protocolo de comunicación I2C/SPI para los acelerómetros tipo MEMS modelos LIS3DH y MMA8451.
- Analizar en el dominio de la frecuencia los datos medidos. Visualización de los datos y análisis matemático mediante interfaz gráfica.
- Aplicar el procedimiento de medida a una bancada con motor asíncrono: estudio de las vibraciones en función de la velocidad de giro y tipo de los anclajes.

## CAPÍTULO II

### 2. FUNDAMENTACIÓN

#### 2.1. INVESTIGACIONES PREVIAS

##### 2.1.1. ARTÍCULOS TÉCNICOS

En el artículo técnico de **“Saurabh Singh, Dr. Manish Vishwakarma «A Review of Vibration Analysis Techniques for Rotating Machines.» International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) vol. 4, pp 1-5, 2015.”** [3]

En el presente documento realiza una revisión de las técnicas de análisis de vibración para una variedad de máquinas rotatorias. Estas técnicas están agrupadas en tres categorías: dominio del tiempo, dominio de frecuencia y dominio tiempo-frecuencia.

La técnica de dominio del tiempo incluye fuertes señales, que pertenece a un grupo de técnicas de recolección de datos como: parámetros estadísticos que incluyen (media cuadrática (RMS), varianza, oblicuidad, cuortosis y factor cresta), y otra técnica que son: filtros basados en métodos que incluyen demodulaciones, método Prony y eliminación de ruido adaptativo (ANC).

Las técnicas de dominio de frecuencia y dominio tiempo-frecuencia son ampliamente utilizadas para el análisis de vibraciones en máquinas giratorias, debido a que se puede identificar de manera mas sencilla las frecuencias características y módulo de vibración.

En el artículo técnico de **“ Subimal Bikash Chaudhury, Mainak Sengupta, Kaushik Mukherjee. «Vibration Monitoring of Rotating Machines Using MEMS Accelerometer.» International Journal of Scientific Engineering and Research (IJSER) vol. 2, pp 1-7, 2014.”** [4]

Este artículo propone un diseño básico para el desarrollo de un sensor de vibraciones basado en el acelerómetro MEMS de bajo costo mediante la integración del sensor básico y la electrónica para el análisis de vibraciones. La sensibilidad del sensor, la efectividad en el procesamiento de la señal y rendimiento se prueban para un motor de inducción de jaula de ardilla de 7,5 KW, 3φ, 440 V, de 4 polos. Los



experimentos se realizan para comprobar la capacidad de detectar los picos de frecuencia de falla bajo diferentes combinaciones de fallas.

En el artículo técnico de **“Yang, Hongyu and Mathew, Joseph and Ma, Lin «Vibration feature extraction techniques for fault diagnosis of rotating machinery », a literature survey. In: Asia- Pacific Vibration Conference, 12-14 November 2003, Gold Coast, Australia.”** [5]

Este trabajo indica las técnicas de extracción de las características de vibración donde se está mejorando todo tiempo dando avances en disciplinas tales como: estadística, procesamiento de señales, y ciencias de la computación. La técnica de dominio del tiempo incluye fuertes señales, basado en parámetros estadísticos como medidas, covarianza, y curtosis pueden ser calculados y comparados con un límite para detectar fallas en maquinaria rotatorias. Los parámetros estadísticos están para mejorar su sensibilidad para cuando se detecta las fallas. Los métodos basados en filtros, como la demodulación se utilizan para separar eficazmente las vibraciones de "fallas" de otras señales irrelevantes como el ruido.

### **2.1.2. TRABAJOS DE GRADUACIÓN**

En la tesis de: **“Nelson Rodrigo Poaquiza Rivera, «Vibraciones mecánicas en motores rotativos trifásicos de 2 hp de potencia para prevenir desbalance mediante una estrategia de mantenimiento predictivo en el Laboratorio de Control y Automatización de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica en la Universidad Técnica de Ambato».”** [6]

Concluye:

- Los valores tomados por el acelerómetro están en valor de gravedad donde se necesitó la aplicación del criterio de la transformada de Fourier, y así obtener valores en función de velocidades(mm/s) y ser evaluado con la norma de severidad de vibraciones ISO 2372.
- El sensor de aceleración PHIDGETS para medición de vibración en sus tres ejes donde compara los costos de acesibilidad, facilidad de manejo, y la compatibilidad con NI LabVIEW.

Tesis de : “**Jorge Enrique Mejía Morales, «Análisis de vibraciones en motores eléctricos asíncronos trifásicos».**” [7]

Concluye:

- Cada componente que vibra tiene sus determinadas frecuencias, cuando ocurre una falla en estos componentes pueden a distorsionar la frecuencia característica, que con análisis espectral llegan a detectar el problema que lo genera.
- El algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier facilita convertir una señal en dominio en el tiempo en señal en dominio de frecuencia, que aprovecha la periodicidad y simetría del cálculo de la transformada discreta, donde lo realiza en menor tiempo y utilizando menos recursos computacionales.

## **2.2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA**

### **2.2.1. MOTORES ASÍNCRONO TRIFÁSICOS**

Estos convierten la energía eléctrica en energía mecánica. Existen tres tipos que son: síncronos, asíncronos, y de corriente continua. Todas estas presentan la propiedad de ser reversibles, es decir actúan como generadores, transformando energía mecánica en energía eléctrica. En motores trifásicos, el devanado del estator es alimentado por corriente alterna trifásica desde la red, induciéndose corrientes en el rotor. [7]

#### **Principios de operación del motor de jaula de ardilla.**

Al aplicar tensión en las terminales del estator donde se produce un campo magnético giratorio en el rotor, dicho campo induce una corriente en las barras de forma que se genera otro campo magnético que se opone al primero, lo que produce el par. [8]

#### **Bases(Anclajes)**

Es la base donde el motor será colocado para su funcionamiento. Deberán ser capaces de cargar esfuerzos mecánicos y vibraciones externas, además deben ser suficientemente rígidos.

## **Tipos de bases**

### **Base de concreto**

Es una de las más usadas para la instalación de estos tipos de motores. El tamaño de este tipo de bases va a depender del tamaño y del tipo de motor además de otras consideraciones cómo puede el peso, cargas, esfuerzos. etc.

### **Base deslizante**

Este tipo de bases deslizantes (rieles) son comúnmente usados en caso que el motor sea accionado por poleas. El riel próximo a la polea motriz debe ser montado tal que el tornillo de posicionamiento quede fijo entre la polea motriz y la polea accionada, en cambio el tornillo del segundo riel es colocado en sentido opuesto, alineado de forma que todo el sistema quede centrado.

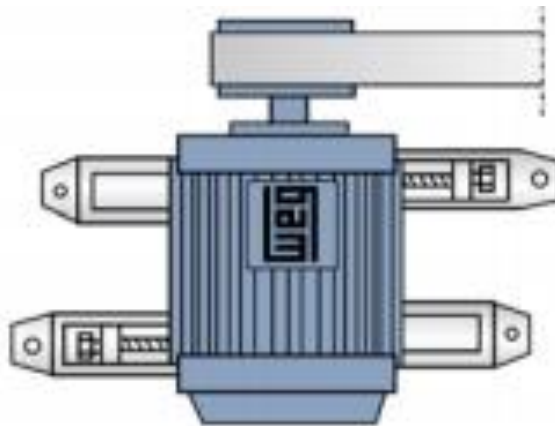


Figura 2. 1: Base deslizante

Fuente: [9]

### **Base metálica**

Se utiliza esta base metálica para que vaya uniformemente apoyado y evitar deformaciones en la carcasa. Comúnmente se utiliza para el ajuste de la punta del eje motriz con la punta de la maquina accionada, todo esto con su respectiva base de concreto y ancladores para fijación de motor.

### **Ancladores**

Son dispositivos de fijación que están directamente sobre las bases sean estas de concreto, deslizantes, o metálicas. Son aplicados con acoplamiento elástico, que ayuda a minimizar los esfuerzos sobre la estructura del motor.

### **2.2.2. VIBRACIÓN**

Se considera vibración cuando un cuerpo experimenta cambios de posición en forma alternativa, mientras el cuerpo no cambie de lugar. Otro concepto de vibración, se define como un intercambio de energía cinética de cuerpos con masas y con rigidez.

Este intercambio de energías se produce por:

- Desequilibrio en máquinas rotativas
- Energía electromagnética
- Energía acústica
- Circulación de masas o fluidos

### **2.2.3. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE VIBRACIÓN**

Según P. N. Saavedra. [10] para poder extraer al máximo toda la información del análisis de vibraciones es necesario aplicar técnicas de análisis tanto en el dominio del tiempo como el dominio de frecuencia, las cuales tienen ventajas en función de las aplicaciones particulares.

#### **Análisis espectral**

Consiste en descomponer la señal de vibración del dominio que está en su dominio del tiempo en sus componentes espectrales respectivas de vibración. La prioridad de este sistema es la determinación de problemas de máquina en base a amplitudes de frecuencia y relación entre los picos de vibración.

#### **Análisis de la forma de onda**

Este tipo de análisis de vibración está en función del tiempo. Provee información que complementa el análisis espectral. Este tipo de análisis reconoce los diferentes tipos de problemas:

- Rozamientos intermitentes
- Modulaciones de amplitud y frecuencias
- Impactos
- Truncaciones

#### **Análisis de fase de vibraciones**

El análisis de fase se define como la diferencia de fase entre dos vibraciones de igual frecuencia, esta diferencia puede ser media en tiempo o grados que llegan a sus valores máximos, mínimos o cero. La velocidad de giro de la máquina entre

vibraciones en eje horizontal, vertical y axial, permite determinar movimientos relativos entre ellos, y diferenciar los problemas que estas generan a frecuencias de 1X rpm como:

- Desalineamiento
- Desbalanceo
- Eje doblado
- Resonancias
- Poleas excéntricas o desalineadas

### **Análisis de demodulaciones**

Este tipo de análisis consiste en analizar la envolvente de la señal portadora del defecto de una señal modulada. Esto permite determinar la periodicidad de las modulaciones y observar problemas como: [11]

- Rodamientos con picaduras
- Engranajes rotos o excéntricos
- Deterioro de alabes en turbinas
- Problemas eléctricos

### **2.2.4. ANÁLISIS DE SEÑALES**

Existen dos tipos de dominios básicos para que las vibraciones sean observadas, como se ha mencionado anteriormente. Se obtiene el dominio del tiempo si el análisis pasa a través de un dispositivo electrónico y la señal es proporcional a la vibración. Para obtener la señal en el dominio de frecuencia, es necesario aplicar un filtro “barrido”.

#### **Series de Fourier**

Fourier postuló que toda función repetitiva y continua en un intervalo  $T$ , puede ser representado por la suma de una componente senoidal continua y una serie de armónicos múltiplos enteros de frecuencia.

La serie armónica que resulta, es denominada serie de Fourier, que establece una relación entre el dominio del tiempo y su expresión con el dominio de frecuencia.

Desgraciadamente, no siempre se va trabajar con funciones continuas. Para funciones discretas, la información se obtiene por medio de muestras caracterizadas por una serie de valores de amplitud de dicha función a intervalos fijos limitados. Cuando se obtiene la información de esta manera la Transformada de Fourier se

convierte en Transformada Discreta de Fourier (TDF) y la solución eficaz por un ordenador se entiende como la Transformada Rápida de Fourier (FFT).” [12]

Esta puede ser representada a través de funciones armónicas.

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_n^{n+1}(a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \text{sen}(n\omega_0 t)) \quad (1)$$

Donde los coeficientes son:

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt \quad (2)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos(n\omega_0 t) dt \quad (3)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \text{sen}(n\omega_0 t) dt \quad (4)$$

La serie de Fourier se puede representar de la siguiente manera.

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (5)$$

$$\theta_n = \tan^{-1} \left( \frac{b_n}{a_n} \right) \quad (6)$$

Entonces indica que  $a_n$  y  $b_n$  pueden expresarse como:

$$a_n = A_n \cos(\theta_n) \quad (7)$$

$$b_n = A_n \text{sen}(\theta_n) \quad (8)$$

Sustituyendo estos valores en la serie de Fourier y simplificando tenemos otra manera de expresar la serie:

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^n A_n \cos(n\omega t - \theta) \quad (9)$$

Pero existe otra forma de expresar la serie de Fourier, que es la transformada compleja de la serie de Fourier, donde es necesario utilizar la ecuación de Euler:

Usando la fórmula de Euler:

$$e^{j\omega} = \cos \omega + j \text{sen} \omega \quad (10)$$

Donde;

$$\cos \omega = \frac{e^{j\omega} + e^{-j\omega}}{2} \quad (11)$$

$$\text{sen} \omega = \frac{e^{j\omega} - e^{-j\omega}}{2j} \quad (12)$$

Haciendo  $C_n = \frac{1}{2}(a_n + j b_n)$  y sustituyendo las ecuaciones de Euler en la serie original de Fourier, se obtiene:

$$f(t) = \sum_{n+1}^{\infty} C_n e^{j\omega t} \quad (13)$$

### Transformada Discreta de Fourier (TDF)

$X(\omega)$  que viene hacer la función del dominio de la frecuencia que corresponde una señal discreta  $X_n$  es definida por la suma “N”.

$$X(\omega) = \sum_n^{n+1} x_k e^{-j\omega k} \quad (14)$$

Donde  $X(\omega)$  es una función periódica compleja de  $\omega$  con periodo de  $2\pi$ .  $X_n$  al ser discreta, la sumatoria de  $X(\omega)$  resulta ser simétrica y se caracteriza que la totalidad de sus valores estén en el rango de  $0 \leq \omega \leq \pi$ . Los valores de una señal discreta provienen de una función continua en función de tiempo  $x(t)$ .

### Transformada Rápida de Fourier (FFT)

Es un algoritmo para evaluar mucho más rápida de la transformada de Fourier discreta y su inversa. La rapidez en el cálculo es lo importante en el análisis e interpretación de señales.

Sean  $X_0, \dots, X_{n-1}$  números complejos. La transformada directa (TDF) se define como;

$$f_j = \sum_{k=0}^{n-1} x_k e^{-\frac{2\pi i}{n} jk} \quad j=0, \dots, n-1 \quad (15)$$

Esta fórmula requiere  $(n^2)$  en lo que es operaciones aritméticas. En el caso de FFT se obtiene el mismo resultado con solo “ $n \log(n)$ ” operaciones.

La transformada discreta inversa de Fourier (TDFI) se calcula como:

$$x_k = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} f_j e^{\frac{2\pi i}{n} jk} \quad k=0, \dots, n-1 \quad (16)$$

Donde;

$$W^k = e^{-\frac{2\pi i}{n} jk} \quad (17)$$

La TDF ampliada queda:

$$f_1 = x_0 + x_1 W^{1k} + x_2 W^{2k} + \dots + x_{n-1} W^{(n-1)k} \quad (18)$$

La FFT aprovecha la simetría y periodicidad del factor  $W$ , para el cálculo de la TDF, donde la periodicidad implica  $W^k = W^{k+n}$  y su simetría implica  $W^k = W^{(k+n)/2}$ .

En base en estas dos prioridades se factoriza la matriz W y realiza menos operaciones. [7]

### 2.2.5. PROBLEMAS VIBRACIONALES

A continuación, se detallará gráficamente el análisis espectral de frecuencia de problemas comunes relacionados en máquinas rotatorias.

#### Desbalanceo

Un problema de desbalanceo existe cuando su centro de masa difiere del centro de rotación.

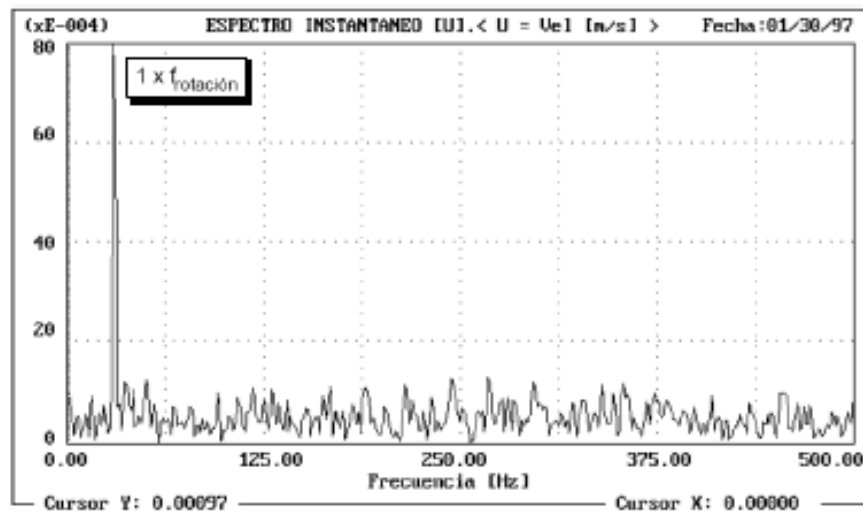


Figura 2. 2: Espectro de frecuencia característico de desbalanceo.

Fuente: [13]

La figura 2.1 muestra un pico de **1xTS=Turning Speed** que significa un desbalanceo del objeto medido, las mayores amplitudes se consiguen en dirección radial, para equipos instalados en forma horizontalmente. Para rotores en voladizo muestran mayores amplitudes en el plano axial.



## Desalineamiento

Existen tres tipos de Desalineamiento el paralelo, angular y combinados.

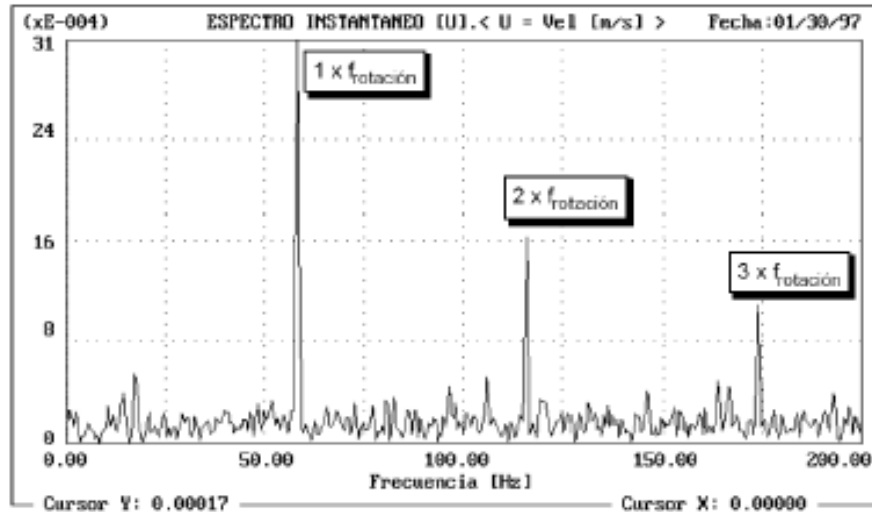


Figura 2. 3: Espectro de frecuencia característico de Desalineamiento.

Fuente: [13]

La figura 2.3 muestra un pico de  $1xTS$  que significa un desalineamiento angular; un pico de  $2xTS$  significa un desalineamiento paralelo. Pueden aparecer un  $3xTS$  que representa una combinación de ambos, que en casos llega a hacer una falta grave de alineamiento.

Este tipo de onda repetida y periódica con uno o dos picos aparece por cada revolución. Las amplitudes de desalineamiento paralelo aparecen en dirección del plano radial, en cambio el desalineamiento angular aparece comúnmente en el plano axial, y en combinación aparecen en ambos planos.

## Defectos en rodamientos

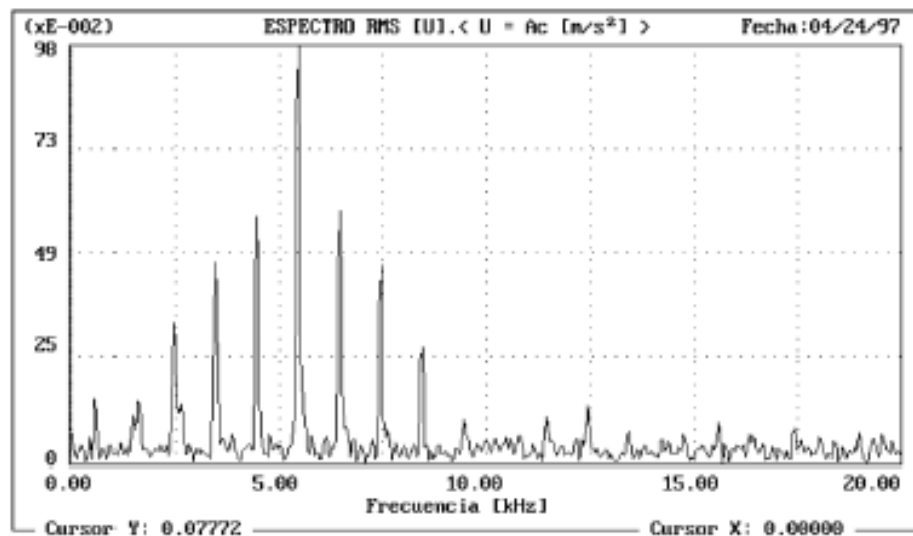


Figura 2. 4: Espectro de frecuencia característico de falla de rodamientos.

Fuente: [13]

La Figura 2.4 muestra armónicos de picos no sincrónicos e impactando en la forma de onda que son característicos en este tipo de defectos. Los armónicos en fallas de pista en un rodamiento va acompañada por bandas laterales a la velocidad de giro. Las mayores amplitudes aparecen en la dirección radial, en el caso de rodamientos de empuje se presentan las mayores amplitudes en dirección axial.

### 2.2.6. ELEMENTOS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES

#### Transductores

Diego Fabián Tandalla Guanoquiza [14] detalla que las vibraciones son procesadas en señales eléctricas mediante el analizador de vibraciones y para ello requieren de transductores. Existen 3 tipos tales como: velocidad, aceleración y proximidad. Los dos primeros están instalados en una carcasa y el último mide directamente la posición del motor.

#### Transductores de velocidad

Una bobina cilíndrica y un imán que mediante dos resortes se encuentra suspendido en la mitad en medio fluido. Estos transductores al colocarse en las chumaceras, produce una oscilación en el magneto donde induce una corriente eléctrica y una diferencia de potencial en la bobina, que es proporcional a la amplitud de vibración medida.

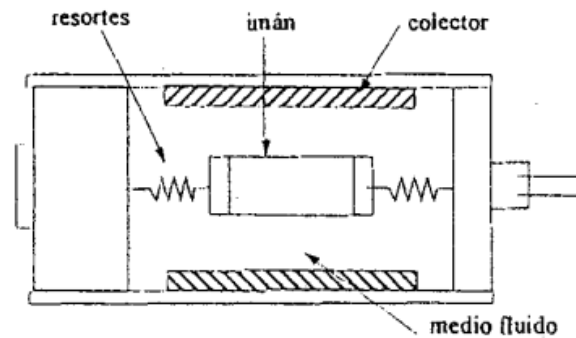


Figura 2. 5: Transductor de Velocidad

Fuente: [14]

Se usa comúnmente para la medición de rodamientos. Su rango de aplicación va desde de 2 Hz a 1 KHz.

### Transductores de aceleración

Consta de una pieza de cristal piezoeléctrico que está en contacto con una masa. Este tipo de transductores se ponen en contacto con la armadura del sensor y el medio vibrante, la fuerza de excitación interna deforma el cristal y por las propiedades piezoeléctricas que posee genera una señal eléctrica en respuesta.

Los acelerómetros operan a una amplia gama de frecuencias, desde 0 - 400kHz hasta más, son muy comunes para máquinas de altas velocidades y de altas frecuencias en general.

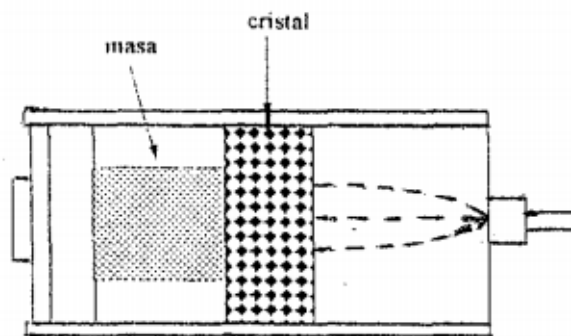


Figura 2. 6: Transductor de Aceleración.

Fuente: [14]

### Transductores de proximidad

Se compone de un núcleo ferroso envuelto con una bobina que generan un campo magnético. Se coloca cerca del eje, que al vibrar completa el lazo del campo magnético, generando corrientes parásitas de Eddy que modifican dicha señal proporcional al desplazamiento del objeto.

Estos tipos de transductores requieren calibración y una fuente externa para su funcionamiento.

Tienen una mejor respuesta a bajas frecuencias, de 0 – 400 Hz, y se instala directamente sobre el eje. [14]

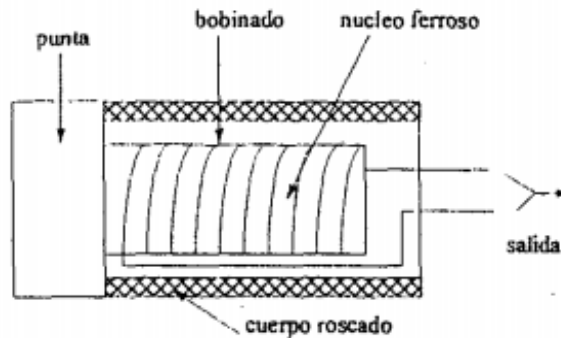


Figura 2. 7: Transductor de proximidad.

Fuente: [14]

### 2.2.7. Sistemas micro-electromecánicos (MEMS)

Reciben esta denominación, “sistemas micro-electromecánicos MEMS (Micro-electro-Mechanical Systems”, circuitos integrados, que además de poseer circuitos electrónicos contiene dispositivos mecánicos muy reducidos. Los sistemas micro-electromecánicos contienen:

- Circuitos acondicionadores (amplificadores, filtros, muestreo y retención).
- Sensores eléctricos.
- Uno o varios procesadores digitales.

Así se obtiene microsistemas capaces de convertir señales, y por ello reciben el nombre de sensores inteligentes (Smart Sensors), a continuación, se representa el esquema de bloques de los MEMS.

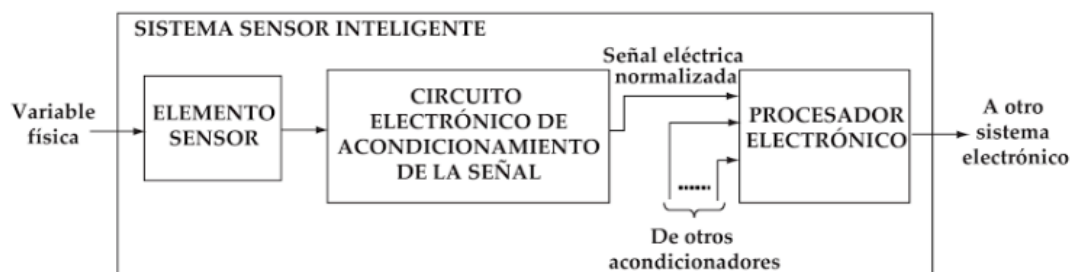


Figura 2. 8: Transductor de proximidad MEMS.

Fuente: [15]

### 2.2.8. ACELERÓMETROS MEMS

Los acelerómetros MEMS son mucho más precisos, pequeños, y robustos; comparados con los acelerómetros convencionales. Su principio de operación es traducir un desplazamiento en medida proporcional a la aceleración. Así se puede integrar un elemento piezoeléctrico, piezoresistivo, e incluso sensor capacitivo. Este tipo de sensores es pegado a la masa sísmica donde mide su movimiento y de ahí obtiene su aceleración. La ventaja de utilizar MEMS se basa en que las señales son linealizadas en los tres ejes principales, x, y, z. Las salidas de los acelerómetros se expresan en unidades g, que corresponden a la gravedad ( $9.8\text{m}/\text{seg}^2$ ). Dependiendo de la construcción del acelerómetro, algunos modelos permiten medir desde frecuencias nulas hasta frecuencias nominales(MEMS), mientras otras familias de acelerómetros necesitan que exista una excitación para que se produzca una señal de salida(piezoeléctricos). [16]

En la tabla 1 se mostrará unos criterios para la selección de acelerómetro.

Tabla 1: Características de tipos de acelerómetros.

	Piezoeléctrico	Piezoresistivo	Capacitivo
Ancho de banda	1 kHz a 30kHz	0 Hz a 130 kHz	0 Hz a 1 kHz
Temperatura de trabajo	Normales: -55°C a 260°C Especiales: -55°C a 650°C	-55°C a 66°C	Hasta 180°C
Aplicación típica	Medición de: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vibración.</li> <li>• Choques.</li> <li>• Ideales para medir pruebas destructivas de automóviles colocados a 1 m del punto de impacto (+5000g).</li> </ul>	Medición de: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Transitorios de larga duración.</li> <li>• Choques.</li> <li>• Ideales para medir pruebas destructivas de automóviles colocados a 2 m del punto de impacto (+500g a 1000g).</li> </ul>	Medición de: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vibraciones de baja frecuencia.</li> <li>• Aceleración constante.</li> <li>• Movimientos de duraciones menores de 1 s a varios minutos</li> <li>• Ideales para medir movimientos en automóviles, estabilidad de aviones</li> </ul>

Fuente: [16]

## 2.2.9. TIPO DE ACELERÓMETROS MEMS

### ACELERÓMETRO LIS3DH

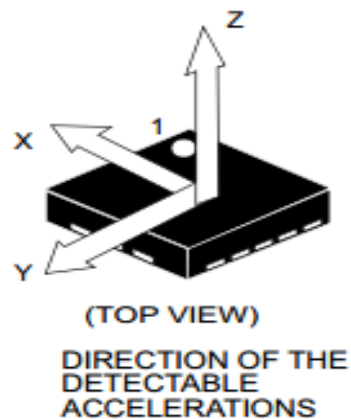


Figura 2. 9: Acelerómetro LIS3DH.

Fuente: [1]

El acelerómetro LIS3DH de tres ejes de muy alto rendimiento, de muy bajo consumo perteneciente a la familia "nano", con salida estándar de interfaz serie digital I2C / SPI, cuenta con modos operativos de muy baja potencia que permiten ahorrar energía y funciones integradas inteligentes.

El LIS3DH posee una variedad de escalas a usar como:  $\pm 2g / \pm 4g / \pm 8g / \pm 16g$  y capaz de medir aceleraciones con salidas de datos que va de 1 Hz a 5.3 kHz. El LIS3DH está disponible en un pequeño paquete de matriz de red de plástico delgado ((LGA) "land grid array") y está garantizado para operar en un rango de temperatura extendida de  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $+85^{\circ}\text{C}$ .

### ACELERÓMETRO MMA8451

El MMA8451 es un acelerómetro inteligente de tres ejes, baja potencia, mediante diseño capacitivo. Las funciones de interrupción que posee el acelerómetro ahorran energía y alivia el procesador principal de los datos de sondeo.

Este dispositivo puede configurarse para generar señales de interrupción de activación por inercia a partir de cualquier combinación de funciones que configurables permiten monitorear eventos y permanecen en un modo de baja potencia durante períodos de inactividad. [2]



Figura 2. 10: Acelerómetro MMA8451

Fuente: [2]

### 2.2.10. CARACTERÍSTICAS DE LOS SENSORES MEMS

Tabla 2: Características de los sensores MEMS

Características	LIS3DH	MMA8451
Voltaje de alimentación	1,71 V a 3,6 V	1,95 V a 3,6 V
Salida digital	16 bits	14 bits y 8 bits
Interfaz de Salida digital	I2C/SPI	I2C
Rangos de medición	$\pm 2g / \pm 4g / \pm 8g / \pm 16g$	$\pm 2 g / \pm 4 g / \pm 8 g$
Temperatura de operación	-40 ° C a +85 ° C	-40 ° C a +85 ° C
Consumo de corriente	muy baja potencia hasta 2 $\mu$ A	6 $\mu$ A a 165 $\mu$ A
Generadores para caída libre	SI	SI
Detección de movimiento	SI	SI
Detección de caída libre	SI	SI
Detección de impulsos	NO	SI

Fuente: [2]

### 2.2.11. NORMATIVAS ISO

Para la medición de vibraciones existe una gama extensa de normas, que trata acerca de la severidad de vibraciones, entre las cuales se tiene:

**ISO 2372-1974. “Vibración mecánica de máquinas con velocidades de operación entre 10 y 200rev/s. Bases para la especificación de estándares de evaluación”.**

Se aplica en máquinas rotativas con rotores flexibles, y rígidos. La severidad de la vibración, según ISO, va de un rango de frecuencia de 10 y 1000 Hz. La severidad de vibración admisible, son distinguidas en varias clases de máquinas rotatorias.

**CLASE I:** “Componentes individuales, totalmente conectados a la máquina en condiciones normales de operación, llegan a ser por ejemplo motores eléctricos hasta 15Kw”.

**CLASE II:** “Aplicado a máquinas de tamaño medio, motores eléctricos de 15 a 75 Kw o hasta 300 Kw en motores con cimentación especial”.

**CLASE III:** “Motores principales grandes, con cimentación rígida y pesada”.

**CLASE IV:** “Motores grandes con cimentación blanda y ligera. Estas pueden ser Turbo máquinas, con velocidades críticas”.

A continuación, se presenta el “Criterio de severidad” admisible por cada clase de máquinas mencionadas:

Tabla 3: Criterio de severidad, según la ISO 2372

Velocidad (mm/seg,rms)	Tipos de máquinas			
	Clase I	Clase II	Clase III	Clase IV
0,18 a 0,28	A	A	A	
0,28 a 0,45				
0,45 a 0,71				
0,71 a 1,12	B	B	B	A
1,12 a 1,8				
1,8 a 2,8	C	C	C	B
2,8 a 4,5				
4,5 a 7,1	D	D	D	C
7,1 a 11,2				
11,2 a 18				
18 a 28				D

Fuente: [17]

Como se observa en la Tabla 3 está dividida en 4 rangos que son: A- Aceptable, B- Satisfactoria, C-Insatisfactoria, D-Inaceptable. Para la utilización de la norma **ISO 2372**, basta clasificar la máquina dentro de la clase correspondiente y obtener el valor global RMS (root mean square) de rango de vibración de 600 y 60000 CPM (ciclos por minuto), para localizar en que zona se encuentra.

**ISO 3945. “Medida y evaluación de la severidad de vibración en grandes máquinas rotativas, in situ; velocidades de operaciones entre 10 y rev/s”.**

Como indica el título de la norma ISO, esta permite clasificar la severidad de vibración en grandes máquinas rotativas con velocidades de operación de 600 y



1200 rpm, a continuación, se presentará en la tabla 4 donde se aplica la respectiva norma tomando en consideración grandes máquinas e inclusive tomando las Clases III y IV definidas anteriormente. [18]

Tabla 4: Criterio de severidad según la ISO 3945

Severidad de velocidad de vibración (rms)		Clasificación por soportes	
mm/seg	pulg/seg	Soportes rígidos	Soportes flexibles
0,46	0,0018	bueno	bueno
0,71	0,028		
1,12	0,044		
1,8	0,071	satisfactorio	satisfactorio
2,8	0,11		
4,6	0,18	no satisfactorio	no satisfactorio
7,1	0,28		
11,2	0,44		
18	0,71	inaceptable	inaceptable
28	1,1		
46	1,8		
71	2,8		

Fuente: [18]

La clasificación de la severidad en este caso depende de dos tipos de soportes: flexibles y rigidez del sistema que presenta la máquina rotativa.

**ISO 10816. “Vibración mecánica, -evaluación de la vibración en una máquina mediante medida en partes no rotativas”.**

En comparación en las anteriores normas esta es la más actual. En la tabla 5 describe los procedimientos para evaluar las vibraciones en máquinas basados en medidas realizadas en partes no rotativas.

Tabla 5: Procedimientos para evaluar vibraciones según ISO 10816.

Estándar	Guías para
Parte 1 “ISO 10816-1”	Procedimientos generales para varias clases de máquinas basado en medidas hechas en partes no rotatorias
Parte 2 “ISO 10816-2”	Turbinas de vapor y generadores que superen los 50 MW con velocidades de trabajo de 1500, 1800, 3000, 3600 rpm
Parte 3 “ISO 10816-3”	Maquinaria industrial con potencia nominal por encima de 15 kW y velocidades entre 120 y 15000 rpm
Parte 4 “ISO 10816-4”	Conjuntos movidos por turbinas de gas, excluyen las empleadas en aeronáutica
Parte 5 “ISO 10816-5”	Conjunto de máquinas en plantas de hidrogenación y bombeo con una potencia nominal de 1MW y velocidad de 120 y 1800 rpm.

Fuente: [18]

Las partes que describe esta norma proporciona un estándar para cada serie de máquina dando información exclusiva con criterio aplicables a esas máquinas.

**ISO 7919. “Vibración mecánica de máquinas no alternativas- Medidas en ejes rotativos y evaluación”**

Una carcasa que llega ser muy rígida y/o pesada en comparación con la masa rotativa, puede llegar a considerarse que tiene un eje de rotor flexible.

En este caso las condicione de vibraciones llegan a ser evaluadas con un mayor grado de sensibilidad si se mide sobre elementos rotativos y no sobre componentes estáticos. Que comúnmente se los hace.

Si se va a analizar este tipo de máquinas es recomendable aplicar directamente esta normativa, en la siguiente tabla muestra las Partes según el tipo de máquinas a las que se va realizar la medición.

Tabla 6: Procedimientos para evaluar vibraciones según ISO 7919.

Estándar	Guías para
Parte 1 “ISO 7919-1”	Procedimientos generales para varias clases de máquinas.
Parte 2 “ISO 7919-2”	Turbinas de vapor y generadores
Parte 3 “ISO 7919-3”	Maquinaria industrial con rodamientos de película de fluido.
Parte 4 “ISO 7919-4”	Turbos de gas industrial con potencias superiores a 3 MW.
Parte 5 “ISO 7919-5”	Maquina hidráulica con rodamientos de película de fluido con salidas de potencia superiores a 1 MW

Fuente: [18]

**ISO 10817-1. “Sistemas de medida de vibraciones en ejes rotativos, parte 1: Señal relativa y absoluta de la vibración radial de ejes rotativos”.**

Las normas ISO, ANSI, NEMA y API emplean una serie de criterios de clasificación para niveles de vibración admisibles para el caso de motores y generadores.

Estos criterios de clasificación no son iguales para todos los casos, ya que algunos se basan en el desplazamiento de vibración del eje pico a pico, y otros utilizan el valor RMS o el valor pico de la amplitud de la velocidad que es medida en el caso de la norma ISO 10817-1.

Cada norma específica el procedimiento a seguir, donde incluye el montaje para el soporte de la máquina, la instrumentación a utilizar y el método de ensayo.

**ISO 2373. “Vibración mecánica en cierta maquinaria eléctrica rotativa con alturas de eje entre 80 y 400 mm – Medida y evaluación de la severidad de vibración”.**

En esta norma toma en consideración la altura de eje que esta viene hacer el valor vertical que va desde la base del motor hasta la línea central del eje con rangos de 80 a 400mm como describe la norma.

El criterio de severidad que se aplica es muy similar que la norma ISO 2372 donde se toma los valores de RMS, en el rango de 10Hz a 1kHz. Todas las medidas se toman con la máquina suspendida o también con soportes que pueden ser elásticos o material elastomérico. El motor deberá operar tanto a frecuencias como velocidades nominales. Si el motor cuenta con velocidades variables el ensayo se realizará a diferentes velocidades de operación.

Toda la medida de vibración se realiza sin carga de operación y la temperatura que alcanza el motor después de un tiempo suficiente de operación. En la tabla 7 establece límites recomendados de severidad para varias alturas de eje.

Tabla 7: Criterio de severidad según ISO 7919.

	Amplitud de velocidad (RMS) para alturas permisibles de eje h, in/mm						
		80<h<132		132<h<225		225<h<400	
Grado de calidad	Velocidad (rpm)	mm/seg	pulg/seg	mm/seg	pulg/seg	mm/seg	pulg/seg
N(normal)	600 a 3600	1,8	0,071	2,8	0,11	4,5	0,177
R(reducido)	600 a 1800	0,71	0,028	1,12	0,044	1,8	0,071
	>1800 a 3600	1,12	0,044	1,8	0,071	2,8	0,11
S(especial)	600 a 1800	0,45	0,018	0,71	0,028	1,12	0,044
	>1800 a 3600	0,71	0,028	1,12	0,044	1,8	0,071

Fuente: [18]

## CAPÍTULO III

### 3. DISEÑO DEL PROYECTO

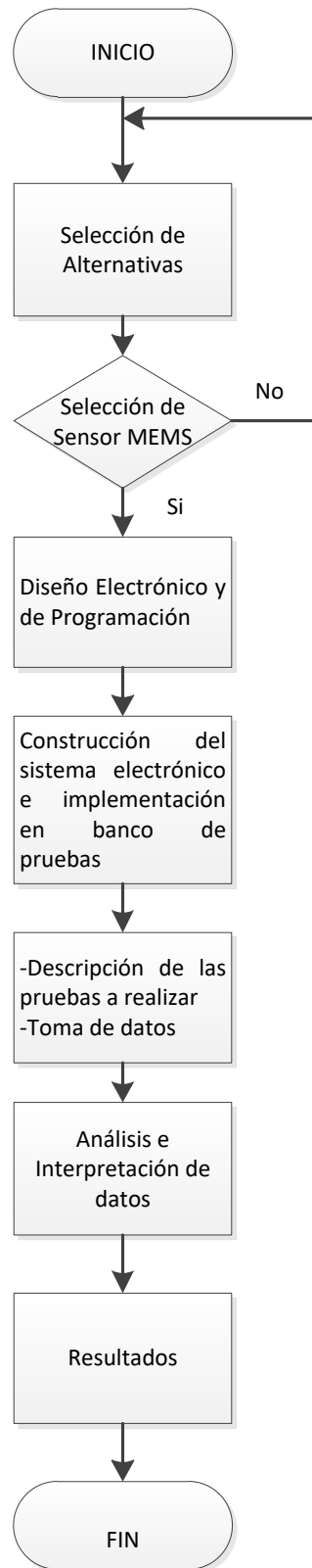


Figura 3. 1: Flujograma de Diseño del Proyecto

Fuente: El Autor

### 3.1. SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

Cada industria posee un plan de mantenimiento en el caso que una o varias máquinas tengan una anomalía en su comportamiento o lleguen a su tiempo estimado de aplicar algún tipo de mantenimiento. Para tener un monitoreo en tiempo real de la maquinaria, es necesario realizar pruebas que están sometidas a vibraciones y estas influyan en sus componentes externos como internos es necesario realizar pruebas y/o ensayos que faciliten la detección o predicción del fallo.

En la actualidad para el monitoreo de este tipo de problemas se utilizan acelerómetros. En el presente trabajo se propone utilizar acelerómetros tipo MEMS mencionados en el Capítulo II a continuación se presentará las marcas que comercializan en el mercado estos dispositivos.

- Analog Devices Inc.
- NXP
- STMicroelectronics
- Konix

Se presentará por cada marca mejores opciones para su selección.

#### **Analog devices Inc.**

Tabla 8: Acelerómetros Analog Devices y sus características.

Parte	Rango	Temperatura de Operación	Frecuencia (Hz)	Tipo de salida	Detención ejes	Precio (\$ US)
ADXL355	2g, 4g, 8g	-40 a 125°C	1k	SPI	X, Y, Z	\$28,25
ADXL151	120g, 240g, 480g	-40 a 125°C	400	PSI5	X	\$25,43
ADXL316	16g	-40 a 105°C	-	Análogo	X, Y, Z	\$2,86
ADXL700	14,2g	-40 a 105°C	-	SPI	X, Y, Z	-
ADXL375	200g	-40 a 85°C	1,6k	PC, SPI	X, Y, Z	\$4,52
ADXL313	1g, 2g, 4g	-40 a 105°C	1,6k	PC, SPI	X, Y, Z	\$3,42
ADXL288	120g	-40 a 105°C	408	SPI	X, Y	\$9,63
ADXL350	1g, 2g, 4g, 8g	-40 a 85°C	1,6k	PC, SPI	X, Y, Z	\$4,57
ADXL189B	120g, 240g, 480g, 30g, 60g	-40 a 125°C	398	PSI5	X	\$3,76
ADXL212	2g	-40 a 85°C	500	PWM	X, Y	\$13,45
ADIS16228	18g	-40 a 85°C	5k	SPI	X, Y, Z	\$159,00
ADXL206	5g	-40 a 175°C	400	Análogo	X, Y	\$569,00

ADIS16223	1,7g	-40 a 85°C	50	SPI	X, Y, Z	\$97,00
ADXL312	1,5g, 12g, 3g, 6g	-40 a 105°C	1,6k	PC, SPI	X, Y, Z	\$3,33
ADXL337	3g	-40 a 85°C	1,6k	Análogo	X, Y, Z	\$1,57
ADIS16227	70g	-40 a 125°C	14,25	SPI	X, Y, Z	\$174,00
ADXL346	16g, 2g, 4g, 8g	-40 a 85°C	1,6K	PC, SPI	X, Y, Z	\$3,13

Fuente: [19]

## NXP.

Tabla 9: Acelerómetros NXP y sus características.

Parte	Rango	Tipo de Salida	Temperatura de Operación (Min-Max) (°C)	Resolución (bit)	Detención de ejes	Precio (\$)
FXLN8371QR1	2g, 8g	Análogo	-40 to 105	-	XYZ	\$1.61
FXLN8372QR1	4g, 16g	Análogo	-40 to 105	-	XYZ	\$1.69
FXLS8471QR1	2g, 4g, 8g	I2C, SPI	-40 to 85	14	XYZ	\$0.95
MMA8451QR1	2g, 4g, 8g	I2C	-40 to 85	14	XYZ	\$0.86
MMA8451QT	2g, 4g, 8g	I2C	-40 to 85	14	XYZ	\$0.86
MMA8452QR1	2g, 4g, 8g	I2C	-40 to 85	12	XYZ	\$0.68
MMA8452QT	2g, 4g, 8g	I2C	-40 to 85	12	XYZ	\$0.68
MMA8453QR1	2g, 4g, 8g	I2C	-40 to 85	10	XYZ	\$0.68
MMA8453QT	2g, 4g, 8g	I2C	-40 to 85	10	XYZ	\$0.68
MMA8491QR1	8g	I2C	-40 to 85	14	XYZ	\$0.78
MMA8652FCR1	4g, 8g, 2g	I2C	-40 to 85	12	XYZ	\$0.54
MMA8653FCR1	8g, 2g, 4g	I2C	-40 to 85	10	XYZ	\$0.52

Fuente: [20]

## STMicroelectronics

Tabla 10: Acelerómetros STMicroelectronics y sus características.

Parte	Rango (g)	Temperatura de Operación	Tipo de Salida	Frecuencia	Precio (\$)
LIS2DH12	±2; ±4; ±8; ±16	-40 °C to +85 °C.	I2 C/SPI	1 Hz a 5,3 kHz.	\$1.54
LIS2HH12	±2; ±4; ±8	-40 °C to +85 °C.	I2 C/SPI	10 Hz to 800 Hz	\$1.51

LIS2DS12	±2; ±4; ±8; ±16	-40 °C to +85 °C.	I2 C/SPI	1 Hz to 6400 Hz	\$1.99
LIS2DE12	±2; ±4; ±8; ±16	-40 °C to +85 °C.	I2 C/SPI	1 Hz to 5.3 kHz	\$1.49
LIS3DH	±2; ±4; ±8; ±16	-40 °C to +85 °C.	I2 C/SPI	1 Hz a 5,3 kHz.	\$4,95
LIS331HH	±6; ±12; ±24	-40 °C to +85 °C.	I2 C/SPI	0.5 Hz to 1 kHz	\$4.83
LIS344ALH	±2; ±6	-40 °C to +85 °C.	Análogo	1.8 kHz	\$3.40
AIS328DQ	±2; ±4; ±8	-40 °C to +85 °C.	I2 C/SPI	0.5 Hz to 1 kHz.	\$7.32
AIS3624DQ	±6; ±12; ±24	-40 °C to +85 °C.	I2 C/SPI	0.5 Hz to 1 kHz	\$8.17
AIS1120SX/ AIS2120SX	±120	-40 °C to +105 °C.	SPI	-	\$5.30
AIS1200PS	±200	-40 °C to +125 °C.	I2 C/SPI	175 Hz	\$4.78
IIS328DQ	±2; ±4; ±8	-40 °C to +105 °C.	I2 C/SPI	0.5 Hz to 1 kHz.	\$3.54
IIS2DH	±2; ±4; ±8; ±16	-40 °C to +85 °C.	I2 C/SPI	1 Hz to 5.3 kHz	\$2.81
H3LISxxxDL	±100; ±200; ±400	-40 °C to +85 °C.	I2 C/SPI	0.5 Hz to 1 kHz	\$8.25
MIS2DH	±2; ±4; ±8; ±16	-40 °C to +85 °C.	I2 C/SPI	1 Hz to 5.3 kHz.	\$12.55

Fuente: [21]

## Konix

Tabla 11: Acelerómetros Konix y sus características.

Parte	Rango (g)	Temperatura de Operación	Tipo de Salida	Frecuencia	Precio (\$)
KX123-1039	±2; ±4; ±8	-40 °C to +85 °C.	I2 C/SPI	3.4MHz y 10MHz(SPI)	\$3.12
KX124-1051	±2; ±4; ±8	-40 °C to +85 °C.	I2 C/SPI	800Hz	\$5.19
KX222-1054	±8; ±16; ±32	-40 °C to +85 °C.	I2 C/SPI	3.4MHz y 10MHz(SPI)	\$14.95
KX23H-1035	±2; ±4; ±8	-40 °C to +85 °C.	I2 C/SPI	1.6KHz	-
KXCJ9-1008	±4; ±8; ±16	-40 °C to +85 °C.	I2 C	0.39Hz a 800Hz	\$2.65
KXCJA-1019	±2; ±4; ±8	-40 °C to +85 °C.	I2 C	3.4MHz y 10MHz(SPI)	-
KXCJB-1041	±2; ±4; ±8	-40 °C to +85 °C.	I2 C	800Hz	-
KXCJK-1013	±2; ±4; ±8	-40 °C to +85 °C.	I2 C	0.39Hz a 800Hz	\$1.15
KXCJK-1038	±2; ±4; ±8	-40 °C to +85 °C.	I2 C	1 Hz to 5.3 kHz.	-

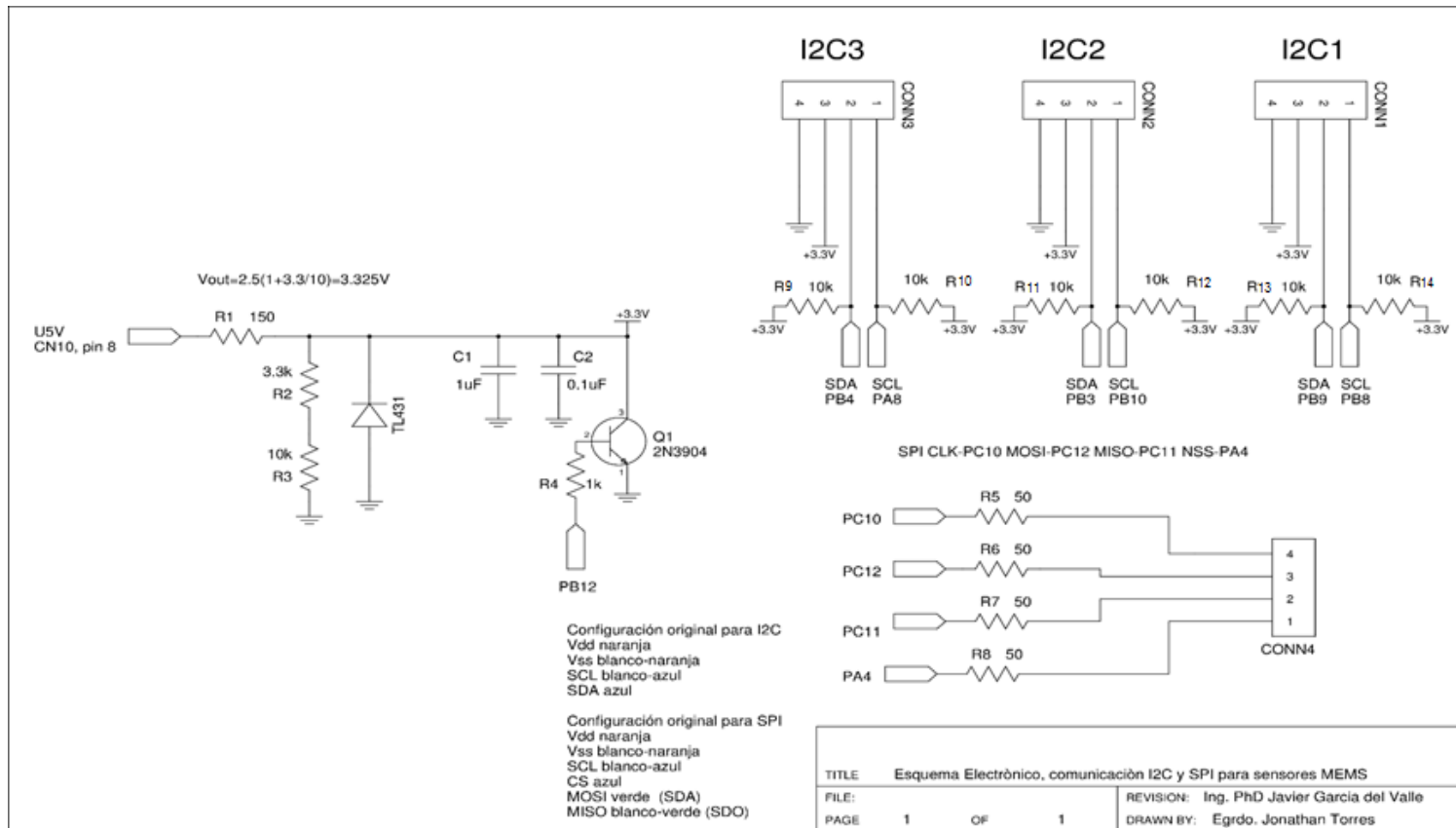
Fuente: [22]

Considerando las características y variedad de marcas que son responsables en la elaboración de los sensores MEMS, donde se tomó los sensores MMA8451 de la marca NXP y LIS3DH de la marca STMicroelectronics con las características propuestas en las tablas 8 y 9 respectivamente.



### 3.2. DISEÑO ELECTRÓNICO E IMPLEMENTACIÓN INFORMÁTICA

Dada la información de la tarjeta de comunicación ST núcleo F411RE (Anexo 7) se realiza el siguiente diseño electrónico para los sensores MEMS (LIS3DH Y MMA8451).



### 3.2.1. IMPLEMENTACIÓN INFORMÁTICA

La implementación consiste en la forma de cómo se llevó a cabo la programación de los sensores y comunicación con la tarjeta de adquisición, además se detalla la forma de comunicación con la interfaz de usuario-máquina.

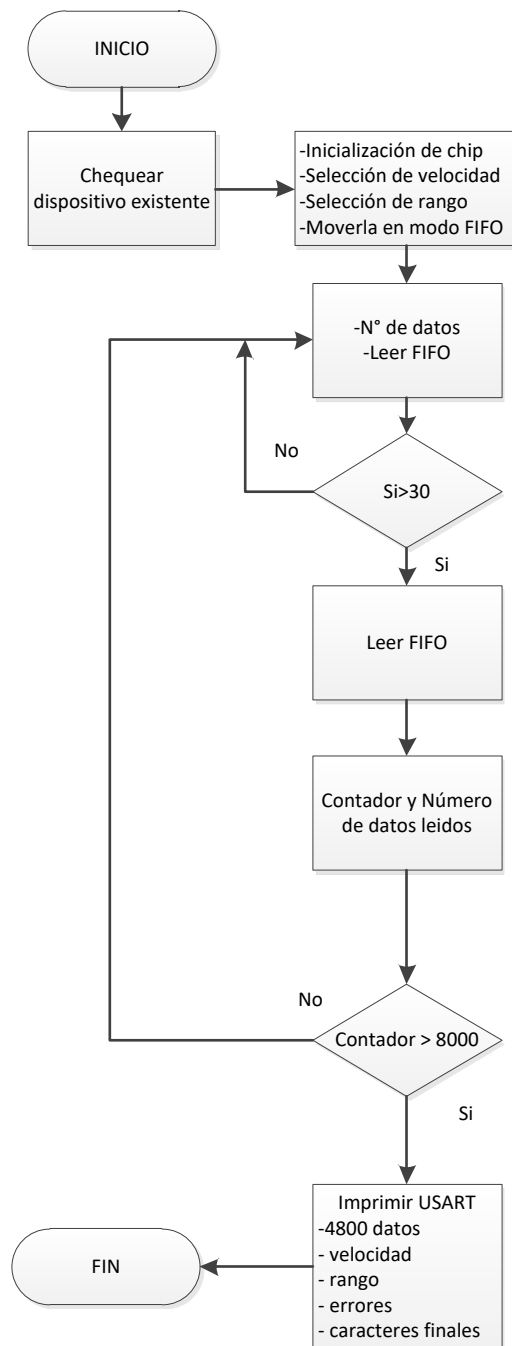


Figura 3. 2: Diagrama de flujo de la Programación de los sensores.

Fuente: El Autor

A continuación, la programación de la relación de los datos obtenidos con la interfaz gráfica.

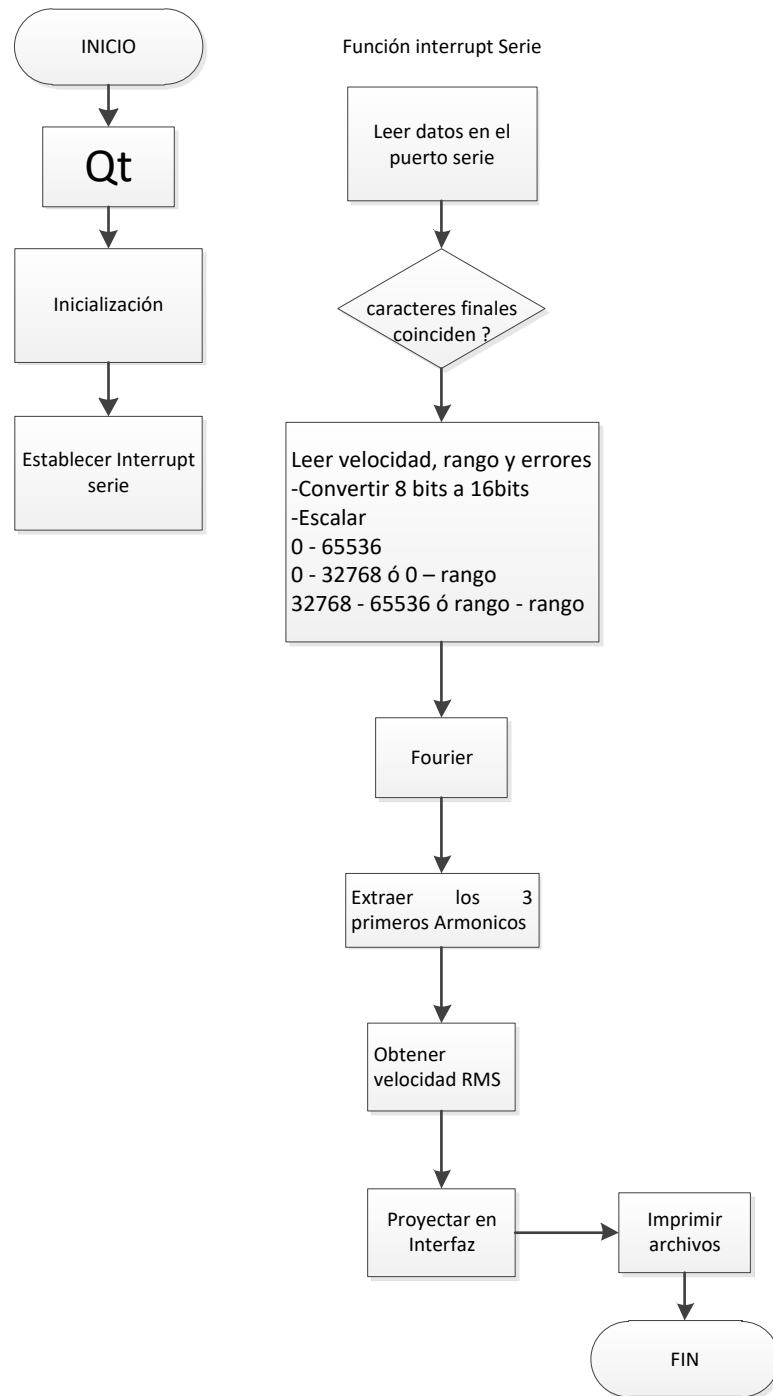


Figura 3. 3: Diagrama de flujo de la programación de interfaz gráfica y obtención de datos.

Fuente: El Autor

### 3.3. MODELO MATEMÁTICO

La realización del modelo matemático de la máquina rotativa (motor eléctrico), se analiza en los planos  $(x, y)$  por facilidad de cálculo. Las ecuaciones del sistema se obtienen a partir de la figura 3.4. Proyecta dos sistemas de coordenadas  $(x, y)$  y  $(x', y')$ , sistemas de coordenadas estático y dinámico respectivamente.

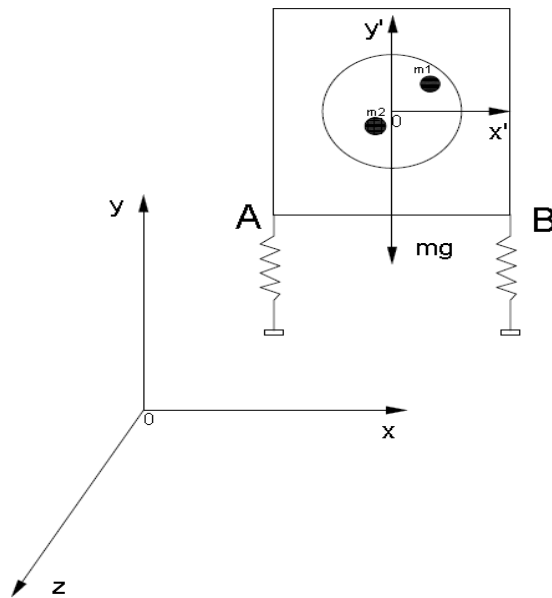


Figura 3. 4: Esquema del motor.

Fuente: El Autor

A partir del esquema anterior se generan las siguientes incógnitas.

$$x, y, \dot{x}, \dot{y}, \alpha, \omega \quad (19)$$

Donde,

$x, y$ = posición.

$\dot{x}, \dot{y}$ = velocidad.

$\alpha, \omega$ = aceleración lineal, velocidad angular.

Por la compatibilidad con el programa empleado para la resolución de un sistema de ecuaciones diferenciales lineales, se adopta la siguiente nomenclatura.

Donde,

$$y_1 = x$$

$$y_2 = y$$

$$y_3 = \dot{x}$$

$$y_4 = \dot{y}$$

$$y5 = \alpha$$

$$y6 = \omega$$

Para la formulación del sistema de ecuaciones se partirá del análisis estático y dinámico del sistema:

$$\sum F = m * a \quad (20)$$

Donde;

F= Fuerza

m= Masa

a= Aceleración

Y,

$$\sum M = I * a \quad [23] \quad (21)$$

Donde:

M= Momento

I= Inercia

a= Aceleración

A partir de la ecuación (20) y sustituyendo en las ecuaciones (20 y 21).

$$\frac{dy1}{dt} = y3; \quad (22)$$

$$\frac{dy2}{dt} = y4; \quad (23)$$

$$\frac{dy3}{dt} = \frac{1}{m} \sum Fx, \text{ en } f(x, y, a); \quad (24)$$

$$\frac{dy4}{dt} = \frac{1}{m} \sum Fy, \text{ en } f(x, y, a); \quad (25)$$

$$\frac{dy5}{dt} = y6; \quad (26)$$

$$\frac{dy6}{dt} = \frac{1}{I} \sum M, \text{ en } f(x, y, a) \quad (27)$$

Análisis de la posición del resorte A estático, a partir de la figura 3.4.

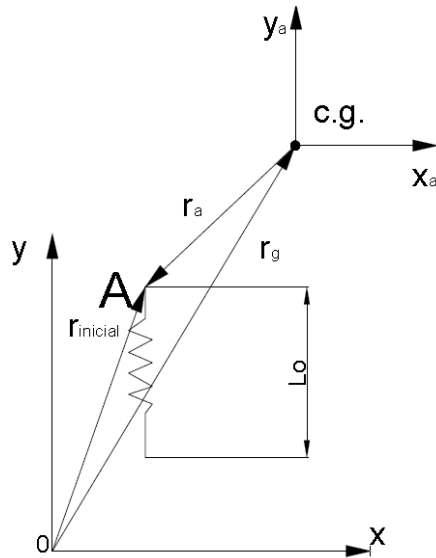


Figura 3. 5: Esquema del resorte A en estado estático.

Fuente: El Autor

Donde los vectores,

$$r_a = (-x_a; -y_a) \tag{28}$$

$$r_g = (x; y) \tag{29}$$

Sumando las ecuaciones (28, 29) de los vectores tenemos;

$$r_{inicial} = r_a + r_g = ((0 - x_a); (0 - y_a)) \tag{30}$$

Análisis de la opción del resorte A, en movimiento a partir de la figura 3.4.

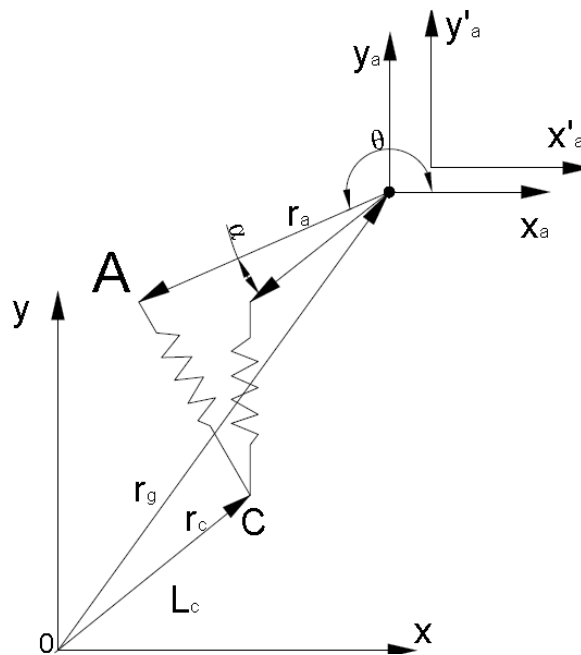


Figura 3. 6: Esquema del resorte A en movimiento.

Fuente: El Autor

En un tiempo  $t=0$  el vector  $\vec{r}_a$  toma la siguiente forma:

$$\vec{r}_a = (r_a * \cos\theta; r_a * \sin\theta) \quad (31)$$

En tiempo  $t=t$  el vector  $\vec{r}_a$  toma la siguiente forma:

$$\vec{r}_{a_t} = \vec{r}_g + |\vec{r}_a|_{\theta + \alpha} \quad (32)$$

$$\vec{r}_{a_t} = (x, y) + [r_a * \cos(\theta + \alpha); r_a * \sin(\theta + \alpha)] \quad (33)$$

$$\vec{r}_c = r_{a_{t=0}}, (0; L_c) \quad (34)$$

$$\vec{r}_c = (r_a * \cos\theta; r_a * \sin\theta - L_c) \quad (35)$$

$$L_0 = (\vec{r}_{a_{t_0}}; \vec{r}_{a_t}) \quad (36)$$

Entonces:  $L_t = (\vec{r}_{a_t}; \vec{r}_c) \quad (37)$

Y, reemplazando las ecuaciones (34, y 36) tenemos;

$$L_t = (x + r_a * \cos(\theta + \alpha) - r_a * \cos\theta; y + r_a * \sin(\theta + \alpha) - r_a * \sin\theta + L_c) \quad (38)$$

### 3.3.1. ANÁLISIS DE FUERZAS

Ya deducido la posición final de la posición del resorte A y realizando la sumatoria de fuerzas tenemos:

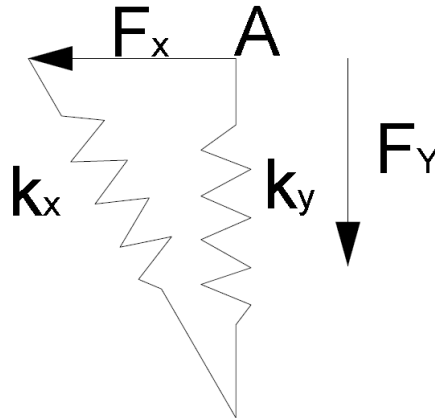


Figura 3. 7: Esquema de fuerzas que actúan en el resorte A.

Fuente: El Autor

$$F_x = k_x(L_{0_x} - L_{t_x}) \quad (39)$$

$$F_y = k_y(L_{0_y} - L_{t_y}) \quad [24] \quad (40)$$

Para el análisis del resorte B figura 3.3, resulta ser el mismo análisis anterior con la diferencia que el ángulo  $\theta$  será distinto con respecto a la del resorte A.

### 3.3.2. ANÁLISIS DE MOMENTOS

$$\overline{\Sigma \mathbf{M}} = \overline{\mathbf{r}_A} \otimes \overline{\mathbf{F}_A} + \overline{\mathbf{r}_B} \otimes \overline{\mathbf{F}_B} \quad (41)$$

Donde,

$$\overline{\mathbf{r}_A} = [r_a(\cos(\theta + \alpha), r_a(\sin(\theta + \alpha))]$$

$$r_x = r_a * \cos(\theta + \alpha)$$

$$r_y = r_a * \sin(\theta + \alpha)$$

$$\begin{aligned} & \overline{\mathbf{r}_A} \otimes \overline{\mathbf{F}_A} \\ & (r_x, r_y) \otimes (F_x, F_y) \\ & \begin{vmatrix} i & j & k \\ r_x & r_y & 0 \\ F_x & F_y & 0 \end{vmatrix} = (r_x * F_y - r_y * F_x)k \end{aligned} \quad (42)$$

Remplazando en la ecuación (43) en la (42) se tiene:

$$M = (r_x * F_y - r_y * F_x)k_A + (r_x * F_y - r_y * F_x)k_B \quad (43)$$

La segunda expresión que influye el resorte a B, se llega analizar considerando lo explicado anteriormente que la variación de esta expresión es el ángulo de giro  $\theta$ .

### 3.3.3. ANÁLISIS DE FUERZA CON AMORTIGUAMIENTO VISCOSO DEL SISTEMA

La fuerza del amortiguamiento viscoso del sistema viene dada por:

$$F_{viscoso} = k * x + c * \dot{x} \quad [24] \quad (44)$$

Donde,

$$\dot{x} = \overline{\mathbf{v}_{cg}} + \overline{\omega} \otimes \overline{\mathbf{r}};$$

$$\begin{aligned} & (v_x, v_y) + \begin{vmatrix} i & j & k \\ 0 & 0 & \omega \\ r_a * \cos(\theta + \alpha) & r_a * \sin(\theta + \alpha) & 0 \end{vmatrix}; \\ & \dot{x} = (v_x - \omega * r_a * \sin(\theta + \alpha), v_y + \omega * r_a * \cos(\theta + \alpha)) \end{aligned} \quad (45)$$



### 3.3.4. ANÁLISIS DE LA VELOCIDAD DEL SENSOR.

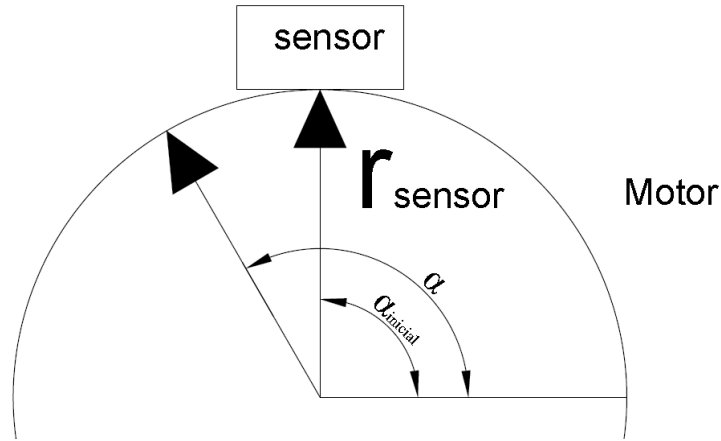


Figura 3. 8: Posición del sensor en el motor.

Fuente: El Autor

Donde;

$$(x, y) = (r_{sensor} * \cos(\alpha_{sensor} + \alpha); r_{sensor} * \sin(\alpha_{sensor} + \alpha))$$

$$v_{sensor} = \vec{v}_g + \vec{\omega} \otimes \vec{r}_{sensor};$$

$$(\dot{x}_g, \dot{y}_g) + \begin{vmatrix} i & j & k \\ 0 & 0 & w \\ r_{sensor} * \cos(\alpha_{sensor} + \alpha) & r_a * \sin(\alpha_{sensor} + \alpha) & 0 \end{vmatrix};$$

$$v_{sensor} = (\dot{x}_g - \omega * r_{sensor} * \sin(\alpha_{sensor} + \alpha), \dot{y}_g + \omega * r_{sensor} * \cos(\alpha_{sensor} + \alpha)) \quad (46)$$

Las ecuaciones que describen el sistema son:

$$\sum F_x = \omega^2(m_1 * r_1 - m_1 * r_1) * \cos(\omega t) + |F_x|_A + |F_x|_B \quad (47)$$

$$\sum F_y = \omega^2(m_1 * r_1 - m_1 * r_1) * \sin(\omega t) + |F_y|_A + |F_y|_B \quad (48)$$

$$\sum M = (r_x * |F_y|_A - r_y * |F_x|_A)k_A + (r_x * |F_y|_B - r_y * |F_x|_B)k_B \quad (49)$$

Remplazando estas ecuaciones en las ecuaciones (24, 25, 27), se obtiene un sistema de 6 ecuaciones diferenciales lineales.

La resolución de dicho sistema se implementa en C++, usando un algoritmo Runge-Kutta de cuarto orden mediante la librería GNU-GSL

## 3.4. ANÁLISIS DE DATOS EXPERIMENTALES

### 3.4.1. ANÁLISIS DE POSICIÓN DEL MOTOR

Para determinar la posición de la partícula(motor-sensor) en el espacio con respecto al tiempo, los datos serán los que se tomen de las pruebas realizadas mediante la

Transformada Rápida de Fourier (armónicos) que son derivados para encontrar la posición de la partícula con respecto al tiempo

De la ecuación (1);

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^n (a_n \cos(nw_0t) + b_n \text{sen}(nw_0t))$$

Donde:

Primer término:

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= \text{Cos}(nw_0t); \\ \frac{d\ddot{x}}{dt} &= \text{Cos}(nw_0t); \\ \dot{x} &= -\frac{1}{w_0} \text{sin}(nw_0t); \\ \frac{d\dot{x}}{dt} &= -\frac{1}{w_0} \text{sin}(nw_0t); \\ x &= -\frac{1}{w_0^2} \text{cos}(nw_0t); \end{aligned} \tag{47}$$

Segundo término:

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= \text{sin}(nw_0t); \\ \frac{d\ddot{x}}{dt} &= \text{sin}(nw_0t); \\ \dot{x} &= \frac{1}{w_0} \text{cos}(nw_0t); \\ \frac{d\dot{x}}{dt} &= \frac{1}{w_0} \text{cos}(nw_0t); \\ x &= -\frac{1}{w_0^2} \text{sin}(nw_0t); \end{aligned} \tag{48}$$

Aplicado en los 3 ejes x, y, z para encontrar su posición en el espacio.

Adicionalmente la velocidad RMS proviene de  $\frac{d\dot{x}}{\sqrt{2}}$ ; tanto del primer término como del segundo indicados anteriormente.

### 3.4.2. DESCRIPCIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS

Para el análisis de vibraciones, se tomó una máquina prototipo que se utiliza para pruebas de fatiga en polímeros como se muestra en la figura 3.8, se realizó pruebas en condiciones normales y rigurosas considerando el tipo de anclaje y desbalances

utilizando masas pequeñas y grandes para mediciones extremas, y recopilar información para su análisis.



Figura 3. 9: Máquinas de pruebas de polímeros.

Fuente: El Autor

A partir de este banco de pruebas se realizó el análisis de vibración considerando las características del motor eléctrico que indica en la tabla 12.

Tabla 12: Características del motor trifásico Weg W22.

Características del motor			
Estándar	60034	Modelo	MOD.TE1BF0X0
Frecuencias	60 Hz	Factor de potencia	0,81
Voltaje	220/440	Amperaje	3,11/1,56
Número de polos	4	Temperatura ambiente	40°C
Grado de protección	IP55	Factor de servicio	1,15
Revoluciones	1720 rpm	Potencia	0,75 KW

Fuente: El Autor

### 3.4.3. DESCRIPCIÓN DE CASOS PARA MEDICIÓN

Para las pruebas se analizaron 3 tipos de bases que son: base metálica, caucho y resorte, donde trabajarán con una velocidad de giro del motor de 1763 rpm.

- **Base metálica.**



Figura 3. 10; Base metálica

Fuente: El Autor

- **Base de goma.**



Figura 3. 11; Base de Goma

Fuente: El Autor

- **Base de resorte.**

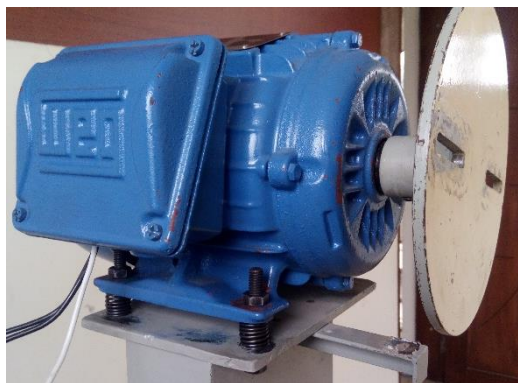


Figura 3. 12: Base de Resorte

Fuente: El Autor

En la siguiente tabla describe los casos de medición a la cual el banco de pruebas fue sometido.

Tabla 13: Descripción de casos sin masas excéntricas

Casos	Descripción
<b>Caso 1</b>	Motor en base metálica con pernos ancladores sujetos.
<b>Caso 2</b>	Motor en base metálica con pernos ancladores sueltos.
<b>Caso 3</b>	Motor con aislante de goma con pernos de anclaje sujetos.
<b>Caso 4</b>	Motor con aislante de goma con pernos de anclaje sueltos.
<b>Caso 5</b>	Motor con aislante de resorte con pernos de anclaje sujetos.
<b>Caso 6</b>	Motor con aislante de resorte con pernos de anclaje sueltos.

Fuente: El Autor

Estas pruebas descritas permitieron tener una referencia para las siguientes pruebas rigurosas que se describirán en la tabla 14 y 15 respectivamente.

### Vibraciones con masas grandes

Para la medición de vibraciones con masas desbalanceadas se utilizaron diferentes valores de masas para el análisis en el comportamiento del motor.

El primer elemento que se colocó en el motor tiene una masa de 274,7 gr y se lo denomina como m1.



Figura 3. 13: Peso de la m1 para el desbalanceo.

Fuente: El Autor

El segundo elemento tiene un valor de 266,1 gr que se lo denomina como m2, donde esta masa ira variando su excentricidad para sus respectivas mediciones.



Figura 3. 14: Peso de la m2 para el desbalanceo.

Fuente: El Autor

### Pruebas con masas excéntricas grandes

Para este tipo de pruebas se tomó tres medidas excéntricas, donde la medida varía desde el extremo hacia la masa que influye en el desbalanceo.

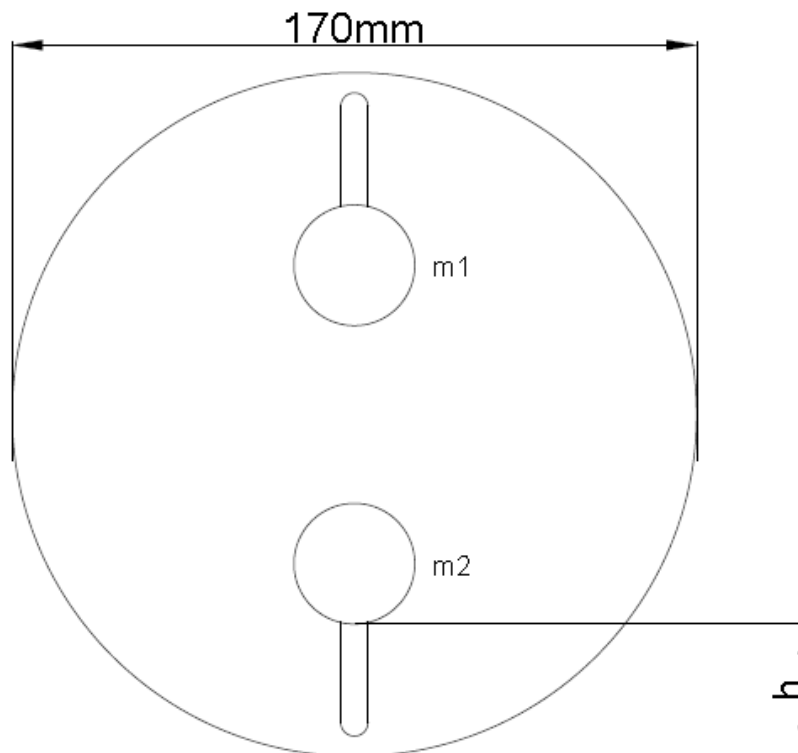


Figura 3. 15: Dimensionamiento de las excentricidades con masas grandes.

Fuente: El Autor

Las pruebas a realizar con masas excéntricas grandes se describen en la siguiente tabla.

Tabla 14: Descripción de casos con masas excéntricas grandes.

Descripción	Casos	Distancia (h)		
		37mm	22mm	15mm
Motor en base metálica con pernos ancladores sujetos.	<b>Caso 7</b>	Caso 7:1	Caso 7:2	Caso 7:3
Motor en base metálica con pernos ancladores sueltos.	<b>Caso 8</b>	Caso 8:1	Caso 8:2	Caso 8:3
Motor con aislante de goma con pernos de anclaje sujetos.	<b>Caso 9</b>	Caso 9:1	Caso 9:2	Caso 9:3
Motor con aislante de goma con pernos de anclaje sueltos.	<b>Caso 10</b>	Caso 10:1	Caso 10:2	N/A
Motor con aislante de resorte con pernos de anclaje sujetos.	<b>Caso 11</b>	Caso 11:1	Caso 11:2	Caso 11:3
Motor con aislante de resorte con pernos de anclaje sueltos.	<b>Caso 12</b>	Caso 12:1	Caso 12:2	N/A

Fuente: El Autor

En algunos casos se descarta o no aplica (N/A) por que la prueba tiende a ser muy inestable para recopilar los datos necesarios.

### Vibración con masas pequeñas.

El tercer elemento que se coloca en el motor tiene una masa de 54.6 gr y se lo denomina como m3.



Figura 3. 16: Peso de la m3 para el desbalanceo.

Fuente: El Autor

El cuarto elemento tiene un valor de 58.6 gr que se lo denomina  $m_2$ , donde esta masa ira variando su excentricidad para sus respectivas mediciones.



Figura 3. 17: Peso de la  $m_3$  para el desbalanceo.

Fuente: El Autor

### Pruebas rigurosas con masas excéntricas pequeñas

A continuación, se describe la prueba con masas excéntricas pequeñas con 4 variaciones de excentricidad.

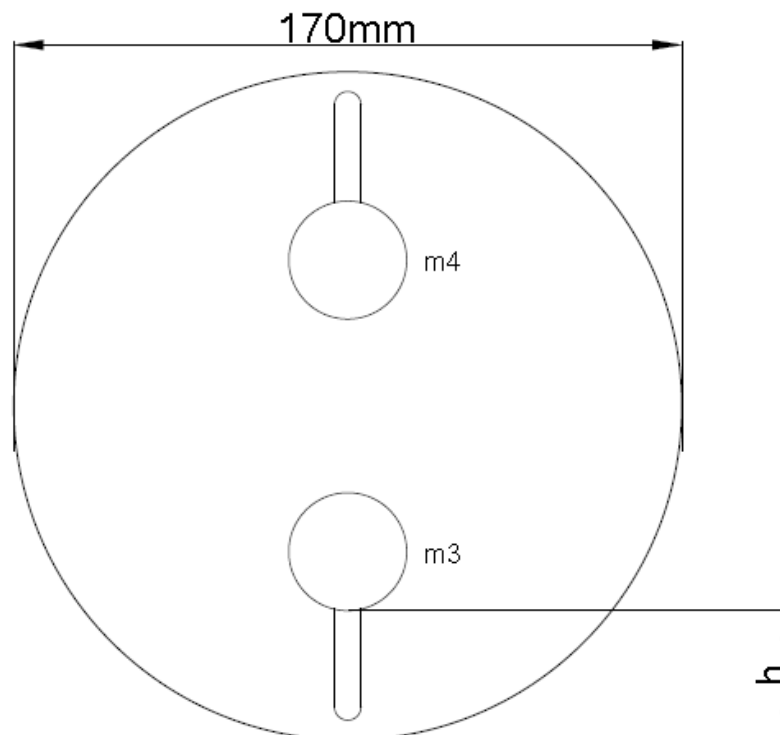


Figura 3. 18: Dimensionamiento de las excentricidades con masas pequeñas.

Fuente: El Autor



Tabla 15: Descripción de casos con masas excéntricas pequeñas.

Descripción	Casos	Distancia (h)			
		43 mm	35 mm	24 mm	2 mm
Motor en base metálica con pernos ancladores sujetos.	<b>Caso 13</b>	Caso 13:1	Caso 13:2	Caso 13:3	Caso 13:4
Motor en base metálica con pernos ancladores sueltos.	<b>Caso 14</b>	Caso 14:1	Caso 14:2	Caso 14:3	Caso 14:4
Motor con aislante de goma con pernos de anclaje sujetos.	<b>Caso 15</b>	Caso 15:1	Caso 15:2	Caso 15:3	Caso 15:4
Motor con aislante de goma con pernos de anclaje sueltos.	<b>Caso 16</b>	Caso 16:1	Caso 16:2	Caso 16:3	Caso 16:4
Motor con aislante de resorte con pernos de anclaje sujetos.	<b>Caso 17</b>	Caso 17:1	Caso 17:2	Caso 17:3	Caso 17:4
Motor con aislante de resorte con pernos de anclaje sueltos.	<b>Caso 18</b>	Caso 18:1	Caso 18:2	Caso 18:3	Caso 18:4

Fuente: El Autor

En esta tabla se aplica todas las pruebas completas sin excepción por ser pequeñas masas.

#### 3.4.4. MEDICIÓN DE VIBRACIONES.

La medición de vibraciones se realizó con el acelerómetro LIS3DH, mediante protocolo de comunicación SPI. Mientras que el sensor MMA8451 funcionó intermitentemente por errores de comunicación con el protocolo I2C. por lo que únicamente las mediciones con acelerómetro LIS3DH fueron consideradas,

Para la obtención de los gráficos que se muestran en las tablas siguientes, se toman 5 mediciones de 8000 datos (dado que las frecuencias de adquisición de 1600 Hz equivalen 5 seg), y se calcula los 10 primeros armónicos para cada serie medida. El rango empleado fue de  $\pm 4g$  para los casos medidos.

El plano de conexiones del sistema electrónico conectado en banco de pruebas se representa en el Anexo 1.

Con los casos propuestos en las tablas 13, 14, 15, se realiza las pruebas necesarias, con el fin de proyectar los espectros de vibración (RMS) vs Frecuencia.

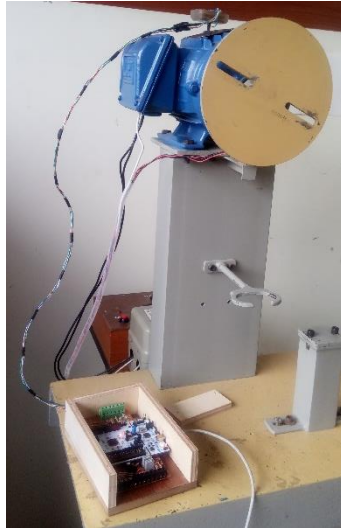
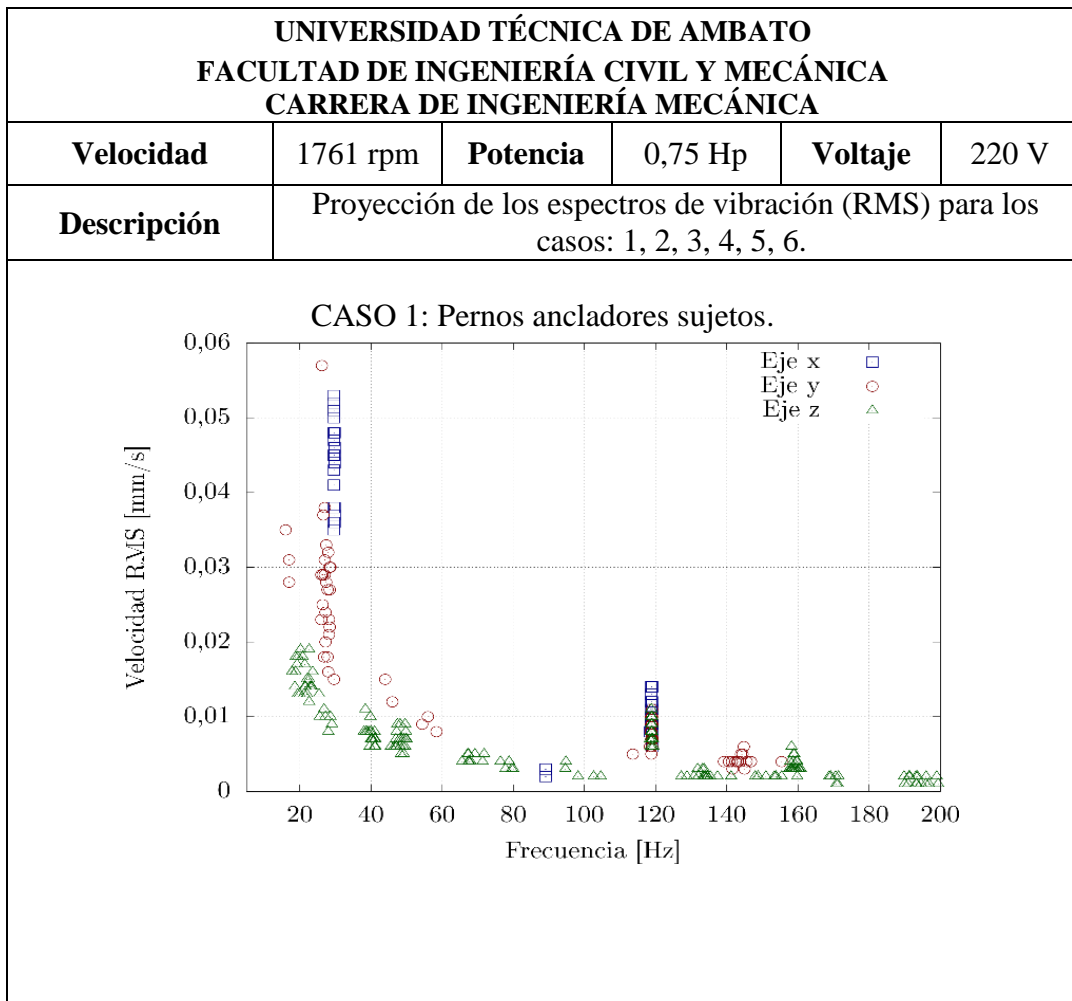


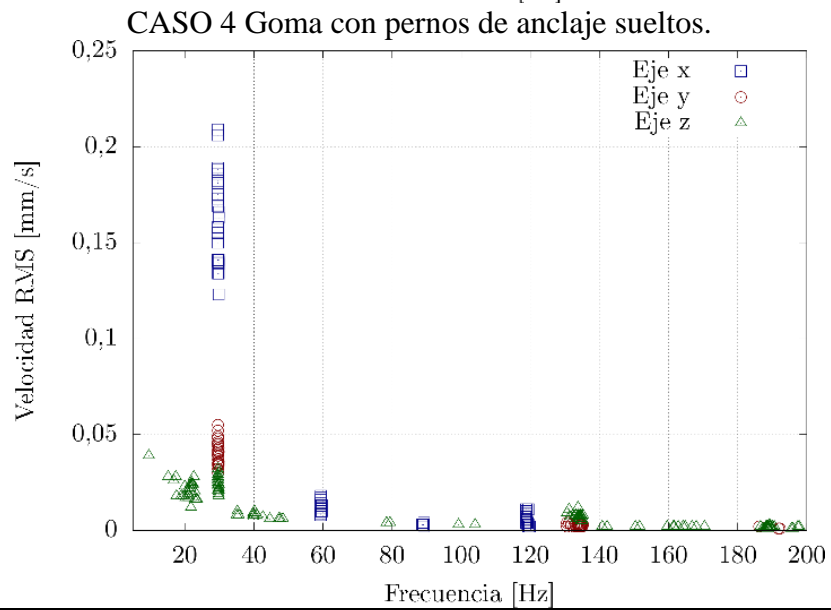
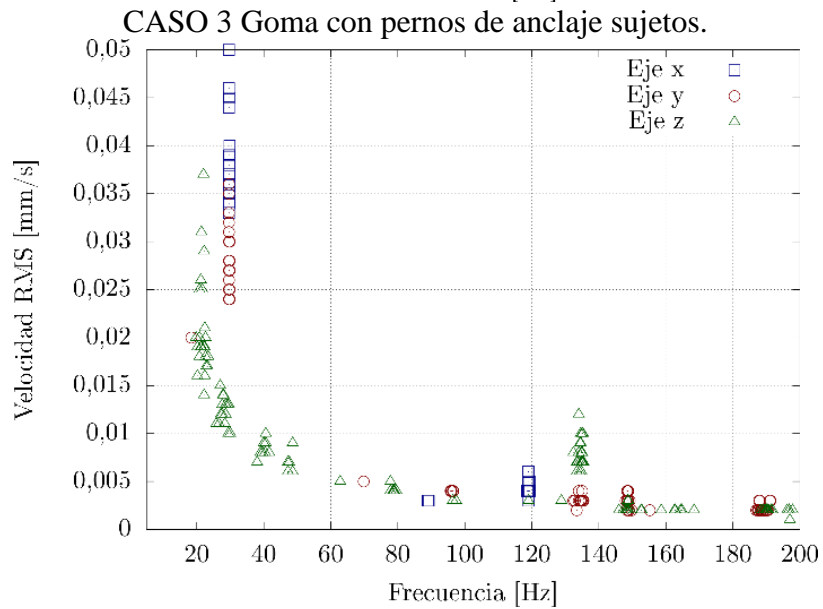
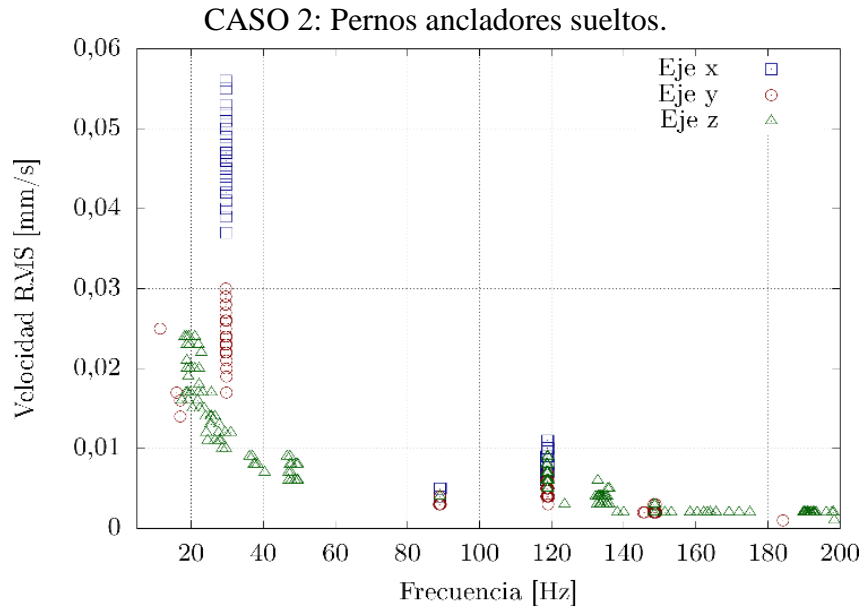
Figura 3. 19: Banco de prueba para pruebas en condiciones normales.

Fuente: El Autor

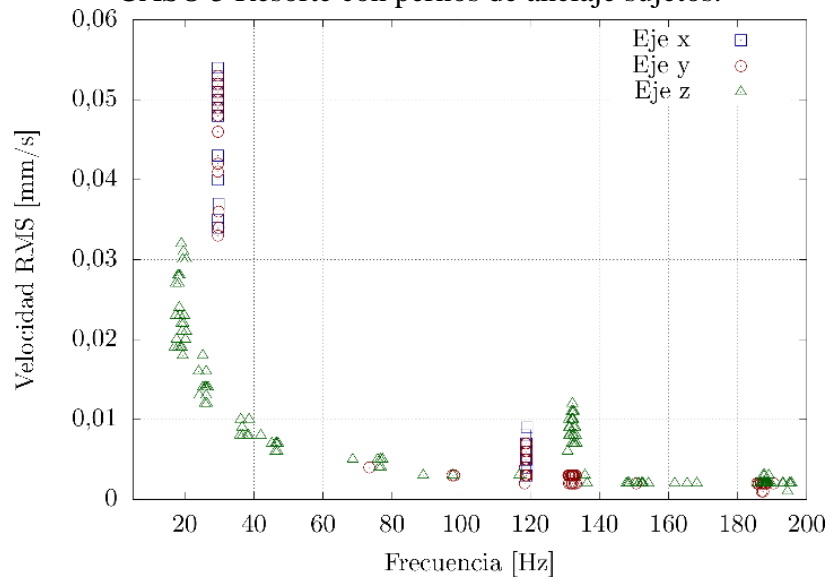
Las pruebas en condiciones normales quieren decir que el motor está en estado de trabajo sin la influencia de cargas externas.

Tabla 16: Espectros de vibración (RMS), motor balanceado sin masas excéntricas.

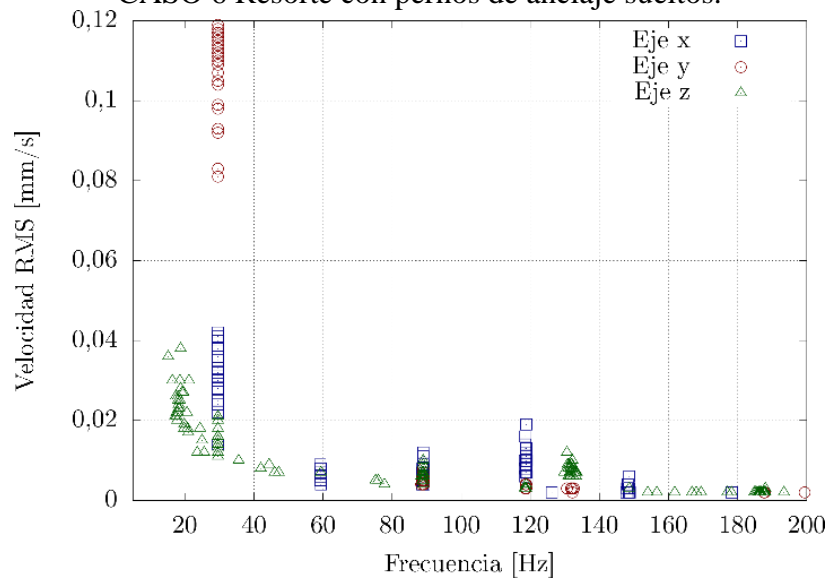




CASO 5 Resorte con pernos de anclaje sujetos.



CASO 6 Resorte con pernos de anclaje sueltos.



Fuente: Propia

## INTERPRETACIÓN DE DATOS DE LA TABLA 16.

Los espectros proyectados en la tabla anterior muestran las mediciones en condiciones normales. Para el análisis, se toma los 3 armónicos predominantes con valores de frecuencia y velocidad como se muestra a continuación.

Tabla 17: Armónicos predominantes para pruebas en condiciones normales.

Casos	Armónico X				Armónico Y				Armónico Z			
	1 armónico		2 armónico		1 armónico		2 armónico		1 armónico		2 armónico	
	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s) RMS	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s) RMS	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s) RMS	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s) RMS	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s) RMS	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s) RMS
1	29.6	0.053	119.00	0.014	26.4	0.029	27.0	0.038	17.8	0.016	23.6	0.016
2	29.6	0.056	118.0	0.011	16.0	0.02	29.6	0.03	18.2	0.024	19.0	0.017
3	29.6	0.05	119.0	0.006	18.2	0.02	26.6	0.035	22.0	0.037	134.0	0.012
4	29.6	0.206	59.4	0.017	29.6	0.052	134.6	0.003	9.6	0.039	134.8	0.007
5	29.6	0.053	118.6	0.008	29.6	0.052	118.6	0.007	19.6	0.038	132.0	0.011
6	29.6	0.41	118.8	0.019	29.6	0.12	89.2	0.004	15.2	0.36	132.0	0.008

Fuente: El Autor

Con las características del motor, según el criterio de severidad de la norma ISO 2372, tabla 3 se distingue al motor en la clase I de máquinas rotatorias. Las velocidades de los casos 1, 2, 3, 4, y 5 están en el rango de 0.18 a 0.28 mm/seg, de la norma de severidad, por lo que se considera valores aceptables. Las velocidades del caso 6 están a un rango de 0.28 a 0.45 mm/seg, las mismas se consideran valores aceptables.

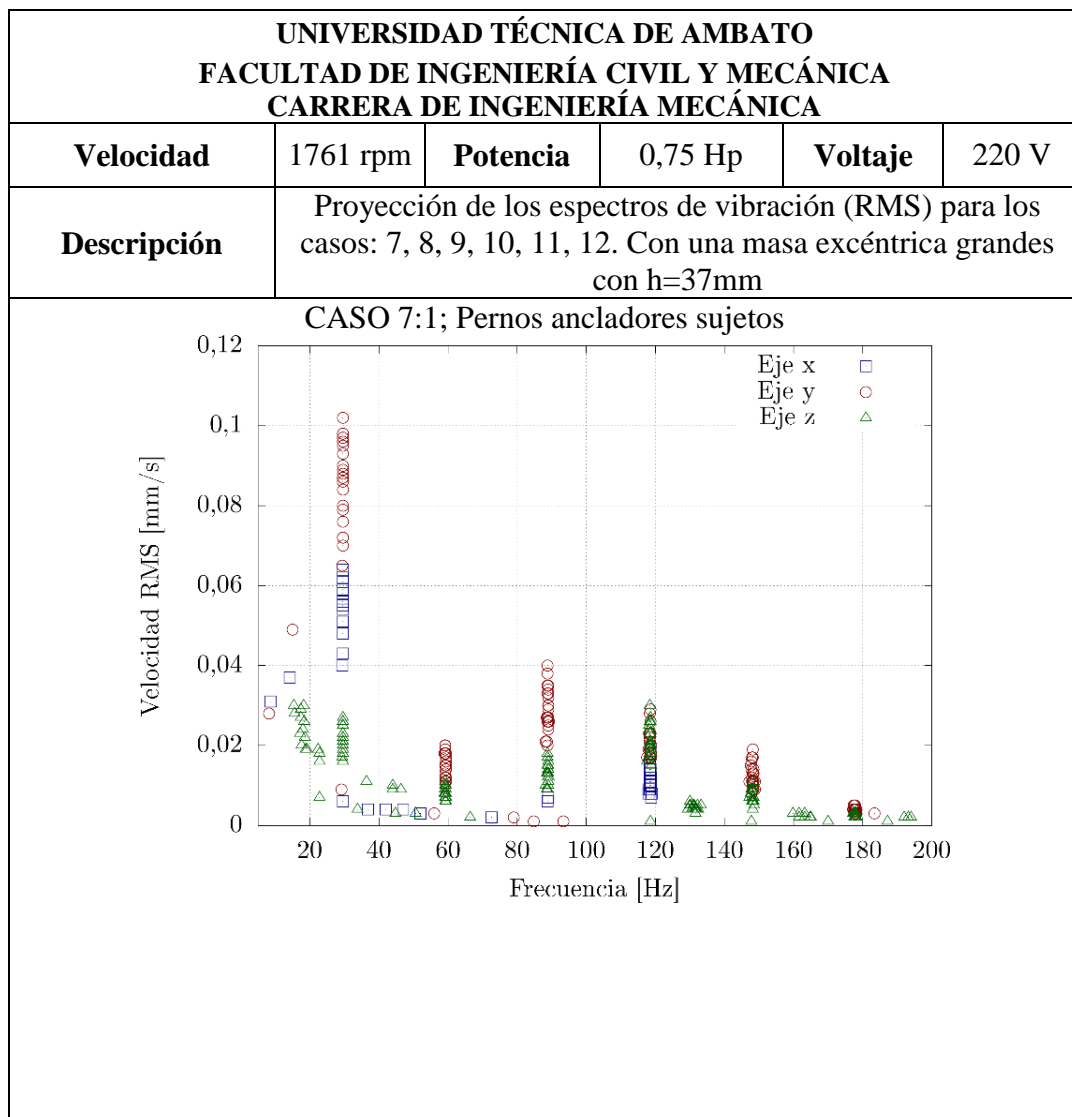
- Pruebas para masa excéntrica grande con  $h=37\text{mm}$ .



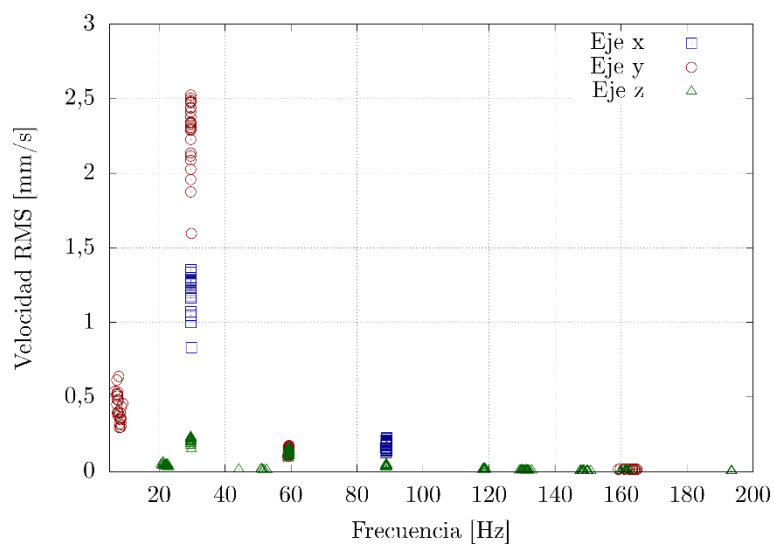
Figura 3. 20: Banco de prueba con masas excéntricas grandes con  $h=37\text{mm}$ .

Fuente: El Autor

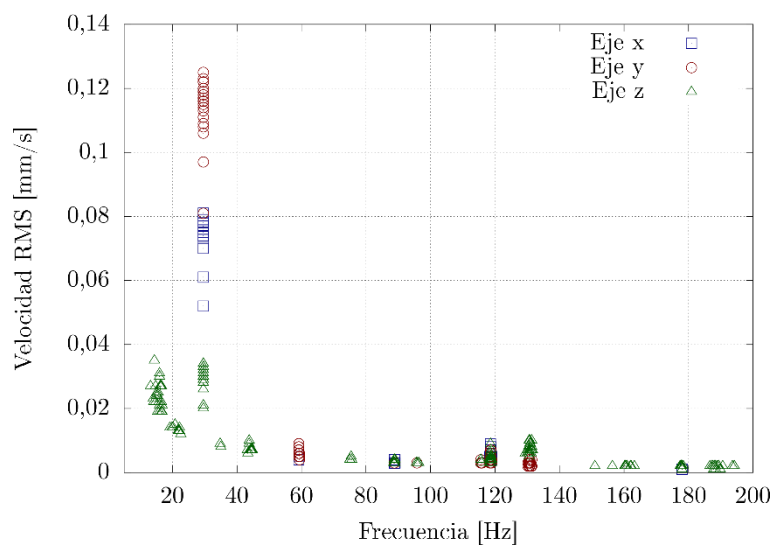
Tabla 18: Espectros de vibración (RMS), masas excéntricas grandes con  $h=37\text{mm}$ .



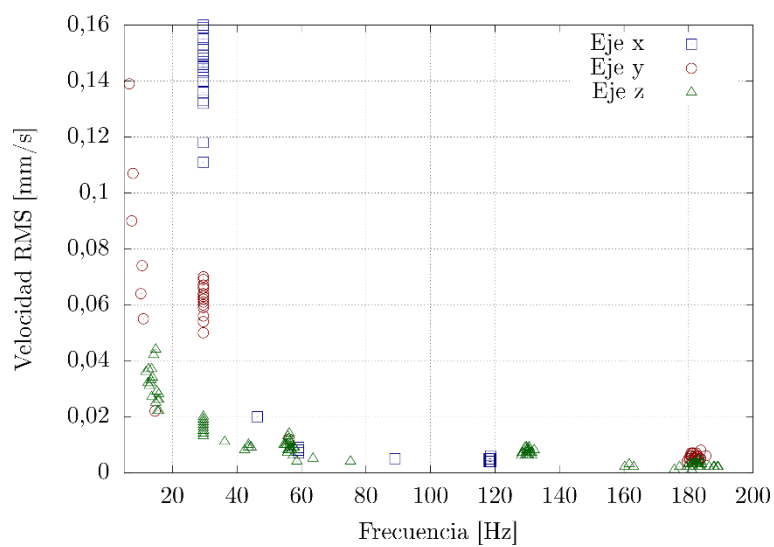
CASO 8:1 Pernos ancladores sueltos.



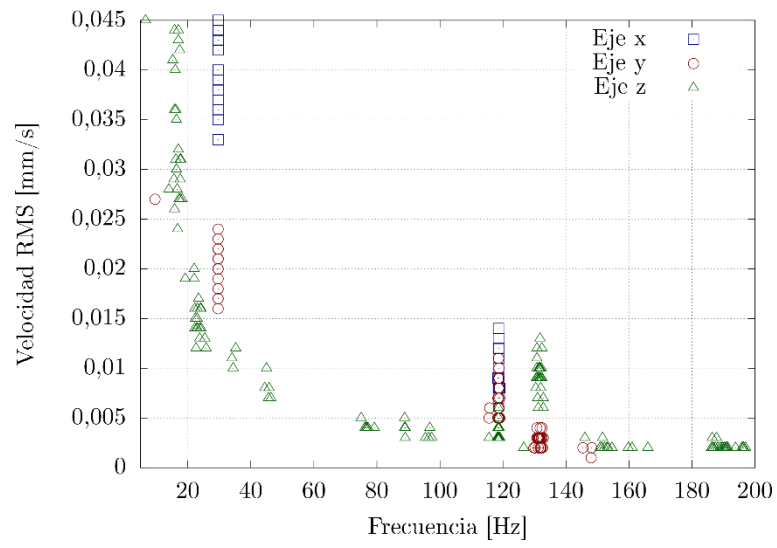
CASO 9:1 Goma con pernos de anclaje sujetos.



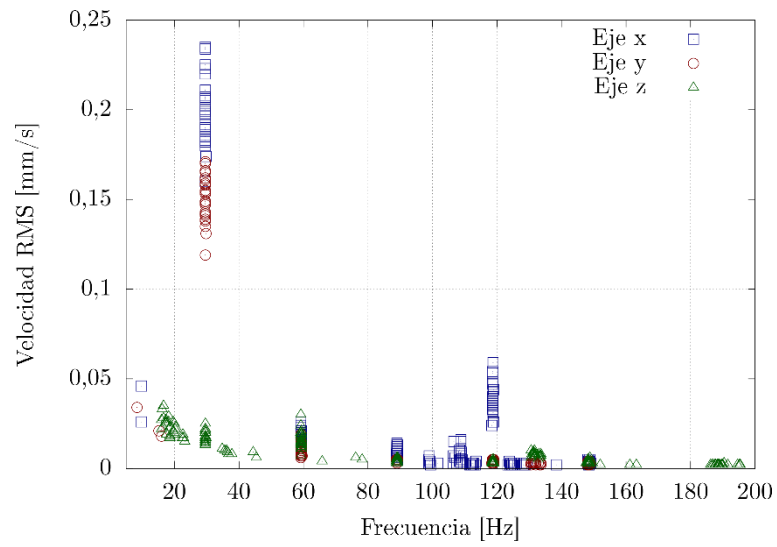
CASO 10:1 Goma con pernos de anclaje sueltos.



CASO 11:1 Resorte con pernos de anclaje sujetos.



CASO 12:1 Resorte con pernos de anclaje sueltos.



Fuente: El Autor



## INTERPRETACIÓN DE LA TABLA 18.

Los espectros proyectados en la tabla anterior muestran las mediciones con masas excéntricas grandes con  $h=37\text{mm}$ .

Tabla 19: Armónicos predominantes con masas excéntricas grandes con  $h=37\text{mm}$ .

Casos	Armónico X				Armónico Y				Armónico Z			
	1 armónico		2 armónico		1 armónico		2 armónico		1 armónico		2 armónico	
	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s) RMS	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s) RMS	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s) RMS	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s) RMS	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s) RMS	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s) RMS
7:1	29.6	0.061	119.2	0.021	26.4	0.96	88.0	0.04	18.2	0.030	119.0	0.033
8:1	29.6	1.336	88.8	0.203	29.6	2.478	59.2	0.160	26.6	0.224	59.2	0.153
9:1	29.6	0.081	118.6	0.007	26.6	0.122	59.2	0.008	16.0	0.037	130.8	0.008
10:1	29.6	0.16	43.0	0.02	7.8	0.107	183.8	0.008	13.4	0.033	57.4	0.006
11:1	29.6	0.045	118.8	0.012	29.6	0.023	118.8	0.01	17.0	0.044	132.0	0.013
12:1	29.6	0.235	118.6	0.053	29.6	0.17	59.2	0.013	18.2	0.029	59.2	0.020

Fuente: El Autor

Con las características del motor, según el criterio de severidad de la norma ISO 2372, tabla 3 se distingue al motor en la clase I de máquinas rotatorias. Masas excéntricas grandes con  $h=37\text{mm}$  en la cual el armónico que predomina en el sistema es el “Armónico Y”. Las velocidades de los casos 7:1, 9:1, 11:1, están en un rango de 0.18 a 0.28 mm/seg, de la norma de severidad, por lo que se considera valores aceptables. La velocidad del caso 8:1 está en un rango de 1.8 a 2.8 mm/seg, se considera un valor insatisfactorio. Las velocidades de los casos 10:1, 12:1, están en un rango de 0.28 a 0.45 mm/seg, se consideran valores aceptables.

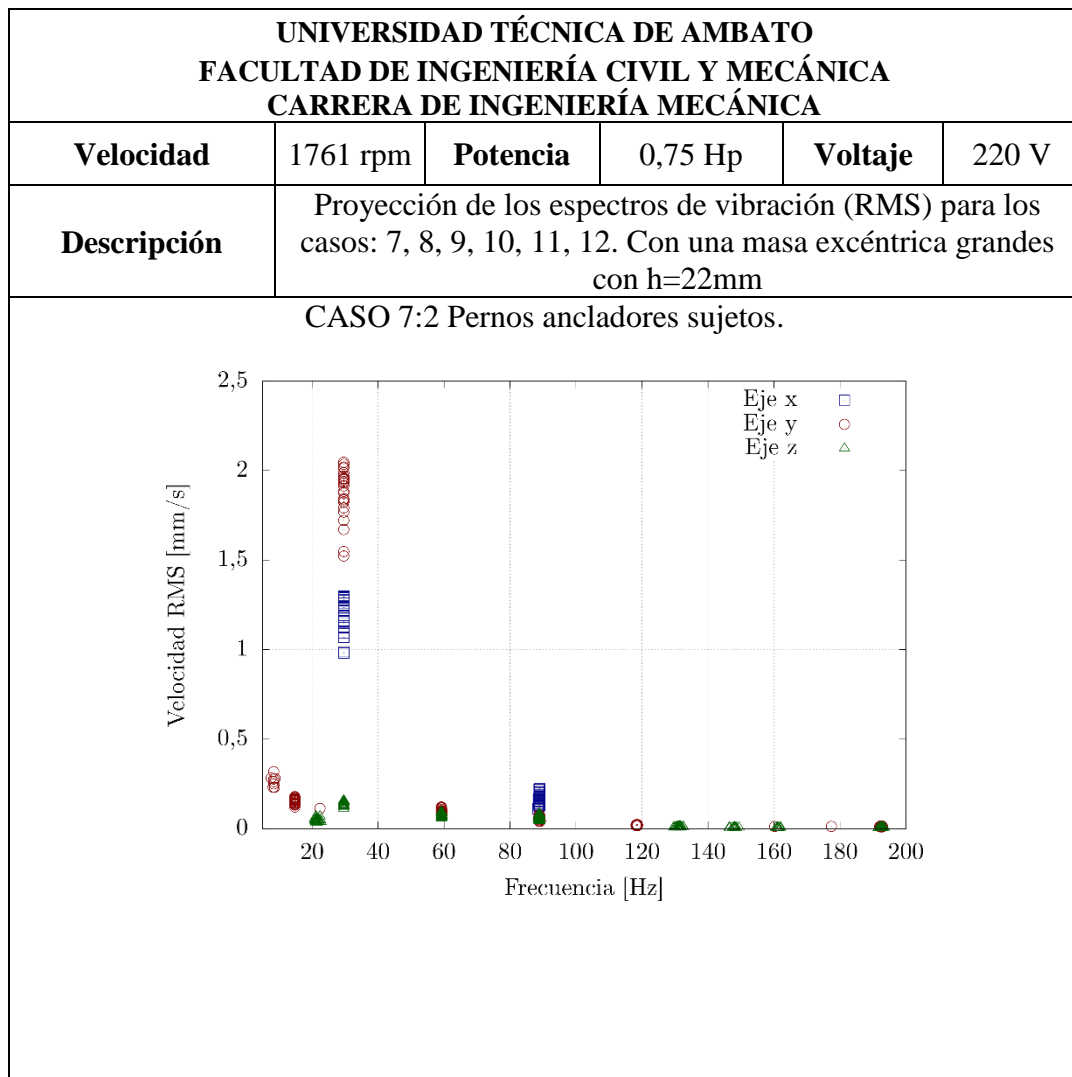
- Pruebas para masa excéntricas grandes con  $h=22\text{mm}$ .



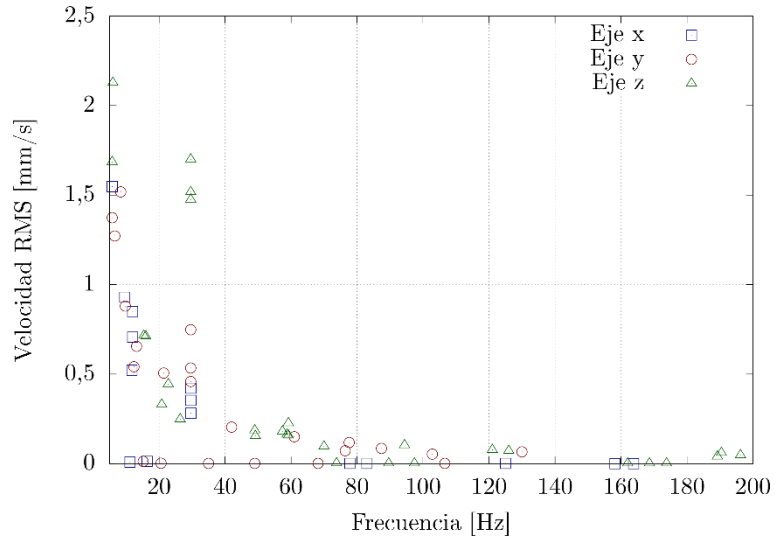
Figura 3. 21: Banco de prueba con masas excéntricas grandes con  $h=22\text{mm}$ .

Fuente: El Autor

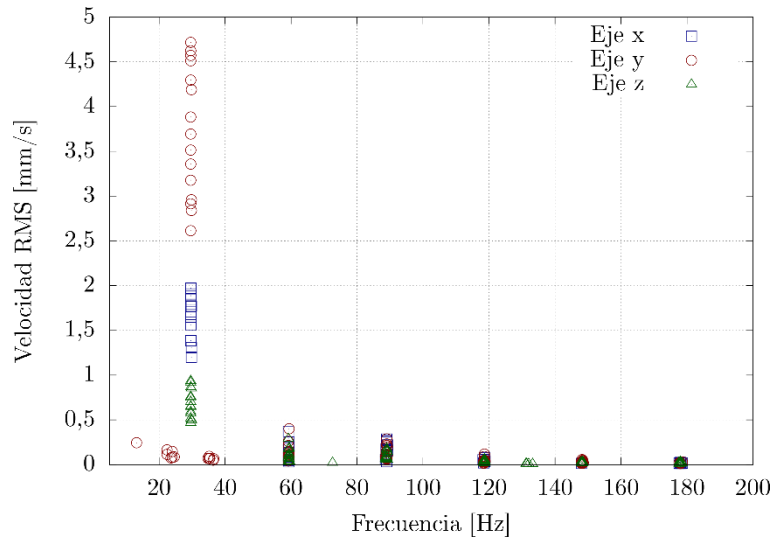
Tabla 20: Espectros de vibración (RMS), masas excéntricas grandes con  $h=22\text{mm}$ .



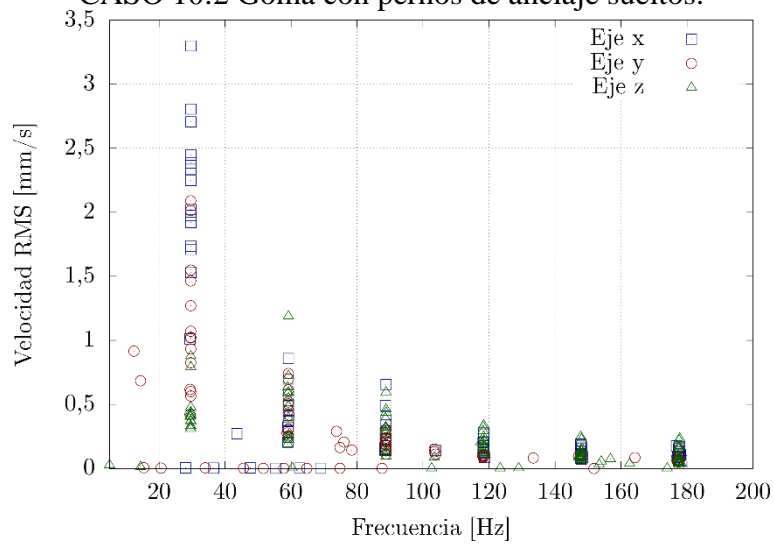
CASO 8:2 Pernos ancladores sueltos.



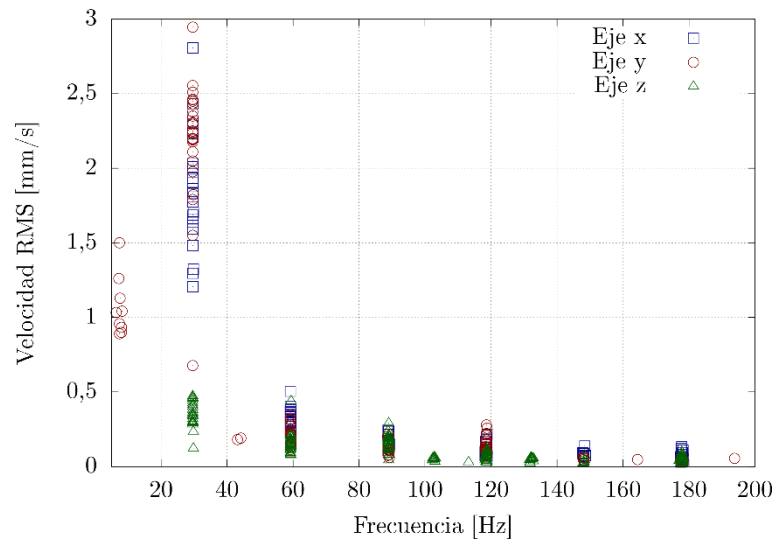
CASO 9:2 Goma con pernos de anclaje sujetos.



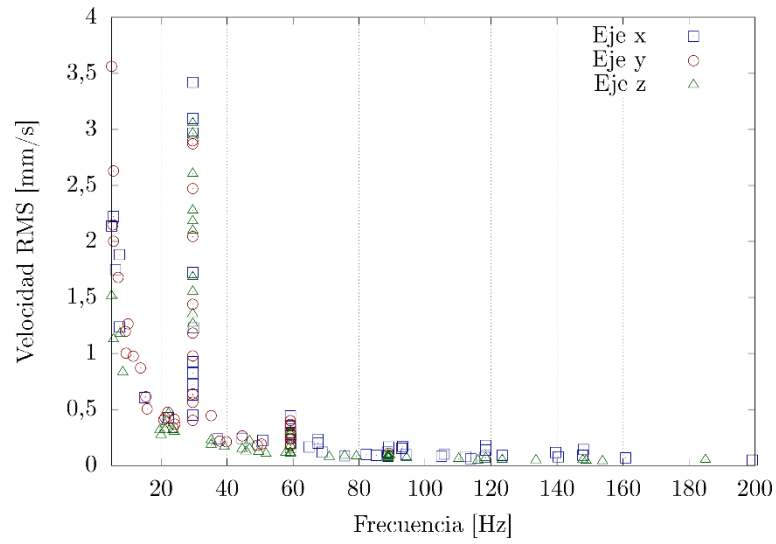
CASO 10:2 Goma con pernos de anclaje sueltos.



CASO 11:2 Resorte con pernos de anclaje sujetos.



CASO 12:2 Resorte con pernos de anclaje sueltos.



Fuente: El Autor

## INTERPRETACIÓN DE LA TABLA 20.

Los espectros proyectados en la tabla anterior muestran las mediciones con masas excéntricas grandes con  $h=22\text{mm}$ .

Tabla 21: Armónicos predominantes con masas excéntricas grandes con  $h=22\text{mm}$ .

Casos	Armónico X				Armónico Y				Armónico Z			
	1 armónico		2 armónico		1 armónico		2 armónico		1 armónico		2 armónico	
	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s) RMS	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s) RMS	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s) RMS	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s) RMS	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s) RMS	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s) RMS
7:2	29.6	1.214	88.8	0.124	26.6	1.957	59.2	0.083	88.8	1.957	59.2	0.068
8:2	3.6	2.528	16.4	0.012	3.0	3.393	42.0	0.204	26.6	3.393	59.2	0.226
9:2	29.6	1.889	89.0	0.286	29.6	4.71	59.4	0.4	29.6	4.71	89.0	0.177
10:2	29.6	3.299	59.2	0.372	29.6	2.013	59.4	0.418	59.2	2.013	59.2	0.487
11:2	29.6	2.8	59.2	0.365	29.6	3.0	59.2	0.224	17.0	3.0	88.8	0.17
12:2	29.6	3.42	59.2	0.327	5.0	3.563	59.2	0.367	29.6	3.563	59.2	0.282

Fuente: El Autor

Con las características del motor, según el criterio de severidad de la norma ISO 2372, tabla 3 se distingue al motor en la clase I de máquinas rotatorias. Masas excéntricas grandes con  $h=22\text{mm}$  en la cual el armónico que predomina en el sistema es el “Armónico X, Y”. La velocidad del caso 7:2 está en un rango de 1.8 a 2.8 mm/seg, de la norma de severidad donde se observa que es valor insatisfactorio. Las velocidades en los casos 8:2, 10:2, 11:2, 12:2 están en un rango de 2.8 a 4.5 mm/seg, donde se observa que son valores insatisfactorios. La velocidad en el caso 9:2 donde se observa que es valor inaceptable.

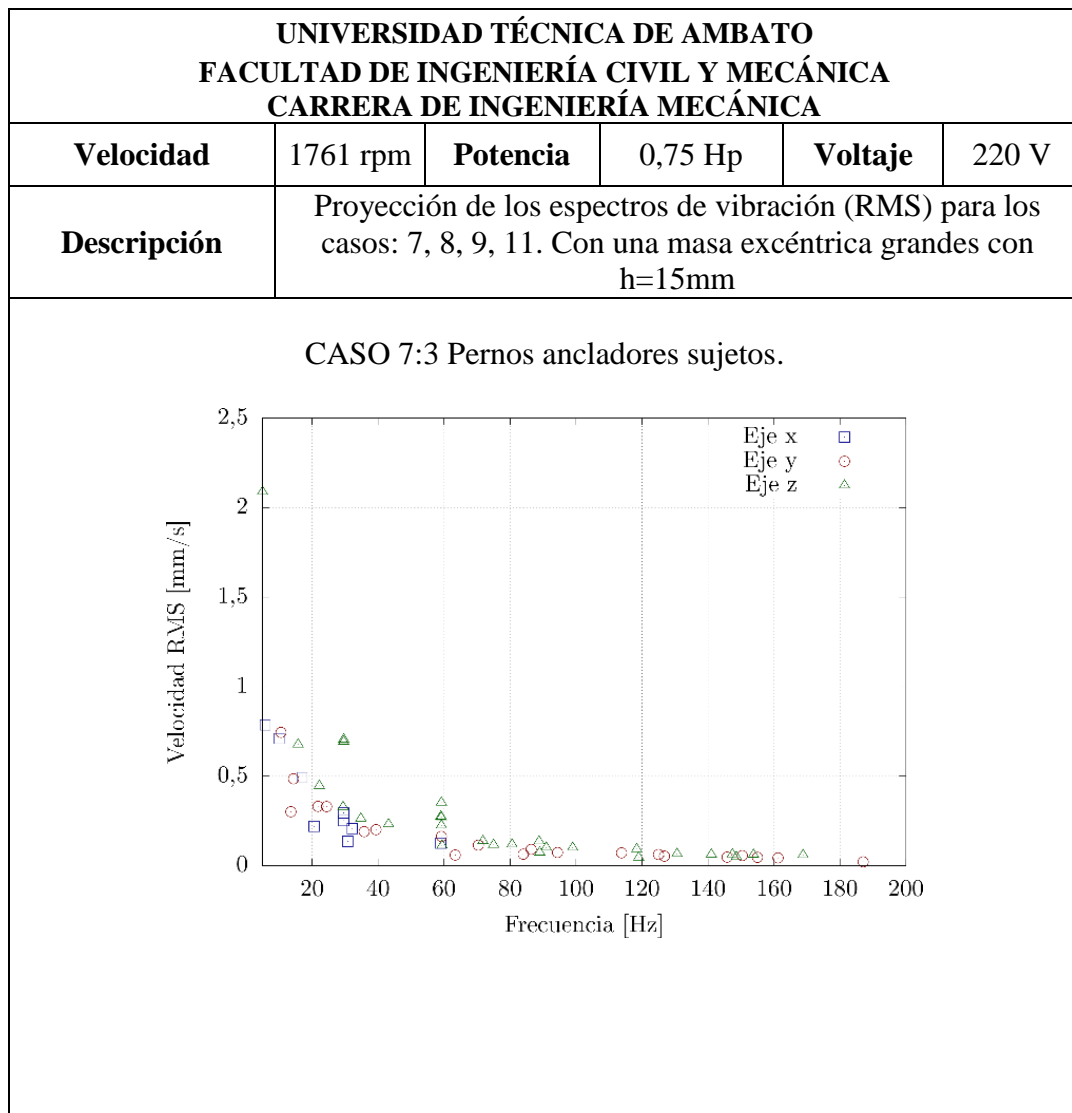
- Pruebas para masa excéntrica grandes con  $h=15\text{mm}$ .



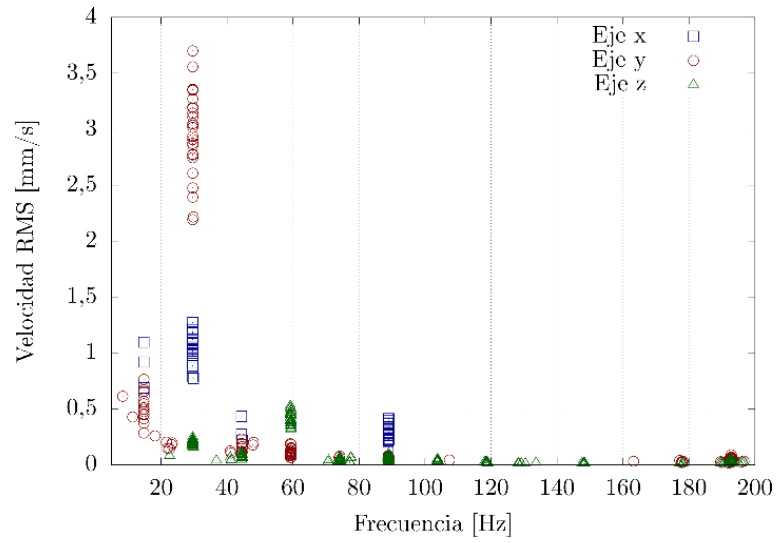
Figura 3. 22: Banco de prueba con masas excéntricas grandes con  $h=15\text{mm}$ .

Fuente: El Autor

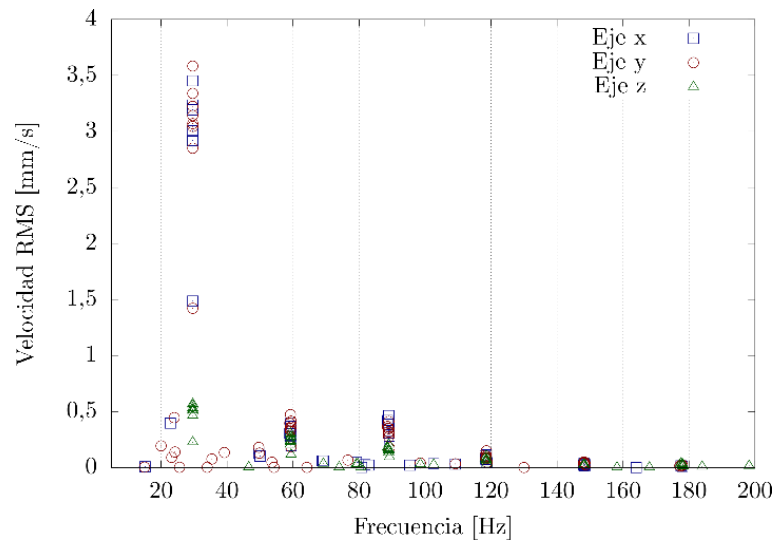
Tabla 22: Espectros de vibración (RMS), masas excéntricas grandes con  $h=15\text{mm}$ .



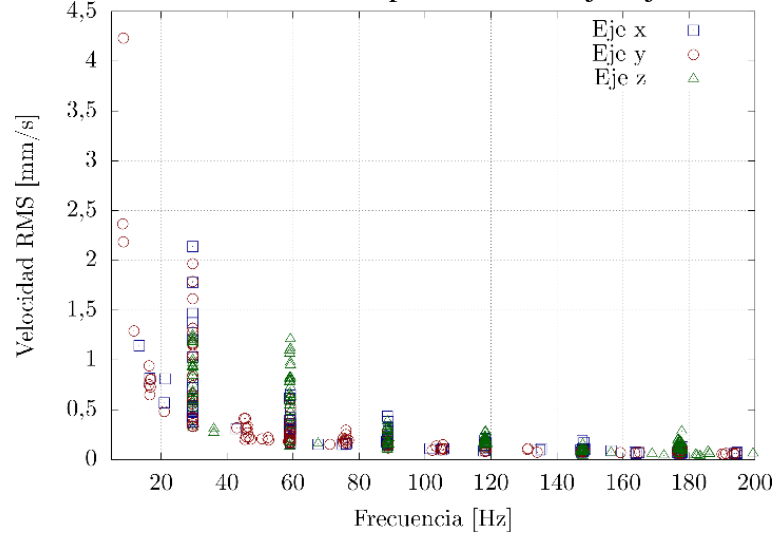
CASO 8:3 Pernos ancladores sueltos.



CASO 9:3 Goma con pernos de anclaje sujetos.



CASO 11:3 Resorte con pernos de anclaje sujetos.



Fuente: El Autor

## INTERPRETACIÓN DE LA TABLA 22.

Los espectros proyectados en la tabla anterior muestran las mediciones con masas excéntricas grandes con  $h=15\text{mm}$ .

Tabla 23: Armónicos predominantes con masas excéntricas grandes con  $h=15\text{mm}$ .

Casos	Armónico X				Armónico Y				Armónico Z			
	1 armónico		2 armónico		1 armónico		2 armónico		1 armónico		2 armónico	
	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s) RMS	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s) RMS	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s) RMS	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s) RMS	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s) RMS	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s) RMS
7:3	5.0	0.786	44.4	0.431	10.6	0.744	44.4	0.119	3.6	2.672	59.2	0.397
8:3	29.6	1.27	44.4	0.44	29.6	3.583	44.4	0.2	59.4	0.52	59.2	0.511
9:3	29.6	3.452	89.0	0.308	29.6	3.583	59.2	0.349	29.6	0.553	59.2	0.228
11:3	29.6	2.39	59.2	0.309	8.6	4.231	43.0	0.318	29.6	1.248	59.2	1.209

Fuente: El Autor

Con las características del motor, según el criterio de severidad de la norma ISO 2372, tabla 3 se distingue al motor en la clase I de máquinas rotatorias. Masas excéntricas grandes con  $h=15\text{mm}$  En la cual el armónico que predomina en el sistema es el “Armónico X, Y”.

La velocidad del caso 7:3 están en un rango de 1.8 a 2.8 mm/seg, donde se observa que es valor insatisfactorio. Las velocidades en los casos 8:3 y 9:3 están en un rango de 2.8 a 4.5 mm/seg, donde se observa que son valores insatisfactorios. La velocidad del caso 11:3 donde se observa que es valor inaceptable.



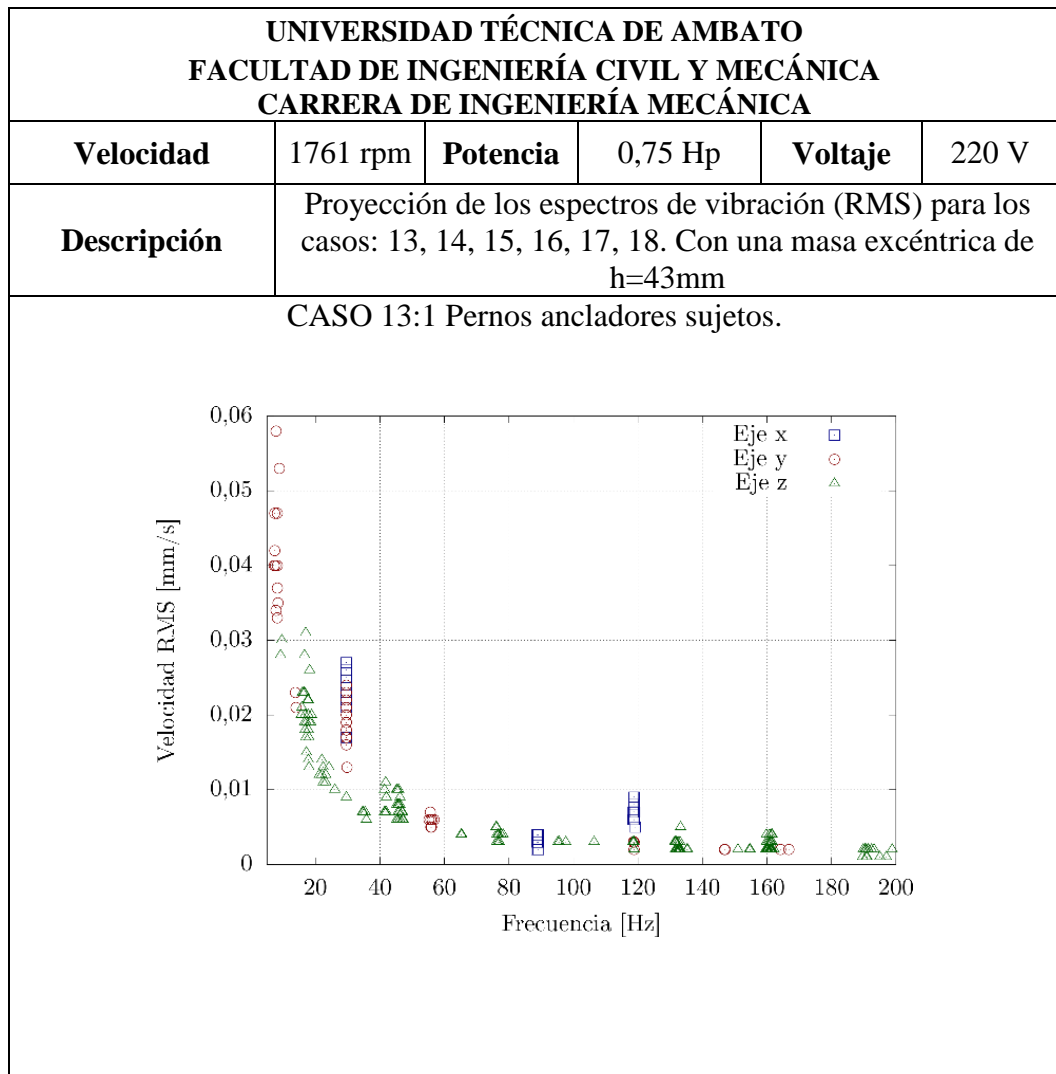
- Pruebas para masa excéntrica pequeña con  $h=43\text{mm}$ .



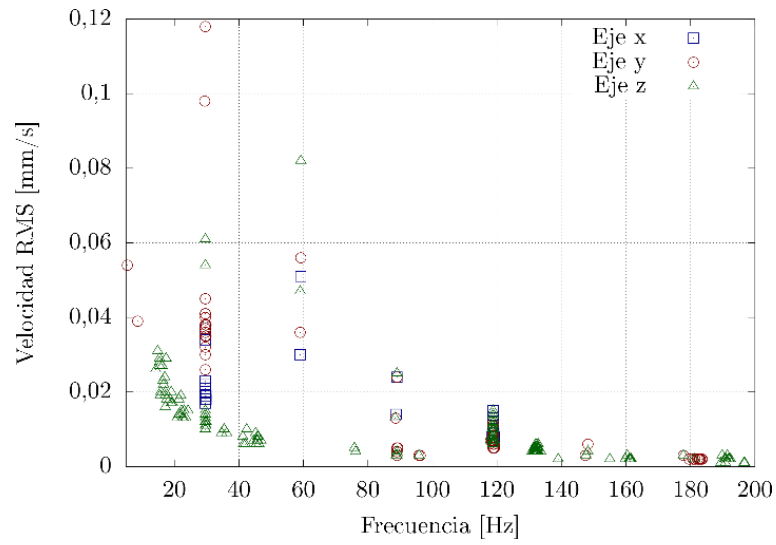
Figura 3. 23: Banco de prueba con masas excéntricas pequeñas con  $h=43\text{mm}$ .

Fuente: El Autor

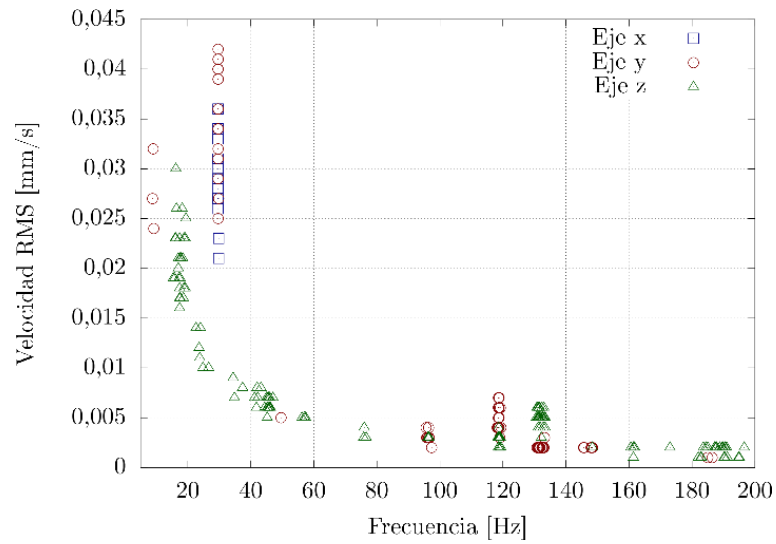
Tabla 24: Espectros de vibración (RMS), masas excéntricas pequeñas con  $h=43\text{mm}$ .



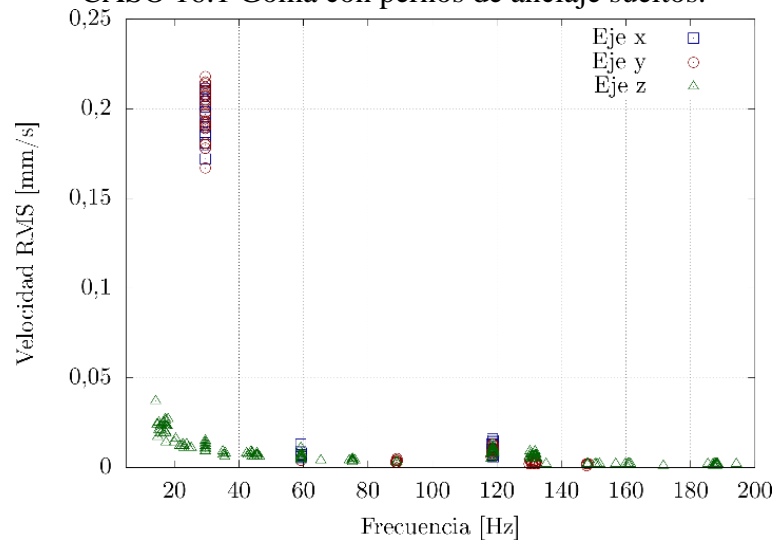
CASO 14:1 Pernos ancladores sueltos.



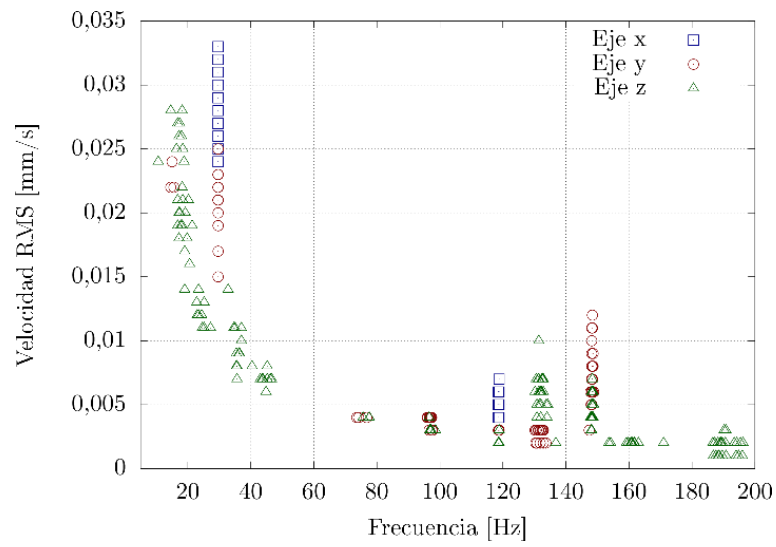
CASO 15:1 Goma con pernos de anclaje sujetos.



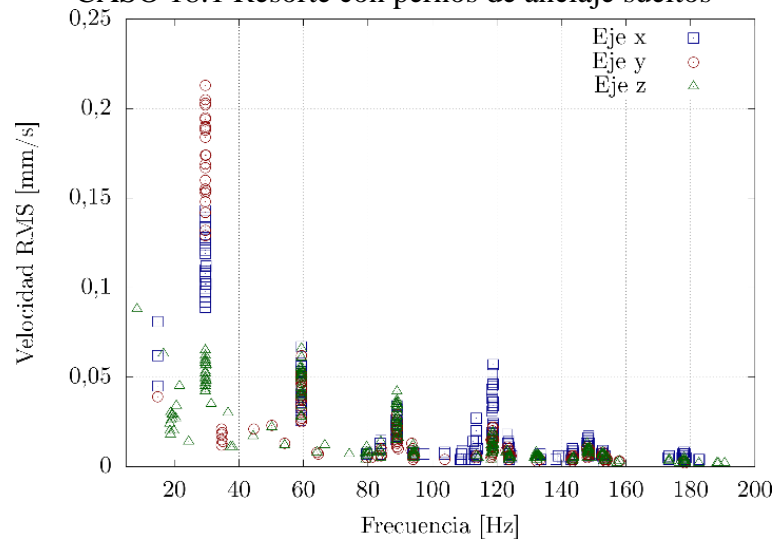
CASO 16:1 Goma con pernos de anclaje sueltos.



CASO 17:1 Resorte con pernos de anclaje sujetos.



CASO 18:1 Resorte con pernos de anclaje sueltos



Fuente: El Autor

## INTERPRETACIÓN DE LA TABLA 24.

Los espectros proyectados en la tabla anterior muestran las mediciones con masas excéntricas pequeñas con  $h=43\text{mm}$ .

Tabla 25: Armónicos predominantes con masas excéntricas pequeñas con  $h=43\text{mm}$ .

Casos	Armónico X				Armónico Y				Armónico Z			
	1 armónico		2 armónico		1 armónico		2 armónico		1 armónico		2 armónico	
	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s) RMS	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s) RMS	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s) RMS	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s) RMS	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s) RMS	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s) RMS
13:1	29.6	0.025	118.4	0.006	7.8	0.058	56.2	0.006	9.6	0.03	46.2	0.009
14:1	59.2	0.051	59.0	0.51	29.6	0.118	59.2	0.056	59.2	0.082	59.2	0.082
15:1	29.6	0.036	357.0	0.022	29.6	0.042	118.8	0.006	16.2	0.03	133.0	0.006
16:1	29.6	0.199	118.8	0.014	29.6	0.204	118.8	0.011	15.2	0.025	118.8	0.010
17:1	29.6	0.033	118.8	0.006	29.6	0.025	148.4	0.013	16.8	0.027	132.2	0.011
18:1	29.6	0.139	59.2	0.058	29.6	0.213	59.2	0.052	59.2	0.055	59.2	0.055

Fuente: El Autor

Con las características del motor, según el criterio de severidad de la norma ISO 2372, tabla 3 se distingue al motor en la clase I de máquinas rotatorias. Masas excéntricas pequeñas con  $h=43\text{mm}$  en la cual el armónico que predomina en el sistema es el “Armónico Y” con masas excéntricas pequeñas con  $h=43\text{mm}$ . Por el estado del motor y la excentricidad con las masas que esta posee se consideran valores aceptable según el criterio de severidad de la norma.

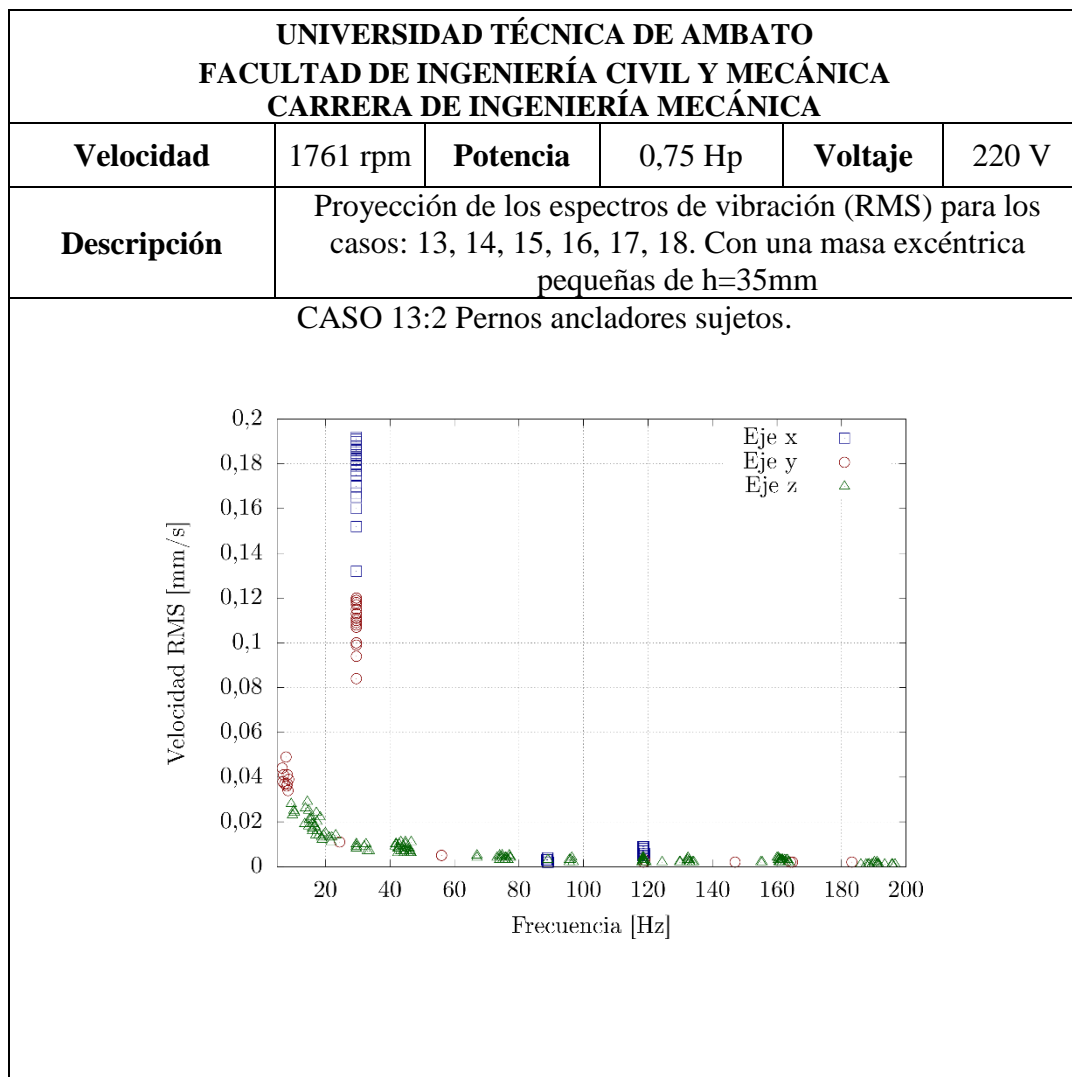
- Pruebas para masa excéntrica pequeña con  $h=35\text{mm}$ .



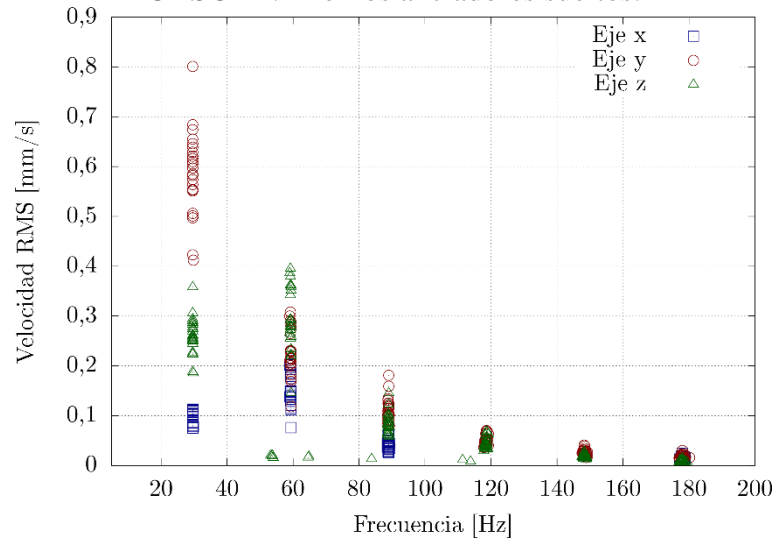
Figura 3. 24: Banco de prueba con masas excéntricas pequeñas con  $h=35\text{mm}$ .

Fuente: El Autor

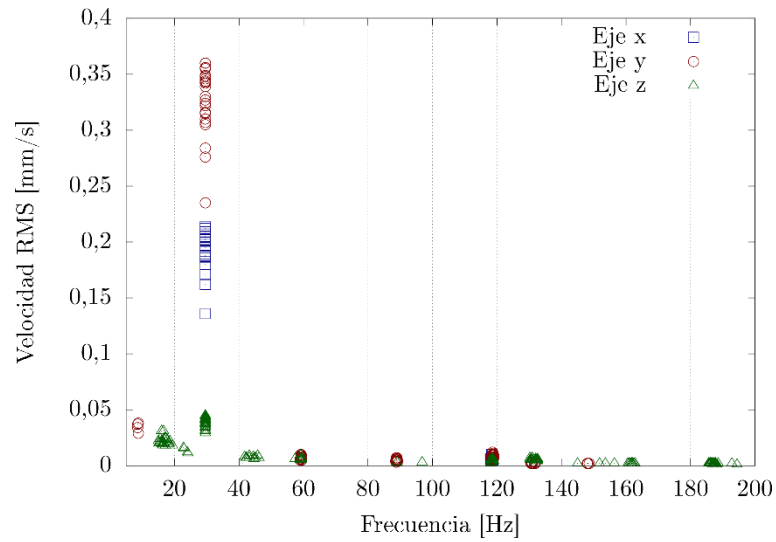
Tabla 26: Espectros de vibración (RMS), masas excéntricas pequeñas con  $h=35\text{mm}$ .



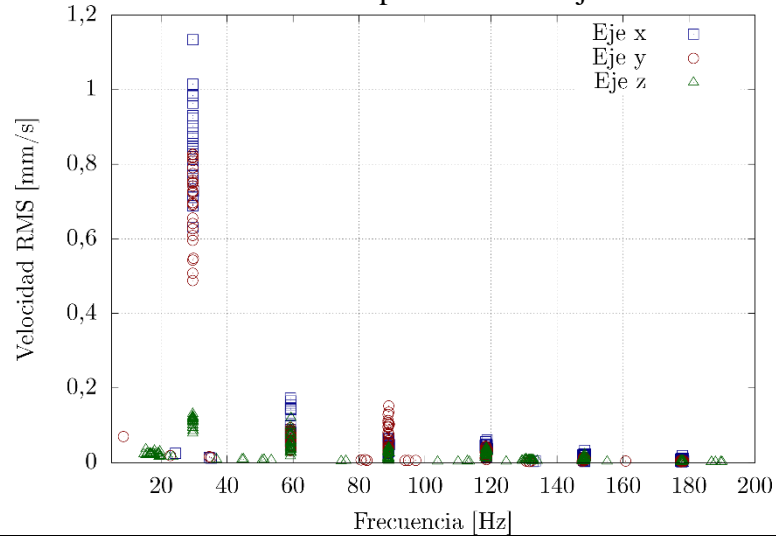
CASO 14:2 Pernos ancladores sueltos.



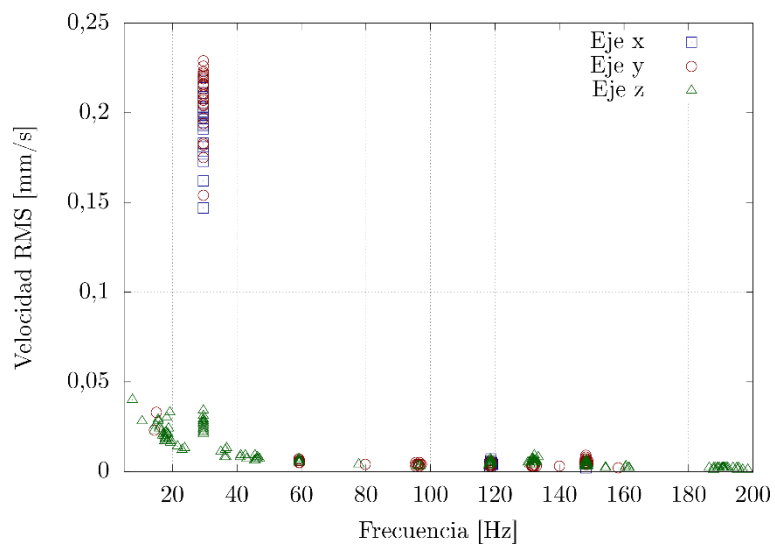
CASO 15:2 Goma con pernos de anclaje sujetos.



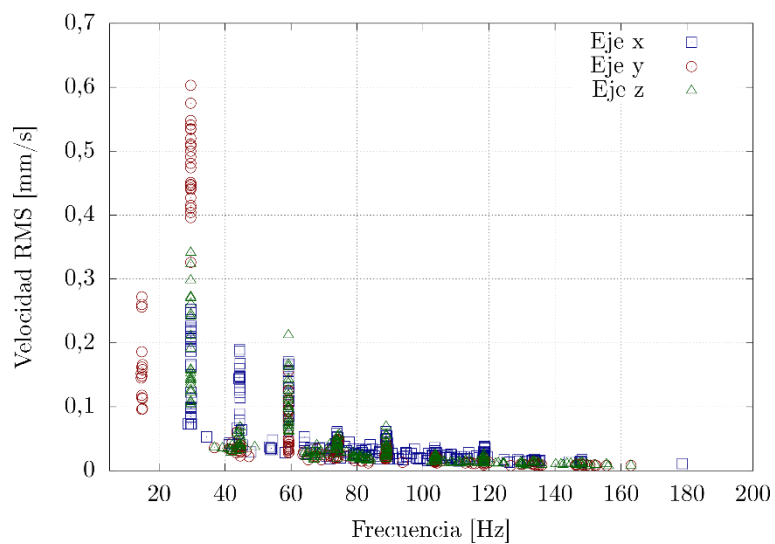
CASO 16:2 Goma con pernos de anclaje sueltos.



CASO 17:2 Resorte con pernos de anclaje sujetos.



CASO 18:2 Resorte con pernos de anclaje sueltos.



Fuente: El Autor

## INTERPRETACIÓN DE LA TABLA 26.

Los espectros proyectados en la tabla anterior muestran las mediciones con masas excéntricas pequeñas con  $h=35\text{mm}$ .

-Tabla 27: Armónicos predominantes con masas excéntricas pequeñas con  $h=35\text{mm}$ .

Casos	Armónico X				Armónico Y				Armónico Z			
	1 armónico		2 armónico		1 armónico		2 armónico		1 armónico		2 armónico	
	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s) RMS	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s) RMS	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s) RMS	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s) RMS	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s) RMS	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s) RMS
13:2	29.6	0.186	118.4	0.006	29.6	0.12	56.0	0.005	13.8	0.026	46.6	0.006
14:2	59.0	0.201	59.4	0.201	29.6	0.801	59.00	0.3	59.0	0.386	59.00	0.386
15:2	29.6	0.205	118.6	0.007	29.6	0.356	59.2	0.01	29.6	0.041	118.4	0.006
16:2	29.6	1.134	59.2	0.173	29.6	0.728	88.8	0.107	29.6	0.116	59.2	0.1
17:2	29.6	0.2	118.8	0.006	29.6	0.226	148.8	0.005	19.2	0.033	133.4	0.008
18:2	29.6	0.252	44.6	0.168	29.6	0.6	59.2	0.156	29.6	0.341	59.2	0.212

Fuente: El Autor

Con las características del motor, según el criterio de severidad de la norma ISO 2372, tabla 3 se distingue al motor en la clase I de máquinas rotatorias. Masas excéntricas pequeñas con  $h=35\text{mm}$  en la cual el armónico que predomina en el sistema es el “Armónico X”.

La velocidad del caso 16:2 está en un rango de 1.12 a 1.8 mm/seg, donde se observa que es valor satisfactorio en la cual puede seguir operando sin ningún problema. En los casos siguientes según el criterio de seriedad están valores aceptables.



- Pruebas para masa excéntrica pequeña con  $h=24\text{mm}$ .



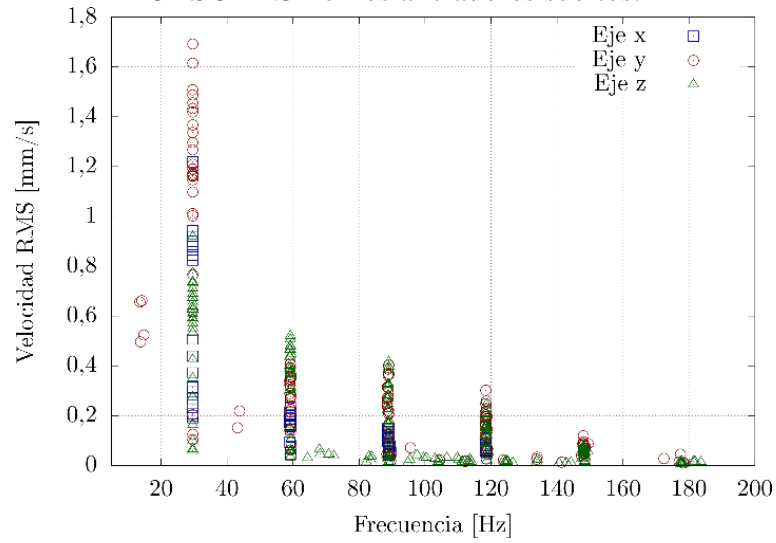
Figura 3. 25: Banco de prueba con masas excéntricas pequeñas con  $h=24\text{mm}$ .

Fuente: El Autor

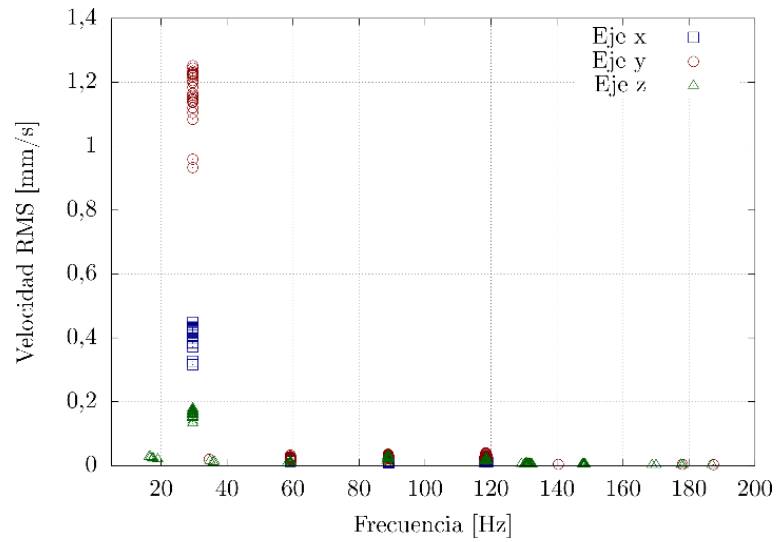
Tabla 28: Espectros de vibración (RMS), masas excéntricas pequeñas con  $h=24\text{mm}$ .

<b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b> <b>CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b>					
<b>Velocidad</b>	1761 rpm	<b>Potencia</b>	0,75 Hp	<b>Voltaje</b>	220 V
<b>Descripción</b>	Proyección de los espectros de vibración (RMS) para los casos: 13, 14, 15, 16, 17, 18. Con una masa excéntrica de $h=24\text{mm}$				
<b>CASO 13:3 Pernos ancladores sujetos.</b>					

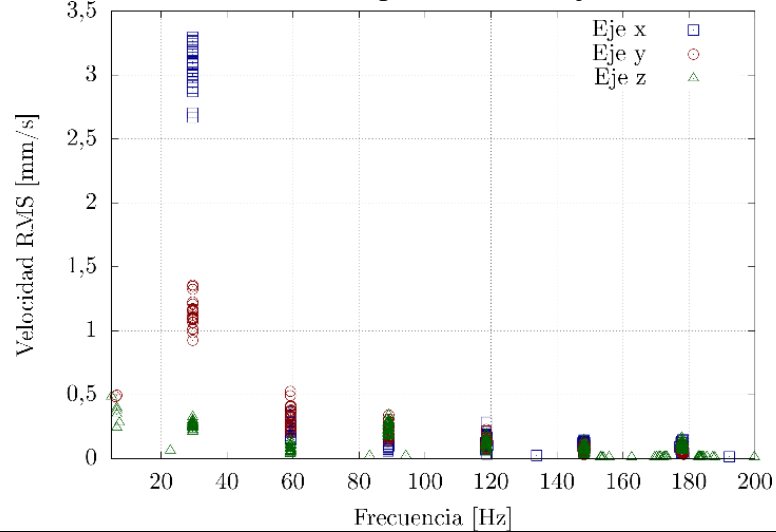
CASO 14:3 Pernos ancladores sueltos.



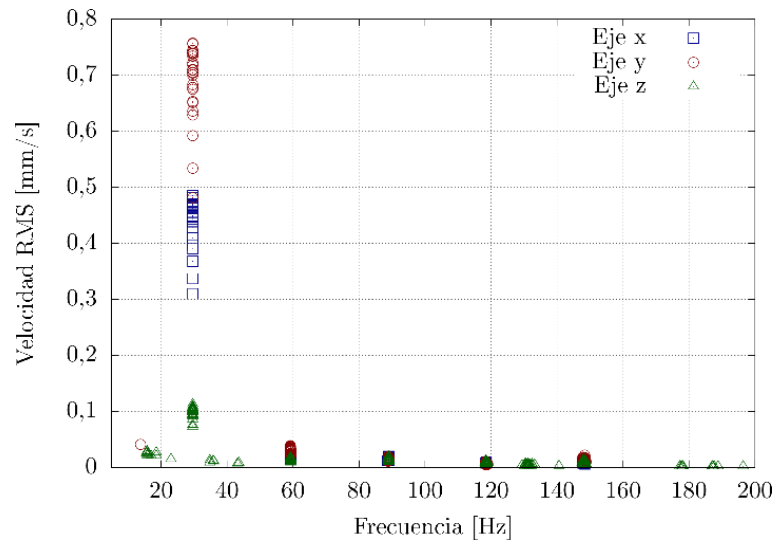
CASO 15:3 Goma con pernos de anclaje sujetos.



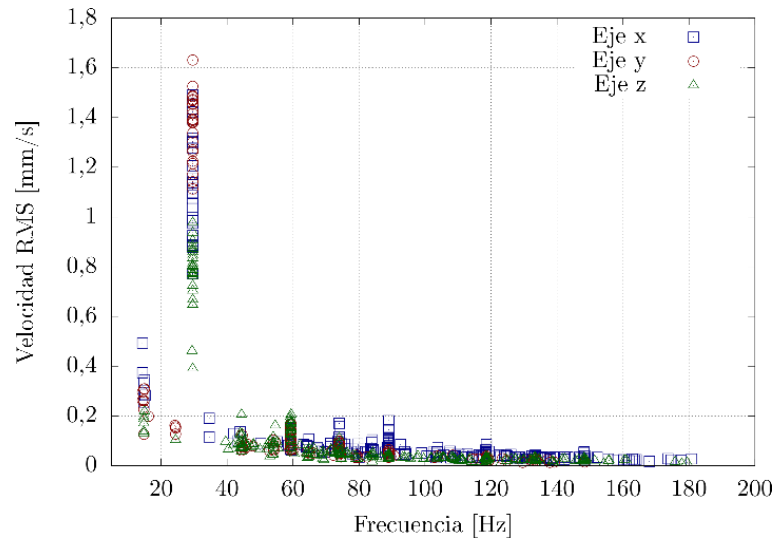
CASO 16:3 Goma con pernos de anclaje sueltos.



CASO 17:3 Resorte con pernos de anclaje sujetos.



CASO 18:3 Resorte con pernos de anclaje sueltos.



Fuente: El Autor

## INTERPRETACIÓN DE LA TABLA 28.

Los espectros proyectados en la tabla anterior muestran las mediciones con masas excéntricas pequeñas con  $h=24\text{mm}$ .

Tabla 29: Armónicos predominantes con masas excéntricas pequeñas con  $h=24\text{mm}$ .

Casos	Armónico X				Armónico Y				Armónico Z			
	1 armónico		2 armónico		1 armónico		2 armónico		1 armónico		2 armónico	
	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s) RMS	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s) RMS	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s) RMS	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s) RMS	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s) RMS	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s) RMS
13:3	29.6	0.465	59.4	0.031	29.6	0.528	59.4	0.030	29.6	0.045	46.6	0.009
14:3	29.6	1.219	59.2	0.203	29.6	1.615	59.2	0.392	29.6	0.625	59.2	0.465
15:3	29.6	0.436	88.8	0.012	29.6	1.22	118.4	0.029	29.6	0.16	88.8	0.027
16:3	29.6	3.261	59.2	0.257	29.6	1.347	59.2	0.323	88.0	0.284	88.8	0.262
17:3	29.6	0.462	88.8	0.015	29.6	0.738	59.2	0.030	29.6	1.06	59.2	0.016
18:3	2.8	1.318	59.2	0.094	29.6	1.631	59.2	0.128	29.6	0.866	44.4	0.205

Fuente: El Autor

Con las características del motor, según el criterio de severidad de la norma ISO 2372, tabla 3 se distingue al motor en la clase I de máquinas rotatorias. Masas excéntricas pequeñas con  $h=24\text{mm}$  en la cual el armónico que predomina en el sistema es el “Armónico X”. La velocidad del caso 13:3 está en un rango de 0.45 a 0.71 mm/seg, de la norma de severidad donde se observa que es valor aceptable. Las velocidades en los casos 15:3, 17:3, 18:3, están en un rango de 1.12 a 1.8 mm/seg, donde se observa que son valores satisfactoria. La velocidad del caso 16:3, está en un rango de 2.8, 4.5 mm/seg, donde se observa que es valor insatisfactorio.

- Pruebas para masa excéntrica pequeña con  $h=2\text{mm}$ .

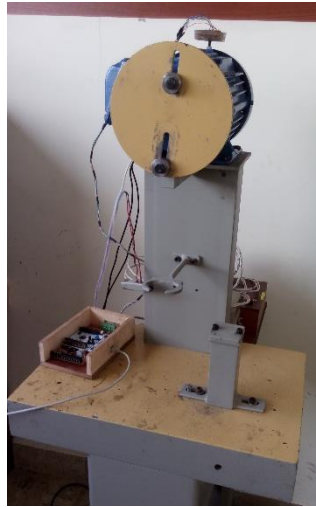


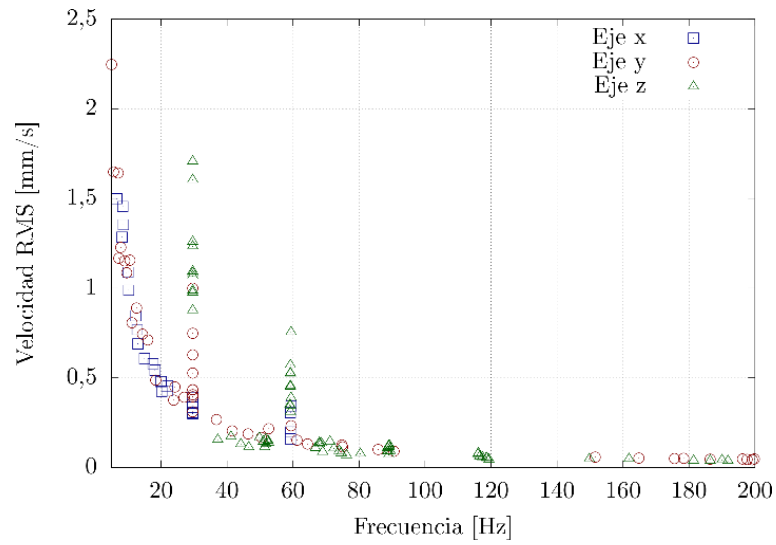
Figura 3. 26: Banco de prueba con masas excéntricas pequeñas con  $h=2\text{mm}$ .

Fuente: El Autor

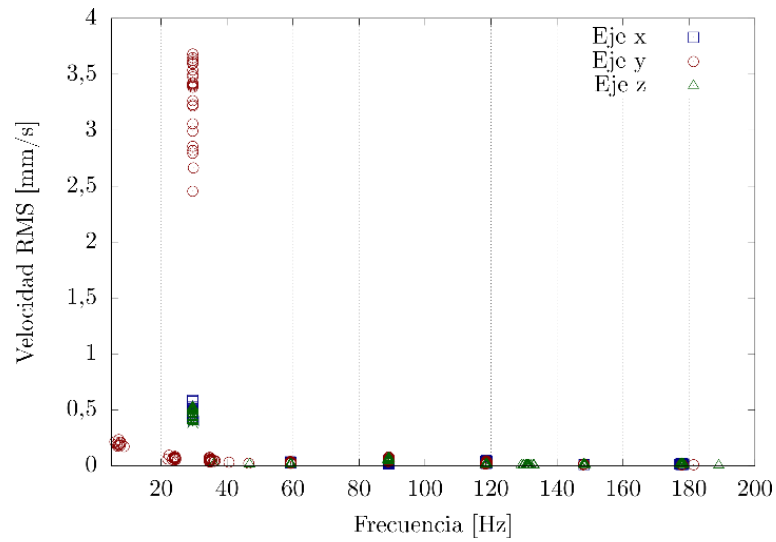
Tabla 30: Espectros de vibración (RMS), masas excéntricas pequeñas con  $h=2\text{mm}$ .

<b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b> <b>CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b>					
<b>Velocidad</b>	1761 rpm	<b>Potencia</b>	0,75 Hp	<b>Voltaje</b>	220 V
<b>Descripción</b>	Proyección de los espectros de vibración (RMS) para los casos: 13, 14, 15, 16, 17, 18. Con una masa excéntrica de $h=2\text{mm}$				
<b>CASO 13:4 Pernos ancladores sujetos.</b>					

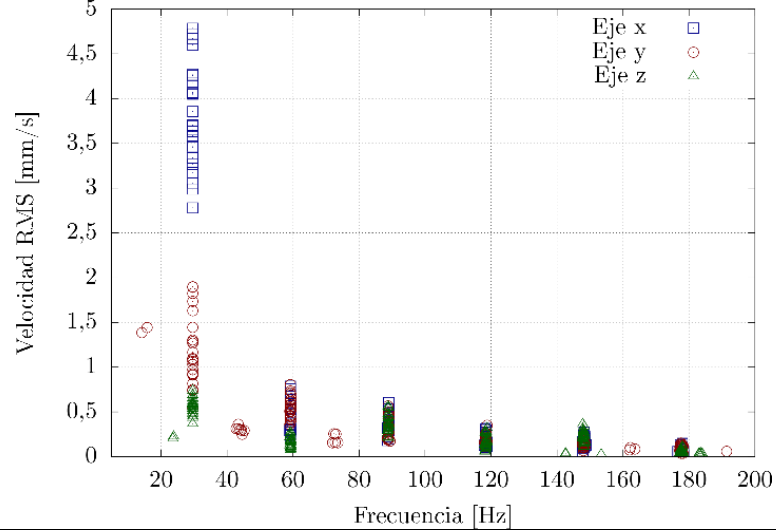
CASO 14:4 Pernos ancladores sueltos.



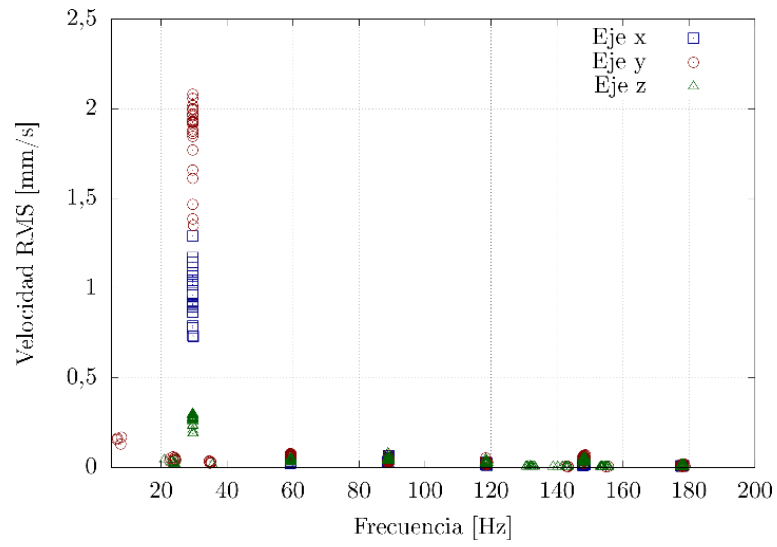
CASO 15:4 Goma con pernos de anclaje sujetos.



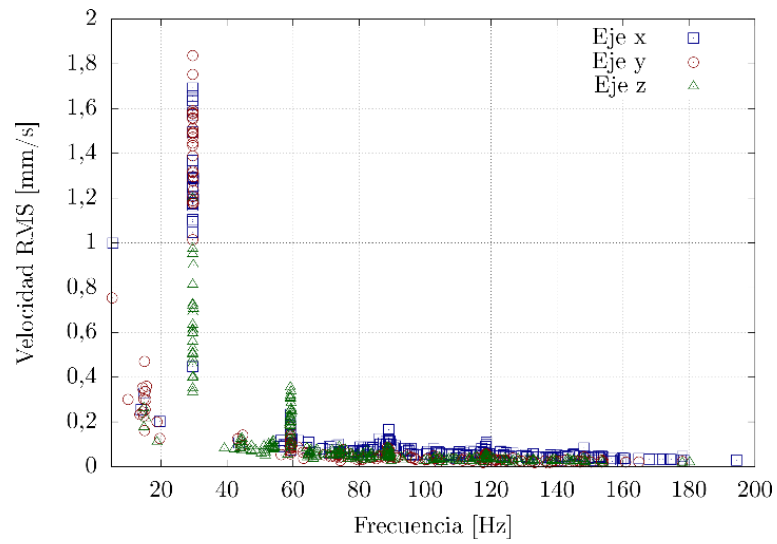
CASO 16:4 Goma con pernos de anclaje sueltos.



CASO 17:4 Resorte con pernos de anclaje sujetos.



CASO 18:4 Resorte con pernos de anclaje sueltos.



Fuente: El Autor

### INTERPRETACIÓN DE LA TABLA 30.

Los espectros proyectados en la tabla anterior muestran las mediciones con masas excéntricas pequeñas con  $h=2\text{mm}$ .

Tabla 31: Armónicos predominantes con masas excéntricas pequeñas con  $h=2\text{mm}$ .

Casos	Armónico X				Armónico Y				Armónico Z			
	1 armónico		2 armónico		1 armónico		2 armónico		1 armónico		2 armónico	
	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s) RMS	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s) RMS	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s) RMS	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s) RMS	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s) RMS	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s) RMS
13:4	29.6	0.804	59.2	0.071	29.6	1.073	59.2	0.050	29.6	0.89	88.8	0.015
14:4	1.6	6.385	59.2	0.198	2.2	4.764	46.4	0.187	29.6	1.604	59.2	0.526
15:4	29.6	0.53	89.0	0.027	29.6	3.594	89.0	0.051	29.6	0.514	89.0	0.051
16:4	29.6	4.598	59.4	0.531	29.6	1.895	59.4	0.647	88.0	0.478	89.0	0.380
17:4	29.6	1.143	89.2	0.048	29.6	1.926	148.2	0.076	29.6	0.281	148.2	0.044
18:4	29.6	1.634	86.2	0.125	29.6	1.837	64.2	0.064	29.6	1.198	59.2	0.304

Fuente: El Autor

Con las características del motor, según el criterio de severidad de la norma ISO 2372, tabla 3 se distingue al motor en la clase I de máquinas rotatorias. Masas excéntricas pequeñas con  $h=2\text{mm}$  en la cual el armónico que predomina en el sistema es el “Armónico X”. La velocidad del caso 13:4, está en un rango de 0.71 a 1.12 mm/seg, del criterio de severidad donde se observa que es valor satisfactorio. Las velocidades en los casos 14:4, 16:4, están en un rango de 4.5 a 7.1 mm/seg, donde se observa que son valores inaceptables. El resto de casos están en un rango de 1.8, 2.8 mm/seg, donde se observa que son valores insatisfactorios.



### 3.4.5. POSICIONAMIENTO DE LA PARTÍCULA EN EL ESPACIO.

Dado el comportamiento del motor mostrado en el análisis de vibraciones se proyectó en modo ilustrativo la posición en el espacio por cada prueba realizada. El análisis se realizó en un tiempo de 4.98seg, propuesto por autor. Se construye la posición integrando dos veces la aceleración, se filtran los 10 primeros armónicos para eliminar movimientos macroscópicos del motor que no se corresponden con la vibración a estudiar.

- Posición de las pruebas realizadas en la tabla 16.

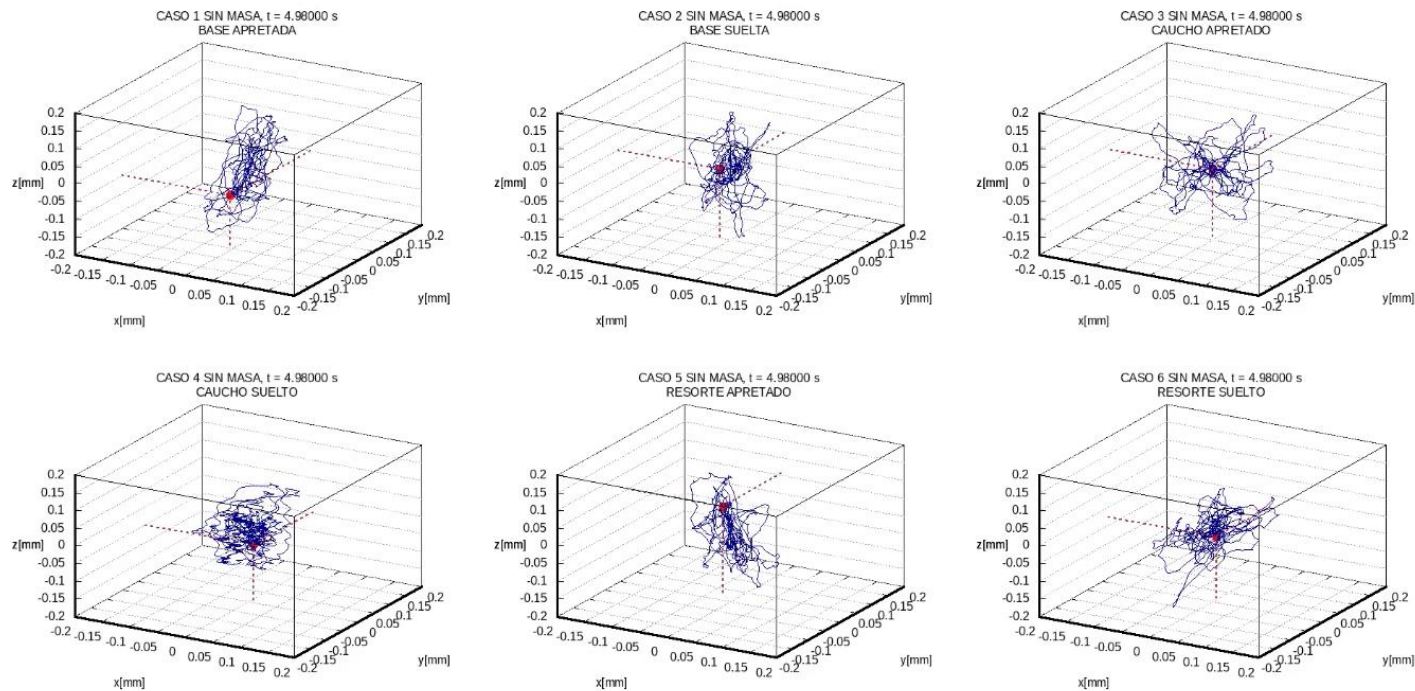


Figura 3. 27: Mosaico 1 de las posiciones de los casos en condiciones normales.

Fuente: El Autor

- Posición de las pruebas realizadas en la tabla 18.

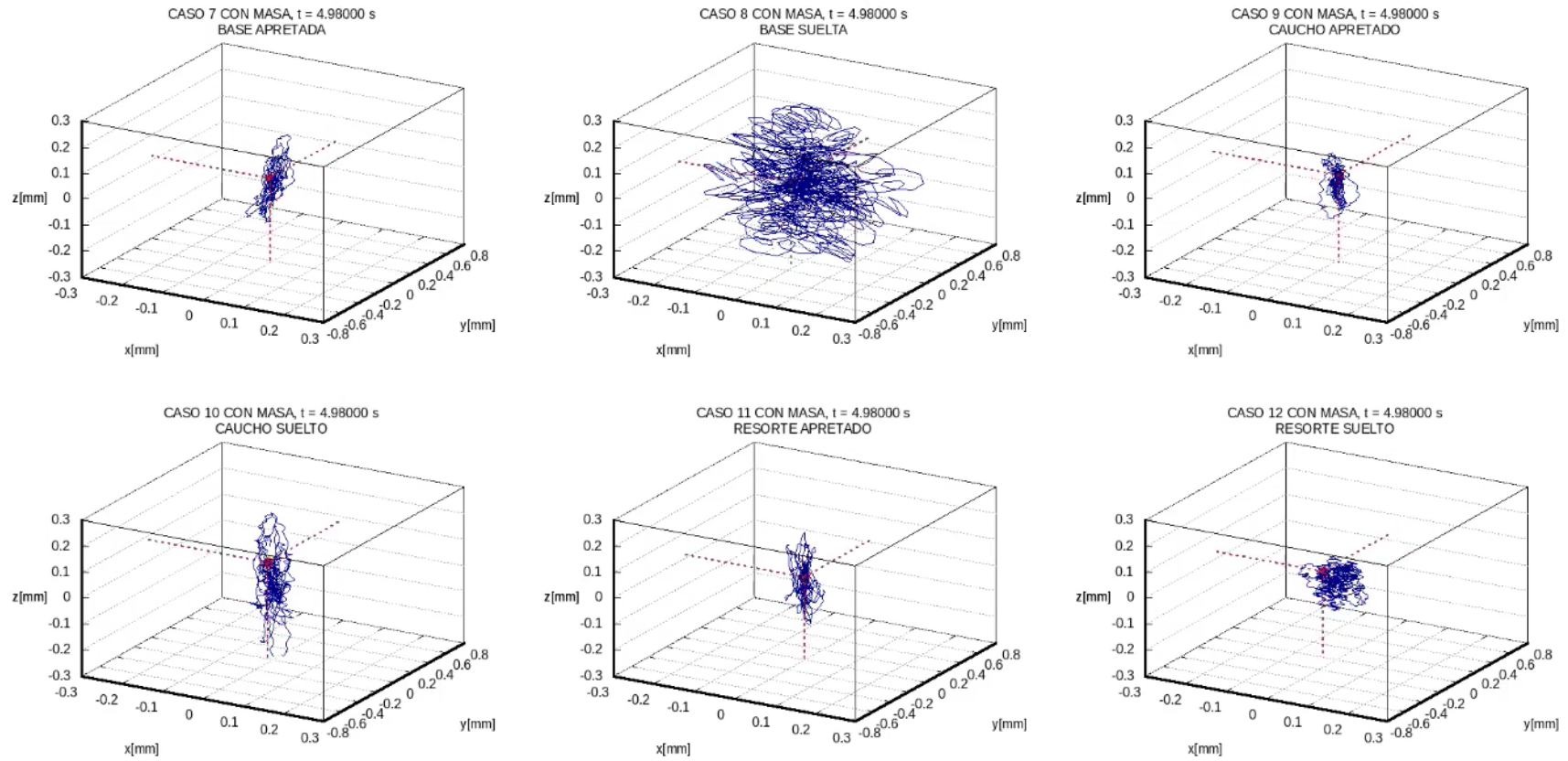


Figura 3. 28: Mosaico 2, posición de pruebas realizadas en la tabla 18.

Fuente: El Autor

- Posición de las pruebas realizadas en la tabla 20.

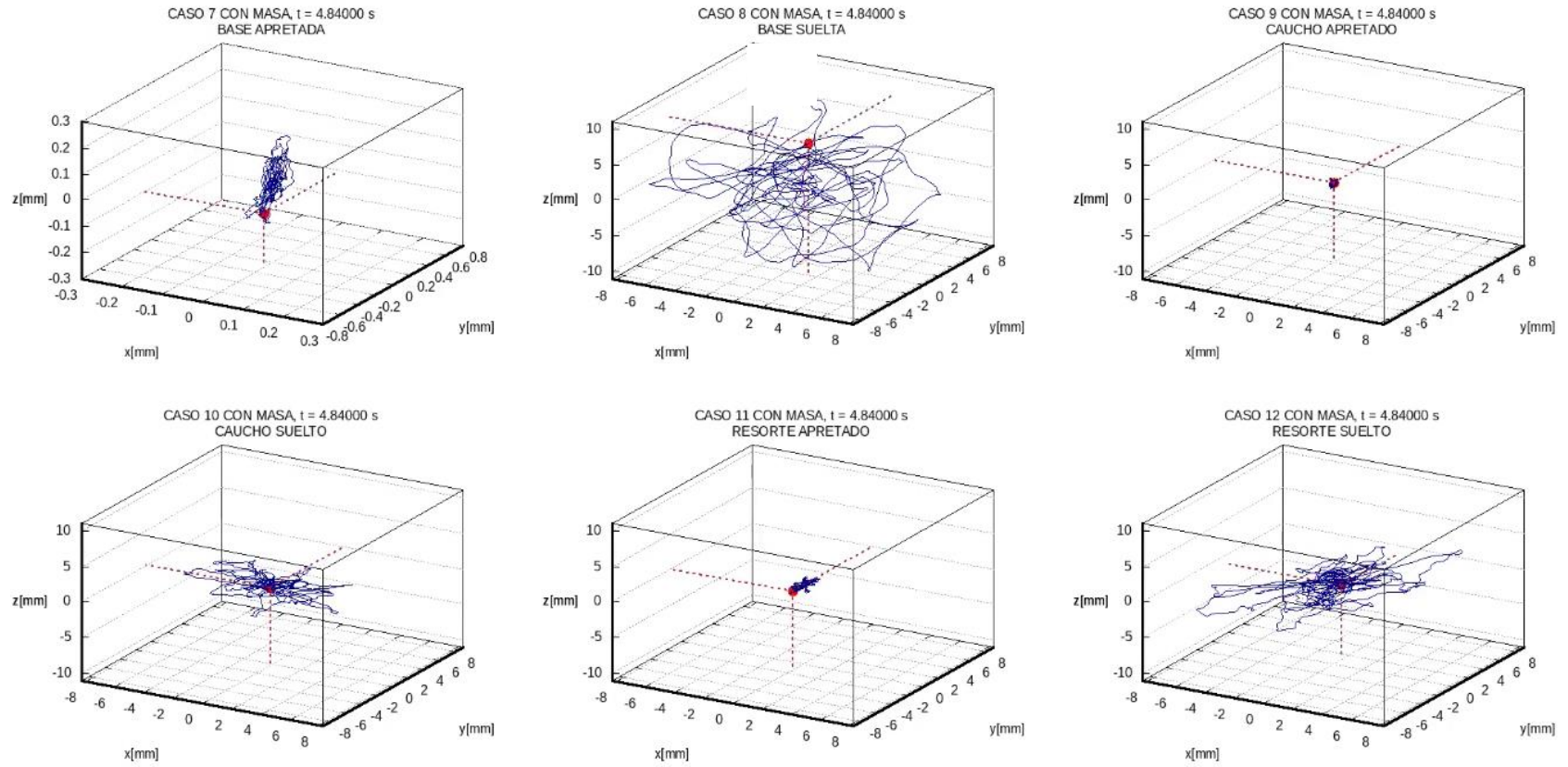


Figura 3. 29: Mosaico 3, posición de pruebas realizadas en la tabla 20.

Fuente: El Autor

- Posición de las pruebas realizadas en la tabla 22.

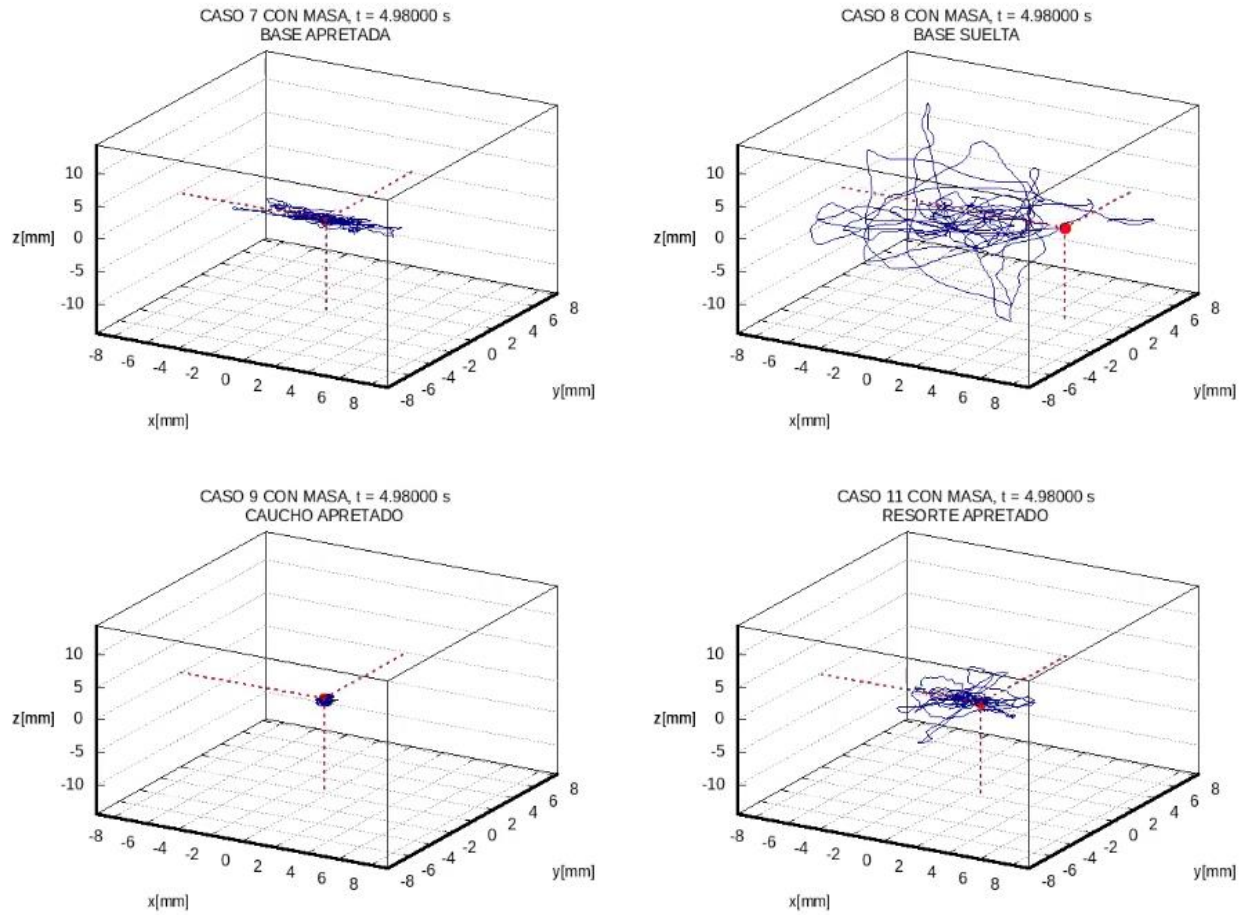


Figura 3. 30: Mosaico 4, posición de pruebas realizadas en la tabla 22.

Fuente: El Autor



- Posición de las pruebas realizadas en la tabla 24.

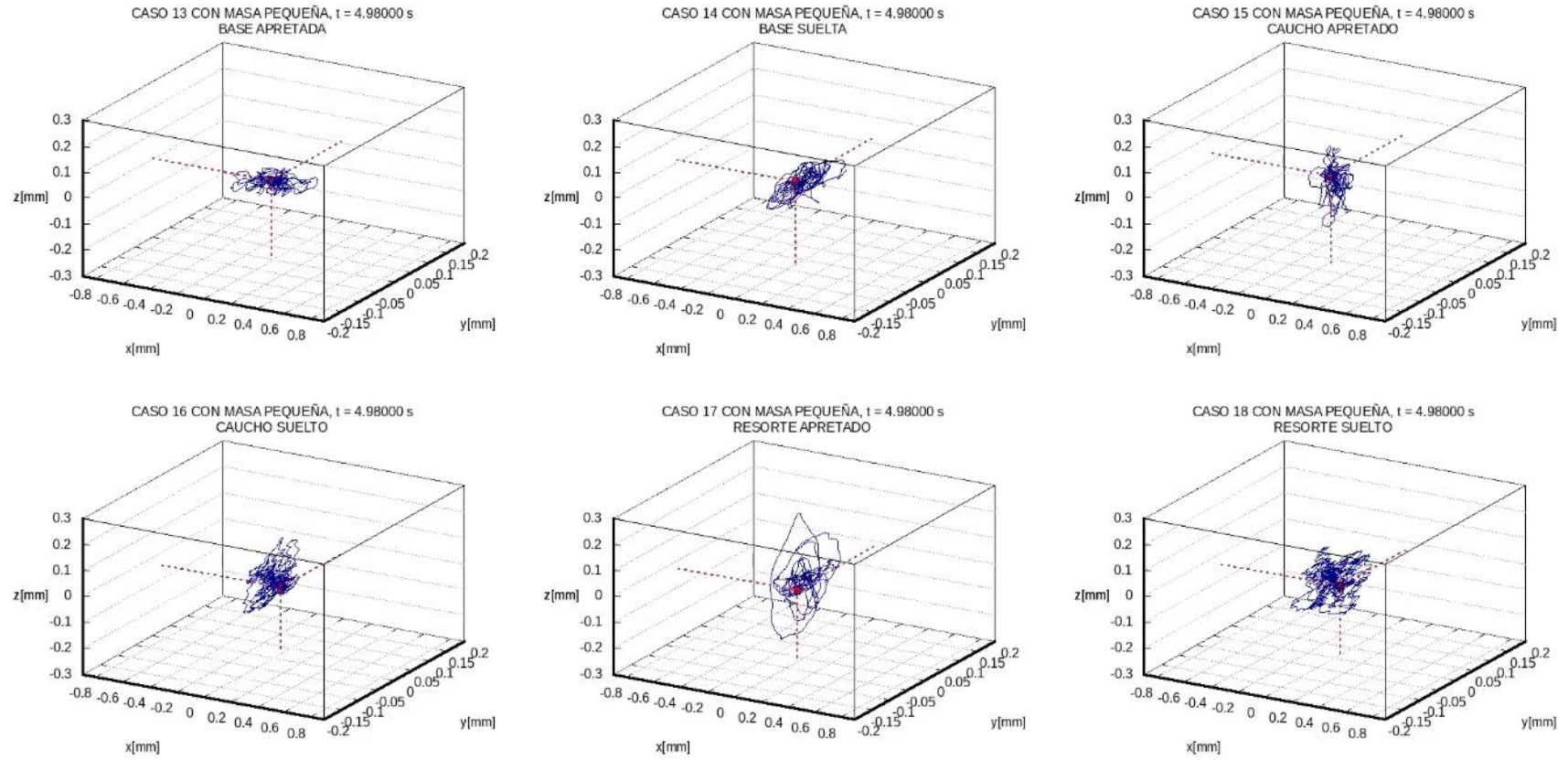


Figura 3. 31: Mosaico 5, posición de pruebas realizadas en la tabla 24.

Fuente: El Autor

- Posición de las pruebas realizadas en la tabla 26.

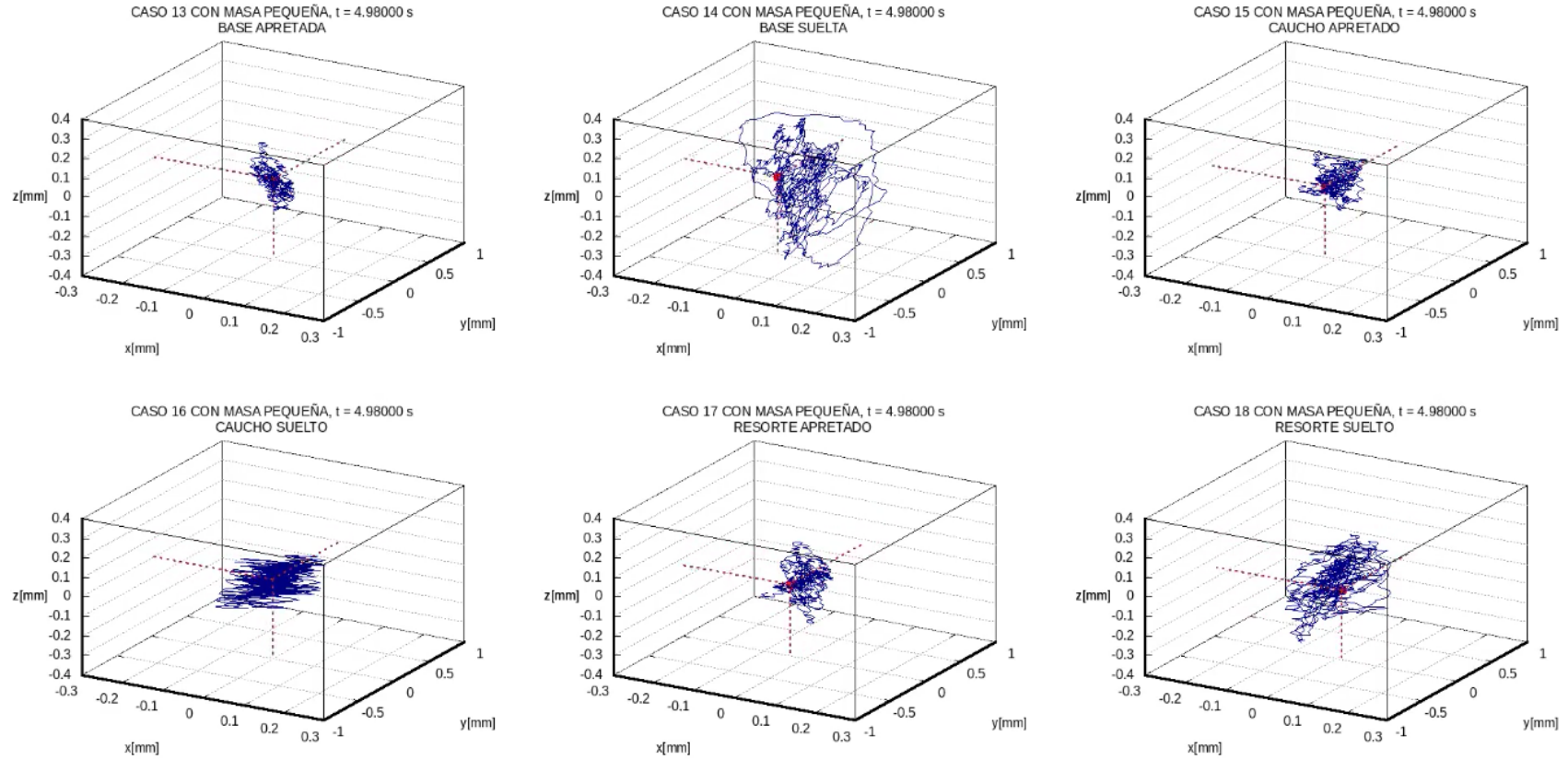


Figura 3. 32: Mosaico 6, posición de pruebas realizadas en la tabla 26.

Fuente: El Autor

- Posición de las pruebas realizadas en la tabla 28.

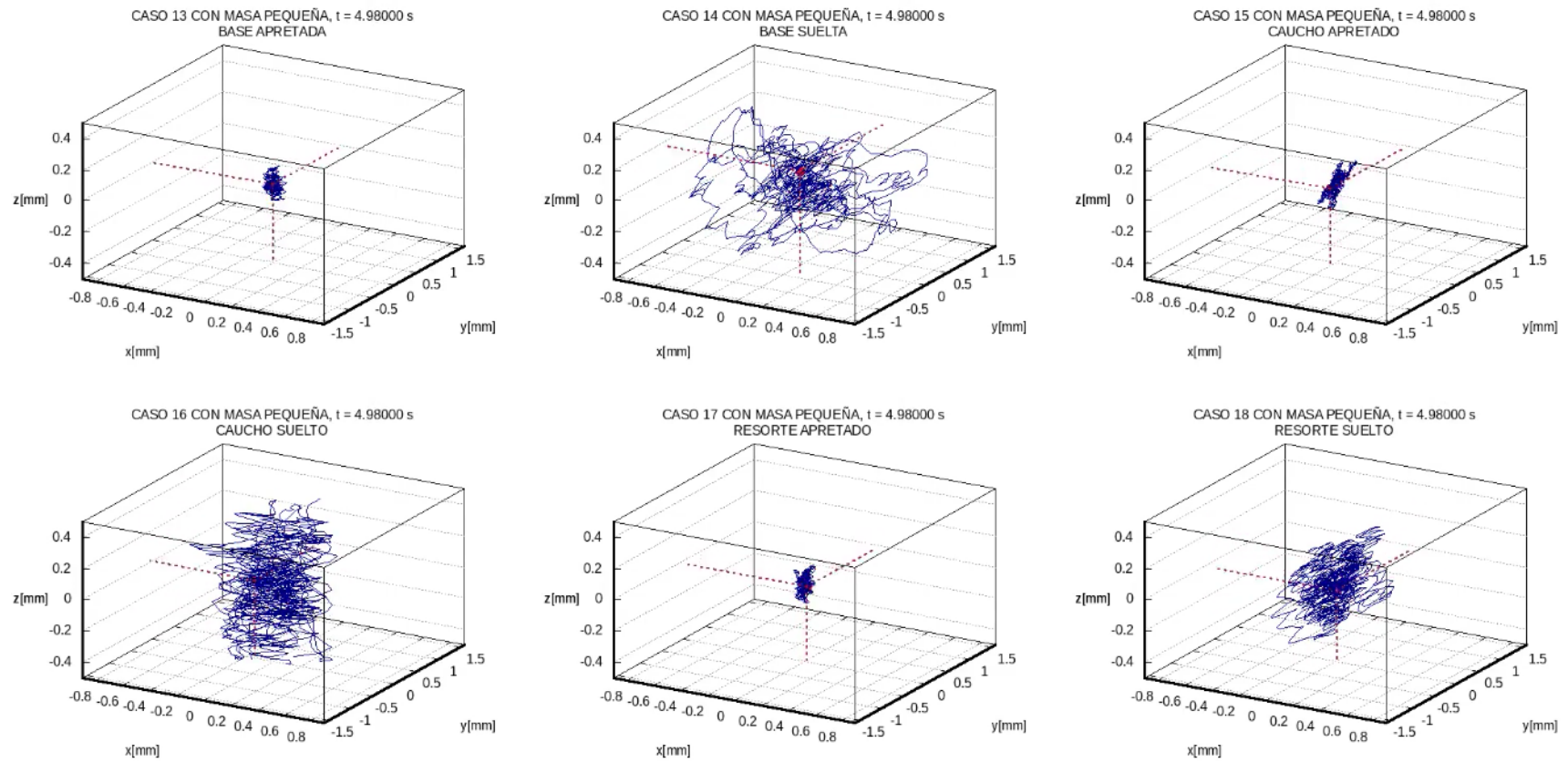


Figura 3. 33: Mosaico 7, posición de pruebas realizadas en la tabla 28.

Fuente: El Autor

- Posición de las pruebas realizadas en la tabla 30.

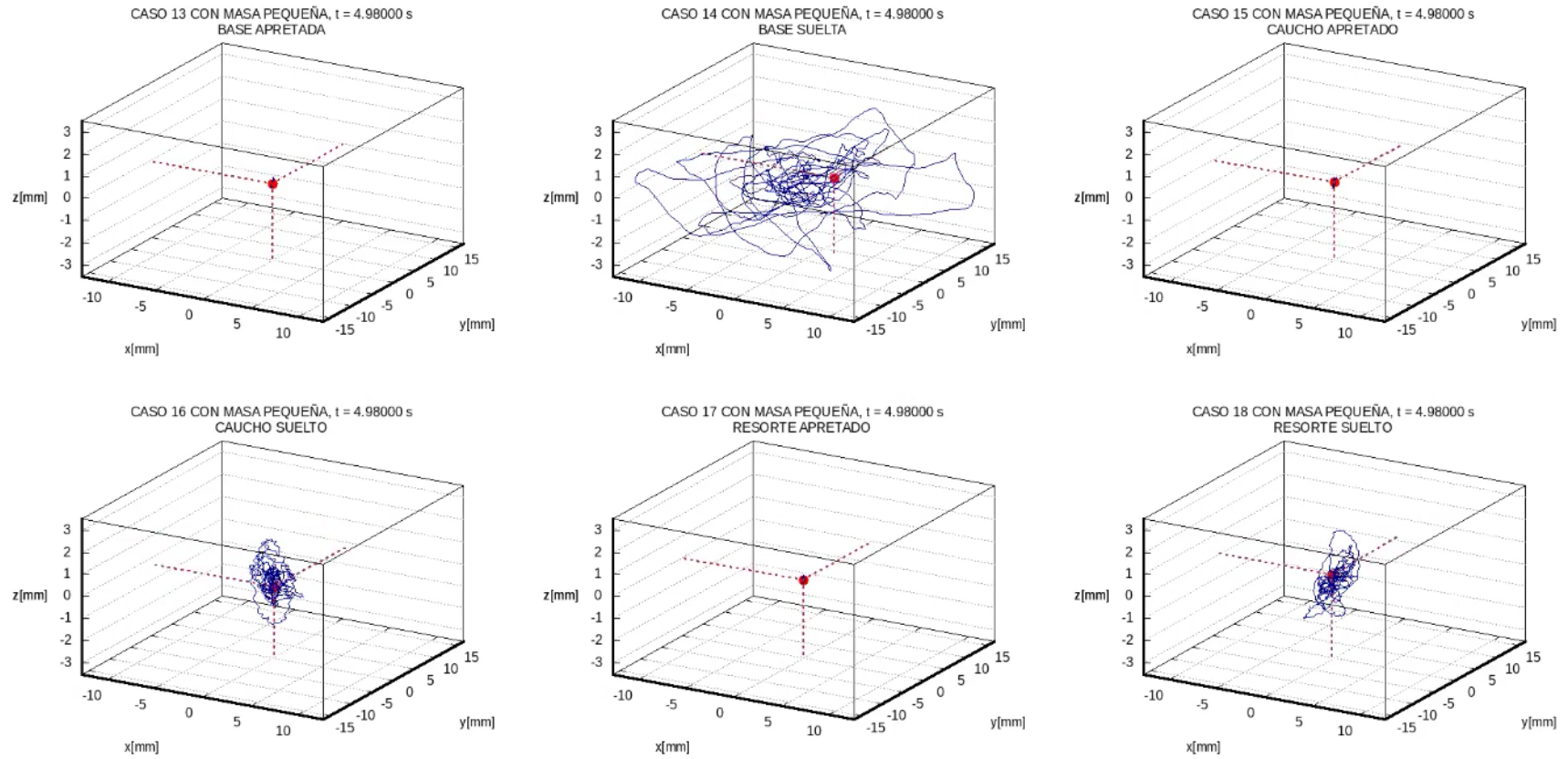


Figura 3. 34: Mosaico 8, posición de pruebas realizadas en la tabla 30.

Fuente: El Autor



Las gráficas de posición son una medida cualitativa de la vibración dado que la norma es establecer rango de aceptación en función de velocidades. No obstante, dichas gráficas están asociadas a la velocidad debido a que cuanto mayor es esta, mayor es el desplazamiento.

### 3.4.6. RESULTADOS EXPERIMENTALES

El objeto de este análisis consiste en verificar cual anclaje llega a absorber las vibraciones del motor realizando pruebas en condiciones normales y en condiciones críticas con varios niveles de excentricidades además colocando masas con variedad de tamaño y volumen.

Las gráficas a continuación muestran como la variedad de anclajes acoplados al motor influyen en la absorción de la vibración.

Las proyecciones de los datos medidos serán interpretadas en los 3 ejes (X, Y, Z), considerando armónicos críticos para mayor apreciación y facilidad de análisis.

- **Datos tabla 16**

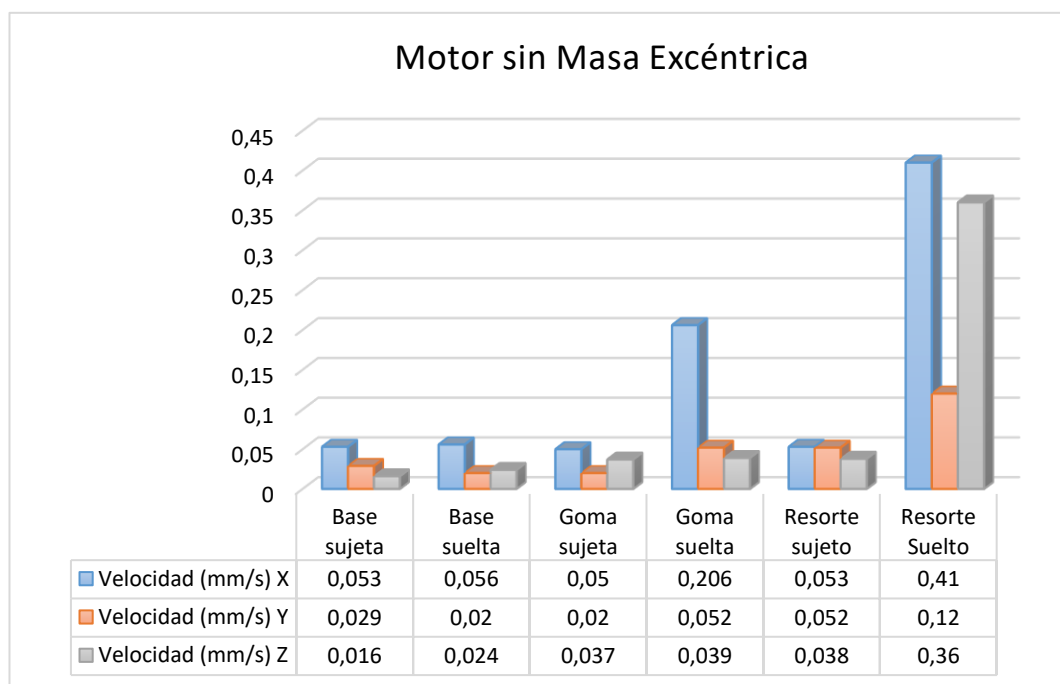


Figura 3. 35: Cuadro comparativo de distintos tipos de bases en condiciones normales de operación.

Fuente: El Autor

- **Datos tabla 18**

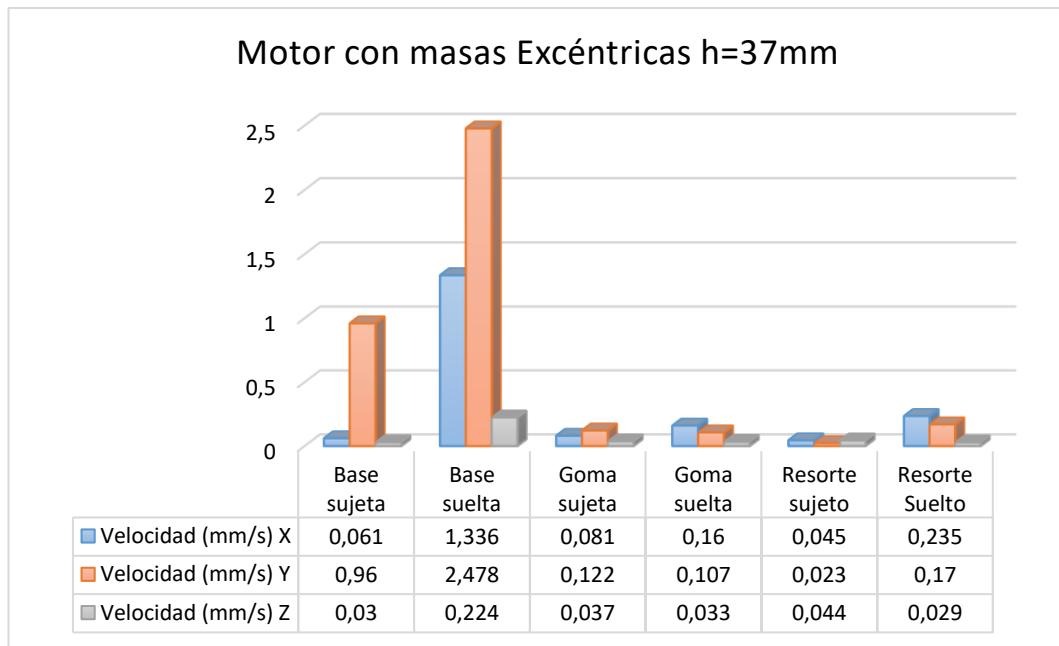


Figura 3. 36: Cuadro comparativo de distintos tipos de bases con masas excéntricas grandes h=37mm.

Fuente: El Autor

- **Datos tabla 20**

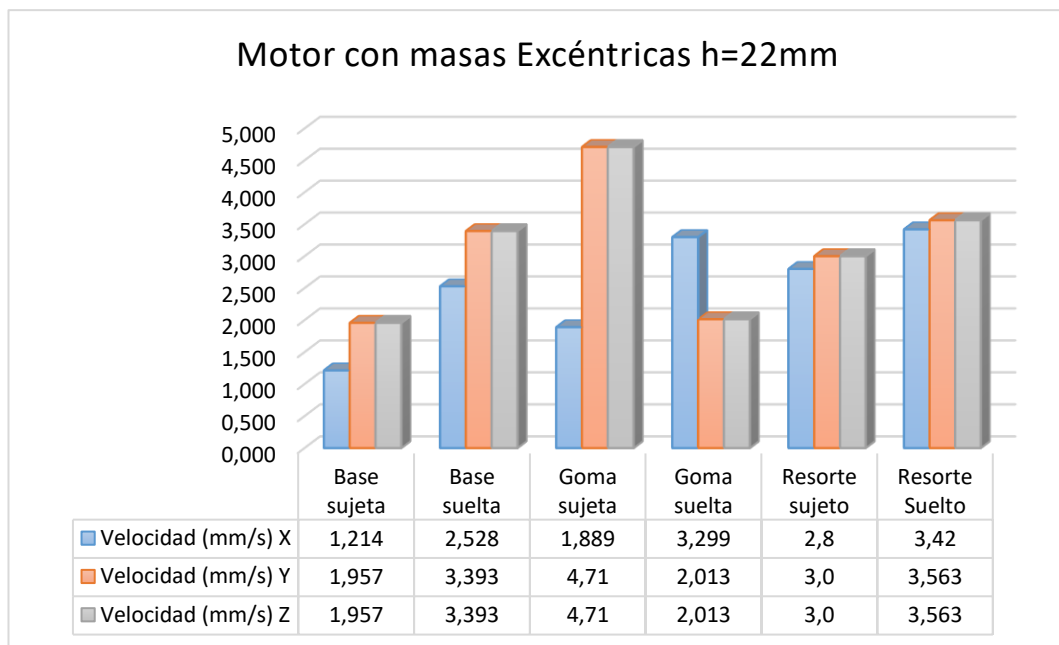


Figura 3. 37: Cuadro comparativo de distintos tipos de bases con masas excéntricas grandes h=22mm.

Fuente: El Autor

- **Datos tabla 22**

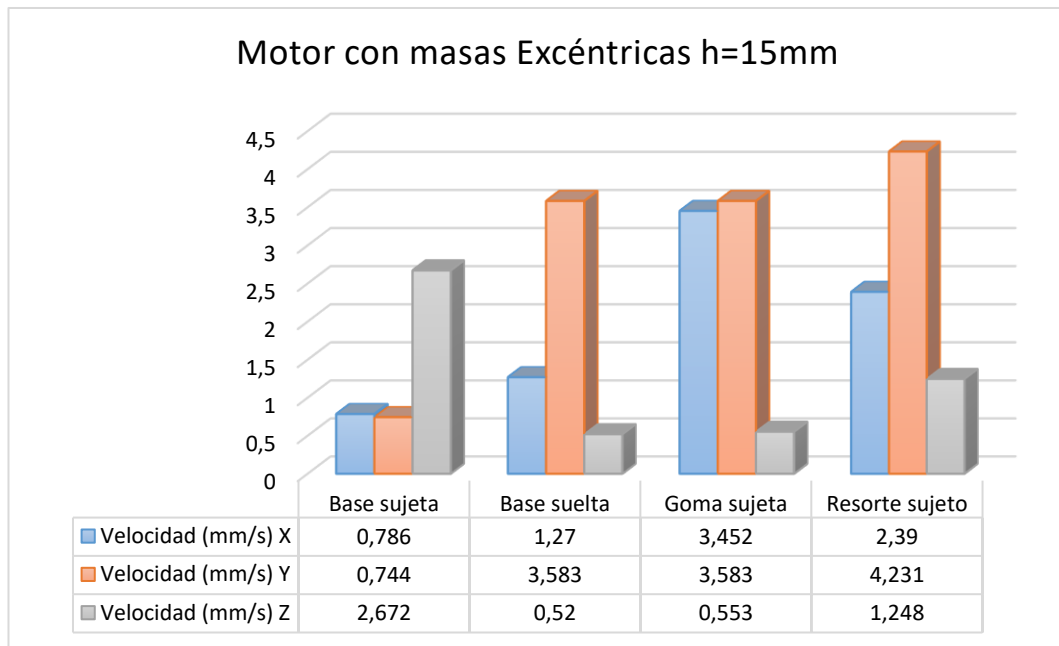


Figura 3. 38: Cuadro comparativo de distintos tipos de bases con masas excéntricas grandes h=15mm.

Fuente: El Autor

- **Datos tabla 24.**

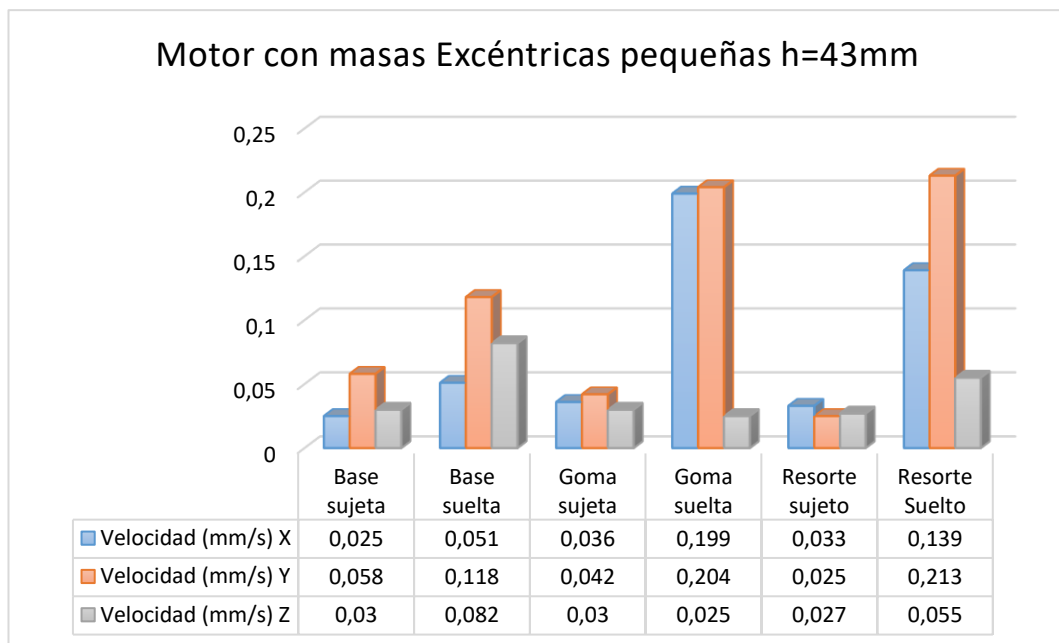


Figura 3. 39: Cuadro comparativo de distintos tipos de bases con masas excéntricas pequeñas h=43mm.

Fuente: El Autor

- **Datos tabla 26.**

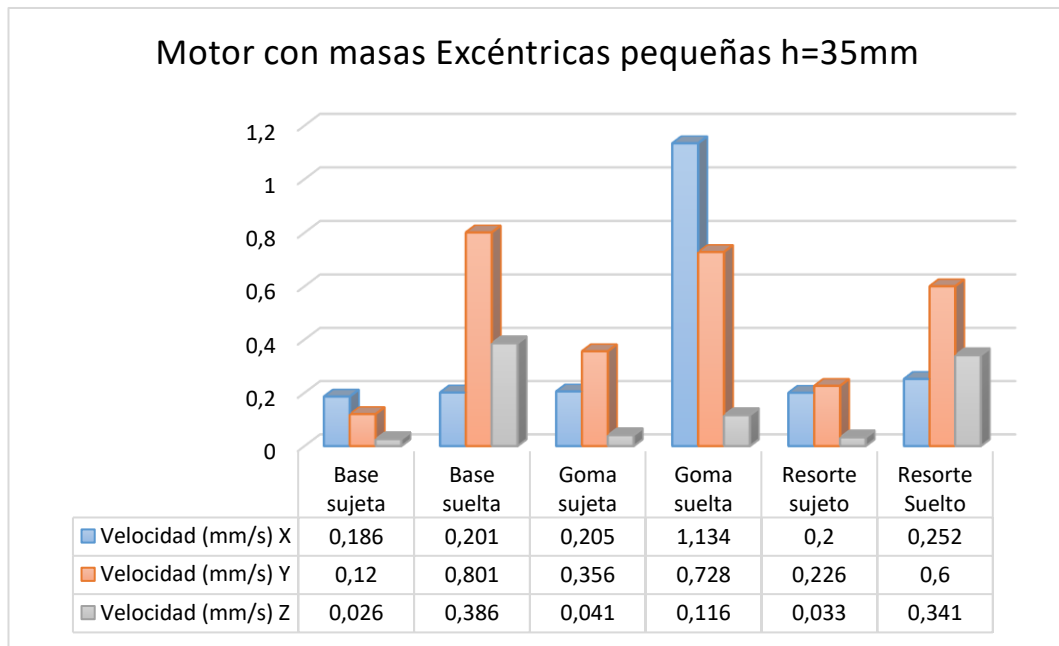


Figura 3. 40: Cuadro comparativo de distintos tipos de bases con masas excéntricas pequeñas h=35mm.

Fuente: El Autor

- **Datos tabla 28.**

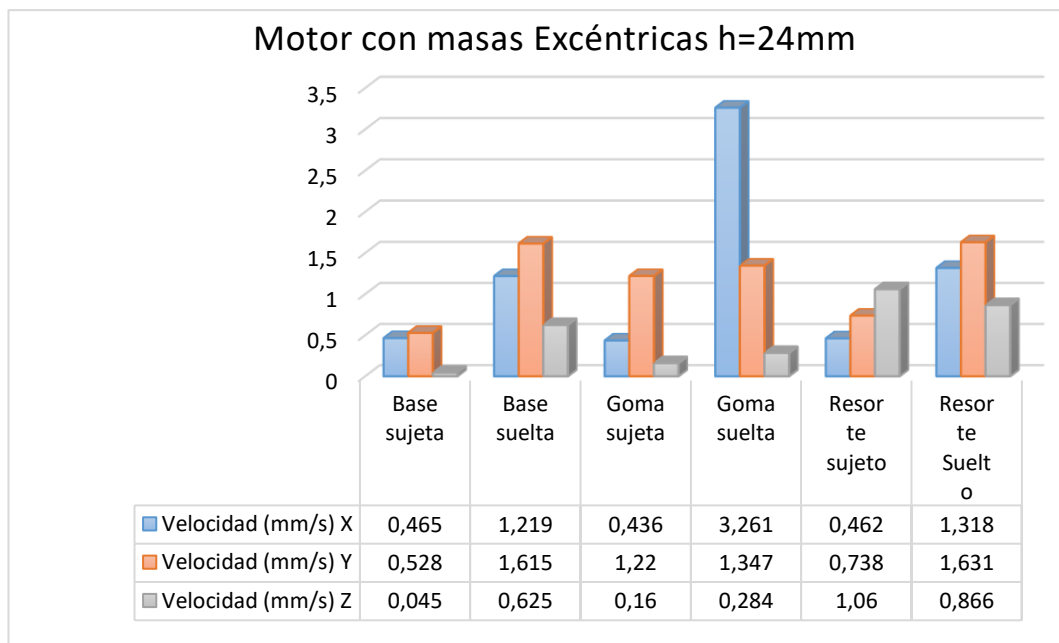


Figura 3. 41: Cuadro comparativo de distintos tipos de bases con masas excéntricas pequeñas h=24mm.

Fuente: El Autor

- **Datos tabla 30.**

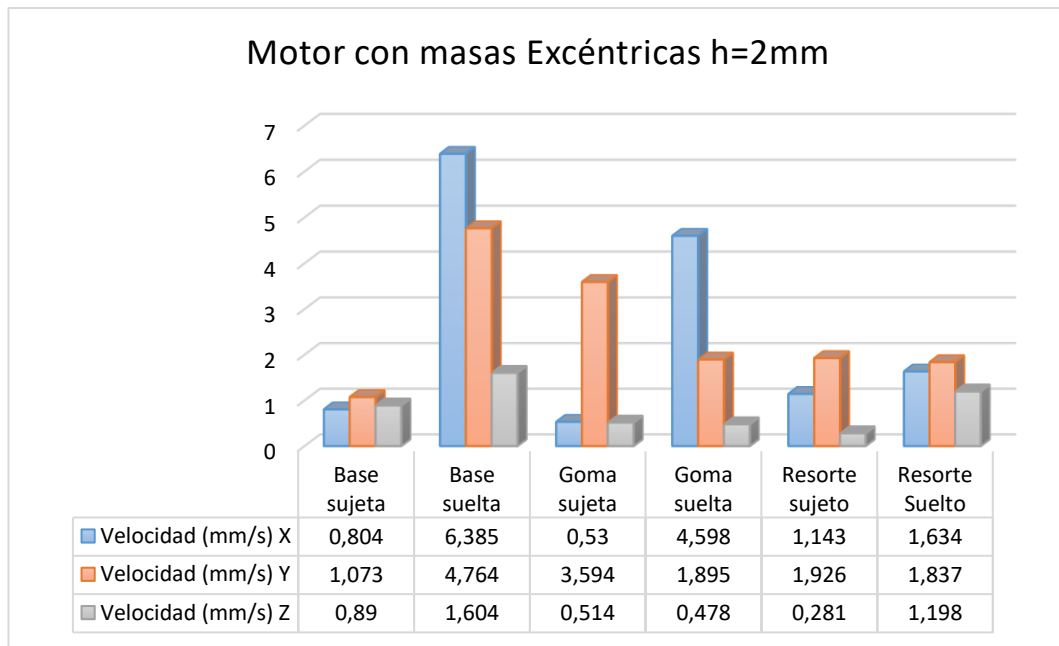


Figura 3. 42: Cuadro comparativo de distintos tipos de bases con masas excéntricas pequeñas h=2mm.

Fuente: El Autor

Las pruebas realizadas al motor en condiciones normales, los anclajes que ayudan atenuar las vibraciones en los ejes X, Y, Z en este caso son de goma sujeta y resorte sujeto. En el caso del motor que trabaja con masas grandes y todas las excentricidades que se aplicaron, indica que en la vibración en el eje X los mejores anclajes son la base metálica apretada y la base de resorte ajustada que atenúa la vibración en esta dirección; en comparación con el eje Y donde el anclaje ajustado notablemente reduce la vibración. En el eje Z el anclaje de goma reduce la vibración y evita los brincos que las excentricidades le provocan en la máquina.

En las pruebas aplicadas al motor con masas excéntricas pequeñas, muestran que la base de goma en la dirección del eje X atenúa las vibraciones mucho mejor que el resto de anclajes, mientras que para la vibración que se genera en la dirección del eje Y, es el anclaje apretado, en el eje Z, el anclaje de goma reduce mejor la vibración y previene los golpes en esta dirección, en todos los niveles de excentricidades que se realizaron la pruebas.

### **3.5. COMPARACIÓN DE MODELO MATEMÁTICO Y EXPERIMENTAL.**

#### **3.5.1. COMPARACIÓN GRÁFICA DE DATOS EXPERIMENTALES Y TEÓRICOS.**

Con el sistema de ecuaciones desarrolladas anteriormente mediante un modelo matemático que fue resuelto en programación C++, y considerando las variables y constantes correspondientes, se obtuvo datos como velocidades, posiciones en función del tiempo, y además análisis de Fourier de dichos datos.

A continuación se muestran las gráficas velocidad (RMS) vs frecuencia de datos experimentales y teóricos.

Los casos a ser comparados con los datos experimentales que se obtuvieron con el sensor LIS3DH son los siguientes:

- Masas pequeñas sin excentricidades, con bases tipo: Rígido, resorte, goma, suelto.
- Masas pequeñas con excentricidades  $h=24\text{mm}$ , con bases tipo: Rígido, resorte, goma, suelto.
- Masas pequeñas con excentricidades  $h=2\text{mm}$ , con bases tipo: Rígido, resorte, goma, suelto.
- Masas grandes sin excentricidades, con bases tipo: Rígido, resorte, goma, suelto.
- Masas grandes con excentricidades  $h=22\text{mm}$ , con bases tipo: Rígido, resorte, goma, suelto.
- Masas grandes con excentricidades  $h=15\text{mm}$ , con bases tipo: Rígido, resorte, goma, suelto.

Masas pequeñas sin excentricidades, bases tipo: Rígido, resorte, goma, suelto.

- Goma

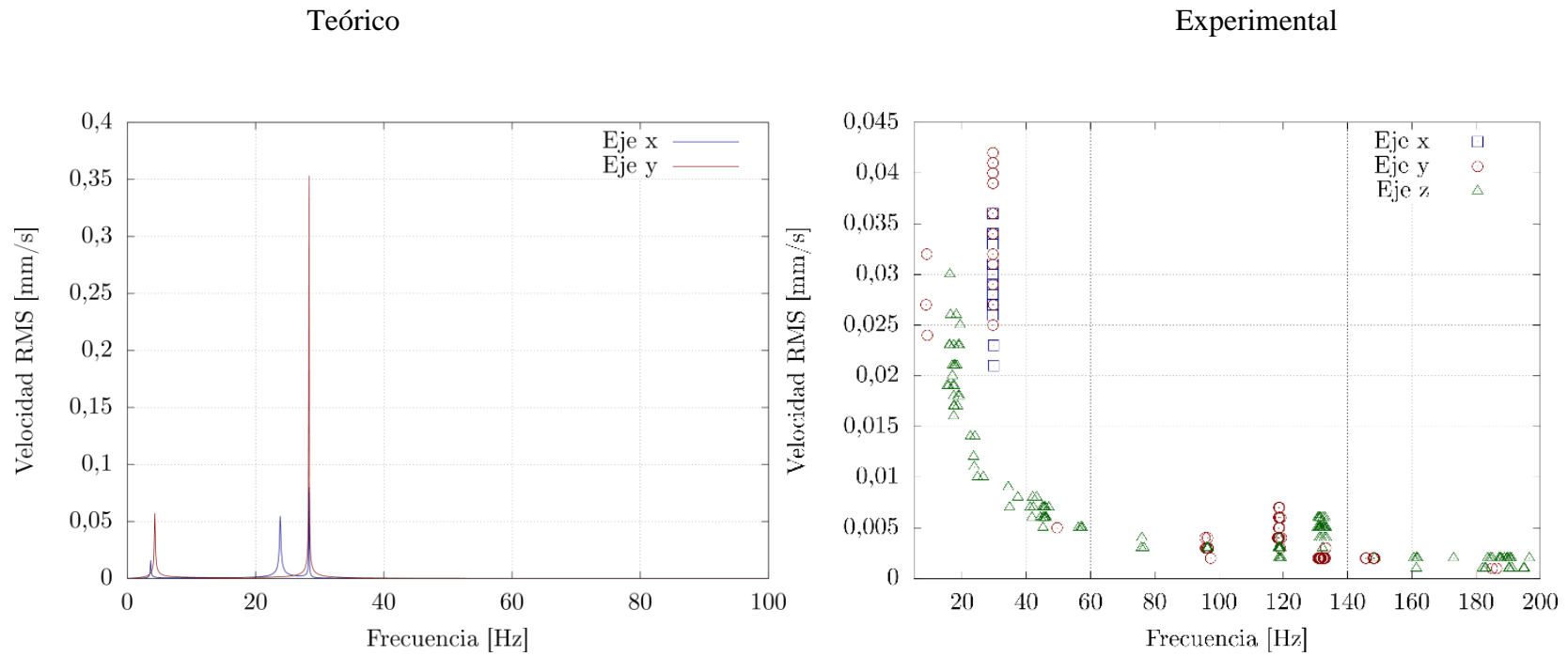
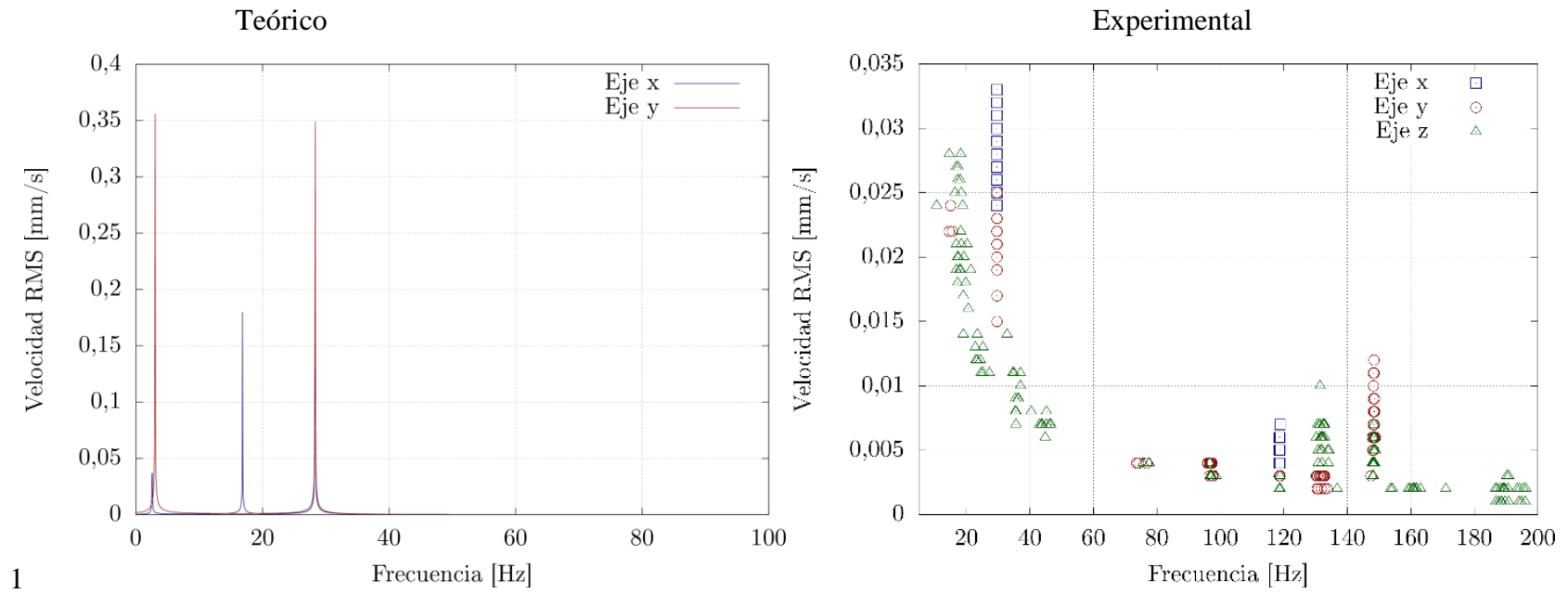


Figura 3. 43: Análisis de Fourier, de anclaje tipo goma

Fuente: El Autor

- Resorte.



1

Resorte con pernos de anclaje sueltos.

Figura 3. 44: Velocidad RMS, base muelle.

Fuente: El Autor



- **Rígido.**

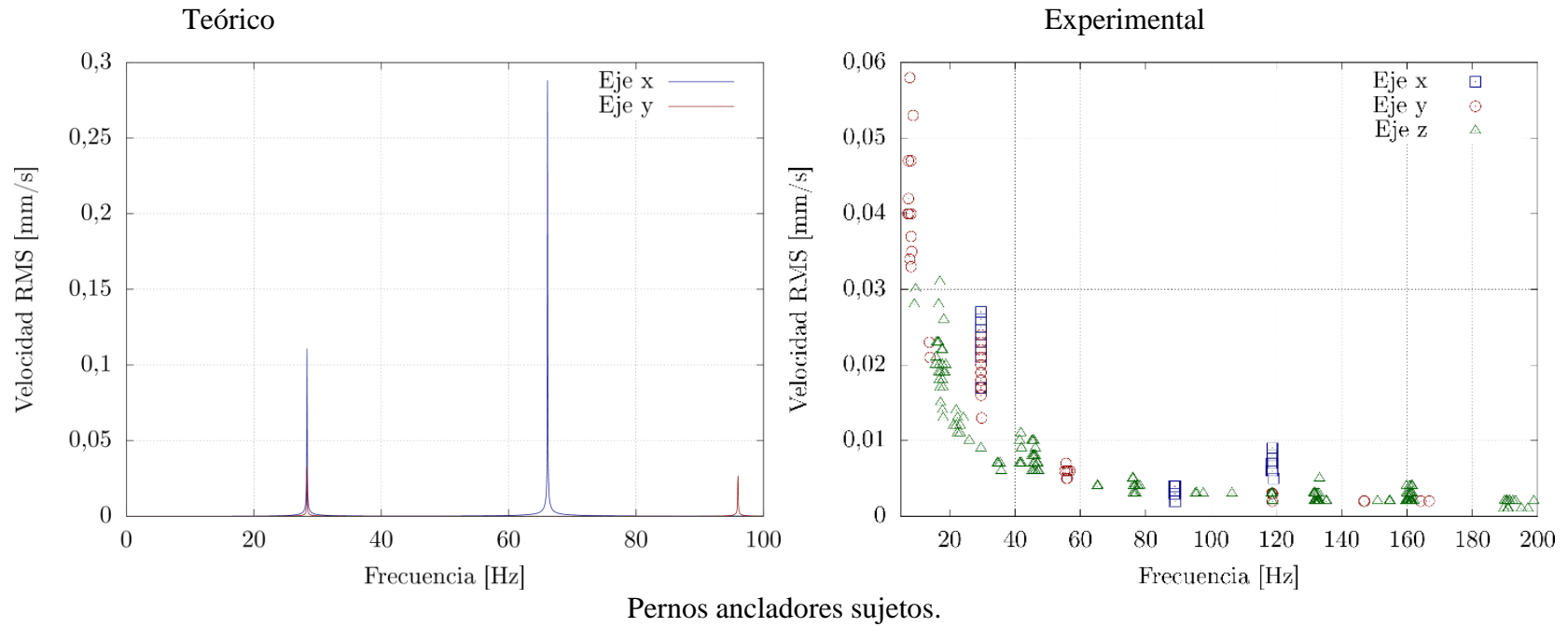
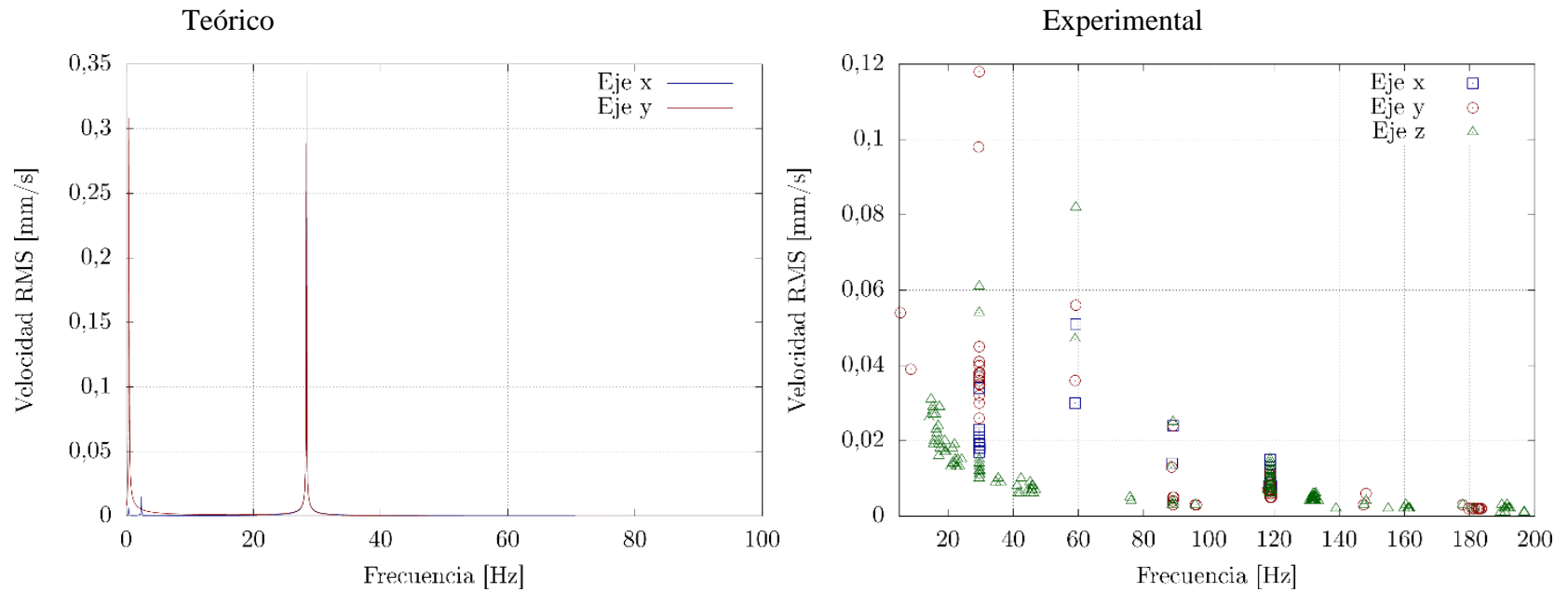


Figura 3. 45: Velocidad RMS, base rígida.

Fuente: El Autor

- Suelto.



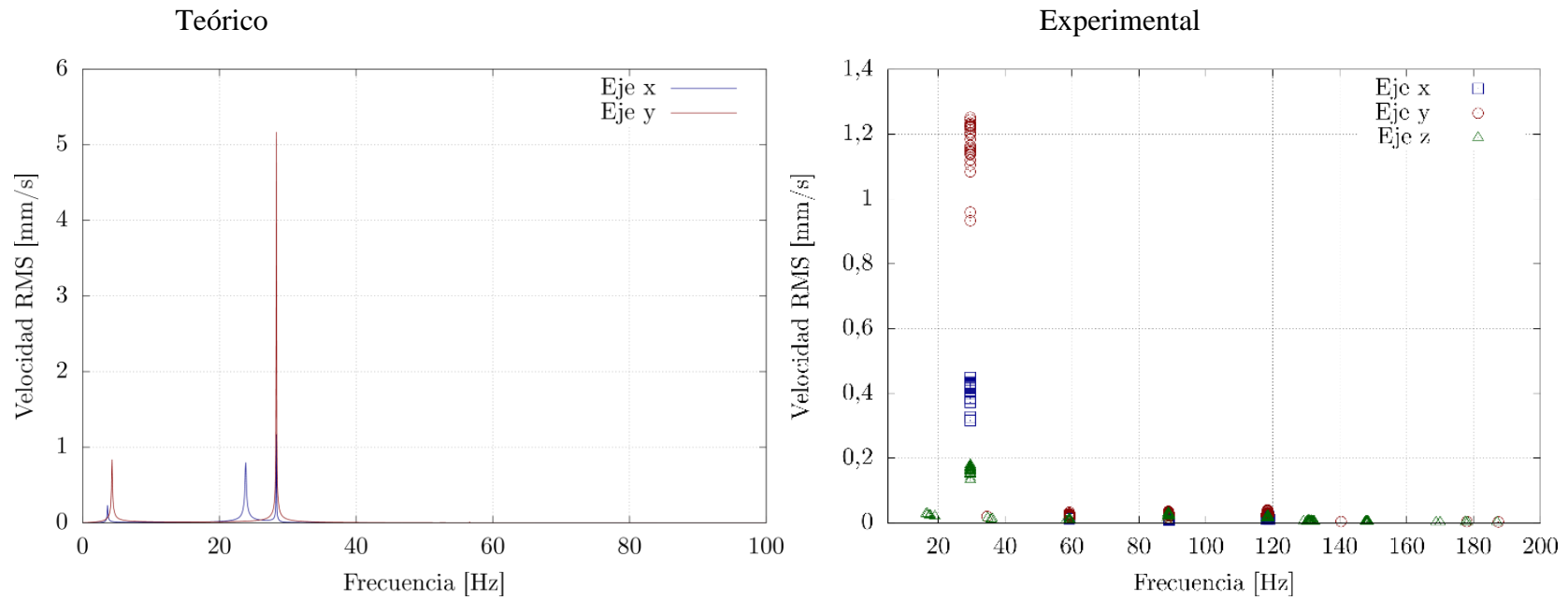
Pernos ancladores sueltos.

Figura 3. 46: Velocidad RMS, base suelta.

Fuente: El Autor

Masas pequeñas con excentricidades  $h=24\text{mm}$ , bases tipo: Rígido, muelle, goma, suelto.

- Goma

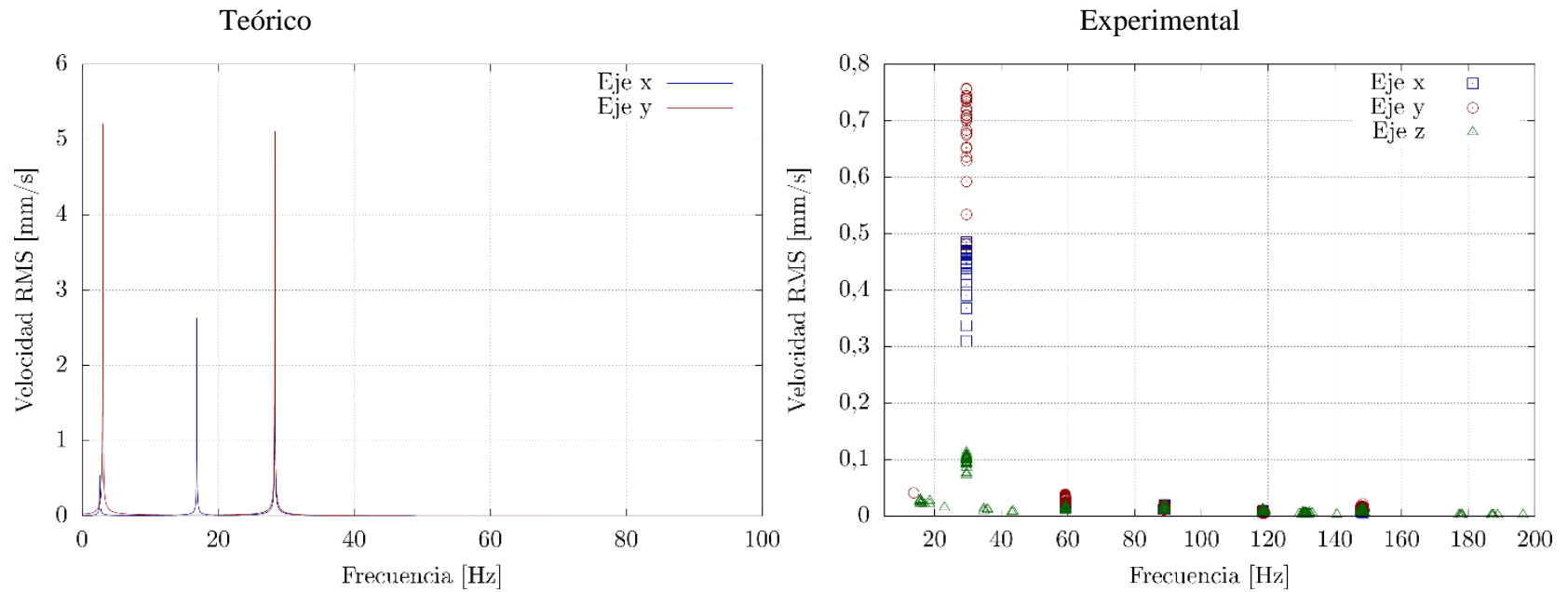


Goma con pernos de anclaje sujetos.

Figura 3. 47: Velocidad RMS, base de goma con  $h=24\text{mm}$ .

Fuente: El Autor

- Resorte



Resorte con pernos de anclaje sujetos.

Figura 3. 48: Velocidad RMS, base muelle con h=24mm.

Fuente: El Autor

- Rígido

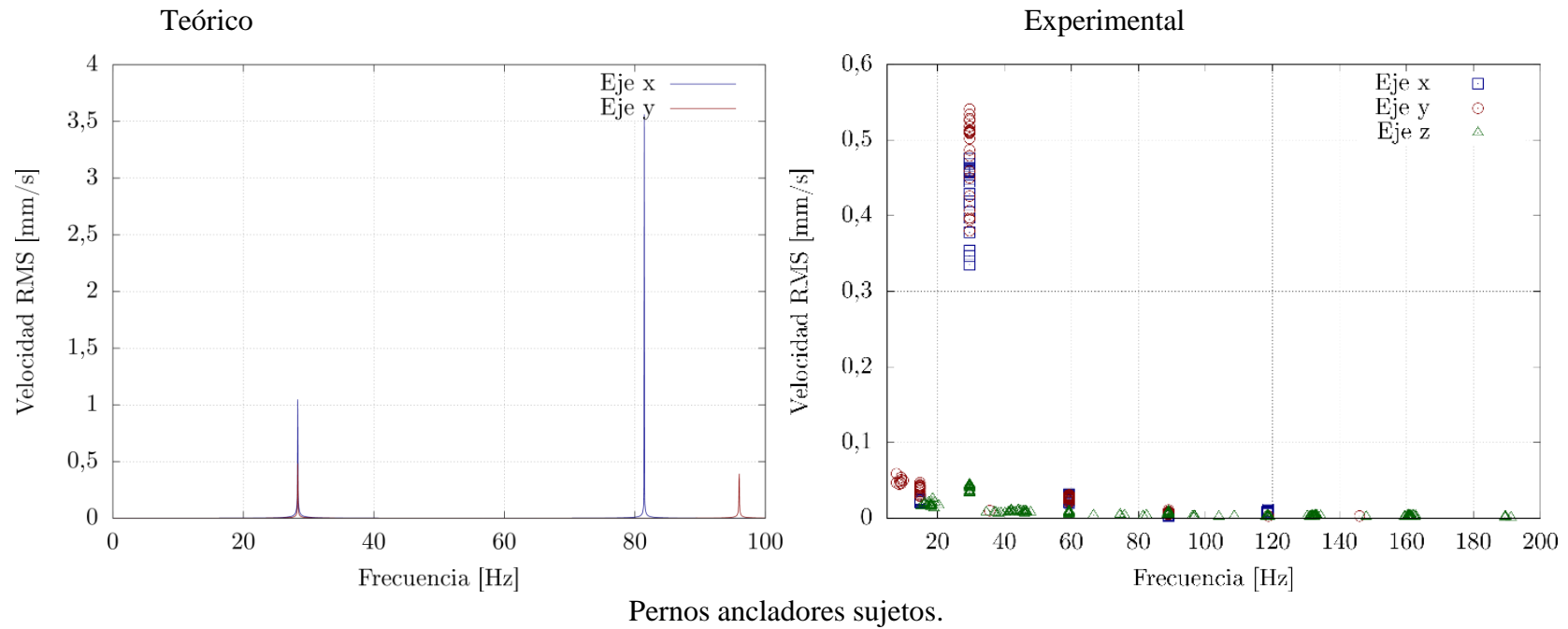
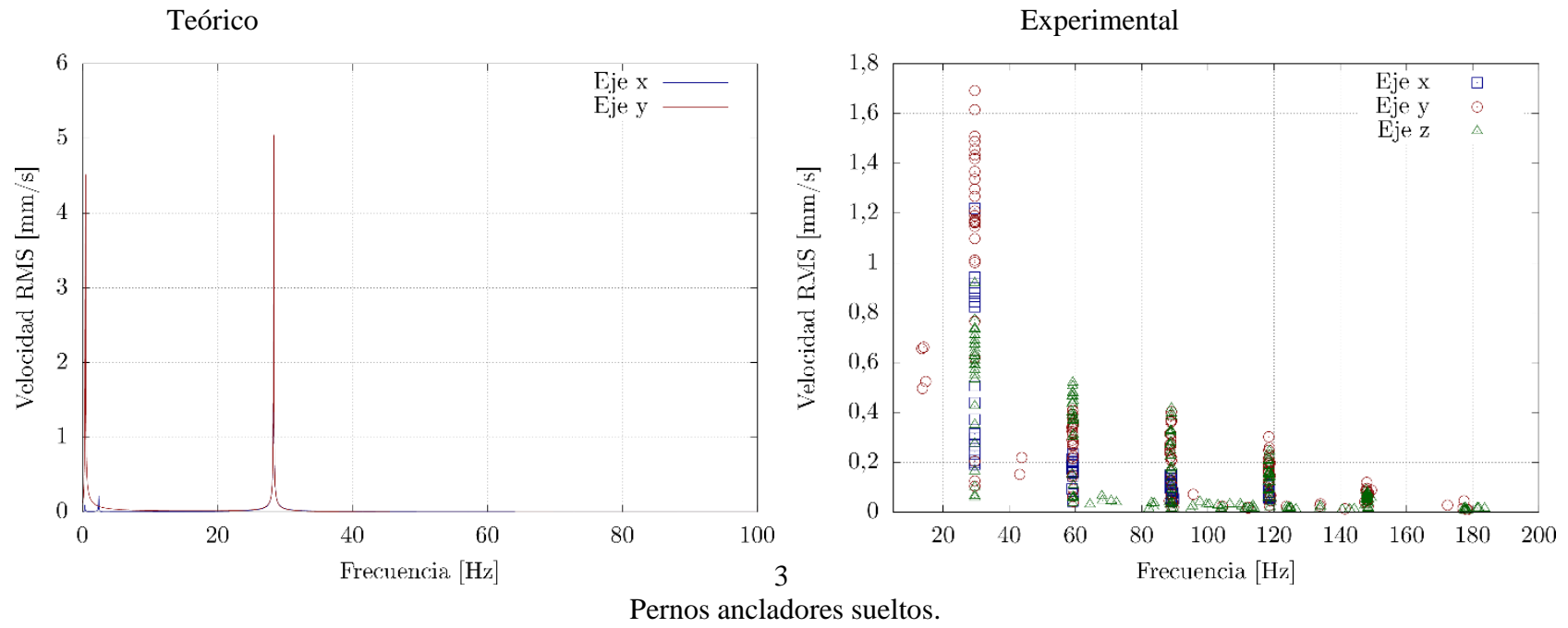


Figura 3. 49: Velocidad RMS, base rígida con h=24mm.

Fuente: El Autor

- Suelto



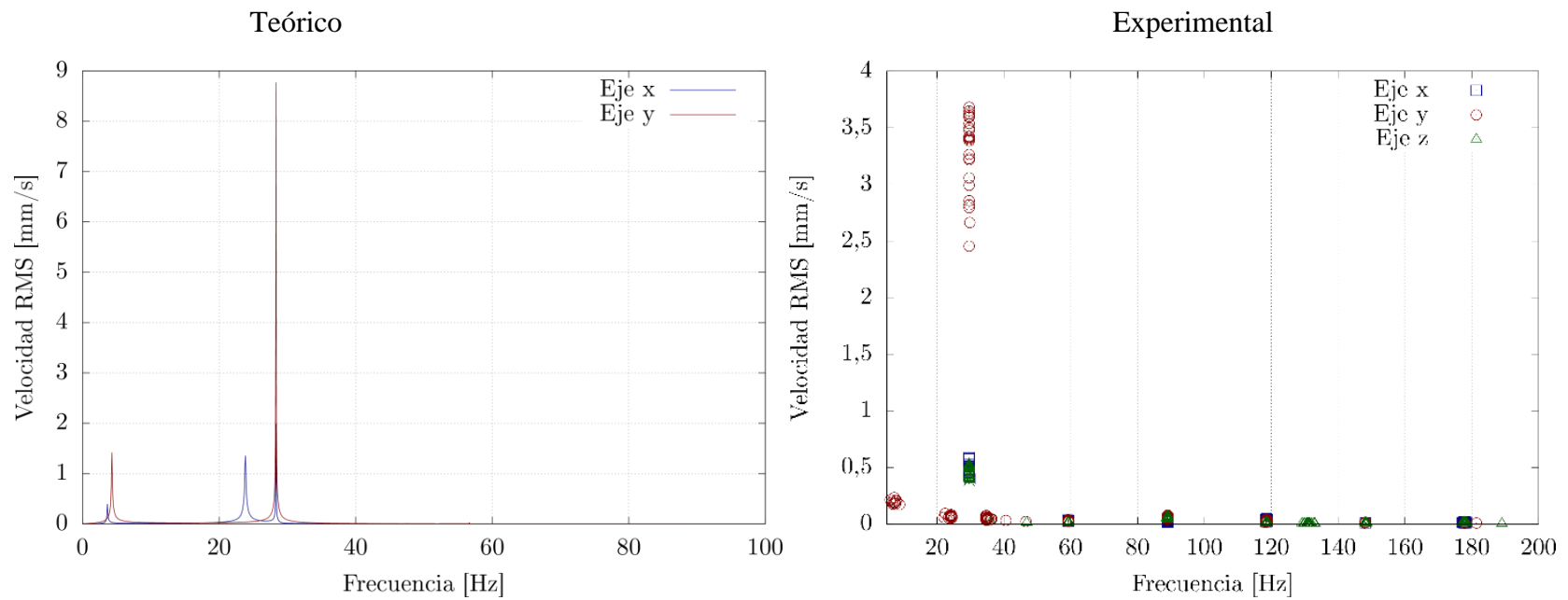
Pernos ancladores sueltos.

Figura 3. 50: Velocidad RMS, base suelta con h=24mm.

Fuente: El Autor

Masas pequeñas con excentricidades  $h=2\text{mm}$ , bases tipo: Rígido, resorte, goma, suelto.

- Goma

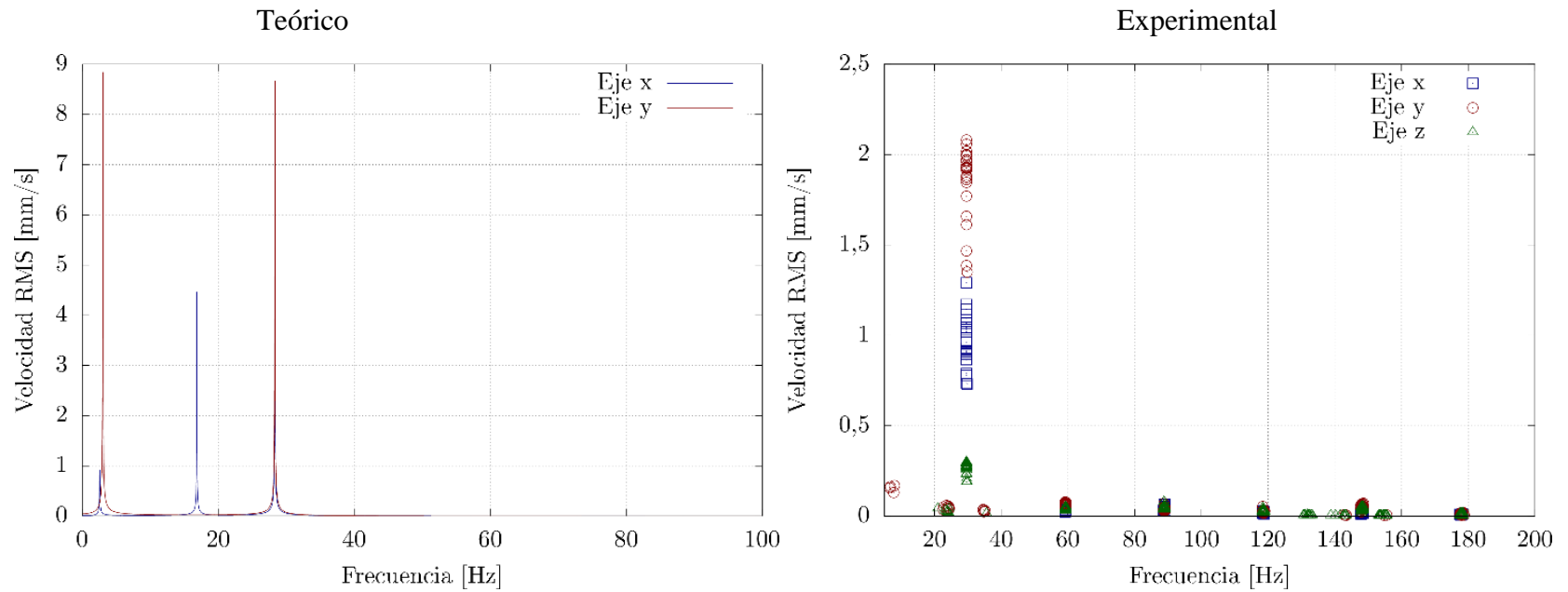


Goma con pernos de anclaje sujetos.

Figura 3. 51: Velocidad RMS, base de goma con  $h=2\text{mm}$ .

Fuente: El Autor

- Resorte



Resorte con pernos de anclaje sujetos.

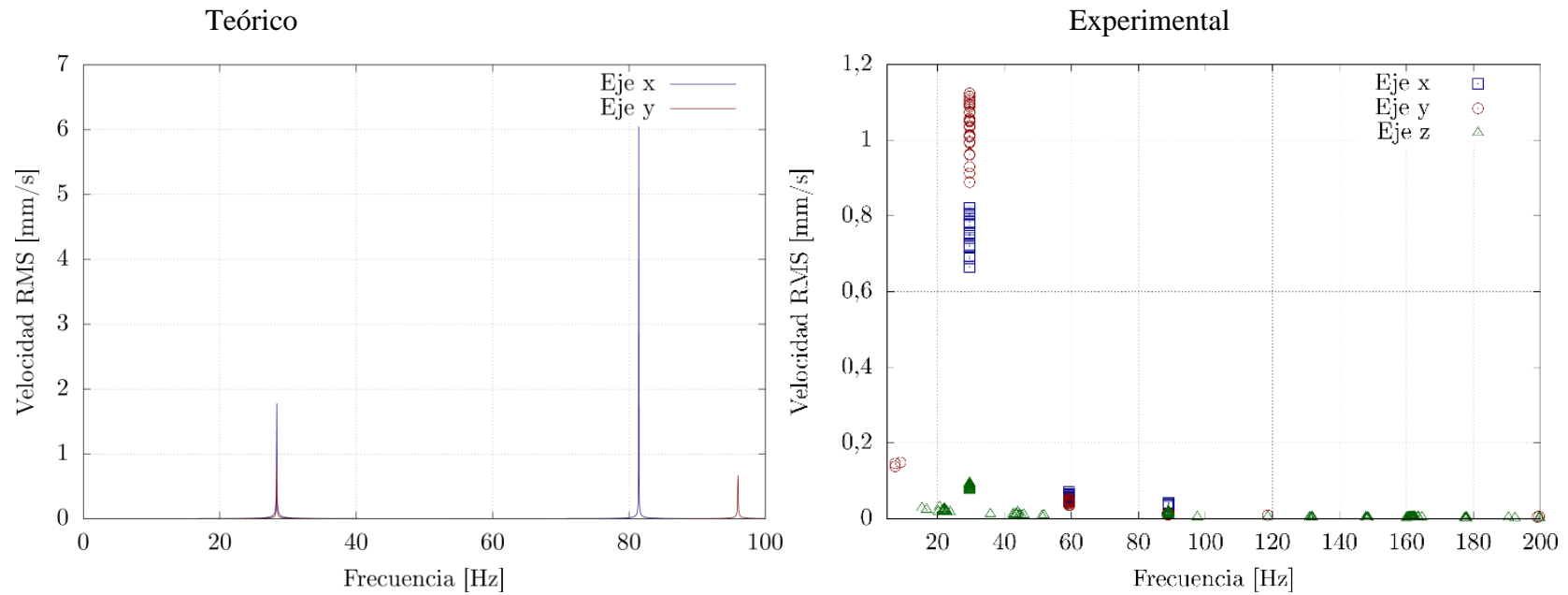
Figura 3. 52: Velocidad RMS, base muelle con h=2mm.

Fuente: El Autor



- Rígido

100

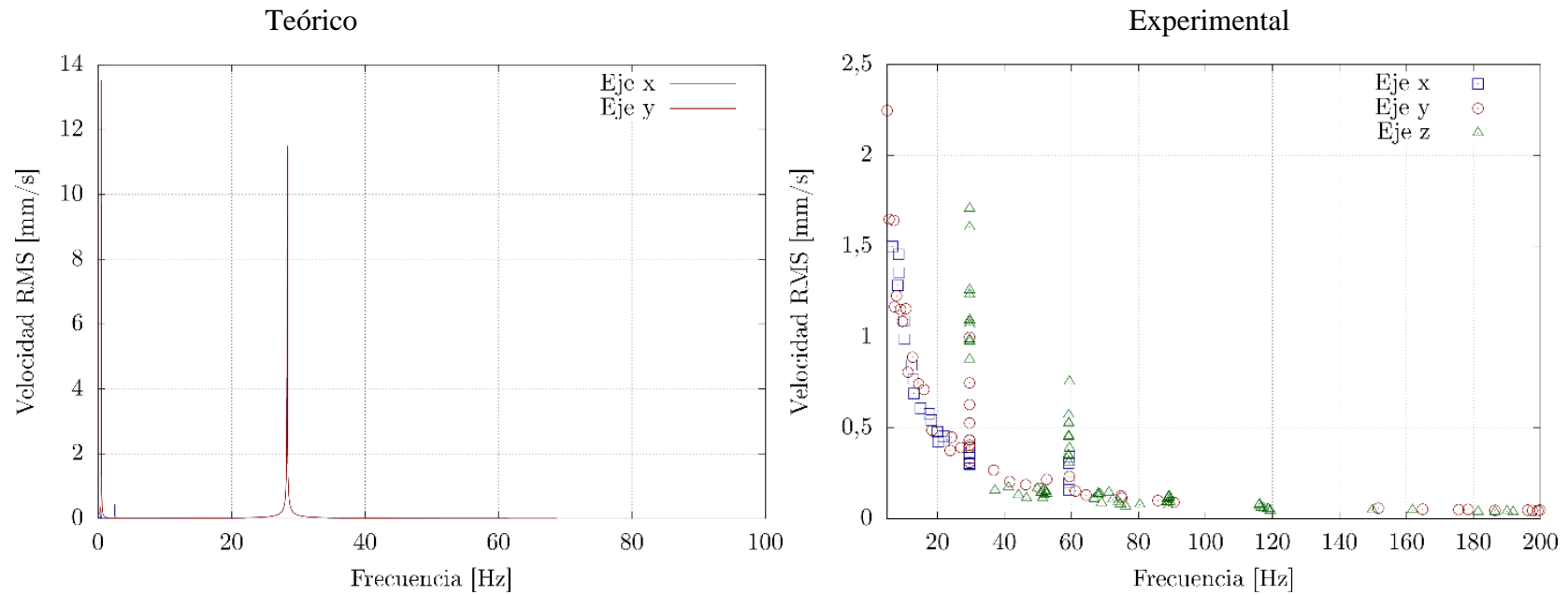


Pernos ancladores sujetos.

Figura 3. 53: Velocidad RMS, base rígida con h=2mm.

Fuente: El Autor

- Suelto



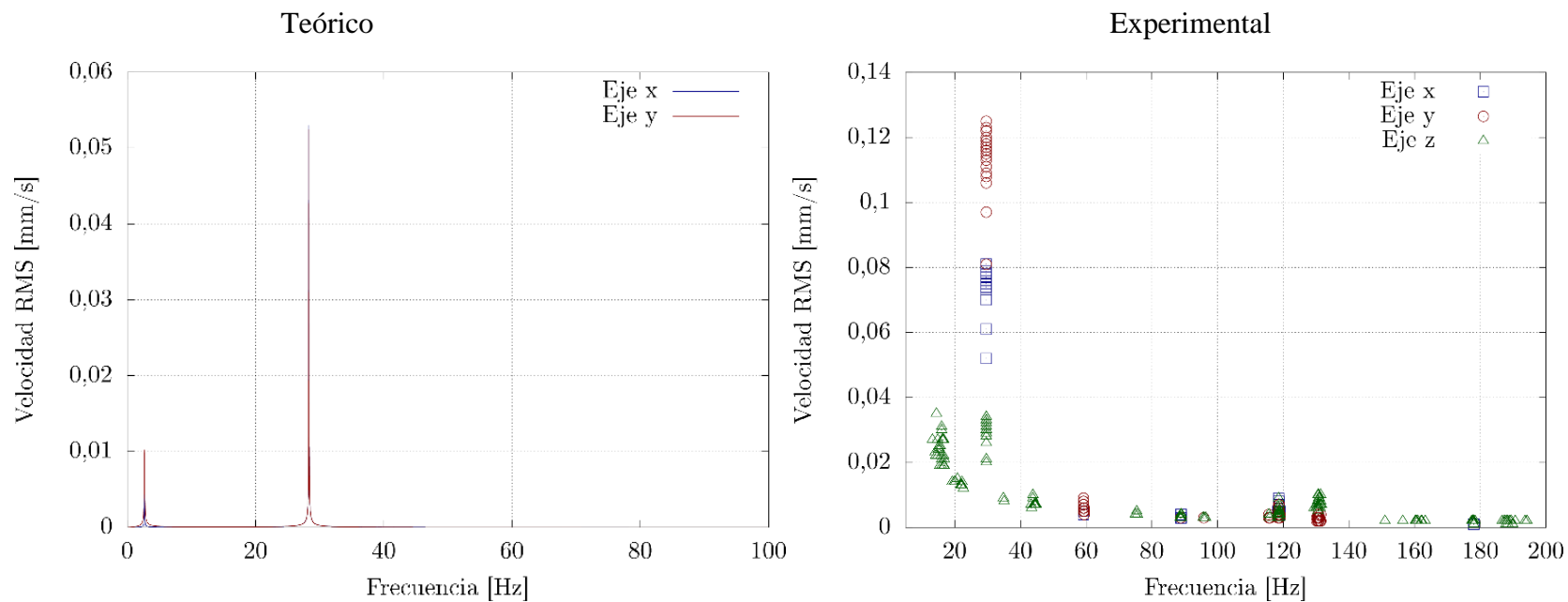
Pernos ancladores sueltos.

Figura 3. 54: Velocidad RMS, base suelta con h=2mm.

Fuente: El Autor

Masas grandes sin excentricidades, bases tipo: Rígido, muelle, goma, suelto.

- Goma

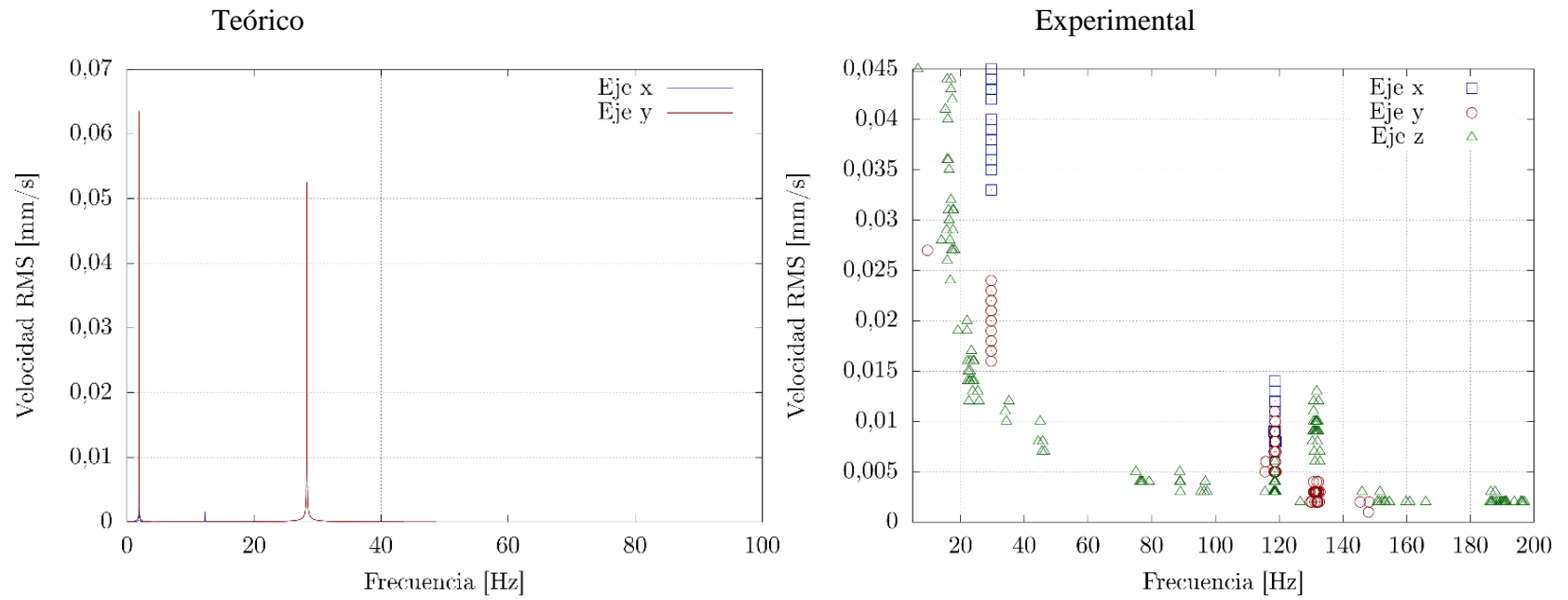


Goma con pernos de anclaje sujetos.

Figura 3. 55: Velocidad RMS, base de goma.

Fuente: El Autor

- Resorte



Resorte con pernos de anclaje sujetos.

Figura 3. 56: Velocidad RMS, base muelle.

Fuente: El Autor

- **Rígido**

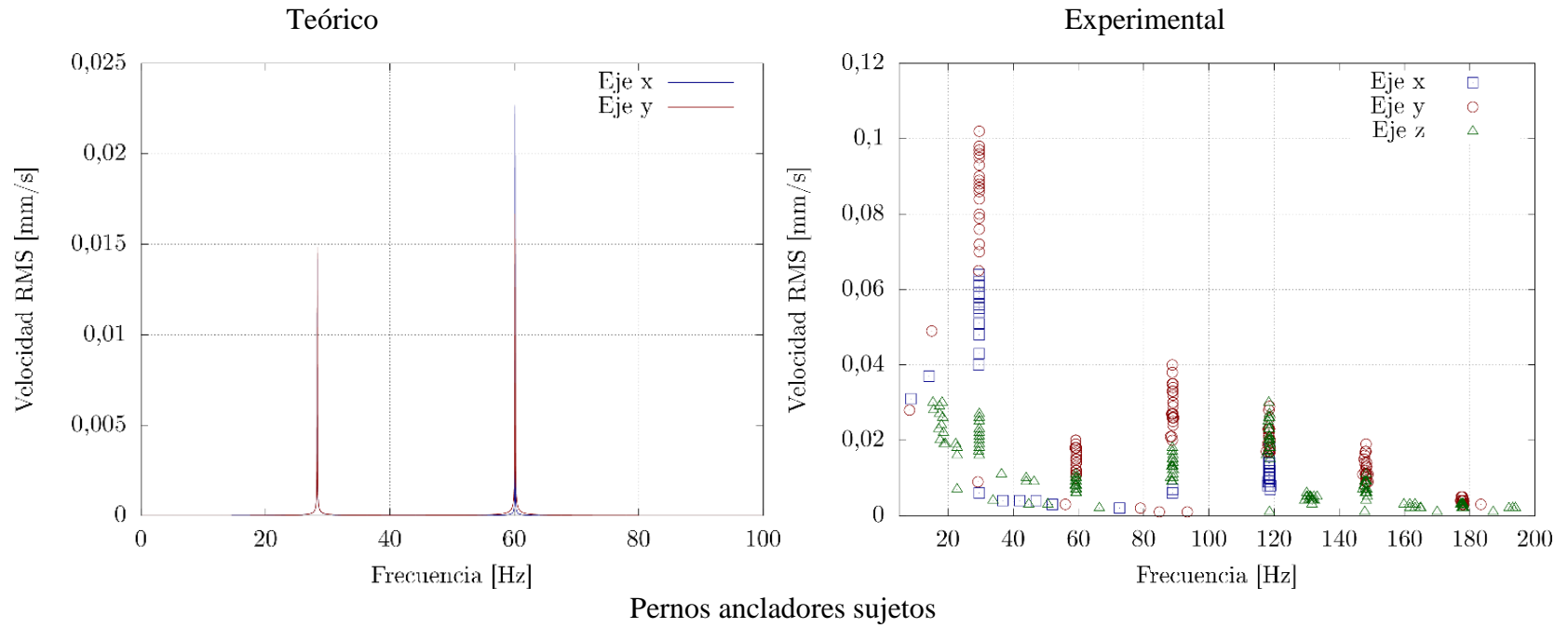
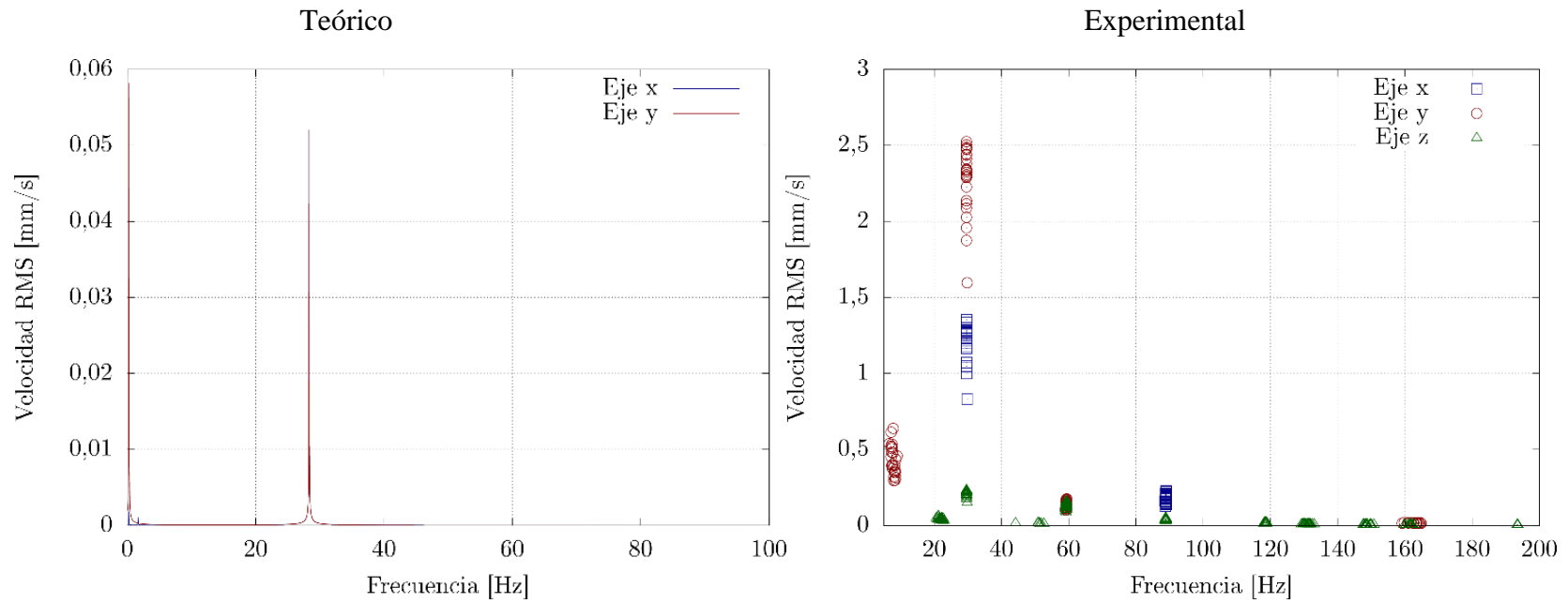


Figura 3. 57: Velocidad RMS, base rígida.

Fuente: El Autor

- Suelto



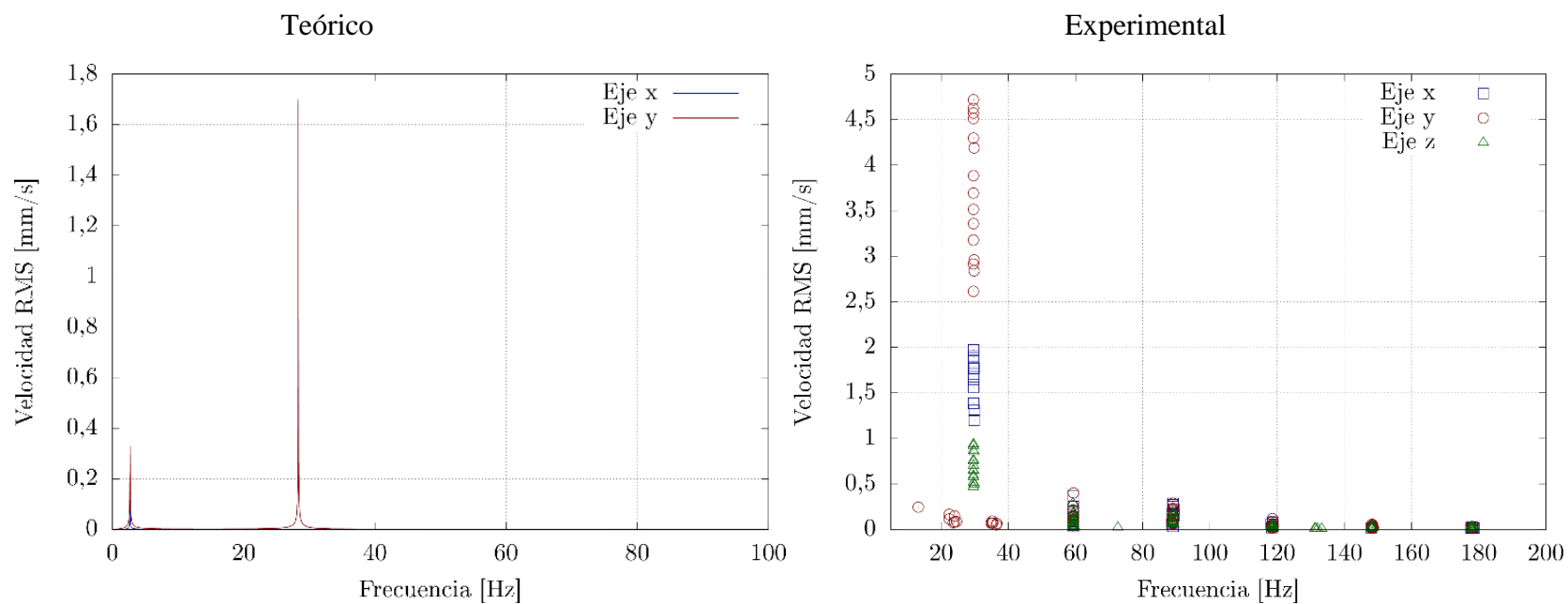
Pernos ancladores sueltos.

Figura 3. 58: Velocidad RMS, base suelta.

Fuente: El Autor

Masas grandes con excentricidades  $h=22\text{mm}$  bases tipo: Rígido, resorte, goma, suelto.

- Goma

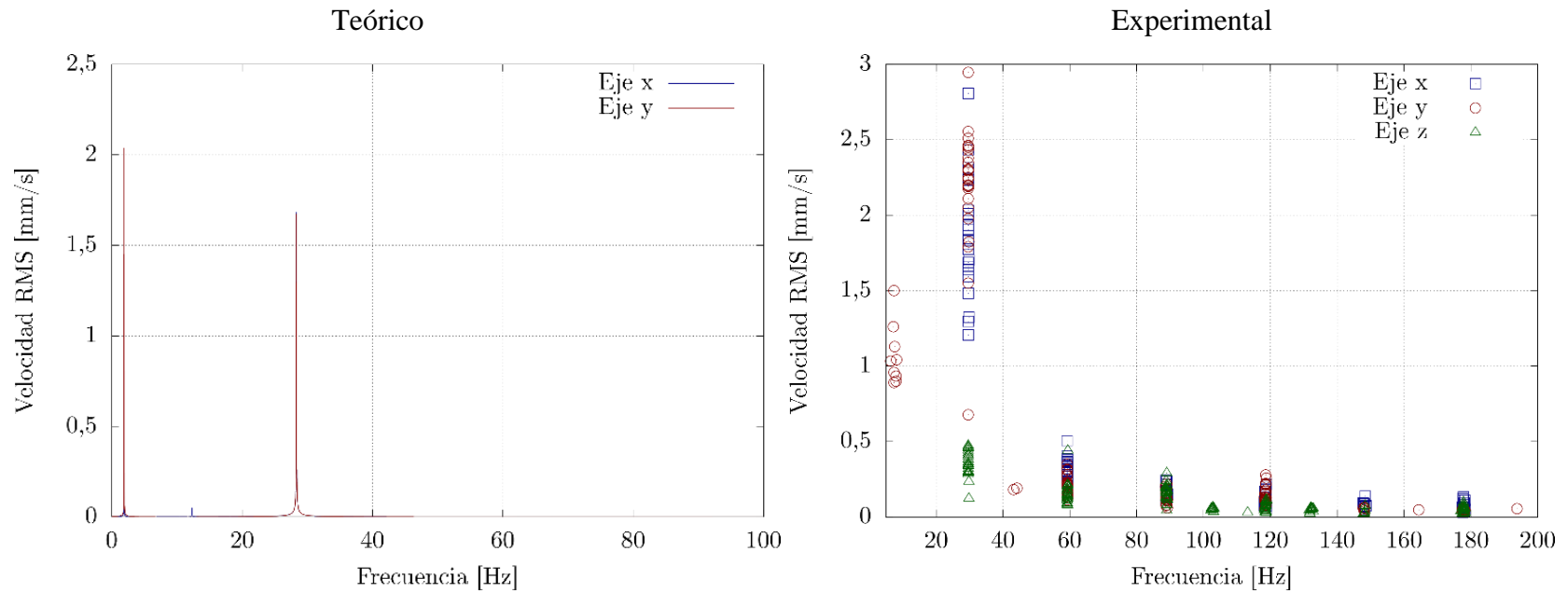


Goma con pernos de anclaje sujetos.

Figura 3. 59: Velocidad RMS, base de goma con  $h=22\text{mm}$ .

Fuente: El Autor

- Resorte



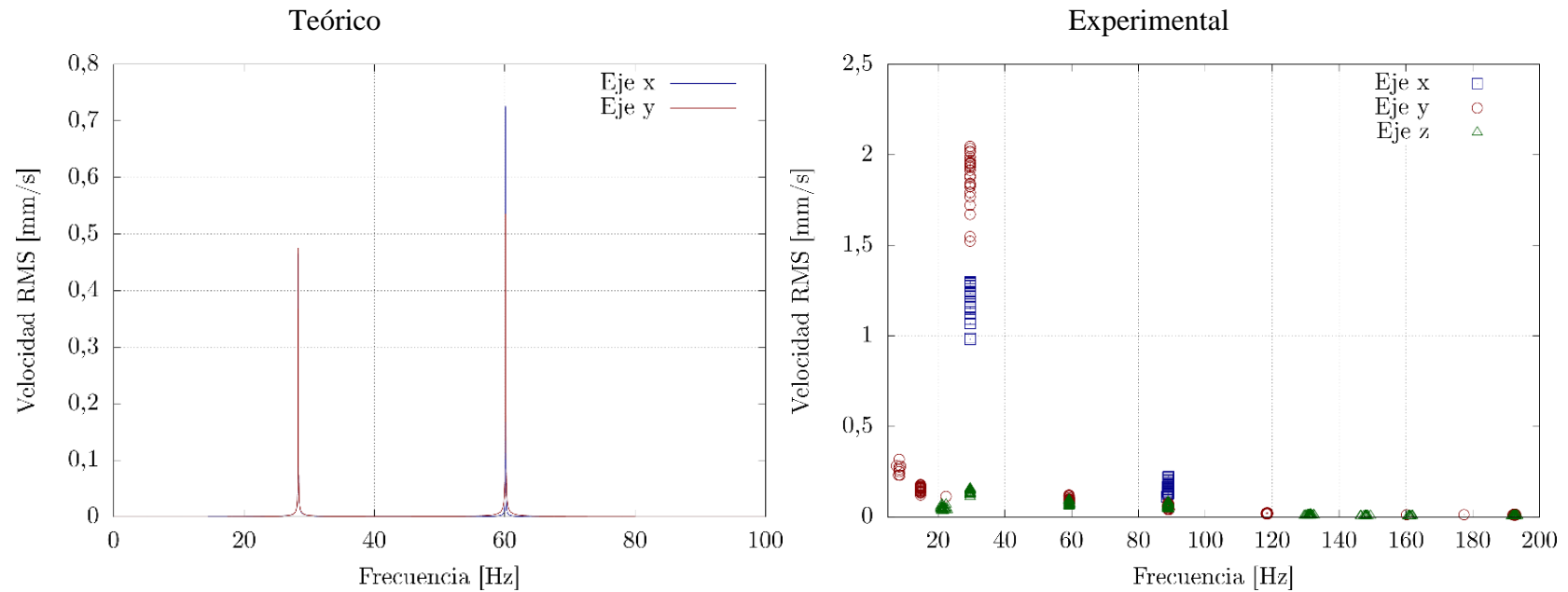
Resorte con pernos de anclaje sujetos.

Figura 3. 60: Velocidad RMS, base resorte con h=22mm.

Fuente: El Autor



- **Rígido**

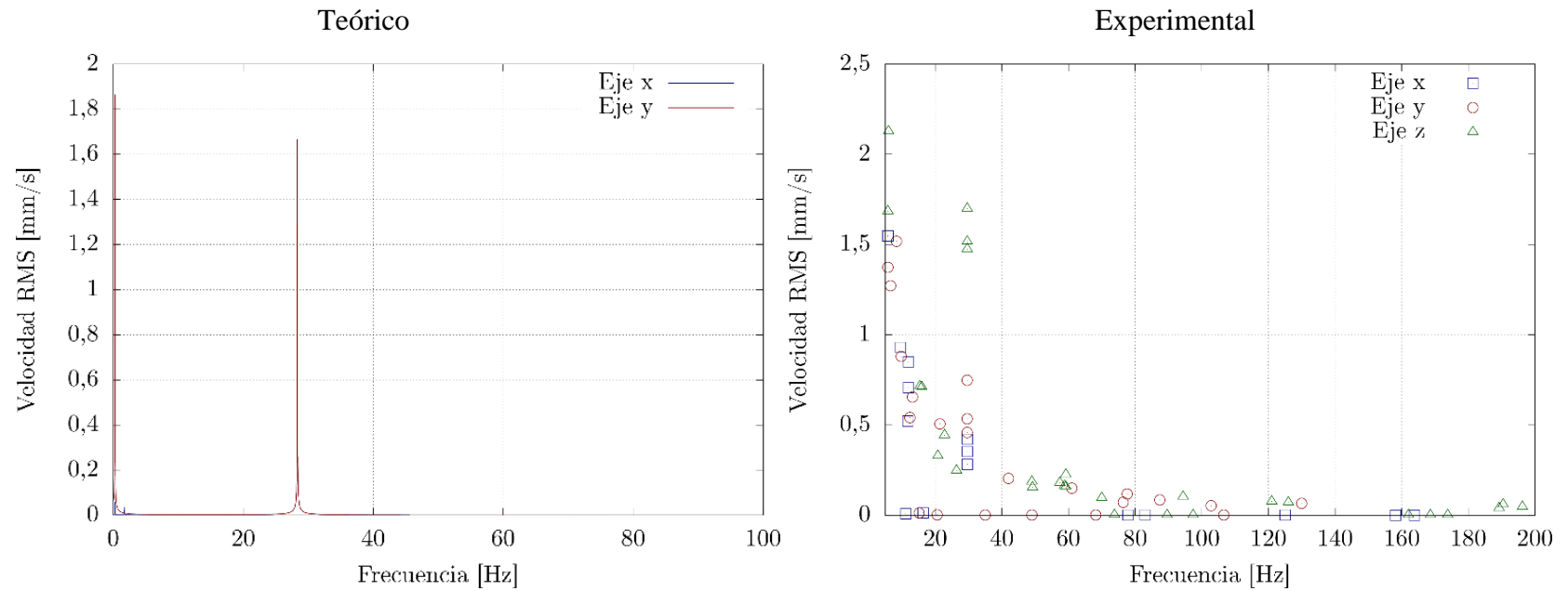


Pernos ancladores sujetos.

Figura 3. 61: Velocidad RMS, base rígida con  $h=22\text{mm}$ .

Fuente: El Autor

- Suelto



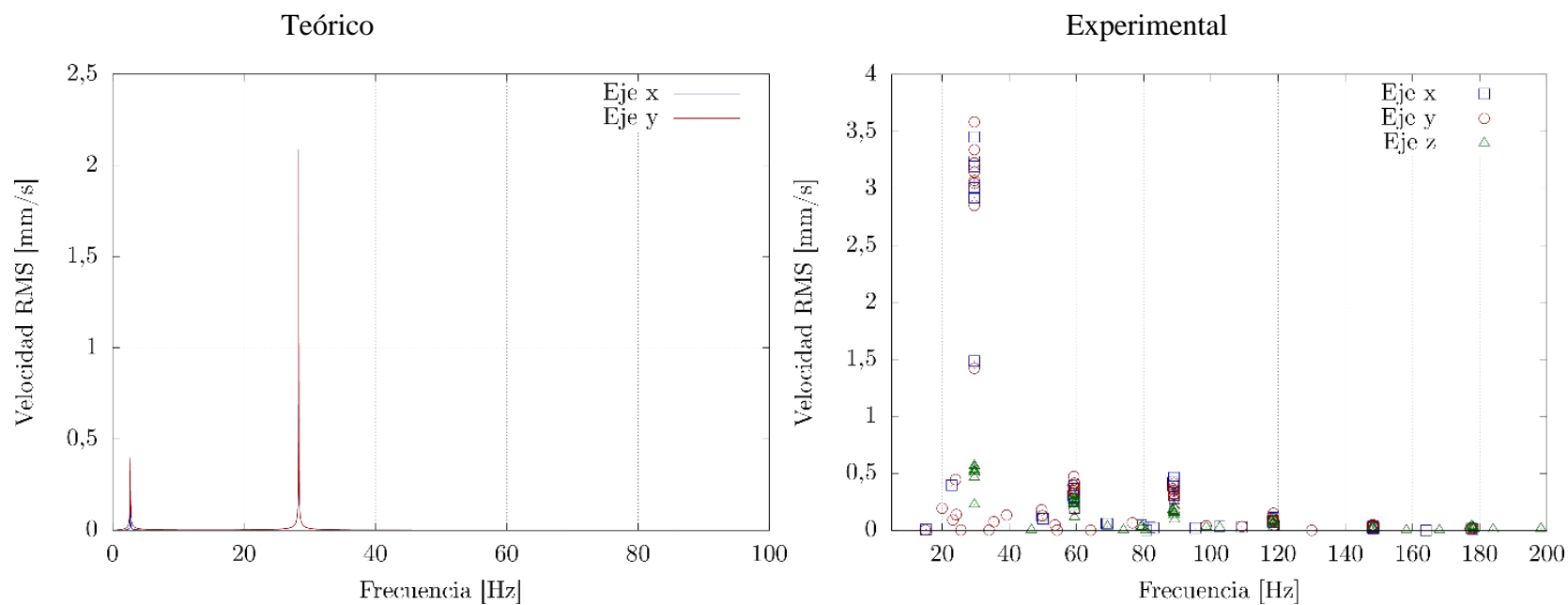
Pernos ancladores sueltos.

Figura 3. 62: Velocidad RMS, base suelta con h=22mm.

Fuente: El Autor

Masas grandes con excentricidades  $h=15\text{mm}$  bases tipo: Rígido, resorte, goma, suelto.

- Goma

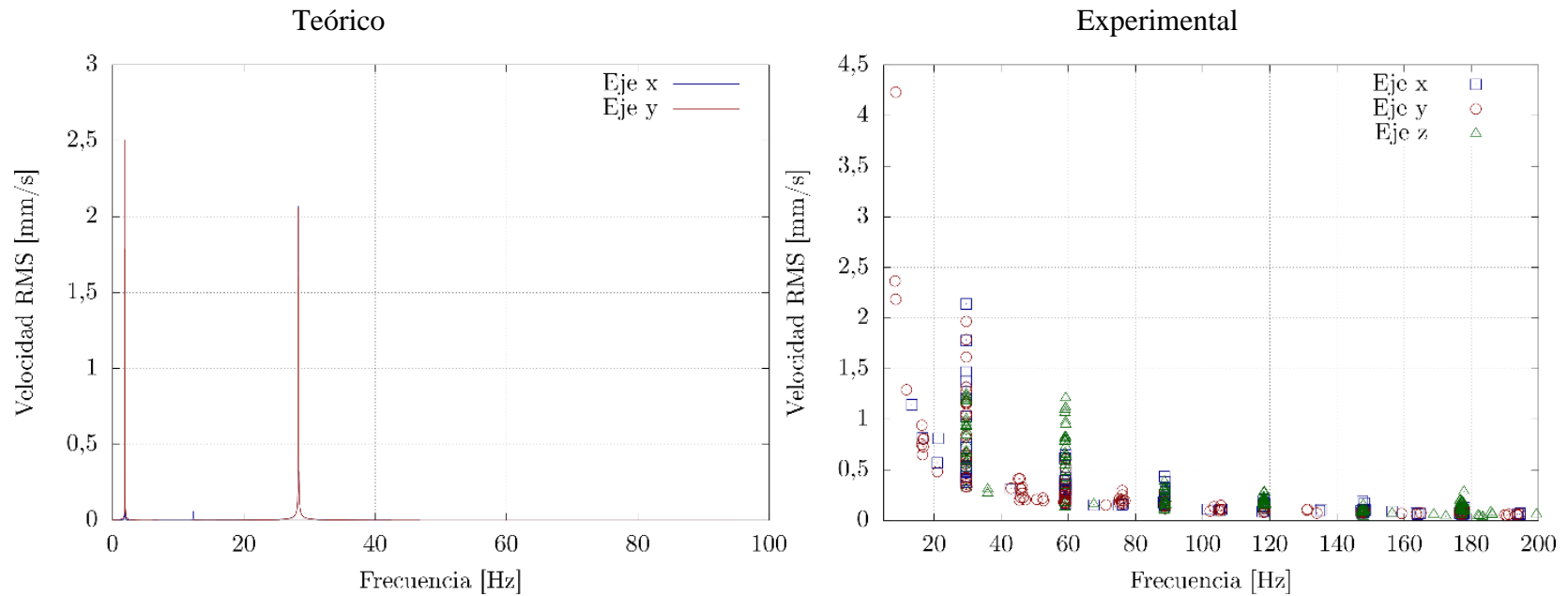


Goma con pernos de anclaje sujetos.

Figura 3. 63: Velocidad RMS, base de goma con  $h=15\text{mm}$ .

Fuente: El Autor

- Resorte

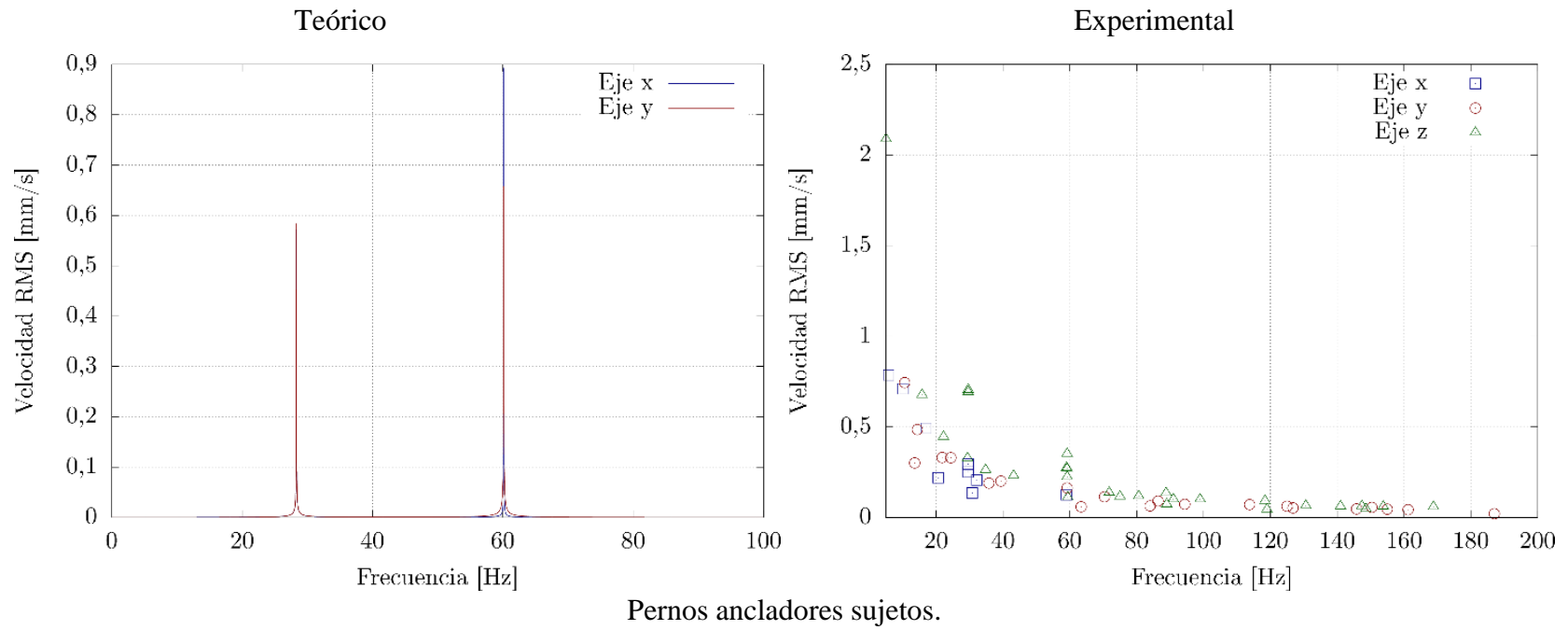


Resorte con pernos de anclaje sujetos.

Figura 3. 64: Velocidad RMS, base resorte con h=15mm.

Fuente: El Autor

- **Rígido**

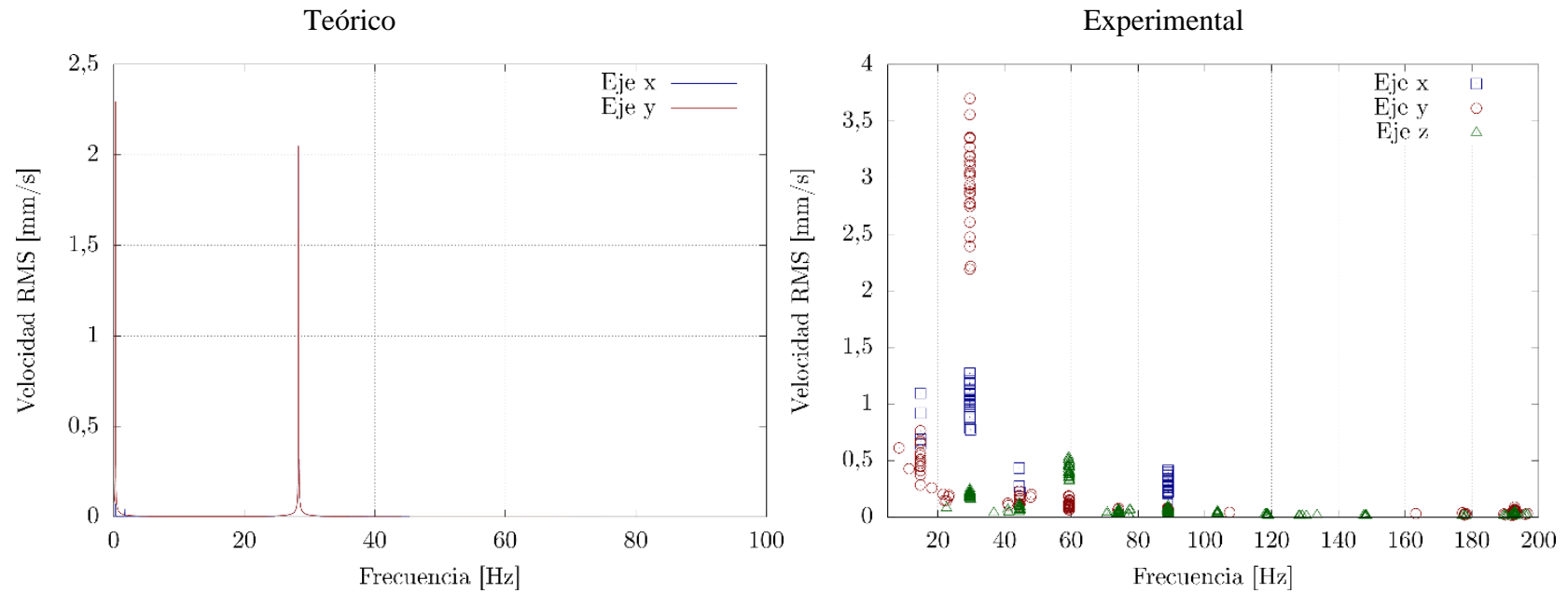


Pernos ancladores sujetos.

Figura 3. 65: Velocidad RMS, base rígido con h=15mm.

Fuente: El Autor

- Suelto



Pernos ancladores sueltos.

Figura 3. 66: Velocidad RMS, base suelta con  $h=15\text{mm}$ .

Fuente: El Autor

### 3.5.2. TABULACIÓN DE DATOS TEÓRICOS

Dados los casos estudiados a partir del modelo teórico, se utilizan armónicos predominantes en dos ejes X, Y.

- **Masas pequeñas sin excentricidades.**

Tabla 32: Masas pequeñas sin excentricidades.

Casos	Armónico X				Armónico Y			
	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s)	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s)	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s)	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s)
Goma	28.34	0.056	28.29	0.026	28.35	0.349	28.29	0.12
Resorte	2.59	0.026	16.84	0.177	3.5	0.351	28.34	0.346
Rígido	28.32	0.12	66.09	0.265	28.32	0.023	95.997	0.018
Suelto	28.34	0.243	28.3	0.11	0.44	0.311	28.35	0.344

Fuente: El Autor

- **Masas pequeñas con excentricidades h=24mm.**

Tabla 33: Masas pequeñas con excentricidades h=24mm.

Casos	Armónico X				Armónico Y			
	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s)	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s)	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s)	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s)
Goma	23.35	0.56	28.35	0.82	4.35	0.59	28.35	4.94
Resorte	16.84	1.86	28.35	2.60	3.04	5.154	28.35	5.09
Rígido	81.44	3.51	28.35	1.17	28.35	0.34	95.99	0.277
Suelto	28.35	3.5	28.29	1.64	0.45	4.57	28.35	5.01

Fuente: El Autor

- **Masas pequeñas con excentricidades h= 2mm.**

Tabla 34: Masas pequeñas con excentricidades h= 2mm.

Casos	Armónico X				Armónico Y			
	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s)	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s)	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s)	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s)
Goma	2.59	0.65	16.89	4.41	3.04	8.35	28.35	8.25
Resorte	28.29	2.9	28.34	6.30	3.49	8.35	28.35	8.25
Rígido	28.35	1.75	81.45	6.1	28.35	0.56	95.94	0.61
Suelto	28.3	3.74	28.35	2.78	0.5	13.5	28.34	11.75

Fuente: El Autor

- **Masas grandes sin excentricidades.**

Tabla 35: Masas grandes sin excentricidades.

Casos	Armónico X				Armónico Y			
	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s)	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s)	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s)	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s)
Goma	28.37	0.011	28.32	0.053	28.29	0.013	28.32	0.05
Resorte	28.35	0.028	28.32	0.05	1.89	0.063	28.32	0.052
Rígido	28.32	0.014	60.15	0.022	28.32	0.014	60.15	0.016
Suelto	28.29	0.013	28.32	0.052	28.35	0.028	28.32	0.052

Fuente: El Autor

- **Masas grandes con excentricidades h=22mm.**

Tabla 36: Masas grandes con excentricidades h=22mm.

Casos	Armónico X				Armónico Y			
	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s)	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s)	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s)	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s)
Goma	2.69	0.193	28.32	1.69	2.69	0.32	28.32	1.68
Resorte	1.89	0.281	28.32	1.681	1.89	2.036	28.32	1.67
Rígido	28.32	0.465	60.15	0.725	28.32	0.475	60.12	0.54
Suelto	28.37	0.35	28.32	1.66	0.274	1.86	28.32	1.66

Fuente: El Autor

- **Masas grandes con excentricidades h=15mm.**

Tabla 37: Masas grandes con excentricidades h=15mm.

Casos	Armónico X				Armónico Y			
	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s)	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s)	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s)	Frecuencia (Hz)	Velocidad (mm/s)
Goma	2.69	0.23	28.32	2.08	2.69	0.44	28.32	2.07
Resorte	1.89	0.34	28.32	2.07	1.89	2.5	28.32	2.05
Rígido	28.32	0.572	60.15	0.89	28.32	0.58	60.12	0.65
Suelto	28.35	1.109	28.32	2.05	28.35	1.108	28.32	2.05

Fuente: El Autor

### 3.5.3. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA COMPARACIÓN ENTRE DATOS EXPERIMENTALES Y TEÓRICOS.

Tomando los datos de los casos experimentales y teóricos se grafica ambos datos con el fin de comparar los resultados e interpretar la diferencia que existen en los dos métodos utilizados.



- Masas pequeñas sin excentricidades.

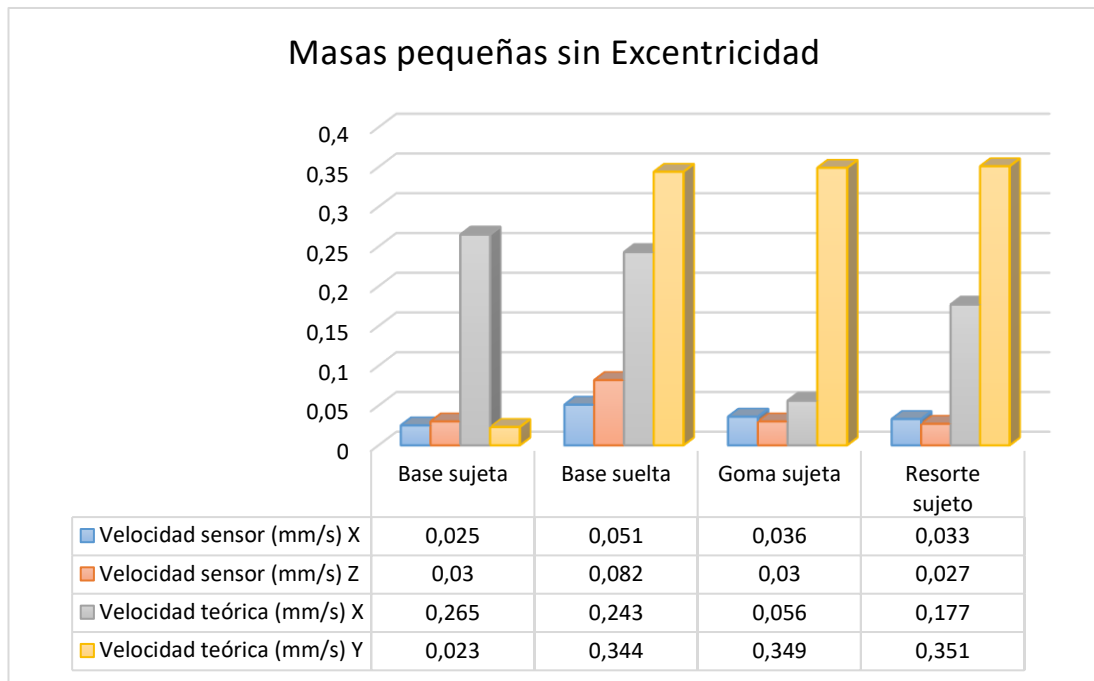


Figura 3. 67: Datos teóricos y experimentales con masas pequeñas sin excentricidad.

Fuente: El Autor

- Masas pequeñas con excentricidades  $h=24\text{mm}$ .

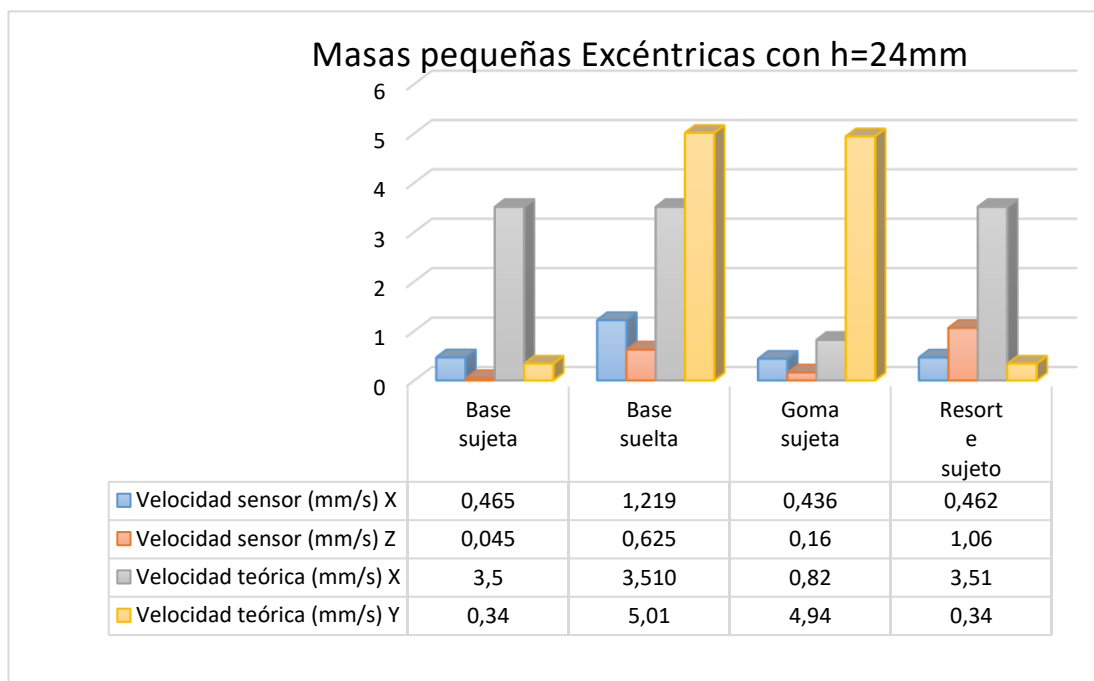


Figura 3. 68: Datos teóricos y experimentales con masas pequeñas con excentricidad  $h=24\text{mm}$ .

Fuente: El Autor

- Masas pequeñas con excentricidades  $h=2\text{mm}$ .

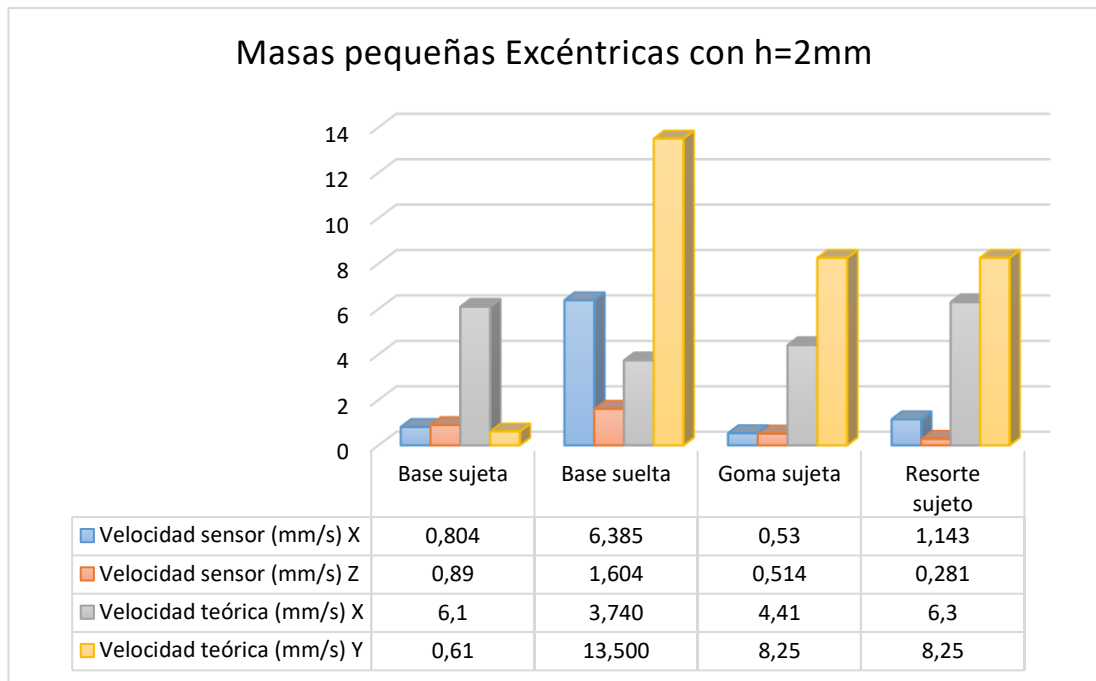


Figura 3. 69: Datos teóricos y experimentales con masas pequeñas con excentricidad  $h=2\text{mm}$ .

Fuente: El Autor

- Masas grandes sin excentricidades.

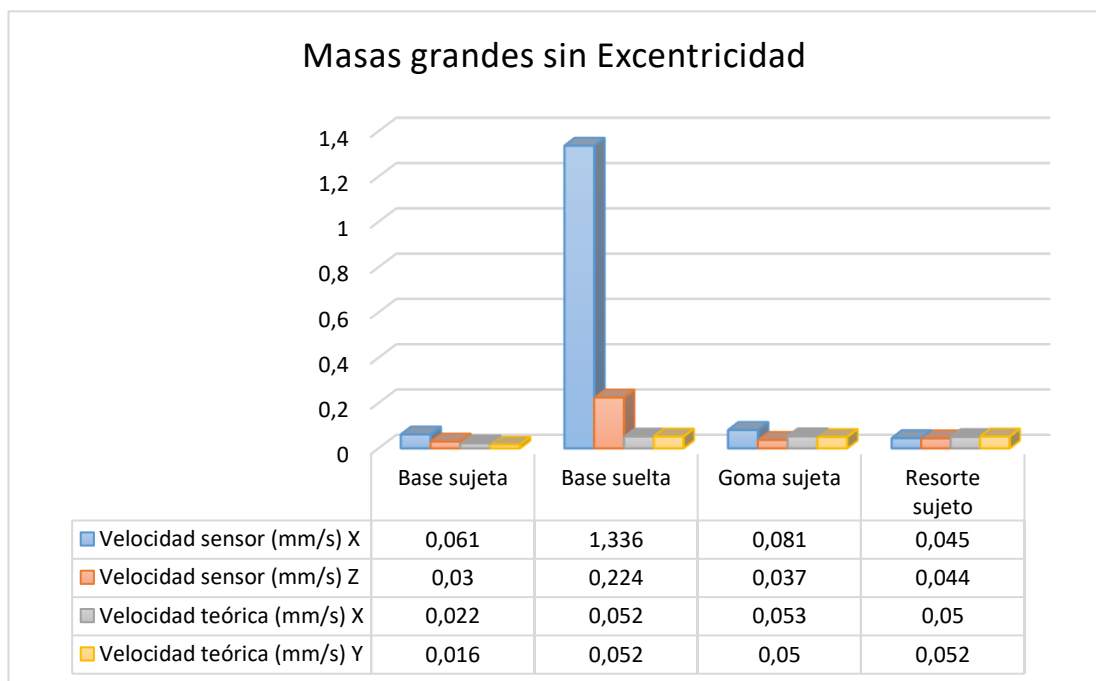


Figura 3. 70: Datos teóricos y experimentales con masas pequeñas sin excentricidad.

Fuente: El Autor

- Masas grandes con excentricidades  $h=22\text{mm}$

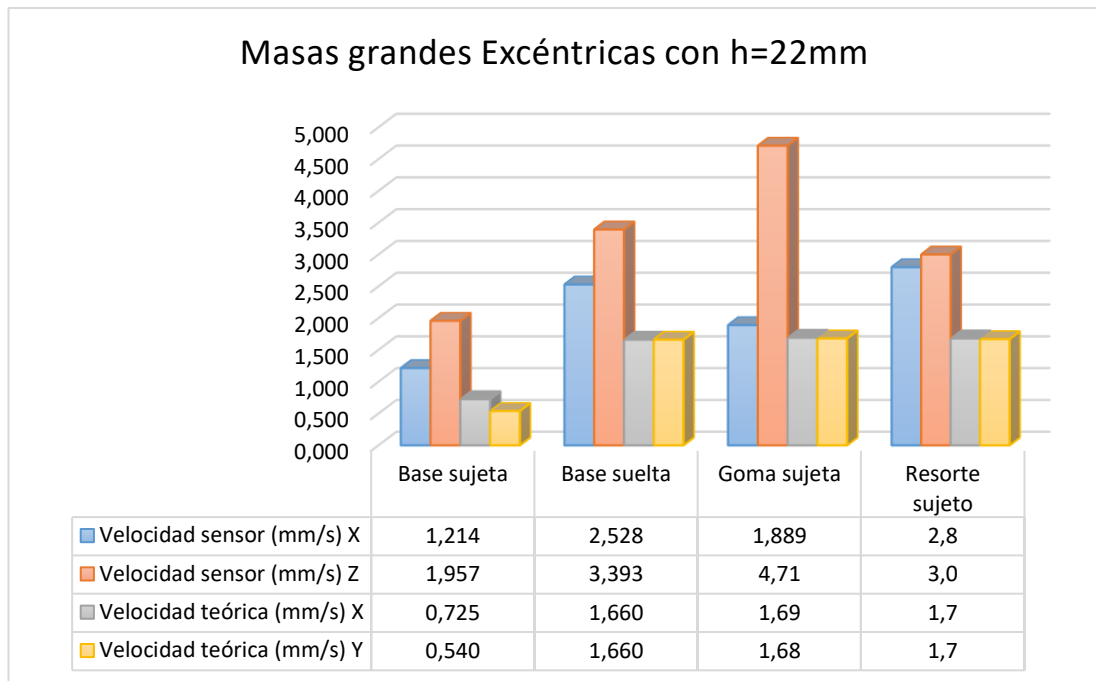


Figura 3. 71: Datos teóricos y experimentales con masas pequeñas con excentricidad  $h=22\text{mm}$ .

Fuente: El Autor

- Masas grandes con excentricidades  $h=15\text{mm}$ .

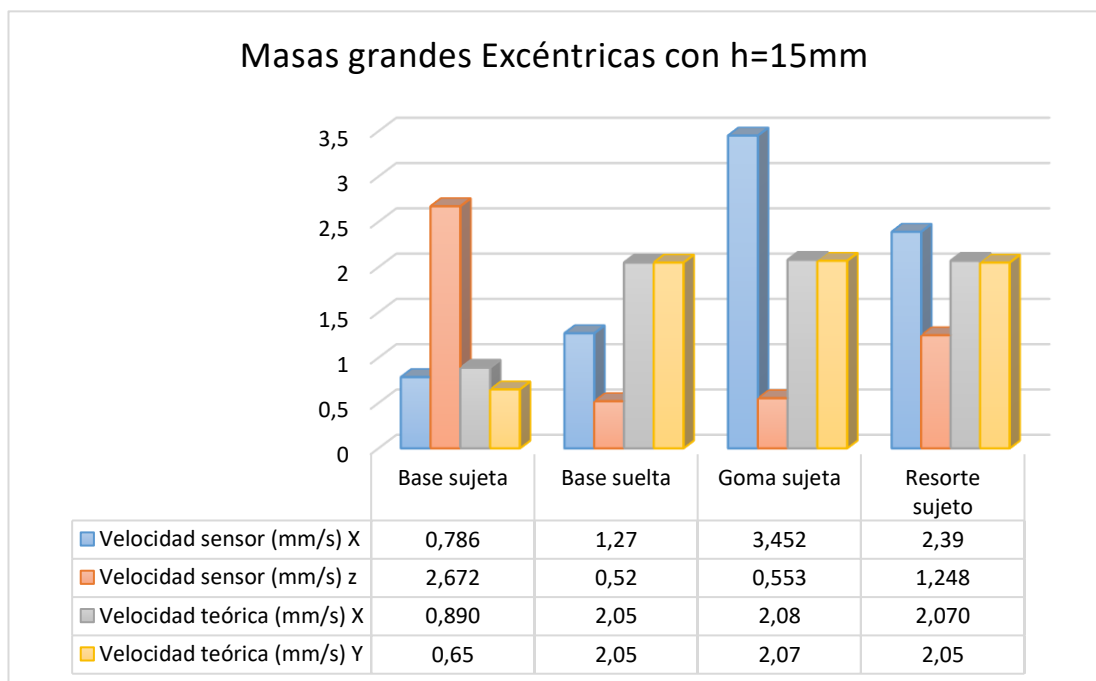


Figura 3. 72: Datos teóricos y experimentales con masas pequeñas con excentricidad  $h=15\text{mm}$ .

Fuente: El Autor

De acuerdo a las gráficas ilustradas en la comparación entre los datos experimentales y teóricos se puede ver que en el análisis desarrollado con masas pequeñas existe discrepancias entre estos valores, sin embargo, para el análisis realizado con masas grandes no existe mucha diferencia entre sus valores teóricos y experimentales. Debido a que el modelo matemático desarrollado considera solo dos dimensiones(X, Y); mientras que en el desarrollo experimental el sensor trabaja con datos en tres dimensiones (X, Y, Z).

### **3.6. MEDICIONES DE VIBRACIONES APLICADO EN RODAMIENTOS.**

El monitoreo con el sensor LIS3DH se utilizó para diagnosticar el daño en rodamientos de bolas y observar su comportamiento mediante un banco de pruebas, en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica “Laboratorio de Ingeniería Mecánica”, de acuerdo a las figuras 3.70 y 3.73.

#### **Banco de Pruebas “Torno”**

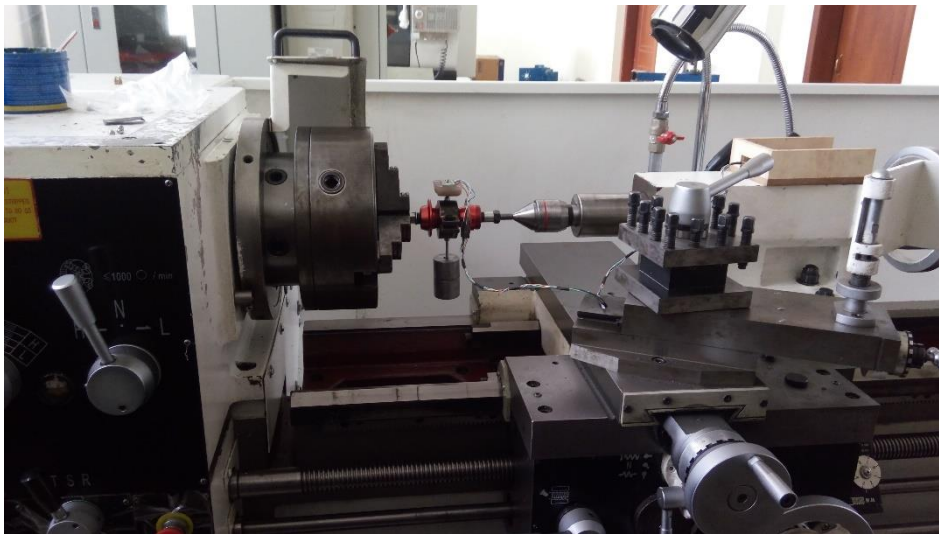


Figura 3. 73: Medición de vibraciones en banco de pruebas Torno.

Fuente: El Autor

La prueba se realizó con una velocidad de 1400 rpm, obteniendo mediciones de rodamientos en dos situaciones: Rodamiento con pista y bolas en buen estado, y Rodamiento con pista dañada y bolas en mal estado. El plano de conexiones del sistema electrónico conectado en el banco de pruebas para análisis de vibraciones en rodamientos se representa en el Anexo 2.



Figura 3. 74: Rodamiento y pista en buen estado.

Fuente: El Autor



Figura 3. 75: Rodamiento y pista en mal estado.

Fuente: El Autor

**Banco de pruebas “Máquina para pruebas de fatiga por rotación”.**



Figura 3. 76: Medición de vibraciones en banco de pruebas “Máquina para pruebas de fatiga por rotación”.

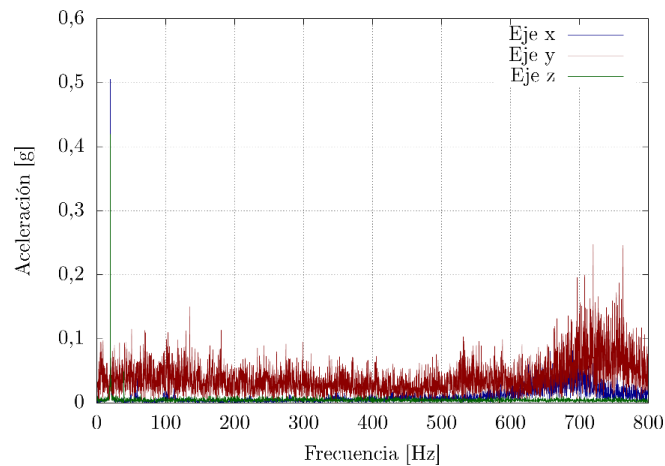
Fuente: El Autor

La prueba se realizó con una velocidad de 3591 rpm obteniendo mediciones para los dos rodamientos experimentales.

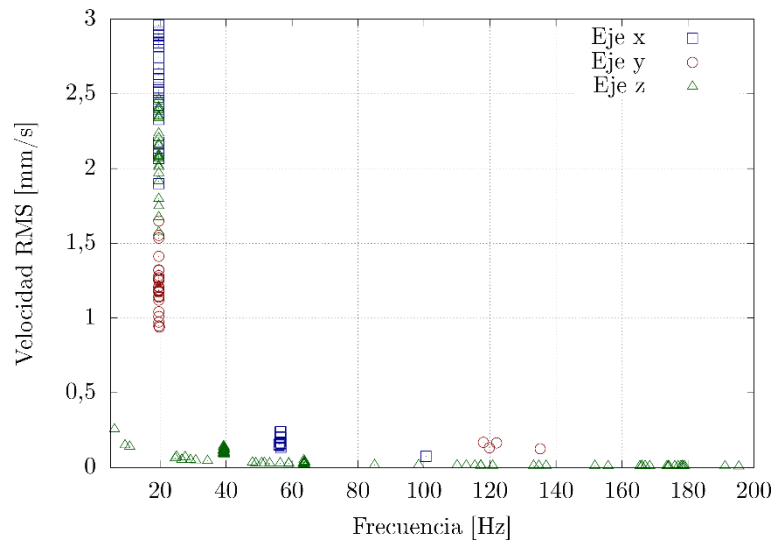
### Análisis de Datos.

#### Rodamientos y pista en buen estado.

Aplicando el mismo principio de medición que en las pruebas con en el motor asíncrono se obtiene lo siguiente:



a). Aceleración vs Frecuencia



b). Velocidad RMS (mm/seg)

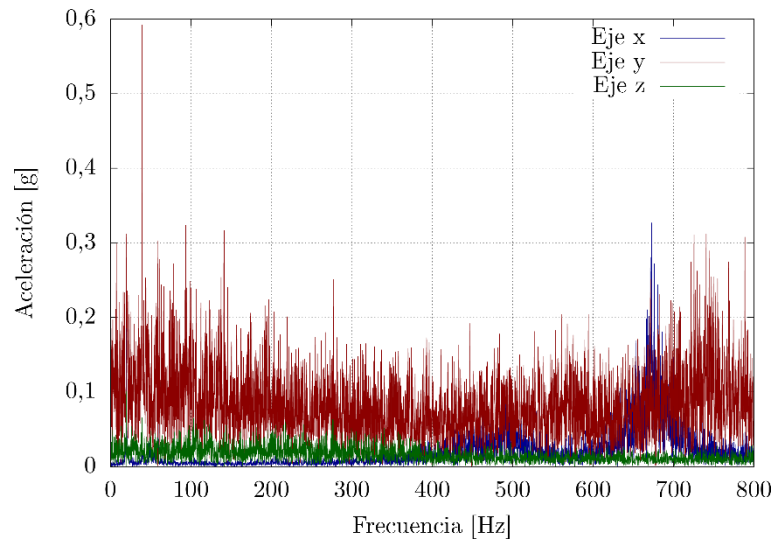
Figura 3. 77: Proyección del análisis espectral Aceleración, Velocidad vs Tiempo.

Fuente: El Autor

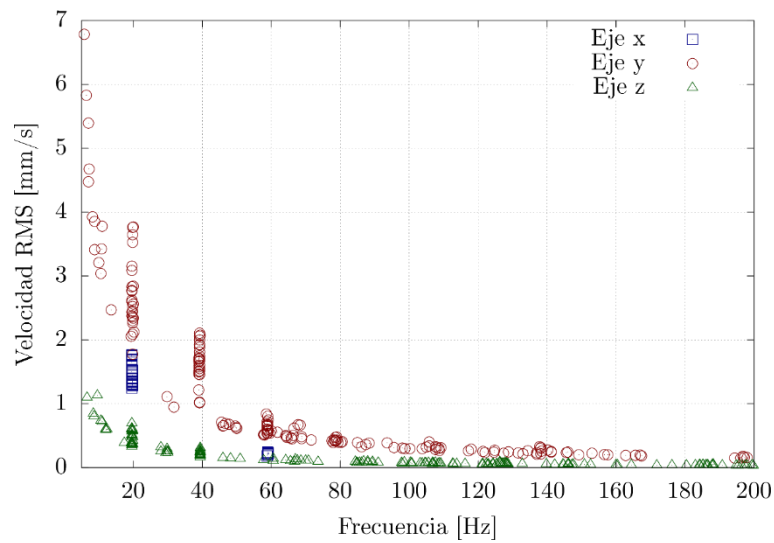
La figura anterior muestra que el comportamiento que tiene el sensor con el banco de pruebas es muy inestable ya que no permite visualizar con claridad lo que está ocurriendo en la medición del rodamiento, y donde las velocidades no están siendo coherente para el correcto análisis e interpretación de datos.

### Rodamientos y pista en mal estado.

Realizando pruebas rigurosas y daños críticos al rodamiento para analizar su comportamiento se obtiene lo siguiente:



a). Aceleración vs Frecuencia



b). Velocidad RMS (mm/seg)

Figura 3. 78: Proyección del análisis espectral Aceleración, Velocidad vs Tiempo.

Fuente: El Autor

La figura anterior muestra un comportamiento aún más inestable en el cual los valores que emite el sensor no llegan a ser muy coherentes y no permiten observar claramente lo que está sucediendo en su interior.

Por tal razón quedan descartadas del análisis de vibraciones este tipo de pruebas por la interferencia que estas tienen y su comportamiento inestable que no permiten su visualización.

### 3.7. MATENIMIENTO PREVENTIVO Y PREDICTIVO.

#### Mantenimiento Preventivo aplicado en análisis de vibraciones.

El análisis de vibraciones llega ser muy útil para la prevención de fallas serias que se generan en la máquina que está siendo examinada.

El mantenimiento preventivo analiza el estado del equipo y/o máquina a inspeccionar para determinar el fallo de un elemento mecánico, falta de lubricación, desgaste de partes móviles, reemplazo de elementos externos como en este caso sería los diferentes tipos de bases aislantes, el estado en la que se encuentran y como estos influirán en el comportamiento del motor mediante un análisis espectral.

Ventajas de aplicación del mantenimiento preventivo:

- Selección de repuestos de alta calidad.
- Disminución de costes de mantenimiento correctivo.
- Evita fallas inesperadas del equipo y/o máquina.

La aplicación de este tipo de mantenimiento aplicado en el presente trabajo se lo realiza comparando las velocidades medidas con el sensor con normativa ISO correspondiente observando el tipo de motor o trabajo que esté realizando.

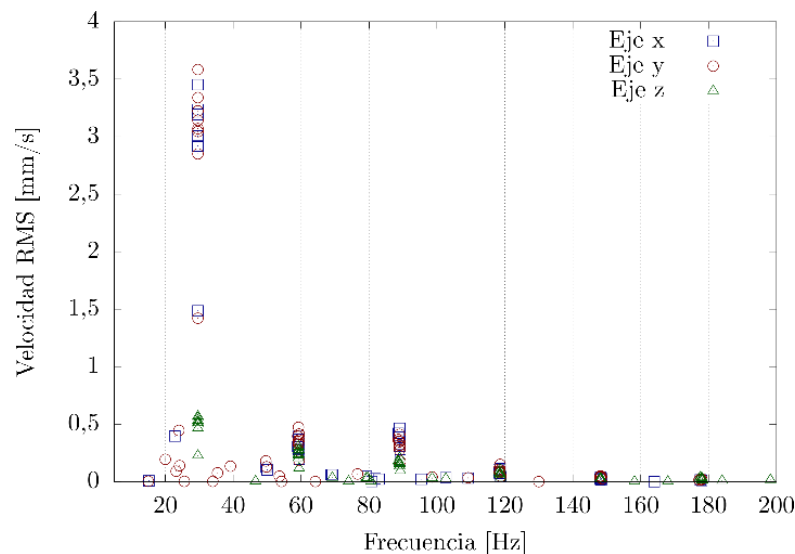


Figura 3. 79: Caso 9:3 Goma con pernos de anclaje sujetos con h 15mm

Fuente: El Autor

Tomando como ejemplo la figura anterior tomada de la tabla 22 indica la velocidad RMS vs Frecuencia. Datos tomados de la tabla 23, armónicos que predominan esta grafica son:

Armónico X: frecuencia 29.6 Hz, y velocidad 3.452 mm/seg.

Armónico Y: frecuencia 29.6 Hz, y velocidad 3.583 mm/seg.



Armónico Z: frecuencia 29.6 Hz, y velocidad 0.553 mm/seg.

Y son comparados los valores más altos con la norma ISO 2372, tabla 13 y están en un rango de inaceptable. En base a este criterio se aplica el mantenimiento preventivo. Se detiene la máquina y se resuelve problema que causa las velocidades altas.

### **Mantenimiento predictivo aplicado en análisis de vibraciones.**

Es uno de los mantenimientos más utilizados en lo que se refiere a medición periódica, es decir mientras el equipo y/o máquina está en operación se determina la condición de la misma. La técnica de análisis de vibración se utilizó para detectar el comportamiento del estado del motor en condiciones normales así como en extremas para su debida interpretación de resultados para luego compararlos con normas de severidad de acuerdo al tipo de máquina se elegirá la norma para tener un criterio del estado de la máquina.

La aplicación de un plan de mantenimiento predictivo en análisis de vibraciones se basa en un plan que consiste en:

- La selección de máquinas a monitorear.
- Revisión del estado de la máquina
- Determinar los puntos de medición
- Mediciones en ciertos intervalos.
- Recolección y análisis de datos registrados
- Revisión de niveles de vibración que se ha considerado dentro de un rango aceptable.
- Dar un estado de la máquina.

La aplicación de este tipo de mantenimiento aplicado en el presente trabajo se lo realiza comparando las velocidades medidas con el sensor con normativa ISO correspondiente observando el tipo de motor o trabajo que esté realizando.

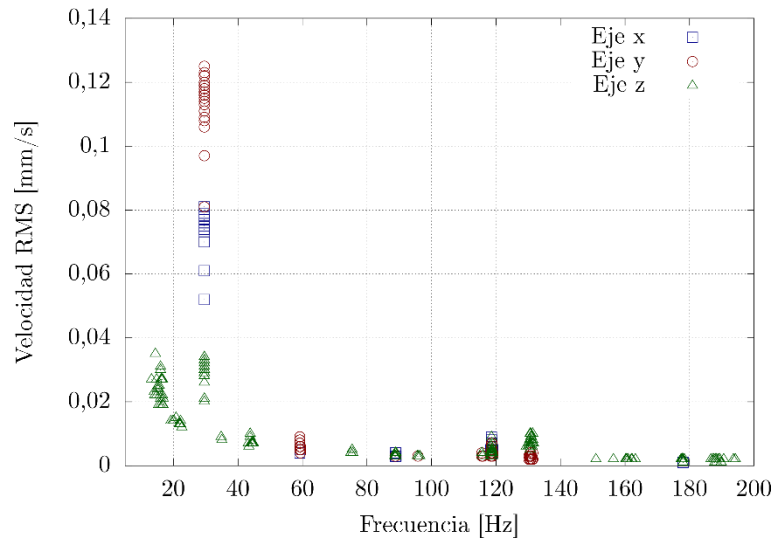


Figura 3. 80: Caso 9:1 Goma con pernos de anclaje sujetos h=37mm.

Fuente: El Autor

Tomando como ejemplo la figura anterior tomada de la tabla 18 indica la velocidad RMS vs Frecuencia. Datos tomados de la tabla 19, armónicos que predominan esta grafica son:

Armónico X: frecuencia 29.6 Hz, y velocidad 0.081 mm/seg.

Armónico Y: frecuencia 29.6 Hz, y velocidad 0.122 mm/seg.

Armónico Z: frecuencia 16.0 Hz, y velocidad 0.037 mm/seg.

Y son comparados los valores más altos con la norma ISO 2372, tabla 13 y están en un rango de aceptable. En base a este criterio se aplica el mantenimiento predictivo. Realizando un monitoreo constante durante la operación de trabajo del motor.

A continuación, se mostrará un flujograma de acuerdo a los dos tipos de mantenimiento.

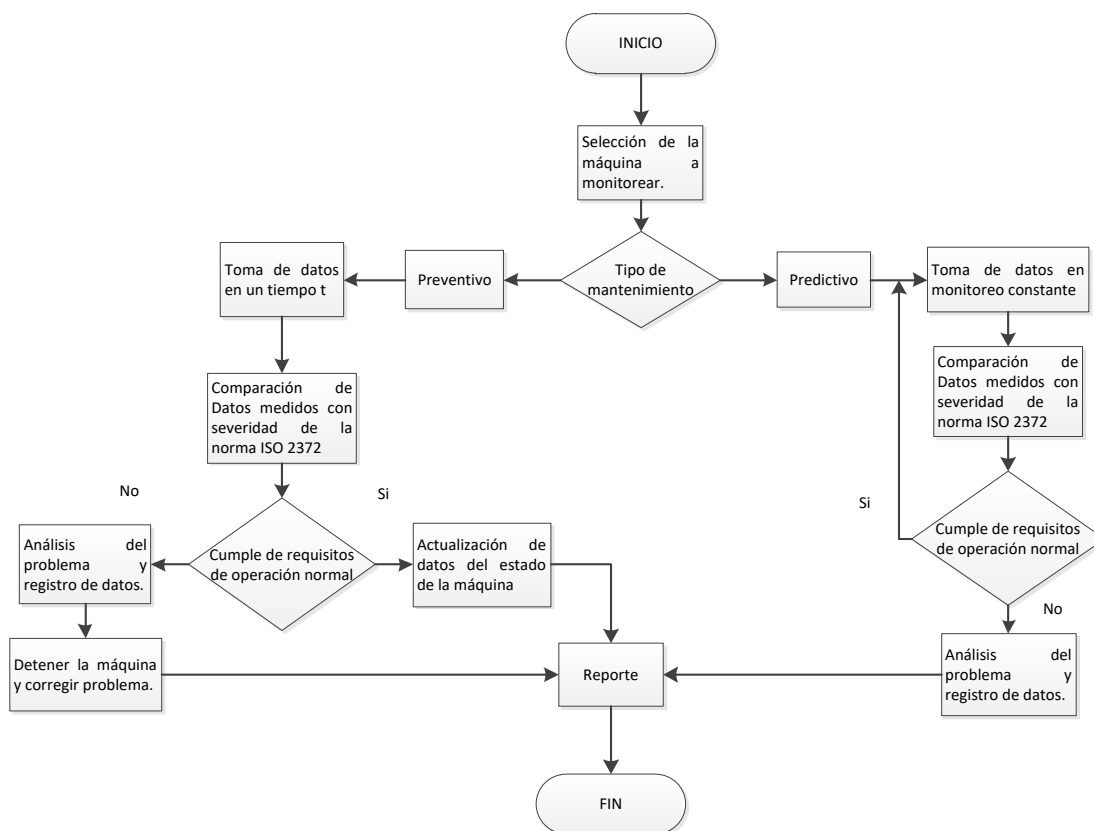


Figura 3. 81: Flujograma de mantenimiento Preventivo y Predictivo.

Fuente: El Autor

### 3.8. PRESUPUESTO

Se tomó en cuenta los costos utilizados para la elaboración del presente proyecto.

Tabla 38: Presupuesto Adquirido para la elaboración del proyecto.

ítem	Descripción	Cant.	Precio unitario (\$).	Precio total (\$).
1	NUCLEO-F411RE - STMicroelectronics	1	24,6	24,6
2	Sensor MEMS Lis3dh	2	7,4	14,8
3	Sensor MEMS MMA8451	2	5,5	11
4	Eje de 1 pulg de diámetro	1	3,5	3,5
5	Eje de 1 1/2 pulg de diámetro	1	4,5	4,5
6	Eje de bicicleta	2	1,95	3,9
7	Amortiguadores	4	1,92	7,68
8	Bases de goma	4	1,12	4,48
9	Elementos y placa electrónicos	1	20	20
10	Cable N°18	8	0,35	2,8
11	Perno 5/16 x 1 1/2 plg	4	0,18	0,72

<b>12</b>	Prisioneros	4	0,1	0,4
<b>13</b>	Macho M6	1	6,15	6,15
<b>14</b>	Tuercas 5/16	4	0,12	0,48
<b>15</b>	Cable USB 450 cm	1	5	5
<b>16</b>	Barrillas de latón	10	0,5	5
<b>17</b>	Chatarra como contra peso	5	1,5	7,5
<b>18</b>	Resina Epoxica y catalizador	1	15	15
				137,51(\$)

Fuente: El Autor

## CAPITULO IV

### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1. CONCLUSIONES:

- Las mediciones de las pruebas realizadas están a partir de la tabla 16, en la cuales se selecciona los armónicos predominantes del sistema en las tres direcciones x, y, z, (tabla 17) con el fin de realizar un análisis y diagnóstico de los datos obtenidos como muestra en la figura 3.32.
- La Transformada Rápida de Fourier (FFT), transforma la señal en dominio de tiempo en señal en dominio de frecuencia, tomando como ejemplo las gráficas de tabla 30, donde se considera la velocidad crítica dispuesta a ser comparada con la Norma de severidad ISO 2372.
- El protocolo de comunicación I2C se ha comportado muy susceptible a las vibraciones y no se recomienda su uso para este tipo de aplicaciones.
- El mejor anclaje para atenuar las vibraciones en el eje X es la base metálica apretada y el resorte ajustado; en el eje Y la base metálica apretada; en el eje Z la base de goma reduce la vibración y además previene los golpeteos en todos los niveles de excentricidad aplicados.
- El modelo matemático compara de manera favorable con los datos experimentales aplicados con masas grandes en los diferentes tipos de anclajes.
- El análisis de vibraciones debido a fallas en rodamiento no se ha mostrado concluyente debido a que no existe una frecuencia característica de vibración.

#### 4.2. RECOMENDACIONES:

- Conocer de las normas de severidad aplicadas en análisis de vibraciones, para su interpretación y analizar el estado de la máquina a medir.
- Utilizar sensores de aceleración con un protocolo de comunicación SPI para evitar errores de lectura en la programación.
- La elaboración de una caja protectora para el dispositivo electrónico para debido a que el modelo matemático desarrollado considera solo dos dimensiones (X, Y); mientras que en el desarrollo experimental el sensor trabaja con datos en tres dimensiones (X, Y, Z). evitar que el ruido del exterior presente fallos en la lectura de datos durante la medición.
- Considerar los costos de adquisición, implementación y desarrollo computacional que implica la aplicación de los sensores de aceleración.
- Variar la frecuencia de monitoreo dependiendo de los cambios de rango de vibración para evitar pérdidas de datos importantes.

\*

## BIBLIOGRAFÍA

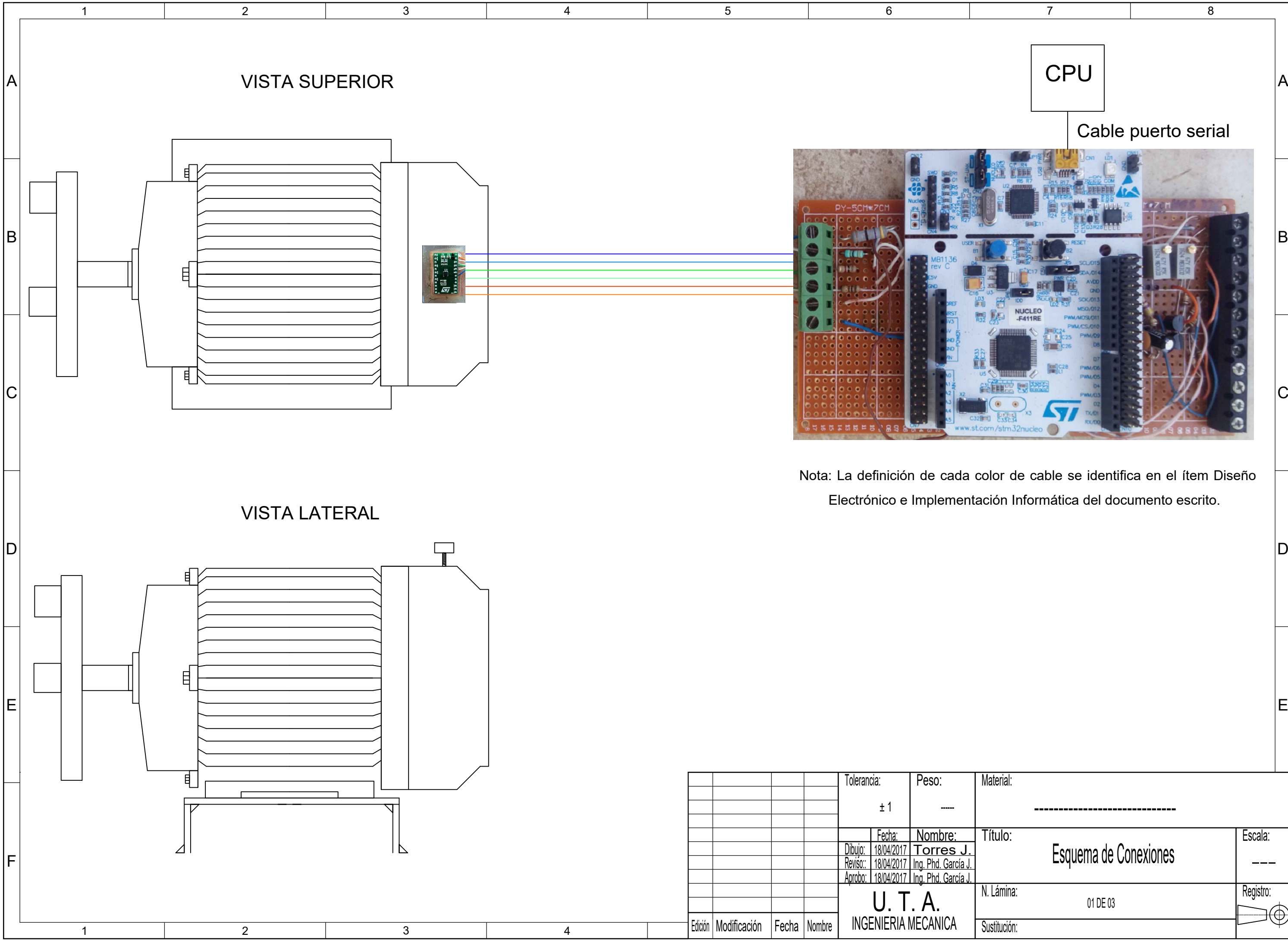
- [1] St, «<http://www.st.com/>,» Recuperado de: <https://goo.gl/ZmtvpI>.
- [2] nxp, «[www.nxp.com](http://www.nxp.com/),» Recuperado de : <https://goo.gl/il3fmk>
- [3] S. Singh, «A Review of Vibration Analysis Techniques for,» *Rotating Machines*, vol. IV, p. 5, 03 Marzo 2015.
- [4] M. S. K. M. Subimal Bikash Chaudhury, «Vibration Monitoring of Rotating Machines Using MEMS Accelerometer,» vol. II, p. 7, 9 Septiembre 2014.
- [5] J. M. a. L. M. Hongyu Yang, «Vibration Feature Extraction Techniques for Fault Diagnosis of Rotating Machinery,» p. 8, 2003.
- [6] N. R. P. Rivera, «Vibraciones mecánicas en motores rotativos trifásicos de 2 hp de potencia para prevenir desbalance mediante una estrategia de mantenimiento predictivo en el laboratorio de control y automatización de la facultad de Ingeniería Civil y Mecánica UTA.,» Ambato, 2015.
- [7] J. E. M. Morales, «Análisis de Vibraciones en Motores Eléctricos Asíncronos Trifásicos,» Guatemala, 2009.
- [8] G. E. Harper, Curso de Transformadores y Motores de Inducción, Cuarta ed., México: Limusa, S.A. de C.V., 2012.
- [9] Weg, «[ecatalog.weg.net](http://ecatalog.weg.net/),» 10 Abril 2016. Recuperado de: <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-motor-de-induccion-trifasico-de-alta-y-baja-tension-rotor-de-anillos-11171348-manual-espanol.pdf>.
- [10] P. N. Saavedra, «La medición y análisis de las vibraciones como técnica de inspección de equipos y componentes, aplicaciones, normativas y certificación.,» Chile.
- [11] I. D. A. Pernia-Márquez, «Introducción a la medición de vibración,» Venezuela, 2004.
- [12] L. I. E. Jesús Arrillaga, Armónicos en Sistemas de Potencia, España, 1994.
- [13] E. P. Marín, Elementos de Medición y Análisis de Vibraciones en Máquinas Rotatorias, Quinta ed., La Habana, 2007.

- [14] T. G. D. FABIÁN, «Análisis vibracional para la estandarización de tareas de mantenimiento preventivo y predictivo en la línea de producción de poliestireno expandible (eps) de la empresa “panecons”,» RIOBAMBA, 2012.
- [15] Y. M. R. Enrique Mandado Pérez, Sistemas electrónicos Digitales, Novena ed., México D.F.: Marcombo, Ediciones Técnicas, 2008.
- [16] P. N. G. Victor Hugo Zárate Silva, Lo esencial de la instrumentación moderna para mecatrónicos, Primera ed., Monterrey: Digital del Tecnológico de Monterrey, 2015.
- [17] Sinais, «[www.sinais.es](http://www.sinais.es),» 2013. Recuperado de: <https://goo.gl/VroMg2>
- [18] E. y. d. M. Departamento de Ingeniería Mecánica, «Normativa sobre vibraciones».
- [19] <http://www.analog.com>, «<http://www.analog.com>,» 2017. Recuperado de: <http://www.analog.com/en/products/mems/accelerometers.html>.
- [20] NXP, «[www.nxp.com](http://www.nxp.com),» Recuperado de: <https://goo.gl/uPf1UH>
- [21] St, «[www.st.com](http://www.st.com),» Recuperado de: <https://goo.gl/NfAarg>
- [22] kionix, «[www.kionix.com](http://www.kionix.com),» Recuperado de: <https://goo.gl/zZMAEq>



## **ANEXOS**

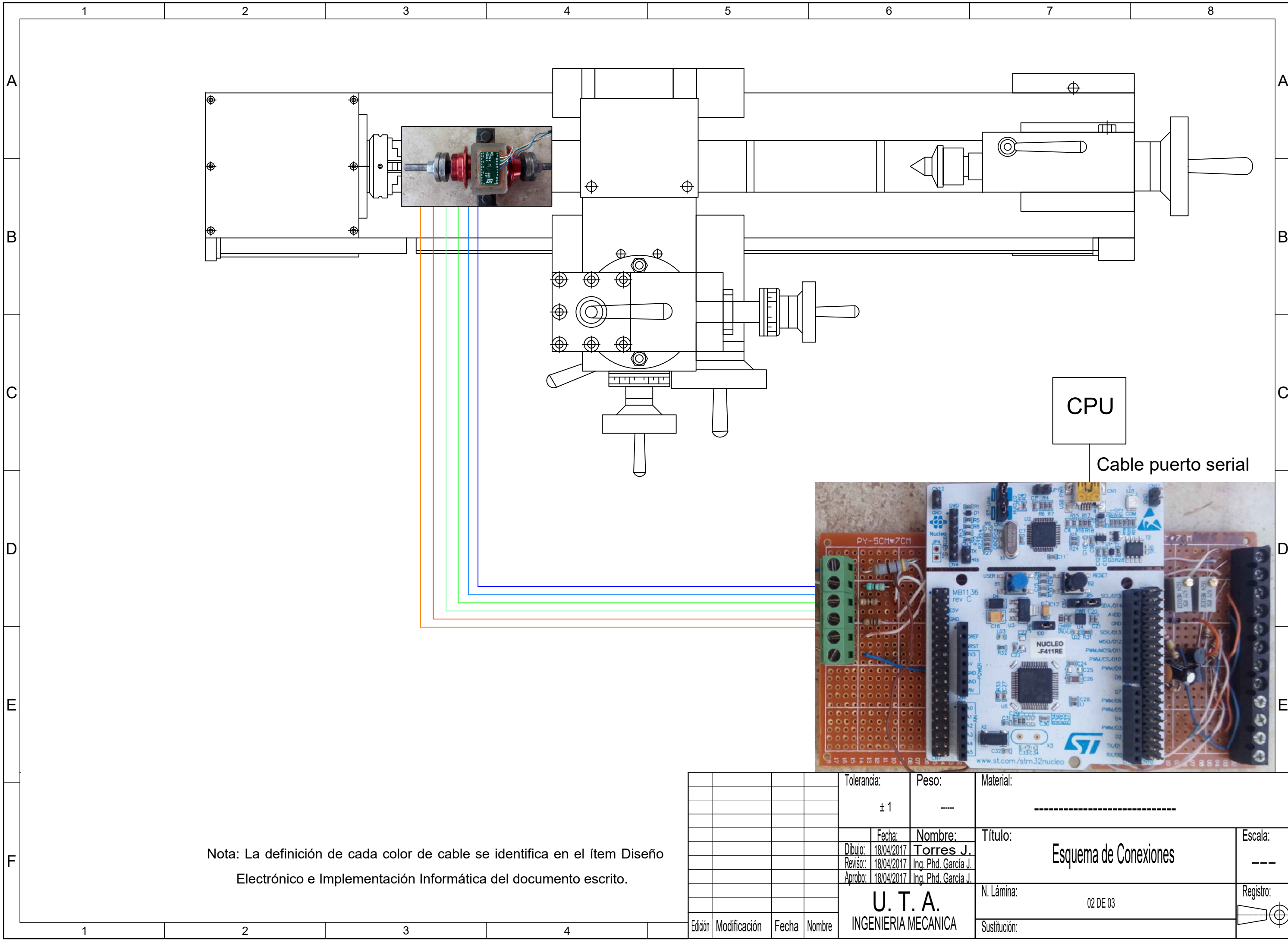
**Anexo 1.** Plano de conexión para medición de vibraciones con masas excéntricas.



Nota: La definición de cada color de cable se identifica en el ítem Diseño Electrónico e Implementación Informática del documento escrito.

				Tolerancia:	Peso:	Material:	
				± 1	----	-----	
				Fecha:	Nombre:	Título:	
				Dibujo: 18/04/2017	Torres J.	Esquema de Conexiones	
				Reviso: 18/04/2017	Ing. Phd. García J.	Escala:	
				Aprobo: 18/04/2017	Ing. Phd. García J.	---	
				U. T. A. INGENIERIA MECANICA		N. Lámina:	Registro:
						01 DE 03	⊕
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	Sustitución:			

**Anexo 2.** Planos de conexiones para medición de vibraciones para rodamientos.



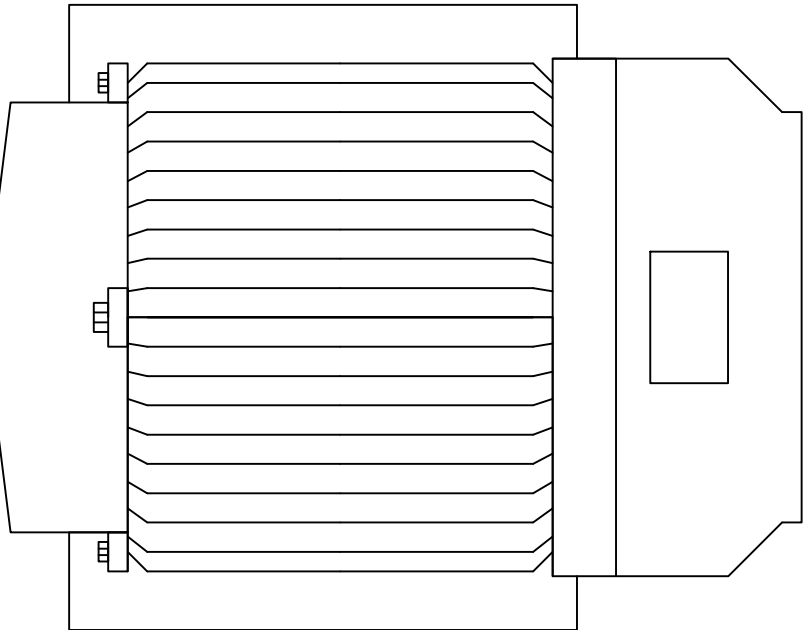
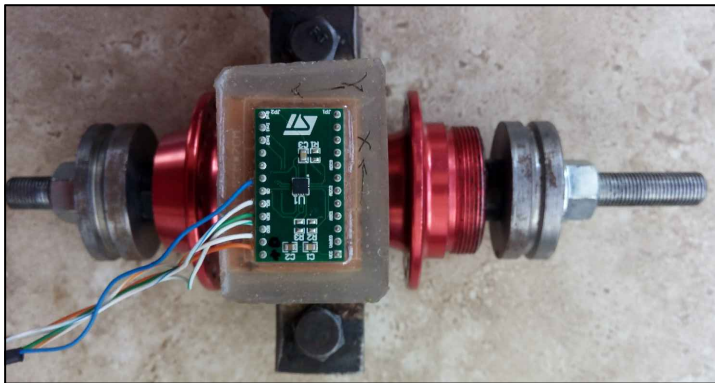
Nota: La definición de cada color de cable se identifica en el ítem Diseño Electrónico e Implementación Informática del documento escrito.

				Tolerancia:	Peso:	Material:	
				± 1	-----	-----	
				Fecha:	Nombre:	Título:	Escala:
				Dibujo: 18/04/2017	Torres J.	Esquema de Conexiones	---
				Reviso: 18/04/2017	Ing. Phd. García J.		
				Aprobo: 18/04/2017	Ing. Phd. García J.		
				U. T. A. INGENIERIA MECANICA		N. Lámina:	Registro:
						02 DE 03	⊕
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	Sustitución:			

1 2 3 4 5 6 7 8

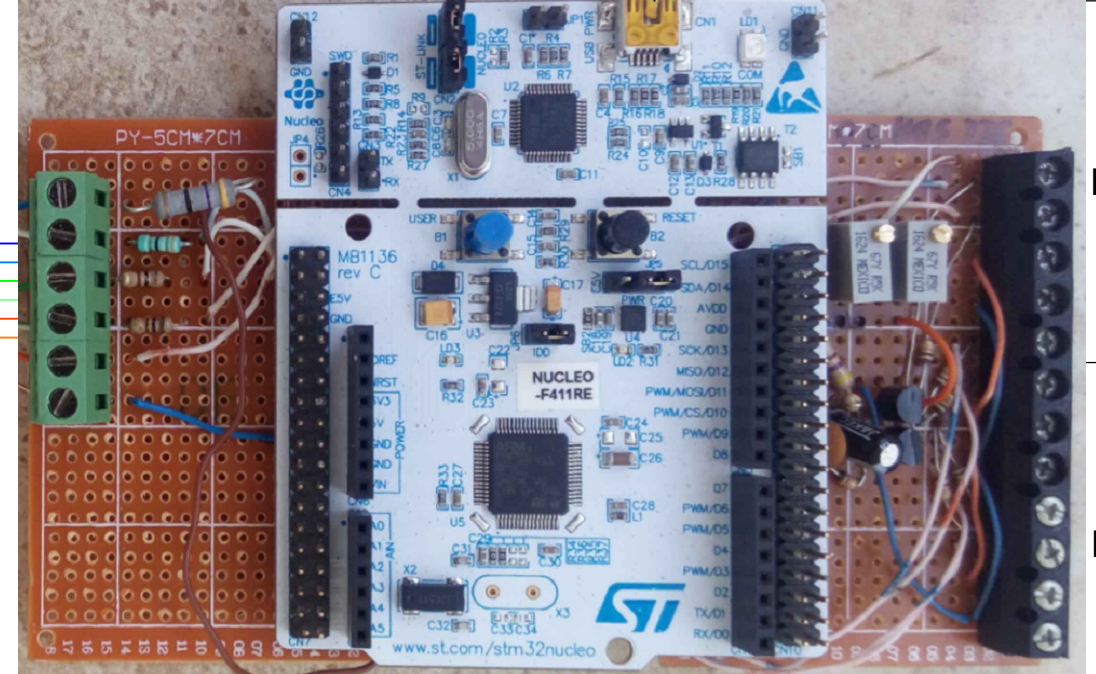
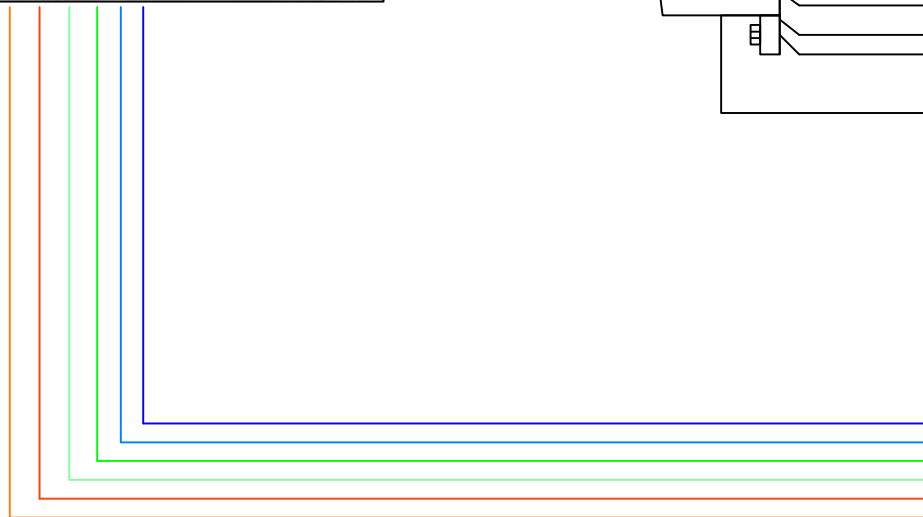
A  
B  
C  
D  
E  
F

VISTA SUPERIOR



CPU

Cable puerto serial



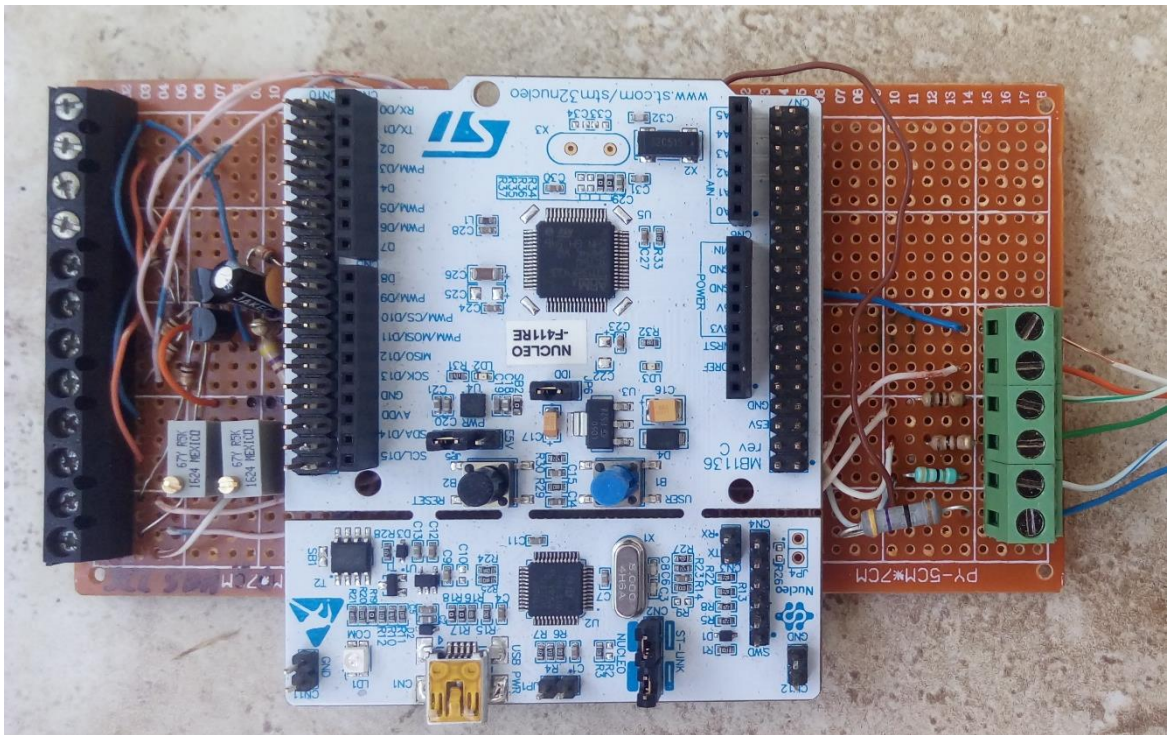
Nota: La definición de cada color de cable se identifica en el ítem Diseño Electrónico e Implementación Informática del documento escrito.

				Tolerancia:	Peso:	Material:	
				± 1	-----	-----	
				Fecha:	Nombre:	Título:	Escala:
				Dibujo: 18/04/2017	Torres J.	Esquema de Conexiones	---
				Reviso: 18/04/2017	Ing. Phd. García J.		
				Aprobo: 18/04/2017	Ing. Phd. García J.		
				U. T. A. INGENIERIA MECANICA		N. Lámina:	Registro:
						03 DE 03	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	Sustitución:			

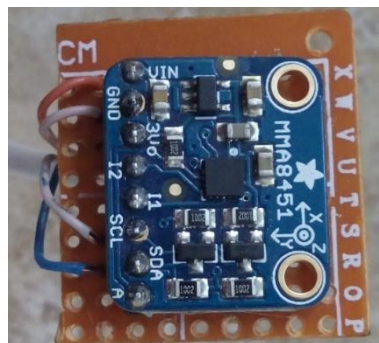
1 2 3 4



**Anexo 3.** Sistema electrónico realizado para la medición de vibraciones.



**Anexo 4.** Sensores de vibración LIS3DH Y MMA8451.

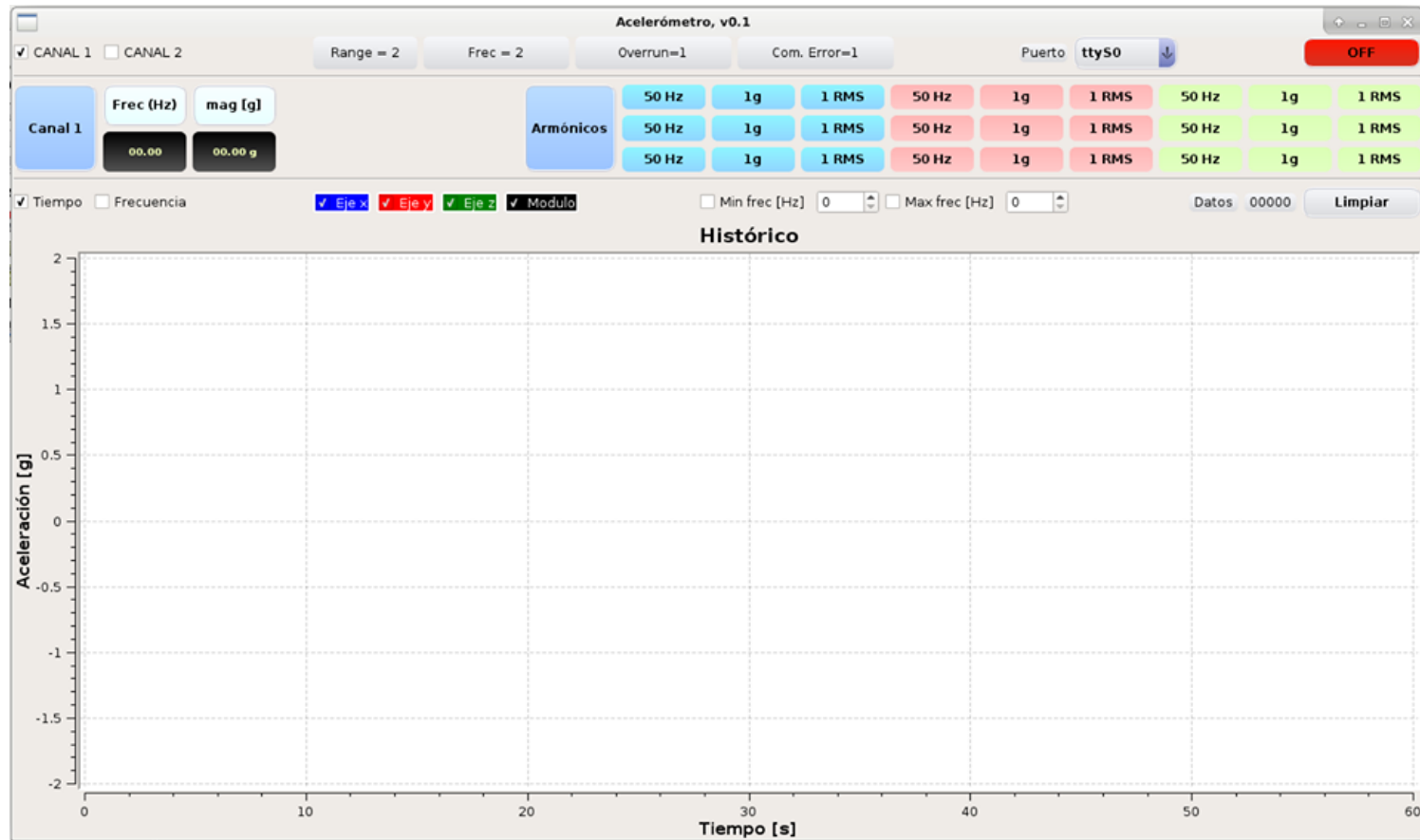


## Anexo 5 Características técnicas del motor.

### W22 - IE1 Standard Efficiency - 60 Hz

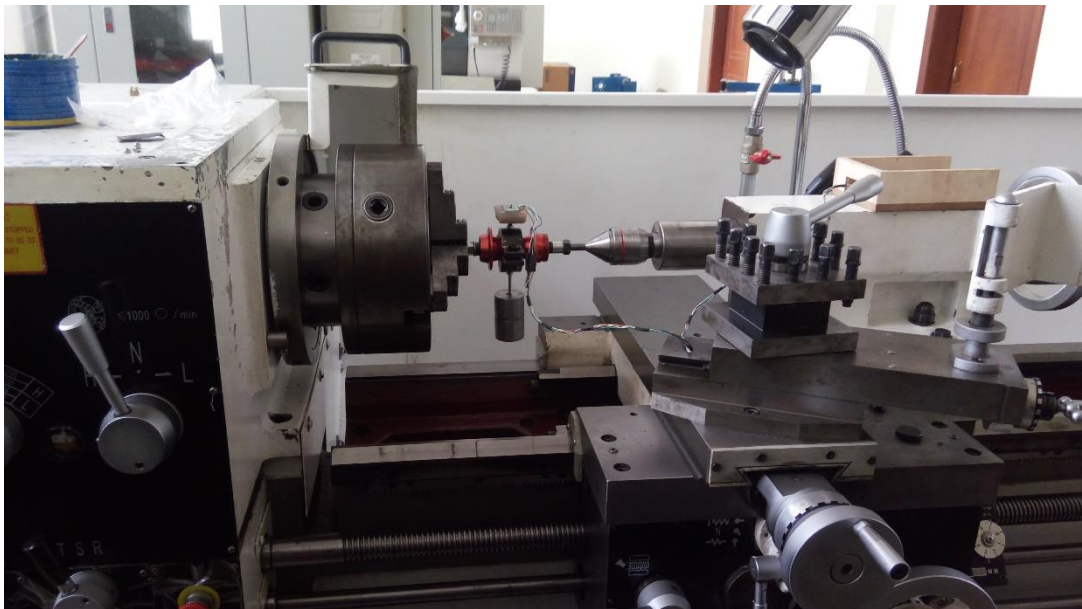
Potencia kW HP		Carcasa	Par nominal (kgfm)	Corriente con rotor trabado I/In	Par con rotor trabado Tl/Tn	Par máximo Tb/Tn	Momento de inercia J (kgm²)	Tiempo máximo con rotor trabado (s)		Peso (kg)	Nivel de ruido dB(A)	220 V						Corriente nominal In (A)	
								RPM	% de la potencia nominal			Factor de potencia							
									Rendimiento				Factor de potencia						
								Caliente	Frio			50	75	100	50	75	100		
VI Polos																			
0,12	0,16	63	0,105	3,2	2,0	2,2	0,0006	20	44	8,0	47	1115	42,0	48,0	49,0	0,43	0,52	0,60	1,07
0,18	0,25	71	0,158	2,8	1,7	1,9	0,0006	31	68	10,0	47	1110	50,0	52,0	52,5	0,38	0,48	0,57	1,58
0,25	0,33	71	0,231	2,8	1,9	2	0,0007	30	66	11,0	47	1055	48,0	54,0	58,0	0,43	0,52	0,63	1,80
0,37	0,5	80	0,312	3,9	2	2,1	0,0020	10	22	14,0	47	1155	60,0	61,5	62,0	0,46	0,57	0,66	2,37
0,55	0,75	80	0,474	4,5	2,2	2,4	0,0027	10	22	15,5	47	1130	58,0	61,0	66,0	0,46	0,57	0,71	3,08
0,75	1	90S	0,646	5,2	2,2	2,5	0,0044	15	33	17,5	49	1130	68,0	73,0	73,0	0,48	0,62	0,72	3,76
1,1	1,5	90S	0,948	5,3	2,5	2,7	0,0055	12	26	19,0	49	1130	71,0	74,5	75,1	0,46	0,60	0,70	5,50
1,5	2	100L	1,28	5,3	2,1	2,6	0,0099	20	44	27,5	48	1140	75,5	77,5	78,0	0,50	0,62	0,70	7,20
2,2	3	100L	1,88	5,0	2,1	2,4	0,0115	14	31	29,0	48	1140	76,7	78,5	78,6	0,52	0,64	0,72	10,2
3	4	112M	2,56	5,1	1,9	2,4	0,0201	12	26	39,0	52	1140	81,5	82,0	81,5	0,56	0,69	0,76	12,7
3,7	5	132S	3,11	5,9	1,9	2,5	0,0377	23	51	58,0	55	1160	81,5	83,5	83,7	0,52	0,65	0,72	16,1
4,5	6	132S	3,78	5,9	1,9	2,4	0,0415	22	48	59,0	55	1160	82,0	84,0	84,3	0,53	0,66	0,73	19,2
5,5	7,5	132M	4,62	6,1	2	2,5	0,0491	19	42	64,0	55	1160	83,5	85,0	85,2	0,55	0,67	0,74	22,8
7,5	10	132M	6,30	6,5	2,1	2,5	0,0642	14	31	75,0	55	1160	85,1	86,2	86,3	0,56	0,68	0,75	30,4
9,2	12,5	160M	7,66	5,6	2	2,4	0,1136	12	26	109	59	1170	86,0	87,5	87,7	0,62	0,75	0,81	34,0
11	15	160M	9,16	6,0	2	2,5	0,1486	12	26	122	59	1170	87,2	89,0	89,2	0,64	0,76	0,82	39,4
15	20	160L	12,5	6,1	2,3	2,7	0,1748	10	22	137	59	1170	87,5	89,3	89,6	0,61	0,74	0,80	55,0
18,5	25	180L	15,4	7,0	2,2	2,7	0,2425	6	13	170	59	1170	89,5	90,3	90,3	0,71	0,82	0,87	61,8
22	30	200L	18,2	6,0	2,1	2,3	0,3510	18	40	227	62	1175	90,5	91,1	91,1	0,75	0,81	0,85	74,6
30	40	200L	24,9	6,0	2,2	2,4	0,4029	12	26	214	62	1175	90,4	91,6	91,8	0,64	0,76	0,82	105
37	50	225S/M	30,5	6,8	2,1	2,5	0,7511	11	24	374	66	1180	92,0	92,5	92,3	0,73	0,82	0,86	122
45	60	250S/M	37,1	7,2	2,3	2,6	1,01	12	26	435	68	1180	92,2	92,7	92,6	0,72	0,82	0,86	148
55	75	250S/M	45,2	7,4	2,5	2,7	1,28	11	24	475	68	1185	93,0	93,5	93,2	0,71	0,81	0,85	182
75	100	280S/M	61,6	6,0	1,9	2,2	2,35	15	33	641	69	1185	93,0	93,6	93,3	0,70	0,80	0,84	252
90	125	280S/M	74,3	6,0	2	2,3	2,69	12	26	678	69	1180	93,2	93,7	93,6	0,70	0,80	0,84	300
110	150	315S/M	90,0	6,4	2	2,3	4,88	20	44	946	70	1190	93,4	94,3	94,3	0,68	0,79	0,83	368
132	180	315S/M	108	6,4	2,1	2,3	5,44	18	40	990	70	1190	93,5	94,4	94,4	0,70	0,79	0,83	442
150	200	315S/M	123	6,6	2,2	2,3	6,15	17	37	1044	70	1190	93,8	94,5	94,5	0,69	0,79	0,83	502
185	250	315L	151	6,7	2,4	2,4	9,53	13	29	1250	71	1190	94,0	94,6	94,6	0,70	0,79	0,83	618
200	270	315L	164	7,2	2,4	2,4	7,27	12	26	1305	71	1190	94,2	94,6	94,7	0,69	0,79	0,83	688
220	300	315L	180	7,6	2,6	2,6	11,0	11	24	1468	71	1190	94,3	94,7	94,8	0,68	0,78	0,83	734
260	350	355M/L	213	6,4	2,1	2,1	12,2	28	62	1769	77	1190	94,6	95,0	95,0	0,68	0,78	0,81	886
300	400	355M/L	246	6,3	2,2	2,1	14,3	26	57	1927	77	1190	94,7	95,2	95,2	0,67	0,77	0,80	1030
330	450	355M/L	270	6,3	2,2	2,1	15,0	26	57	1989	77	1190	94,9	95,3	95,3	0,67	0,77	0,80	1140
370	500	355M/L	303	6,3	2,2	2,3	15,0	25	55	1989	77	1190	95,0	95,4	95,4	0,63	0,74	0,79	1280

Anexo 6 Interfaz gráfica para la toma de datos.





- Pruebas realizadas en banco de pruebas para medición de rodamientos.



## **Anexo 7**

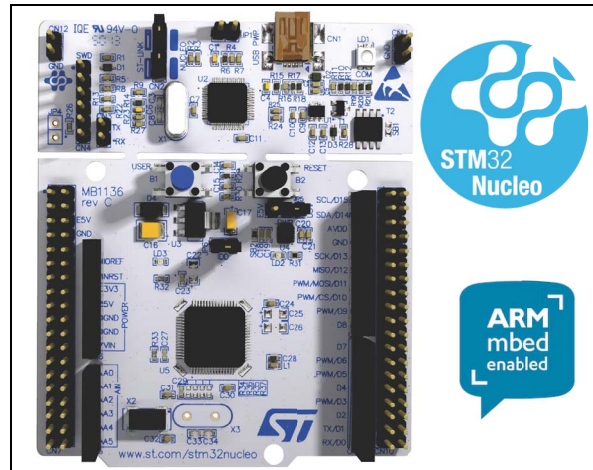
Datasheet's de los dispositivos electrónicos que se utilizó en la elaboración del proyecto.

### Features

- STM32 microcontroller in QFP64 package
- Two types of extension resources:
  - Arduino™ Uno V3 connectivity
  - ST morpho extension pin headers for full access to all STM32 I/Os
- ARM® mbed™ (see <http://mbed.org>)
- On-board ST-LINK/V2-1 debugger/programmer with SWD connector:
  - Selection-mode switch to use the kit as a standalone ST-LINK/V2-1
- Flexible board power supply:
  - USB VBUS or external source (3.3V, 5V, 7 - 12V)
  - Power management access point
- Three LEDs:
  - USB communication (LD1), user LED (LD2), power LED (LD3)
- Two push-buttons: USER and RESET
- USB re-enumeration capability. Three different interfaces supported on USB:
  - Virtual COM port
  - Mass storage
  - Debug port
- Support of wide choice of Integrated Development Environments (IDEs) including IAR™, ARM® Keil®, GCC-based IDEs

### Description

The STM32 Nucleo board provides an affordable and flexible way for users to try out new concepts and build prototypes with the STM32 microcontroller, choosing from the various combinations of performance, power consumption and features. The Arduino™ Uno V3 connectivity support and the ST morpho headers allow to expand easily the functionality of the STM32 Nucleo open development platform



1. Picture is not contractual

with a wide choice of specialized shields. The STM32 Nucleo board does not require any separate probe as it integrates the ST-LINK/V2-1 debugger and programmer. The STM32 Nucleo board comes with the STM32 comprehensive software HAL library together with various packaged software examples, as well as direct access to the ARM® mbed™ online resources at <http://mbed.org>.

**Table 1. Device summary**

Reference	Part number
NUCLEO-XXXXRX	NUCLEO-F030R8, NUCLEO-F070RB, NUCLEO-F072RB, NUCLEO-F091RC, NUCLEO-F103RB, NUCLEO-F302R8, NUCLEO-F303RE, NUCLEO-F334R8, NUCLEO-F401RE, NUCLEO-F410RB, NUCLEO-F411RE, NUCLEO-F446RE, NUCLEO-L053R8, NUCLEO-L073RZ, NUCLEO-L152RE, NUCLEO-L452RE, NUCLEO-L476RG.

## System requirement

- Windows® OS (XP, 7, 8) or Linux 64-bit or Mac OS® X
- USB Type-A to Mini-B cable

## Development toolchains

- ARM® Keil®: MDK-ARM<sup>(a)</sup>
- IAR™: EWARM<sup>(a)</sup>
- GCC-based IDEs (free AC6: SW4STM32, Atollic TrueSTUDIO®<sup>(a)</sup> and others)
- ARM® mbed™ online

## Demonstration software

Demonstration software is preloaded in the STM32 Flash memory for easy demonstration of the device peripherals in standalone mode. For more information and to download the latest version, refer to the demonstration software for the STM32 Nucleo board at the [www.st.com/stm32nucleo](http://www.st.com/stm32nucleo) website.

## Ordering information

[Table 2](#) lists the order codes and the respective targeted STM32.

**Table 2. Ordering information**

Order code	Targeted STM32
NUCLEO-F030R8	STM32F030R8T6
NUCLEO-F070RB	STM32F070RBT6
NUCLEO-F072RB	STM32F072RBT6
NUCLEO-F091RC	STM32F091RCT6
NUCLEO-F103RB	STM32F103RBT6
NUCLEO-F302R8	STM32F302R8T6
NUCLEO-F303RE	STM32F303RET6

a. On Windows® only.

**Table 2. Ordering information (continued)**

Order code	Targeted STM32
NUCLEO-F334R8	STM32F334R8T6
NUCLEO-F401RE	STM32F401RET6
NUCLEO-F410RB	STM32F410RBT6
NUCLEO-F411RE	STM32F411RET6
NUCLEO-F446RE	STM32F446RET6
NUCLEO-L053R8	STM32L053R8T6
NUCLEO-L073RZ	STM32L073RZT6
NUCLEO-L152RE	STM32L152RET6
NUCLEO-L452RE	STM32L452RET6
NUCLEO-L476RG	STM32L476RGT6

The meaning of the NUCLEO-TXXXRY codification is explained in [Table 3](#) with an example:

**Table 3. Codification explanation**

NUCLEO-TXXXRY	Description	Example: NUCLEO-L452RE
TXXX	STM32 product line	STM32L452
R	STM32 package pin count	64 pins
Y	STM32 Flash memory size (8 for 64 Kbytes, B for 128 Kbytes, C for 256 Kbytes, E for 512 Kbytes, G for 1 Mbyte, Z for 192 Kbytes)	512 Kbytes

The order code is printed on a sticker placed at the top or bottom side of the board.

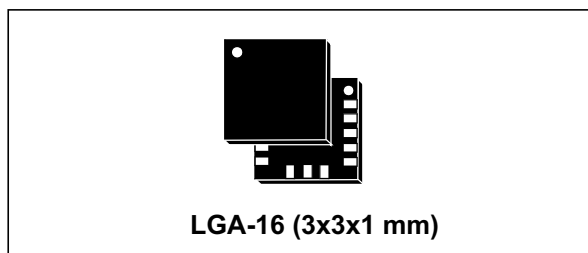
## Revision history

**Table 4. Document revision history**

Date	Revision	Changes
10-Feb-2014	1	Initial release.
13-Feb-2014	2	Added <a href="#">Table 1: Device summary</a> and updated <a href="#">Table 2: Ordering information</a> .
11-Apr-2014	3	Extended the applicability to NUCLEO-F302R8. Updated <a href="#">Table 1: Device summary</a> and <a href="#">Table 2: Ordering information</a> .
26-May-2014	4	Extended the applicability to NUCLEO-L053R8, NUCLEO-F072RB, NUCLEO-F334R8 and NUCLEO-F411RE Updated <a href="#">Table 1</a> and <a href="#">Table 2</a> .
09-Sep-2014	5	Extended the applicability to NUCLEO-F091RC and NUCLEO-F303RE. Updated <a href="#">Features</a> . Updated <a href="#">Table 1: Device summary</a> and <a href="#">Table 2: Ordering information</a> .
16-Dec-2014	6	Extended the applicability to NUCLEO-F070RB, NUCLEO-L073RZ and NUCLEO-L476RG. Updated <a href="#">Table 1: Device summary</a> and <a href="#">Table 2: Ordering information</a> .
08-Jul-2015	7	Extended the applicability to NUCLEO-F410RB, NUCLEO-F446RE. Updated <a href="#">Table 1: Device summary</a> and <a href="#">Table 2: Ordering information</a> .
29-Nov-2016	8	Extended the applicability to NUCLEO-L452RE. Updated <a href="#">Table 1: Device summary</a> and <a href="#">Table 2: Ordering information</a> . Added <a href="#">Table 3: Codification explanation</a> .

## MEMS digital output motion sensor: ultra-low-power high-performance 3-axis "nano" accelerometer

Datasheet - production data



### Features

- Wide supply voltage, 1.71 V to 3.6 V
- Independent IO supply (1.8 V) and supply voltage compatible
- Ultra-low-power mode consumption down to 2  $\mu$ A
- $\pm 2g/\pm 4g/\pm 8g/\pm 16g$  dynamically selectable full scale
- I<sup>2</sup>C/SPI digital output interface
- 16-bit data output
- 2 independent programmable interrupt generators for free-fall and motion detection
- 6D/4D orientation detection
- Free-fall detection
- Motion detection
- Embedded temperature sensor
- Embedded self-test
- Embedded 32 levels of 16-bit data output FIFO
- 10000 g high shock survivability
- ECOPACK<sup>®</sup>, RoHS and "Green" compliant

### Applications

- Motion activated functions
- Free-fall detection
- Click/double-click recognition
- Intelligent power saving for handheld devices
- Pedometers

- Display orientation
- Gaming and virtual reality input devices
- Impact recognition and logging
- Vibration monitoring and compensation

### Description

The LIS3DH is an ultra-low-power high-performance three-axis linear accelerometer belonging to the "nano" family, with digital I<sup>2</sup>C/SPI serial interface standard output. The device features ultra-low-power operational modes that allow advanced power saving and smart embedded functions.

The LIS3DH has dynamically user-selectable full scales of  $\pm 2g/\pm 4g/\pm 8g/\pm 16g$  and is capable of measuring accelerations with output data rates from 1 Hz to 5.3 kHz. The self-test capability allows the user to check the functioning of the sensor in the final application. The device may be configured to generate interrupt signals using two independent inertial wake-up/free-fall events as well as by the position of the device itself. Thresholds and timing of interrupt generators are programmable by the end user on the fly. The LIS3DH has an integrated 32-level first-in, first-out (FIFO) buffer allowing the user to store data in order to limit intervention by the host processor. The LIS3DH is available in small thin plastic land grid array package (LGA) and is guaranteed to operate over an extended temperature range from -40 °C to +85 °C.

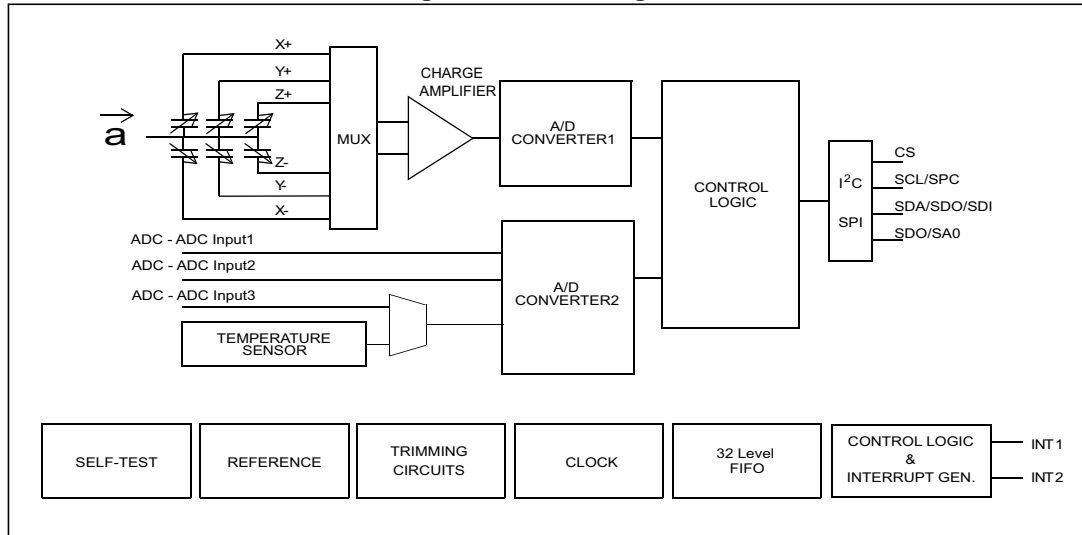
**Table 1. Device summary**

Order codes	Temp. range [°C]	Package	Packaging
LIS3DHTR	-40 to +85	LGA-16	Tape and reel

# 1 Block diagram and pin description

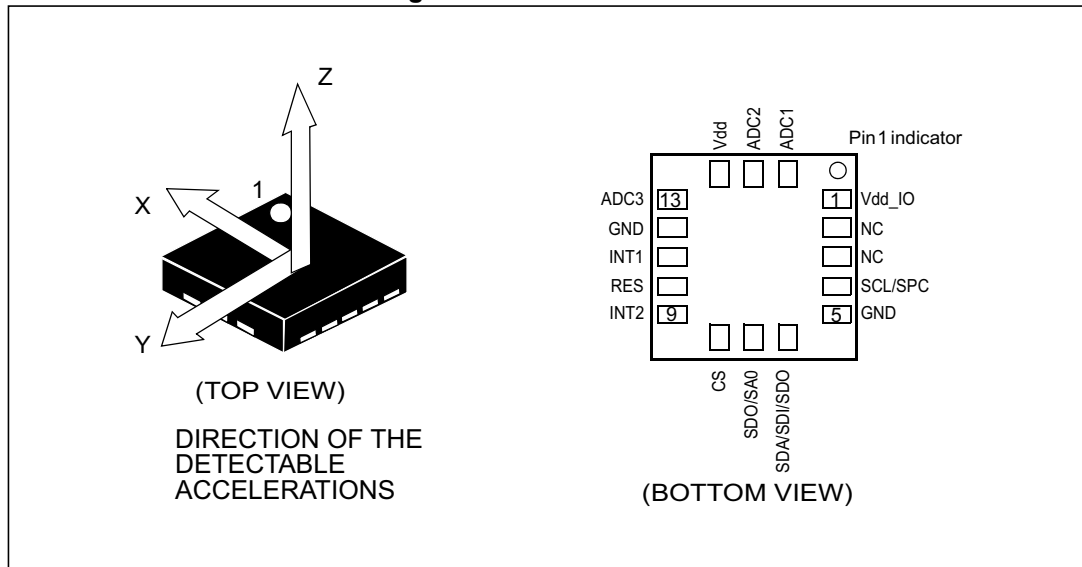
## 1.1 Block diagram

Figure 1. Block diagram



## 1.2 Pin description

Figure 2. Pin connections





## MMA8451Q, 3-axis, 14-bit/8-bit digital accelerometer

The MMA8451Q is a smart, low-power, three-axis, capacitive, micromachined accelerometer with 14 bits of resolution. This accelerometer is packed with embedded functions with flexible user programmable options, configurable to two interrupt pins. Embedded interrupt functions allow for overall power savings relieving the host processor from continuously polling data. There is access to both low-pass filtered data as well as high-pass filtered data, which minimizes the data analysis required for jolt detection and faster transitions. The device can be configured to generate inertial wakeup interrupt signals from any combination of the configurable embedded functions allowing the MMA8451Q to monitor events and remain in a low-power mode during periods of inactivity. The MMA8451Q is available in a 16-pin QFN, 3 mm x 3 mm x 1 mm package.

### Features

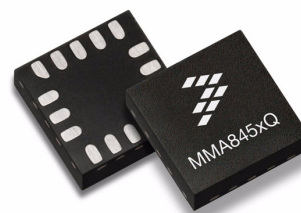
- 1.95 V to 3.6 V supply voltage
- 1.6 V to 3.6 V interface voltage
- $\pm 2 g/\pm 4 g/\pm 8 g$  dynamically selectable full scale
- Output data rates (ODR) from 1.56 Hz to 800 Hz
- 99  $\mu g/\sqrt{Hz}$  noise
- 14-bit and 8-bit digital output
- I<sup>2</sup>C digital output interface
- Two programmable interrupt pins for seven interrupt sources
- Three embedded channels of motion detection
  - Freefall or motion detection: one channel
  - Pulse detection: one channel
  - Jolt detection: one channel
- Orientation (portrait/landscape) detection with programmable hysteresis
- Automatic ODR change for auto-wake and return to sleep
- 32-sample FIFO
- High-pass filter data available per sample and through the FIFO
- Self-test
- Current consumption: 6  $\mu A$  to 165  $\mu A$

### Typical Applications

- E-compass applications
- Static orientation detection (portrait/landscape, up/down, left/right, back/front position identification)
- Notebook, e-reader, and laptop tumble and freefall detection
- Real-time orientation detection (virtual reality and gaming 3D user position feedback)
- Real-time activity analysis (pedometer step counting, freefall drop detection for HDD, dead-reckoning GPS backup)
- Motion detection for portable product power saving (auto-sleep and auto-wake for cell phone, PDA, GPS, gaming)
- Shock and vibration monitoring (mechatronic compensation, shipping and warranty usage logging)
- User interface (menu scrolling by orientation change, tap detection for button replacement)

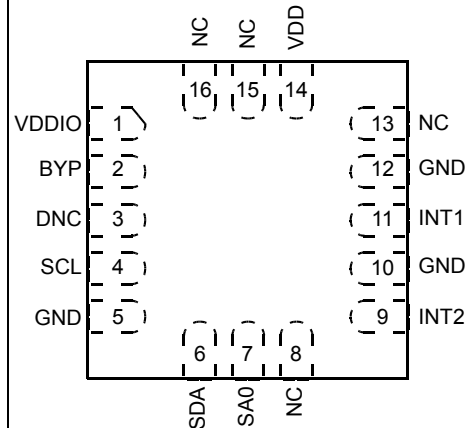
## MMA8451Q

### Top and bottom view



16-pin QFN  
3 mm x 3 mm x 1 mm

### Top view



Pin connections

### Ordering information

Part number	Temperature range	Package description	Shipping
MMA8451QT	-40 °C to +85 °C	QFN-16	Tray
MMA8451QR1	-40 °C to +85 °C	QFN-16	Tape and Reel

# 1 Block Diagram and Pin Description

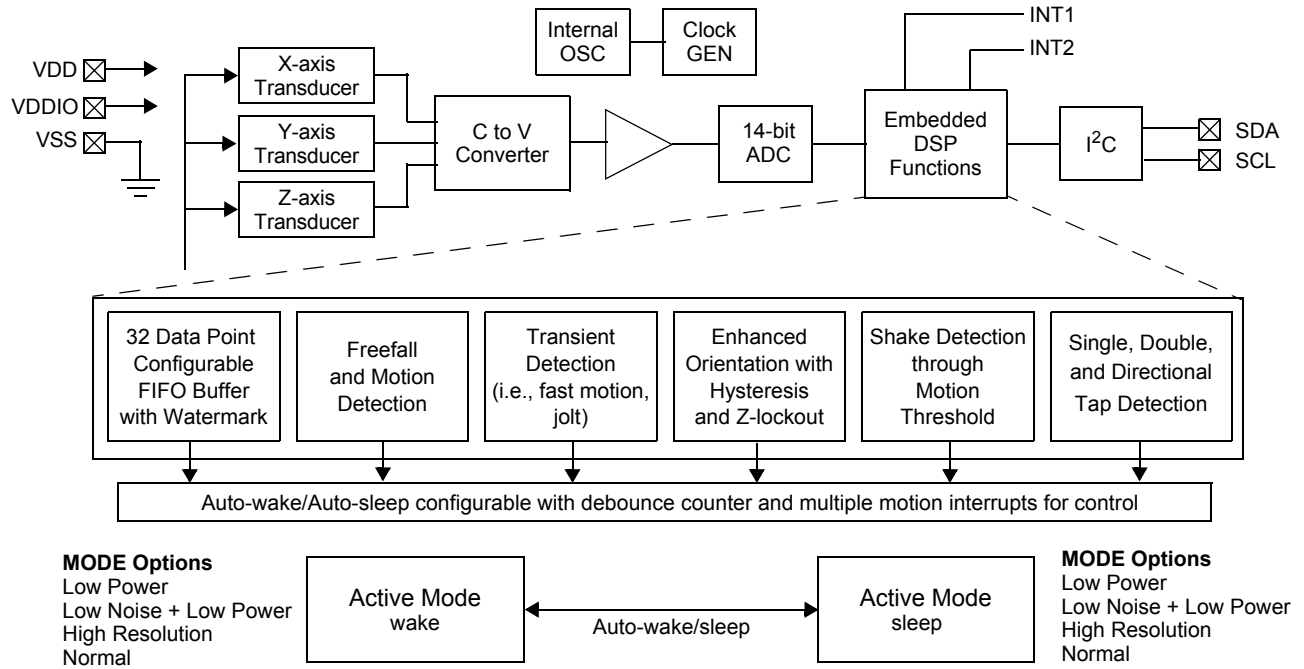


Figure 1. Block diagram

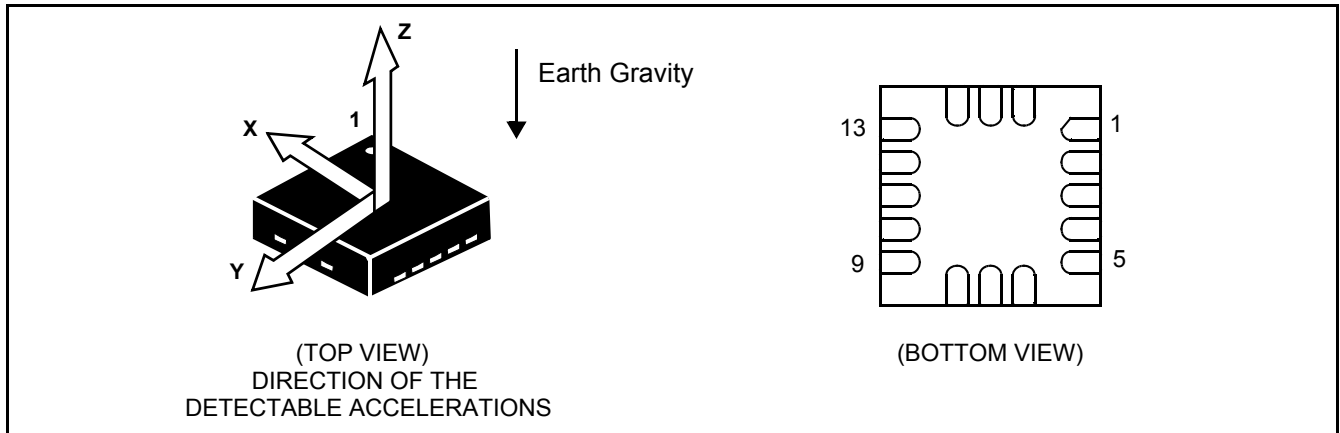


Figure 2. Direction of the detectable accelerations

## Urkund Analysis Result

**Analysed Document:** Tesis Torres Jonathan.pdf (D26665223)  
**Submitted:** 2017-03-22 14:39:00  
**Submitted By:** jav.garcia@uta.edu.ec  
**Significance:** 2 %

### Sources included in the report:

Tesis - Nelson Poaquiza.pdf (D14237076)  
PROYECTO DE VIBRACIONES.pdf (D21351492)  
proyecto vibraciones revelo, casa.pdf (D21351498)  
<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-motor-de-induccion-trifasico-de->

### Instances where selected sources appear: