

RAE

- 1. TIPO DE DOCUMENTO:** Trabajo de grado para optar al título de INGENIERO DE SONIDO
- 2. TÍTULO:** DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE VIBRACIONES PORTÁTIL.
- 3. AUTORES:** Donaldo García Mendieta, Carlos Alberto Hernández Carvajal, y Paulo Andrés Morillo Muñoz
- 4. LUGAR:** Bogotá, D.C
- 5. FECHA:** Enero de 2016
- 6. PALABRAS CLAVE:** Vibrómetro, Acústica, Vibraciones, Análisis de vibraciones, Matlab, Sistemas Embebidos, Normas Internacionales, Conversión Análogo - Digital, Medición de Vibraciones.
- 7. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO:** En este proyecto , se obtiene como resultado un vibrómetro que permite medir y analizar mediante un software las vibraciones, con el fin de diagnosticar fallas en estructuras arquitectónicas, máquinas y el ser humano, dando la opción de ingresar normas que regulen los niveles de exposición a estas vibraciones. Para evaluar el correcto funcionamiento del dispositivo se compara con un sistema de medición y análisis de uso profesional (Pro 117/EXT), obteniendo el porcentaje de error relativo que se presenta, mediante un enfoque empírico analítico donde aplicando conocimientos adquiridos durante la etapa de Estudios (pregrado ingeniería de sonido) en áreas de ciencias básicas, programación, electrónica, acústica y vibraciones principalmente.
- 8. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN:** Línea de Investigación de la USB: Tecnologías actuales y Sociedad. Sub línea de Facultad de Ingeniería: Acústica y Vibraciones, Procesamiento de señales. Campo Temático del Programa: Acústica y vibraciones.
- 9. METODOLOGÍA:** El enfoque del proyecto será empírico analítico, debido a que se utilizará el conocimiento adquirido durante la etapa de estudios en las áreas de ciencias básicas, programación, electrónica, acústica y vibraciones principalmente.
- 10. CONCLUSIONES:** El vibrómetro es una herramienta útil para medir y analizar niveles de vibración por lo tanto es necesaria para el ingeniero de sonido que opte por desempeñarse en el campo de las vibraciones, con el fin de desarrollar métodos para prevenir o controlar niveles de vibración que según normativas afecten a máquinas, estructuras arquitectónicas y seres humanos. De este modo se pretende generar inquietudes o motivaciones para explorar sistemas de medición y análisis portátil como el realizado en este proyecto (Vibration Analyzer VCDP).

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE
VIBRACIONES PORTÁTIL.

PAULO ANDRÉS MORILLO MUÑOZ
CARLOS ALBERTO HERNÁNDEZ CARVAJAL
DONALDO GARCÍA MENDIETA

UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA DE SONIDO
BOGOTÁ D.C
SEGUNDO SEMESTRE DE 2015

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE
VIBRACIONES PORTÁTIL.

PAULO ANDRÉS MORILLO MUÑOZ
CARLOS ALBERTO HERNÁNDEZ CARVAJAL
DONALDO GARCÍA MENDIETA

Trabajo de grado para obtener el título de Ingeniero de sonido

Asesor: LUIS JORGE HERRERA FERNÁNDEZ
MÁSTER EN INGENIERÍA ACÚSTICA EN LA INDUSTRIA Y EL TRANSPORTE

UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA DE SONIDO
BOGOTÁ D.C
SEGUNDO SEMESTRE DE 2015

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma jurado

Firma jurado

DEDICATORIA

A Padres y familiares quienes han dedicado su vida para formarnos en el largo camino de la vida. Brindándonos la oportunidad de convertirnos en profesionales, alcanzando la meta de ser ingenieros de sonido.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios, a la vida y al sonido. A nuestros padres que siempre han estado ahí con su ejemplo y dedicación que empujan a seguir adelante. A todos los profesores que aportaron con conocimientos que forman un carácter profesional, a nuestro tutor el Físico Luis Jorge Herrera Fernández que nos orientó en la elaboración de este proyecto.

Gracias a nuestras novias que nos apoyaron en los momentos que más las necesitábamos (siempre). Siendo la fuerza que nos hace entrar en resonancia.

Donaldo García y Carlos Hernández

Gracias a todos aquellos que participaron en esta etapa de mi vida, familia, amigos, profesores y compañeros que con su apoyo y sabiduría aportaron a mi formación profesional.

Paulo Morillo Muñoz

TABLA DE CONTENIDO

1.	Introducción.....	16
2.	Planteamiento del problema	17
2.1	Antecedentes	17
2.1.1	Sistemas embebidos [4]	17
2.1.2	La medición y análisis de las vibraciones como técnica de inspección de equipos y componentes, aplicaciones, normativas y certificación. [5].....	17
2.1.3	Frecuencias de vibraciones teóricas y experimentales de un edificio de nueve niveles localizado en la vecindad de la zona rio de Tijuana, Bc, México [6]	17
2.1.4	Diseño y montaje de un dispositivo, para determinar las frecuencias vibratorias de objetos, en los ejes X, Y, Z, en un rango de 0.5 Hz – 500 Hz. [7]	18
2.1.5	CMDM 6700 series I-Pro [8].....	18
2.1.6	DSP Logger Expert. [9]	19
2.1.7	Pro-117/EXT [10].....	19
2.1.8	Calibrador de Vibraciones SV111 [11].....	20
2.2	Descripción y formulación del problema.....	21
2.3	Justificación.....	22
2.4	Objetivos	23
2.4.1	Objetivo General.....	23
2.4.2	Objetivos específicos	23
2.5	Alcances y limitaciones.....	24
2.5.1	Alcances.....	24
2.5.2	Limitaciones.....	24
3	Metodología.....	25
3.1	Línea de investigación de la universidad/Línea de investigación de la facultad/Núcleos problemáticos.	25
3.1.1	Enfoque de la investigación.....	25
3.2	Hipótesis.....	26
3.3	Variables.....	26
3.3.1	Variables dependientes.	26
3.3.2	Variables Independientes.....	26
3.4	Metodología de diseño	27
4	Marco Teórico-Conceptual.....	28
4.1	Técnicas De Análisis De Vibraciones [22]	29

4.1.1	Análisis espectral.	29
4.1.2	Análisis de la forma de onda.....	29
4.1.3	Análisis de fase de vibraciones.....	29
4.2	Normativa Existente En El Análisis De Vibraciones [23]	30
4.2.1	Respecto a las máquinas	30
4.2.2	Respecto a las estructuras.....	30
4.2.3	Respecto a las personas.....	31
4.3	Tipos de acelerómetros.....	32
4.4	Excitadores de vibración (Shakers) [26] [27]	33
4.5	Conversión Análoga – Digital [28] [29]	35
4.5.1	Muestreo	36
4.5.2	Cuantificación.....	36
4.5.3	Codificación.....	36
4.5.4	Tarjeta de adquisición de datos NI myDAQ.....	36
4.5.5	Tarjeta de adquisición de datos USB Multifunción (USB-1208FS).....	37
4.6	Procesamiento de la señal	38
4.6.1	Ventaneo De Una Señal [30] [31].....	38
4.6.2	Transformada de Fourier [32] [33]	39
4.6.3	Raíz Cuadrática Media (RMS) [34].....	40
4.6.4	Auto Power Spectrum (APS) espectro de potencia automático [35].....	43
4.6.5	Cross Power Spectrum (CPS) Espectro de potencia cruzada [36].....	43
4.7	Sistemas Embebidos [37] [38] [39] [40].....	43
4.7.1	Arquitectura de los sistemas embebidos.....	44
4.7.2	Microprocesador	44
4.7.3	Memoria.....	45
4.7.4	Módulos de entrada y salida	45
4.7.5	Características de los sistemas embebidos.....	45
4.7.6	Limitaciones de los sistemas embebidos	46
4.7.7	Microcontrolador	46
4.7.8	Arduino	46
4.7.9	Raspberry Pi B+.....	47
4.7.10	Panda Board	48

5	Desarrollo Ingenieril.....	49
5.1	Referente a la señal:	49
5.2	Adecuación de la señal y adquisición de datos	52
5.2.1	Alimentación del acelerómetro triaxial.....	52
5.2.1	Muestreo, cuantificación y codificación:	54
5.2.2	Tarjeta de adquisición de datos.....	58
5.2.3	Filtro Anti Aliasing	59
5.2.4	Preamplificador	59
5.3	Hardware	64
5.3.1	Formas de eliminar o disminuir el ruido eléctrico [47]	64
5.1.1	Acople de impedancias	64
5.1.2	Especificaciones del hardware.....	65
5.1.3	Características del hardware utilizado respecto a otros sistemas embebidos	66
5.1.4	Medición e implementación de la etapa del hardware.....	67
5.1.5	Diseño y ensamble de carcasa para vibrómetro portátil VCDP.....	68
5.1.6	Ensamble completo del dispositivo VCDP.....	70
5.2	Sistema de calibración para el vibrómetro portátil (Shaker VCDP)	71
5.2.1	Diseño y construcción del shaker VCDP.....	71
5.3	Software	76
5.3.1	Programación del software para adquisición de datos.....	76
5.3.2	Medición general del dispositivo	78
6	Presentación y análisis de resultados.....	79
6.1	Medición de estructuras Guillermo de Ockham según BS7385 parte 2:	79
6.1.1	Medición con Pro 117/EXT- dBFA.....	81
6.1.2	Medición con Vibration Analyzer VCDP	85
6.2	Medición de vibraciones en el cuerpo humano.....	86
6.2.1	Medición con Pro117/EXT – dBFA.....	87
6.2.2	Medición con Vibration Analyzer VCDP.....	95
6.3	Medición de la vibración de una sierra eléctrica según la ISO10816-1.....	98
6.3.1	Medición con Pro117/EXT - dBFA	99
6.3.2	Medición con Vibration Analyzer VCDP.....	102
6.4	Error relativo	103

7	Conclusiones y Recomendaciones.....	109
7.1	Conclusiones.....	109
7.2	Recomendaciones	110
8	Bibliografía.....	111
9.	Anexos	115

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Cuadro Metodológico. Fuente propia	27
Ilustración 2. Comparación de acelerómetros según materiales de construcción. Tomado de: http://www.tav.net/transductores/acelerometros-sensores-piezoelectricos.pdf	32
Ilustración 3. Proceso de fabricación de un acelerómetro piezoeléctrico. Tomado de: http://www.tav.net/transductores/acelerometros-sensores-piezoelectricos.pdf	33
Ilustración 4. Ejemplo de Shaker de uso general. Tomada de http://www.bksv.es/Products/shakers-excitters	34
Ilustración 5. Shaker profesional. Tomado de: http://www.bksv.es/Products/shakers-excitters/lds-vibration-test/shakers/low-force	34
Ilustración 6. Partes de un conversor A/D. Fuente: Proakis, Jhon G. (1998) Tratamiento digital de señales.	35
Ilustración 7. Tarjeta de adquisición de datos (NI myDAQ). Tomado de: http://sine.ni.com/images/products/us/05041214_m.jpg	37
Ilustración 8. Tarjeta de adquisición de datos (USB-1208FS) Tomado de: http://www.mccdaq.com/products/LargeImage.aspx?oid=54	37
Ilustración 9. Arquitectura general de un sistema embebido. Tomado de: Microprocesadores y microcontroladores 8085, MCS-51 y ST-6.....	44
Ilustración 10. Arquitectura del microcontrolador 8048. Tomado de: Microprocesadores y microcontroladores 8085, MCS-51 y ST-6.....	46
Ilustración 11. Arduino. Tomado de: http://co.mouser.com/newproducts/newproductsmanufacturers.aspx?mfg=arduino&virtualdir=arduinomega2560%2f	47
Ilustración 12. Arquitectura de Raspberry Pi B+ tomado de: https://www.raspberrypi.org/products/model-b-plus/	48
Ilustración 13. Tarjeta PandaBoard. Tomado de: http://pandaboard.org/pbirclogs/index.php?date=2011-07-06	48
Ilustración 14 Implementación de la etapa del hardware. Fuente propia.	49
Ilustración 15. Esquemático integrado XL6009. Tomado de: http://www.electroschematics.com/10625/12v-universal-laptop-notebook-charger/	53
Ilustración 16 Datos alimentación eléctrica acelerómetro Wilcoxon 993A. Tomado de. http://www.wilcoxon.com/prodpdf/993A(98292d3).pdf	54
Ilustración 17. Datos alimentación eléctrica acelerómetro Wilcoxon 993A. Tomado de. http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/123456789/4783/BARBOZA_ANDERSON_SISTEMA_FALLAS_BOMBA_CENTRIFUGA_ANEXOS.pdf?sequence=2	54
Ilustración 18. Ejemplo de rango dinámico. Fuente propia.	55
Ilustración 19. Circuito amplificador no inversor. Fuente propia.....	60
Ilustración 20. Circuito empleado para simular amplificador no inversor. Fuente propia.	61
Ilustración 21. Simulación osciloscopio amplificador no inversor. Fuente propia.....	62
Ilustración 22. Esquemático de fuente dual a partir de fuente simple. Fuente propia.	63

Ilustración 23 Medición de puntos del elevador. Fuente propia	67
Ilustración 24 Medición de los amplificadores de voltaje de salida del transductor triaxial. Fuente propia.	68
Ilustración 25 Plano de diseño de carcasa (Vista lateral). fuente: propia	69
Ilustración 26 Fotografía carcasa terminada (Vista lateral). fuente: propia.....	69
Ilustración 27 División de los puntos más importantes del Hardware. fuente: propia	70
Ilustración 28 Parlante utilizado para implementar el shaker. Fuente: Propia	71
Ilustración 29 Parlante sin cono y con el sistema acoplado. Fuente: Propia	72
Ilustración 30. Circuito esquemático de amplificador TDA2003	72
Ilustración 31 Calibrador terminado con acople para acelerómetro. Fuente: Propia.....	73
Ilustración 32 Diagrama de medición para cálculo de desplazamiento del cono Fuente: Propia. 75	
Ilustración 33 Medición para el cálculo del desplazamiento del cono Fuente: Propia.....	75
Ilustración 34 Estructura de diseño del programa. Fuente propia	76
Ilustración 35 Representación señal de prueba de adquisición de datos. Fuente propia	77
Ilustración 36 medición de prueba a 0.1 Hz	78
Ilustración 37 medición de prueba a 6 KHz.....	79
Ilustración 38 Medición de estructuras. Fuente: Propia.....	80
Ilustración 39 Medición de estructuras en el edificio Guillermo de Ockham Fuente Propia	81
Ilustración 40 Resultado de la medición en el dBFA. Fuente: Propia	82
Ilustración 41 Resultado de la medición en el dBFA. Fuente: Propia	83
Ilustración 42 Resultado de la medición en el dBFA. Fuente: Propia	84
Ilustración 43 Resultado de la medición en el VCDP Fuente: Propia	85
Ilustración 44 Medición en el cuerpo humano Fuente: Propia	86
Ilustración 45 Resultado de la medición en el dBFA Fuente: Propia	87
Ilustración 46 Resultado de la medición en el dBFA Fuente: Propia	88
Ilustración 47 Resultado de la medición en el dBFA Fuente: Propia.....	89
Ilustración 48 Resultado de la medición en el dBFA Fuente: Propia	89
Ilustración 49 Resultado de la medición en el dBFA Fuente: Propia	90
Ilustración 50 Resultado de la medición en el dBFA Fuente: Propia	91
Ilustración 51 Resultado de la medición en el dBFA Fuente: Propia	91
Ilustración 52 Resultado de la medición en el dBFA. Fuente: Propia	92
Ilustración 53 Resultado de la medición en el dBFA. Fuente: Propia	93
Ilustración 54 Resultado de la medición en el VCDP Fuente: Propia	95
Ilustración 55 Resultado de la medición en el VCDP Fuente: Propia	96
Ilustración 56 Resultado de la medición en el VCDP Fuente: Propia	97
Ilustración 57 Medición para normativa en máquinas ISO 10816 fuente: propia	98
Ilustración 58 Resultado de la medición en el dBFA Fuente: Propia	99
Ilustración 59 Resultado de la medición en el dBFA Fuente: Propia	100
Ilustración 60 Resultado de la medición en el dBFA Fuente: Propia	100
Ilustración 61 Resultado de la medición en el VCDP Fuente: Propia	102

Ilustración 62 Resultado de la medición en el dBFA. Fuente: Propia	104
Ilustración 63 Resultado de la medición en el dBFA Fuente: Propia	105
Ilustración 64 Resultado de la medición en el dBFA Fuente: Propia	106
Ilustración 65 Resultado de la medición en el dBFA Fuente: Propia	107
Ilustración 66 Resultado de la medición en el dBFA Fuente: Propia	108
Ilustración 67 Resultado de la medición en el dBFA Fuente: Propia	108

Índice de Tablas

Tabla 1 Especificaciones para diseño de sistema Tomado de: http://www.mccdaq.com/PDFs/manuals/USB-1208FS.pdf	38
Tabla 2 Resumen hojas de especificaciones transductores empleados. Tomado de: http://www.wilcoxon.com/prodpdf/731A-P31%2098079a1.pdf	50
Tabla 3 Resumen valores mínimos, rangos de frecuencias y unidades de medida tomados de normas internacionales Tomado de: ISO 10816, ISO2631 y BS7385.....	51
Tabla 4 Especificación del uso del acelerómetro según el tipo de medición.....	52
Tabla 5 Especificaciones para diseño de sistema Tomado de: Fuente propia.	52
Tabla 6 Comparación tarjetas de adquisición de datos	59
Tabla 7 Comparación de los sistemas embebidos contemplados para el proyecto.....	66
Tabla 9 Resultados de la medición es Estructuras	86
Tabla 10 Resultados de la medición en seres humanos según dBFA	94
Tabla 11 Resultados de la medición en los Seres Humanos según VCDP	98
Tabla 12 Resultados medición en Maquinas según dBFA	101
Tabla 13 Resultados de la medición en Maquinas según VCDP.....	102
Tabla 14 Comparación de las mediciones obtenidas con ambos sistemas	103
Tabla 15 Valores finales después de aplicar el filtro wk	105
Tabla 16 Valores finales después de aplicar el filtro wk	107
Tabla 17 Valores finales después de aplicar el filtro wk	109

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1 Función ventana Rectangular	39
Ecuación 2 Función ventana Hann	39
Ecuación 3 Función ventana Hamming	39
Ecuación 4 Función ventana Blackman	39
Ecuación 5 Transformada de Fourier.....	40
Ecuación 6 Transformada inversa de Fourier	40
Ecuación 7 Cálculo de valor RMS para señales periódicas	40
Ecuación 8 Valor RMS de señal digitalizada	41
Ecuación 9 Energía total según Rayleigh	41
Ecuación 10 Valor RMS de una señal sinusoidal	42
Ecuación 11 Potencia automática del espectro	43
Ecuación 12 Espectro de potencia cruzada.....	43
Ecuación 13 Cantidad de fracciones de la señal	55
Ecuación 14 Cantidad de bits necesarios	57
Ecuación 15 Voltaje de salida.....	60
Ecuación 16 Voltaje de salida en temrinos de RF	60
Ecuación 17 Voltaje de salida en terminos de Ri	60
Ecuación 18 Voltaje de salida en terminos de RF y Ri.....	60
Ecuación 19 Ganancia.....	61
Ecuación 20 Porcentaje de energía no perdida entre etapas	65
Ecuación 21 Desplazamiento.....	73
Ecuación 22 Derivada para obtener la velocidad.....	73
Ecuación 23 Derivada para obtener la aceleración	73
Ecuación 24 Derivada para obtener la aceleración cuando el desplazamiento es cero	74
Ecuación 25Relacion de aceleración lineal con decibeles	88
Ecuación 26 Aceleración promedio para los tres ejes ortogonales.....	93

1. Introducción

La vibración es un movimiento oscilatorio que según sus características (amplitud, frecuencia, duración y fase), pueden afectar distintos sistemas tales como: humanos, estructuras arquitectónicas y máquinas. Las grandes industrias que fabrican productos en masa cuentan con herramientas mecánicas que agilizan este proceso siendo fundamentales para la línea de producción tanto así que si alguna de estas fallara la empresa podría perder tiempo, dinero y materia prima. [1] No obstante no sólo se ven afectadas las empresas sino también los seres humanos estando expuestos a enfermedades como el síndrome de Raynaud o dedo blanco, pérdida de sensibilidad, entre otras. [2] Debido a esto se crean instrumentos de medición y análisis para observar su comportamiento y de esta manera encontrar medidas preventivas que eviten consecuencias irreversibles como las descritas anteriormente. El vibrómetro es un dispositivo que consta de un sensor que capta las señales de vibración que son enviadas a un conversor análogo-digital con el fin de analizar las características de la señal obtenida, en busca de fallas o problemas en los sistemas anteriormente mencionados.

En las ciudades en general es normal que se genere un crecimiento de la población obligando a realizar construcciones cercanas a las vías principales (avenidas), por fenómenos de extensión y densificación de la aglomeración humana. [3] No obstante al estar expuesto a cualquier fuente de vibración se puede afectar la salud como también el hecho de permanecer en un lugar en donde las vibraciones no sean atenuadas.

En este proyecto se da solución al problema que se plantea en el numeral 2.2 mediante un enfoque empírico analítico donde aplicando conocimientos adquiridos durante la etapa de Estudios (pregrado ingeniería de sonido) en áreas de ciencias básicas, programación, electrónica, acústica y vibraciones principalmente, se obtiene como resultado un vibrómetro que permite medir y analizar mediante un software las vibraciones, con el fin de diagnosticar fallas en estructuras arquitectónicas, máquinas y el ser humano, dando la opción de ingresar normas que regulen los niveles de exposición a estas vibraciones. Para evaluar el correcto funcionamiento del dispositivo se compara con un sistema de medición y análisis de uso profesional (Pro 117/EXT), obteniendo el porcentaje de error relativo que se presenta.

2. Planteamiento del problema

En la presente subsección, se expondrán algunos de los factores más importantes de la sustentación del proyecto, por lo que se definirá y planteará el enfoque de la investigación realizada.

2.1 Antecedentes

2.1.1 Sistemas embebidos [4]

- Autor: Antonio Nadal Galiana Llinares.
- País: España
- Año: 2005

Este documento se basa en el desarrollo y caracterización de un sistema embebido así como su evolución y desarrollo en el tiempo, determinando los parámetros más importantes a tener en cuenta para la elección de un hardware que cumpla con las características necesarias para este proyecto.

2.1.2 La medición y análisis de las vibraciones como técnica de inspección de equipos y componentes, aplicaciones, normativas y certificación. [5]

- Autor: Pedro Nelson Saavedra
- País: Chile.
- Año: 2007

En este documento se comentan los tipos de sensores que son utilizados para medir la vibración, además comenta el autor que posterior a la medición es necesario acondicionar la señal para poder tener digitalmente una señal similar a la análoga, se exponen también las técnicas e importancia del análisis de vibraciones en máquinas, comentando los beneficios que conlleva el realizar un análisis de vibraciones con respecto a otros métodos de predicción de fallas como el ultrasonido, radiografía, etc. También menciona normas referentes a la exposición de vibraciones en el ser humano y la evaluación de la vibración en máquinas que se han de considerar para este proyecto.

2.1.3 Frecuencias de vibraciones teóricas y experimentales de un edificio de nueve niveles localizado en la vecindad de la zona rio de Tijuana, Bc, México [6]

- Autores: Carlos I. Huerta López, Daniel Salvador Lomelí Limón, Manuel Esparza Fuentes, Fortunato Espinoza Barreras, Rosalba Sofía Contreras Porras y Yuriam Baltazar Cifuentes.
- País: Puerto Rico
- Año: 2009

Proyecto realizado por la revista internacional de desastres naturales, accidentes e infraestructura civil, este estudio fue desarrollado para identificar los modos de vibración y características dinámicas de la estructura la cual se vio afectada por el temblor de Northridge de 1994, para el proceso de análisis se realizó la evaluación teórica la cual fue calculada por el programa SAP 2000 Versión 10.0, también se realizó la estimación experimental usando mediciones de vibración ambiental. Al ser un ejemplo claro de análisis permite identificar los elementos necesarios para implementar un sistema de medición y análisis de vibración.

2.1.4 **Diseño y montaje de un dispositivo, para determinar las frecuencias vibratorias de objetos, en los ejes X, Y, Z, en un rango de 0.5 Hz – 500 Hz. [7]**

- Autores: Oscar Esneider Acosta, Juan Martin Aponte.
- País: Colombia
- Año: 2010

Este trabajo de grado se desarrolló con el fin de producir un vibrómetro para medir y determinar las frecuencias de cualquier objeto con un sensor de bajo costo. En este proyecto se implementó un acelerómetro ADXL 330 como sensor para medir las vibraciones en cualquier elemento, el cual fue limitado en frecuencia en un rango de 0.5 Hz a 500 Hz, y mediante un software programado en LabView se realizó la visualización y análisis de datos. El trabajo de los ingenieros da el punto de partida para este proyecto brindando conocimientos fundamentales para el desarrollo del vibrómetro portátil.

2.1.5 **CMDM 6700 series I-Pro [8]**

- Desarrolladores: SKF
- País: Suecia

Este sistema es de los últimos colectores y analizadores de la marca SKF, fabricado para mantenimiento predictivo de máquinas industriales, permitiendo cargar rutas para posterior medición, adquisición de datos inalámbrica, cuenta con una red de varios computadores o sistemas para compartir las bases de datos con el fin de realizar un mantenimiento lo antes posible en caso de ser necesario. Este dispositivo no está adaptado para medir o analizar la vibración en estructuras arquitectónicas o seres humanos sin embargo es un ejemplo de un sistema que permite analizar señales de vibración similar al que se pretende desarrollar.

2.1.6 DSP Logger Expert. [9]

- Desarrolladores: SEMAPI
- País: Argentina.

Es un sistema colector y analizador de datos que permite monitorear y comparar el estado de máquinas industriales con la norma ISO 10816, este nuevo modelo tiene la opción de medir la vibración en seres humanos. Sin embargo su gran aplicación y desarrollo son para el mantenimiento predictivo, presentado un software que facilita al usuario cargar una ruta (orden de máquinas a medir) para su posterior medición, como también módulos que pueden balancear y alinear máquinas entre otras. Al ser una herramienta portátil para analizar vibraciones sus características pueden ser empleadas o referencias a utilizar para el desarrollo del vibrómetro portátil que permita el análisis en edificaciones, máquinas y seres humanos.

Algunas especificaciones técnicas:

El sistema cuenta con 6 canales de entrada, 6 (seis) Sensores, de los cuales 4 se emplean para acelerómetros, y 2 para entradas AC 2, además posee una entrada DC de tacómetro universal TTL/análogo programable de hasta $\pm 25V$, permitiendo un rango de 1...99.999 RPM. Tiene protección contra sobretensiones de entradas Individuales en todos los canales.

2.1.7 Pro-117/EXT [10]

- Desarrolladores: Acoustic1
- País: Reino Unido

Este sistema está conformado por un software (dBFA Suite) de adquisición, visualización y análisis de vibraciones, el cual también consta de una tarjeta de adquisición de datos (dB4) de alta resolución de bits, las cuales conforman un sistema de alto estándar de calidad para el análisis de vibraciones.

Características del hardware (dB4): La tarjeta cuenta con entradas que pueden ser usadas de manera simultánea, cada canal posee una resolución de 24 bits y frecuencia de muestreo de 52kHz. Su fuente de alimentación es vía USB. Al ser un dispositivo que se encuentra en la Universidad de San Buenaventura es posible realizar una comparación de ambos vibrómetros.

2.1.8 Calibrador de Vibraciones SV111 [11]

- Desarrolladores: Svantek
- País: Polonia
- Año: 2011

Este dispositivo permite calibrar acelerómetros triaxiales y sísmicos bajo valores de tolerancia definidos estrictamente en la norma internacional ISO 8041 de 2005 definiendo además las tres frecuencias de calibración estándares que son 15.92Hz, 79.58Hz y 159.2Hz. Gracias a este se determina una frecuencia de calibración para el vibrómetro que se realiza en este proyecto de grado.

2.2 Descripción y formulación del problema

Según la presente investigación, no se ha evidenciado hasta el momento una herramienta computacional que, al realizar mediciones con acelerómetros, permita comparar la medición con respecto a las normas enfocadas a estructuras, máquinas y seres humanos. Además, en los sistemas estudiados para el análisis de vibraciones, no se ha encontrado un software que permita la actualización y el ingreso de nuevas normativas enfocadas a vibraciones. Por consiguiente, surge la pregunta. ¿Cómo realizar un sistema que permita medir y analizar las vibraciones, comparando los resultados respecto a las normativas actuales que regulan los niveles de exposición a estas, brindando al usuario la posibilidad de ingresar nuevas normas?

2.3 Justificación

La exposición a vibraciones de gran magnitud y duración son causantes de problemas que perjudican cualquier estructura, en el hombre se pueden presentar enfermedades que afectan directa o indirectamente la salud. Como afecciones en el sistema nervioso central, la pérdida de la sensibilidad, trastornos del sueño, dolores de cabeza, estrés, bajo rendimiento en las ocupaciones (cansancio, fatiga, irritabilidad, etcétera). [12] De igual manera las vibraciones también perjudican las estructuras arquitectónicas, afectando las fachadas, los cimientos y en el peor de los casos puede llegar a derribar el edificio. [13] En las máquinas se debe tener en cuenta la vibración para que esta no afecte al hombre o a las estructuras arquitectónicas y que a su vez su funcionamiento no se vea deteriorado por su misma vibración dañando implementos electrónicos o mecánicos. [14]

Por tal razón es importante crear un mecanismo portátil que permita medir y comparar los datos adquiridos con normas que pueden ser ingresadas en cualquier momento, con el fin de evaluar los riesgos para facilitar la toma de decisiones, para corregir o atenuar el nivel de exposición de las vibraciones en máquinas, estructuras arquitectónicas y el hombre.

Al desarrollar este proyecto se complementan conocimientos adquiridos en el área de acústica, electrónica y desarrollo de software puesto que son necesarios para la elaboración del sistema de medición y análisis de vibraciones. Además como futuros ingenieros de sonido este dispositivo es una herramienta que puede facilitar trabajos o labores en áreas de salud ocupacional, mantenimiento predictivo de máquinas y estructuras.

2.4 Objetivos

2.4.1 Objetivo General

Diseñar e implementar un vibrómetro portátil que permita medir y analizar las vibraciones en los ejes x, y, z implementando un sistema embebido para que realice el análisis y la comparación con las normas establecidas.

2.4.2 Objetivos específicos

- Realizar la etapa de acoplamiento que adecue la señal de entrada del sensor según las características de la tarjeta de adquisición de datos.
- Implementar el software de adquisición de datos dentro del sistema embebido.
- Diseñar un programa informático que analice y compare los datos medidos con el sistema análogo según los lineamientos de las normas enfocadas a la medición en vibraciones hacia máquinas, estructuras y el hombre.
- Implementar en el sistema la posibilidad de ingresar nuevos parámetros de comparación existentes en normas no especificadas dentro del vibrómetro portátil.

2.5 Alcances y limitaciones

2.5.1 Alcances

- Con el dispositivo ensamblado se tendrá un vibrómetro capaz de medir las vibraciones presentes en cualquier objeto, analizando el grado de exposición, permitiendo su implementación en campos de trabajo donde las personas, máquinas o estructuras se vean afectadas.
- El vibrómetro tendrá la capacidad de comparar la medición con una norma que escoja o ingrese el usuario.
- Creación de un sistema de alarmas en caso de riesgo por vibraciones demasiado fuertes, que puedan causar daños al ser humano.
- Investigar y dar a conocer el riesgo de las vibraciones a nivel nacional con el fin de que se implementen normas de prevención de accidentes.
- Facilidad de movilidad del dispositivo para hacer las mediciones gracias al programa informático que se implementará en el embebido.

2.5.2 Limitaciones

- El rango de frecuencias de operación del dispositivo se verá directamente condicionado a las características de los elementos electrónicos usados por el acelerómetro que determinan el costo del mismo.
- Al necesitar de una conversión análogo–digital, la calidad de la señal dependerá netamente de la tarjeta que se utilice para tal fin.
- Al indagar ciertas normativas enfocadas en la medición y análisis de la exposición de vibraciones en los seres humanos, se encontró que los parámetros de evaluación son subjetivos y por lo tanto no es posible estandarizar un software que analice automáticamente dicha exposición ya que solo hay evidencia de tablas de comparación opcionales.

3 Metodología

3.1 Línea de investigación de la universidad/Línea de investigación de la facultad/Núcleos problemáticos.

3.1.1 Enfoque de la investigación.

El enfoque del proyecto será empírico analítico, debido a que se utilizará el conocimiento adquirido durante la etapa de estudios en las áreas de ciencias básicas, programación, electrónica, acústica y vibraciones principalmente, para de esta manera poder dar solución al problema planteado.

En este proyecto se va a diseñar un dispositivo de medición de vibraciones portátil, implementándolo en un sistema embebido que procese la señal medida por un acelerómetro para su posterior análisis respecto a las normas contempladas en el área. Este proyecto se encuentra en el núcleo problemático de acústica y procesamiento de señales, ya que para medir y analizar la vibración que incide en estructuras arquitectónicas, máquinas y seres humanos, es necesario entender esta como una señal de origen mecánico (onda), que para ser examinada es necesario estudiar sus características (frecuencia, amplitud, fase, duración), además de manipular la señal por medio de promedios y procesos matemáticos implementados de forma digital que lleven a la comparación de resultados. Esto se debe a que el dispositivo es una herramienta que no ha sido implementada y el desarrollarla requiere de un tratamiento de señales análogas y digitales que busquen un beneficio para la comunidad como lo es la prevención de enfermedades o fatiga de estructuras.

3.2 Hipótesis

El dispositivo diseñado e implementado (vibrómetro portátil), será una herramienta que el ingeniero de sonido podrá utilizar para generar informes que ayuden a prevenir problemas como fatiga en las estructuras, enfermedades en los seres humanos, y posibles fallas en maquinaria, todo esto gracias al software que analiza las vibraciones por medio de normas que pueden ser ingresadas por la persona que manipule este sistema de medición y análisis.

3.3 Variables

3.3.1 Variables dependientes.

- Velocidad de procesamiento del embebido.
- Memoria interna.
- Rango de frecuencias
- Relación señal ruido

3.3.2 Variables Independientes.

- Obtención de los datos
- Almacenamiento de datos
- Normas a analizar
- Correcta medición del sensor.

3.4 Metodología de diseño

Para el diseño y construcción del vibrómetro portátil son necesarios conocimientos en análisis de vibraciones y procesamiento digital de señales (DSP), partiendo de éstos, se determinan las características necesarias para la implementación del hardware y software del vibrómetro, en donde la ilustración 1, muestra la forma en que se realiza este dispositivo.



Ilustración 1. Cuadro Metodológico. Fuente propia

4 Marco Teórico-Conceptual

Partiendo del concepto de salud que determina la OMS “la salud es un estado de completo bienestar físico, mental y social y no sólo la ausencia de enfermedad o dolencia”. [15] Se puede analizar la exposición a vibración como un factor que afecta el bienestar, el confort y la salud, aunque las consecuencias suelen presentarse con el pasar de los años en su gran mayoría son trastornos irreversibles según estudios realizados. [16] Ahora bien teniendo en cuenta que las vibraciones afectan al ser humano en el diario vivir se debe evitar la exposición a estas cuando son de alta magnitud y duración. Por ejemplo, en un edificio para determinar y prevenir las alteraciones que generan las vibraciones en el cuerpo lo indicado es tomar los focos de máxima exposición en elementos de descanso para las personas como son camas, sillas y demás enseres presentes en una vivienda, porque es aquí donde se va a permanecer más tiempo. [17]

Según la norma de sismo resistencia colombiana NSR-10, del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, los constructores tienen la obligación de velar por el control de vibraciones de fuentes internas en las estructuras arquitectónicas, pero en ningún momento esta determina la incidencia de vibración proveniente de fuentes externas a las edificaciones, tales como automóviles, trenes, entre otros. [18] Ya que es posible que se puedan presentar daños, no solo a nivel estructural sino también en la salud humana provocando alteraciones de las funciones fisiológicas, neuromusculares, cardiovasculares, respiratorias, endocrinas, metabólicas, sensoriales y del sistema nervioso central evidenciadas en mareo, vértigo, malestar digestivo, lesiones musculares, problemas de columna, estrés, pérdida de sueño, cansancio, entre otras, sin desconocer que algunas de estas afecciones también pueden ser de origen laboral determinadas por la actividad que se realice. Un ejemplo claro de esto es el síndrome de Raynaud o dedo blanco, que consiste en adormecimiento, cosquilleo, dolor, pérdida de sensibilidad, entre otros síntomas ocasionados por falta de irrigación sanguínea a los dedos provocado por la exposición de manos y brazos a jornadas extensas de trabajo con herramientas vibratorias, como en el caso de algunas actividades laborales de conductores, operarios, obreros, carpinteros, deportistas, entre otras ocupaciones. Por ejemplo, la vibración vertical de un asiento causa movimiento en varias partes del cuerpo, en la cabeza va a presentar transmisibilidad máxima en el intervalo de 3 a 10 Hz, esto quiere decir que en este intervalo se presenta la mayor transmisión de la vibración externa; la columna vertebral presenta un rango de 6.5 a 8 Hz; los reflejos de los tendones pueden disminuir o desaparecer al ser sometidos a frecuencias superiores a 10 Hz; los pies presentan un rango de 40 a 50 Hz; en general el cuerpo humano puede entrar en resonancia a una frecuencia de 5Hz. Lo ideal sería evitar que cualquier sistema entre en resonancia siendo indispensable el analizar las vibraciones que pueden incidir en el ser humano. Según las investigaciones de varios expertos en el tema una velocidad de 15m/s causa malestar intenso. [19]

Sin embargo las vibraciones no sólo afectan al ser humano, siendo estas causantes de fallas de maquinaria, tanto así que se ha creado el mantenimiento predictivo para máquinas, en donde por medio del análisis de vibraciones se pueden encontrar y pronosticar el estado de estas, este proceso se ha vuelto muy popular puesto que es un método que permite analizar la salud de la máquina sin necesidad de apagarla, evitando paradas indeseadas. [20] Hay instituciones especializadas en la capacitación y certificación del análisis de vibraciones en máquinas industriales como lo son el Vibration Institute o Technical Associate of Charlotte, dando a conocer algunas de las fallas que se pueden encontrar en un análisis para mantenimiento

predictivo como lo son: Desbalanceo, Desalineación, rotor combado, desgaste de cojinetes, engranajes con dientes rotos, soltura mecánica, excentricidad, fallas en rodamientos entre otras. [21]

Al ser las vibraciones causantes de tantos problemas se han generado técnicas y normas que buscan prever y alertar la exposición a estas por lo tanto se mostrará a continuación algunas de las técnicas y normativas existentes.

4.1 Técnicas De Análisis De Vibraciones [22]

En el análisis de vibraciones se debe realizar para extraer la mayor cantidad de información importante que esta posee. Para esta tarea existen diferentes tipos de análisis en el dominio del tiempo y frecuencia, cada una de ellas posee ventajas específicas para ser usadas de manera particular según el caso.

4.1.1 Análisis espectral.

El análisis espectral consiste en descomponer la señal medida en las componentes espectrales en frecuencia en el dominio del tiempo, este tipo de análisis se realiza utilizando la transformada rápida de Fourier (FFT) el cual se explicara en la sección 4.6, en la medición de máquinas este proceso permite la correlación de las vibraciones medidas en los tiempos de descanso que tiene la máquina dentro de su habitual proceso de funcionamiento.

4.1.2 Análisis de la forma de onda.

Al analizar las vibraciones en el tiempo, este análisis permite obtener información complementaria y adicional de la que ofrece el análisis espectral, con este tipo de análisis es posible reconocer los siguientes problemas.

- Impactos
- Rozamientos intermitentes
- Modulaciones en amplitud y frecuencias
- Transitorios.
- Truncados.

4.1.3 Análisis de fase de vibraciones.

La diferencia de fase que hay en dos vibraciones que poseen la misma frecuencia se define como la diferencia en tiempo con la cual estas vibraciones alcanzan sus valores máximos, mínimos o el valor de cero. Este análisis permitirá determinar los movimientos relativos entre cada uno de estos, también permite diferenciar los problemas que pueden generar las vibraciones a una frecuencia de una revolución por minuto (1RPM).

4.2 Normativa Existente En El Análisis De Vibraciones [23]

4.2.1 Respecto a las máquinas

- **Máquinas rotatorias**

La normativa actual da criterios de evaluación del rigor de las vibraciones respecto a:

- La condición operacional de la máquina
- Ensayos de aceptación de máquinas.

La normativa ISO 10816-1. “*Vibración mecánica. Evaluación de la vibración de máquina por medición de partes no rotatorias.*” indica los lineamientos a medir, el método, la instrumentación y las condiciones recomendadas para realizar las mediciones.

Para la evaluación en máquinas las divide según su potencia, de acuerdo al tipo de máquina y respecto a su sistema de montaje. Esta mide el nivel vibratorio en cuatro calidades: A, B, C y D.

Calidad A: Esta calificación es la correspondiente a un nivel vibratorio de una máquina en buen estado, y este debería ser la calidad de aceptación para una máquina nueva.

Calidad B: En este rango suelen estar las máquinas que presentan un nivel de vibración aceptable.

Calidad C: Las máquinas que se encuentran en esta zona son aquellas que en poco tiempo podrían fallar.

Calidad D: El Nivel vibratorio de calidad es considerado suficientemente severo para la máquina y por tal razón puede llegar a causar daños inmediatos.

Esta norma para evaluar la severidad de las vibraciones en baja frecuencia ($f < 10$ Hz) utiliza el desplazamiento RMS, mientras que para vibraciones en frecuencias intermedias ($10 \text{ Hz} \leq f \leq 1000 \text{ Hz}$) y para altas frecuencias ($f > 1000 \text{ Hz}$) la velocidad RMS.

- **Máquinas con movimiento alternativo**

Los modelos que existen para evaluar la rigurosidad de las vibraciones en las máquinas con movimiento alternativo tienen finalidades diferentes que para el caso de las máquinas rotatorias. Una máquina con movimiento alternativo, como por ejemplo un motor Diesel, es una máquina diseñada para soportar los esfuerzos que generan las explosiones que se producen dentro de ella. La normativa evalúa el nivel de vibración para considerar el efecto que ella tiene en elementos montados sobre la máquina (pistones, instrumentos, intercambiadores de calor, etc.) y los elementos que se encuentran conectados a ella (tuberías, fundaciones, etc.).

4.2.2 Respecto a las estructuras.

Para el análisis de vibraciones en estructuras existen ciertas normativas que no brindan valores de referencia para evaluar la magnitud y severidad de las señales de vibración medidas. Un ejemplo de esto es la norma ANSI S2.47 en la que se muestran los métodos de medición y los

factores que hay que tener en cuenta para la evaluación, sin embargo, esta no presenta ninguna tabla, gráfica o dato de referencia que indique como afectan las vibraciones a las estructuras arquitectónicas. Por otra parte, la norma británica BS 7385 sí muestra una serie de promedios en donde se pueden evaluar los resultados obtenidos en la medición de vibraciones presentes en edificaciones fomentando la prevención de riesgos estructurales.

4.2.3 **Respecto a las personas.**

La norma más importante y ampliamente conocida para el estudio en los seres humanos es la norma ISO 2631: "Mechanical vibration and shock. Evaluation of human exposure to whole-body vibration. Part 1: General requirements".

Esta normativa indica valores numéricos para los límites de exposición a los que puede llegar a estar expuesta una persona. Estos límites establecen los valores que permiten calificar los diferentes efectos de las vibraciones sobre el ser humano en estudio, los parámetros que se estudian para identificar las consecuencias de las vibraciones en el ser humano son:

- Daño en la salud o seguridad de las personas.
- Disminución de la eficiencia en el trabajo.
- Disminución del confort de la persona.

Esta norma utiliza para evaluar la severidad de las vibraciones la aceleración RMS entre 0.1 y 80 (Hz) medida en los tres ejes ortogonales (X, Y, Z).

Sin embargo hay una norma que enuncia los requisitos necesarios de hardware para implementar un dispositivo de medición de vibraciones que puedan afectar a los seres humanos, esta es la ISO 8041 que indica sensores, rangos dinámicos y de frecuencias, entre otras características a implementar. Por consiguiente se indaga acerca del sensor adecuado en el siguiente numeral.

4.3 Tipos de acelerómetros

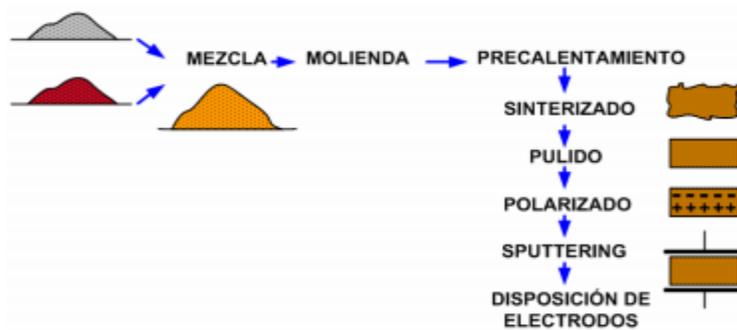
Piezoeléctricos, mecánicos, capacitivos, piezo-resistivos, características de los transductores:

Tipo de acelerómetro	Margen de medida	Ancho de Banda (Hz)	Ventajas e inconvenientes	Aplicaciones
Micromecánico	De 1,5 a 250g	De 0,1 a 1500	<ul style="list-style-type: none"> - Alta sensibilidad - Coste medio - Uso sencillo - Bajas temperaturas 	<ul style="list-style-type: none"> - Impacto - ABS - Airbag - Automoción
Piezo-eléctricos	De 0 a 2000g	De 10 a 20000	<ul style="list-style-type: none"> - Sensibilidad media - Uso complejo - Bajas temperaturas - No funcionan en continua 	<ul style="list-style-type: none"> - Vibración - Impacto - Uso industrial
Piezo-resistivos	De 0 a 2000g	De 0 a 10000	<ul style="list-style-type: none"> - Respuesta en continua y alterna - Prestaciones medias - Bajo coste 	<ul style="list-style-type: none"> - Vibración - Impacto - Automoción
Capacitivos	De 0 a 1000g	De 0 a 2000	<ul style="list-style-type: none"> - Funciona en continua - Bajo ruido - Baja potencia - Excelentes características 	<ul style="list-style-type: none"> - Uso general - Uso industrial
Mecánicos	De 0 a 200g	De 0 a 1000	<ul style="list-style-type: none"> - Alta precisión en continua - Lentos - Alto coste 	<ul style="list-style-type: none"> - Navegación inercial - Guía de misiles - Herramientas - Nivelación

Ilustración 2. Comparación de acelerómetros según materiales de construcción. Tomado de: <http://www.tav.net/transductores/acelerometros-sensores-piezoelctricos.pdf>

Se puede ver claramente que el mejor transductor para el dispositivo a implementar es el piezoeléctrico, puesto que la imagen muestra que permiten mayor ancho de banda y margen de medida esto quiere decir que al utilizar este sensor se podrá medir vibraciones que presenten una amplitud alta y rangos de frecuencias amplios, logrando así adaptarse a los tres casos (máquinas, estructuras arquitectónicas y el ser humano), por lo tanto se va a indagar sobre este.

Transductores piezoeléctricos: constan de un cristal que al deformarse genera una señal eléctrica similar o casi igual a la deformación, fue descubierto por Jacques y Pierre Curie, para que el material sea sensible a cargas se hace una distribución de las cargas del material homogénea para que al presentarse una fuerza externa que altere el cristal todas se desplacen y generen una señal similar. La manera de construcción del material es el siguiente:



*Ilustración 3. Proceso de fabricación de un acelerómetro piezoeléctrico.
Tomado de: <http://www.tav.net/transductores/acelerometros-sensores-piezoelctricos.pdf>*

Se realiza una mezcla de los materiales cerámicos, luego pasan a ser molidos, se calientan, se sintetizan, se pulen se polarizan y se almacenan. Estos transductores requieren de un sistema de pre amplificación con el fin que al registrar o capturar los datos no se pierda el voltaje medido o captado por tal razón se utilizan amplificadores de voltaje de impedancia de entrada alta e impedancia de salida baja, como cualquier aparato electrónico que pretenda no perder energía. [24]

Al obtener resultados habrá que basarse en las normas de vibraciones de cuerpo completo, estructuras y maquinaria que hay hasta el momento, en donde se debe tener en cuenta los rangos de frecuencia que tienen, como la duración de la exposición a la que estarán sometido, y la magnitud que puede ser la aceleración o velocidad que se evidenciarán en los resultados de la medición aplicados a los focos de mayor vibración. [25]

De acuerdo con lo visto anteriormente con respecto a los acelerómetros, el valor de voltaje generado por estos debe ser equivalente a la aceleración medida, esto es posible mediante un valor de referencia que da el fabricante (Sensibilidad), o midiendo una señal conocida que pueda generar esta referencia, esta señal es generada por un dispositivo denominado Shaker.

4.4 Excitadores de vibración (Shakers) [26] [27]

Son dispositivos que pueden oscilar a una frecuencia determinada, permitiendo la calibración de instrumentos de medición o el análisis modal o la respuesta en frecuencia del sistema, suelen ser utilizados en las estructuras arquitectónicas para determinar la frecuencia de resonancia que presenta el sistema. Trabajan bajo el principio de masa resorte, en donde se logra mantener una masa oscilando a una velocidad o aceleración determinada. Suelen ser construidos mediante el uso de un imán y una bobina, el campo magnético generará un movimiento que puede ser controlado en amplitud similar al funcionamiento de un altavoz. No obstante en el caso de acelerómetros demasiado grandes y pesados es común que los excitadores de vibración sean controlados bajo principios de Bernoulli (presión) siendo sistemas hidráulicos. A continuación, se mostrarán algunos de los shakers comerciales de la marca Brüel & Kjaer.

El Shaker de uso general, es un excitador de vibración que puede ser usado para diversas labores, como calibrar acelerómetros, analizar el comportamiento de frecuencias de una estructura, medidas de impedancia, etc.



Ilustración 4. Ejemplo de Shaker de uso general. Tomada de <http://www.bksv.es/Products/shakers-exciter>

El Shaker denominado controlador o calibrador, permite la calibración de otros excitadores de vibración como también la posibilidad de calibrar objetos que requieren mayor fuerza para ser desplazados, tiene usos en la industria, en aviones y hardware militares, componentes satelitales, ensamble electrónico, automatización, etc.



Ilustración 5. Shaker profesional. Tomado de: <http://www.bksv.es/Products/shakers-exciter/lds-vibration-test/shakers/low-force>.

Después de calibrar el sensor y garantizar un valor correcto de voltaje se obtienen los datos para su posterior proceso y análisis. Si esto se desea realizar de manera digital, se debe implementar un conversor análogo – digital.

4.5 Conversión Análoga – Digital [28] [29]

Cuando se tienen señales análogas que se quieren estudiar, analizar, procesar o almacenar en un sistema digital es necesario realizar una conversión en donde una serie de conjuntos binarios representen la señal análoga de la mejor forma posible.

Es aquella conversión que permite pasar de una señal análoga a digital por medio de tres etapas que se encargan de crear un conjunto de números binarios

Este proceso se conoce como *Conversión Análoga – Digital (A/D)* y es realizado por conversores (A/D). Estos conversores ejecutan tres procesos (Muestreo, Cuantificación, Codificación) para crear una señal digital a partir de una señal análoga.

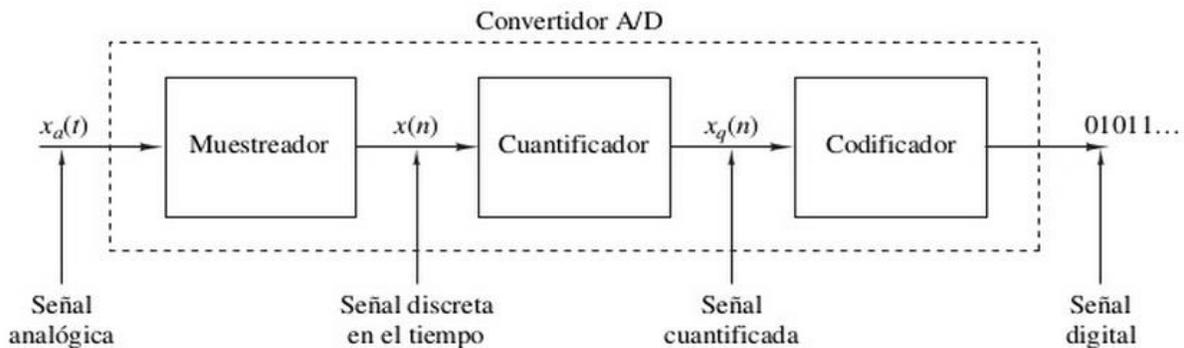


Ilustración 6. Partes de un conversor A/D. Fuente: Proakis, Jhon G. (1998) Tratamiento digital de señales.

Ilustración 7. Tarjeta de adquisición de datos (NI myDAQ). Tomado de: http://sine.ni.com/images/products/us/05041214_m.jpg

Características de la tarjeta NI myDAQ

- Resolución de bits: 16 bits
- Velocidad de muestreo: 200 kS
- Entradas diferenciales: 2 entradas
- Entradas y salidas digitales: 8
- Salidas análogas: 2 salidas
- Entrada sencilla: 2 entradas.

4.5.5 Tarjeta de adquisición de datos USB Multifunción (USB-1208FS)

Es un dispositivo de bajo costo que realiza la conversión análogo-digital de cualquier señal adquirida por un sensor, en donde por medio de un software es posible determinar parámetros necesarios para digitalizar una señal como lo son, entradas a utilizar, tiempos a registrar, frecuencia de muestreo entre otros, con el fin de manipular, procesar o mostrar digitalmente la señal.



Ilustración 8. Tarjeta de adquisición de datos (USB-1208FS) Tomado de: <http://www.mccdaq.com/products/LargeImage.aspx?oid=54>

Al realizar la adquisición de datos en función del hardware la tarjeta tiene la capacidad de obtener los datos a través de sus ocho entradas análogas, los datos análogos son adquiridos y convertidos a digital cuantas veces se desee hasta detener la medición, esta información es transferida en bloques de 31 muestras de la tarjeta de adquisición a la memoria del computador. La USB-1208FS no puede exceder las cincuenta mil muestras por segundo, así que dependiendo de la cantidad de canales en uso se reduce la velocidad de muestreo por canal. Seguido a esto se muestra la velocidad de muestreo por canal.

Número de canales	Velocidad de
-------------------	--------------

usados	muestreo (kS/s)
1	50
2	25
3	16.70
4	12.50
5	10
6	8.30
7	7.14
8	6.25

Tabla 1 Especificaciones para diseño de sistema Tomado de: <http://www.mccdaq.com/PDFs/manuals/USB-1208FS.pdf>

A continuación, se presentan las características de esta tarjeta de adquisición de datos.

- Resolución de bits: 12 bits entradas diferenciales, 11bits entradas sencillas.
- Velocidad de muestreo: 50 kS
- Entradas análogas: 8 entradas
- Entradas diferenciales: 4 entradas
- Entradas y salidas digitales: 16
- Salidas análogas: 2 salidas a 12bits

Puesto que este proyecto contempla el análisis de la vibración, es necesario realizar procesos de la señal digitalizada, para estudiar cada una de sus características y así comparar estas con las tablas de referencias presentes en ciertas normativas. Por tanto se muestran en los numerales 4.6 y 4.7 los métodos de procesamiento de señal y los sistemas embebidos que permiten el diseño e implementación del vibrómetro portátil.

4.6 Procesamiento de la señal

A continuación se muestran algunos procesos que suelen aplicarse a la señal digitalizada para el análisis de vibraciones.

4.6.1 Ventaneo De Una Señal [30] [31]

Una ventana es una función matemática que es utilizada para suavizar la señal al evitar discontinuidades al principio y fin del bloque de la señal que será analizado. Este proceso solo es posible si se realiza en una señal tiempo finito.

Cuando se realiza el ventaneo en función del tiempo, la ventana se multiplica por los valores de la señal. En el caso del ventaneo en función de la frecuencia, al realizar la transformada de Fourier, esta se convoluciona con la función de transferencia de la ventana.

Al aplicar una ventana a una señal en función de la frecuencia, el espectro en frecuencia se verá afectado. Existen diferentes tipos de ventanas, entre las más utilizadas se encuentran la rectangular, hann, hamming y blackman.

A continuación se presentan las funciones de forma discreta de las cuatro ventanas mencionadas anteriormente para una señal de tamaño N , siendo $0 \leq n \leq N-1$.

Ventana Rectangular:

$$v(n) = 1$$

Ecuación 1 Función ventana Rectangular

Ventana Hann :

$$v(n) = a_0 - a_1 * \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right)$$

Ecuación 2 Función ventana Hann

Donde $a_0 = 0.5$; $a_1 = 0.5$

Ventana Hamming:

$$v(n) = a_0 - a_1 * \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right)$$

Ecuación 3 Función ventana Hamming

Donde $a_0 = 0.53836$; $a_1 = 0.46164$

Ventana Blackman

$$v(n) = a_0 - a_1 * \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) + a_2 * \cos\left(\frac{4\pi n}{N-1}\right)$$

Ecuación 4 Función ventana Blackman

Donde $a_0 = 0.42$; $a_1 = 0.5$; $a_2 = 0.08$

4.6.2 Transformada de Fourier [32] [33]

La transformada de Fourier permite que una función en dominio del tiempo $f(t)$ pase a ser una función del dominio de frecuencia $F(\omega)$. No obstante la integral es reversible o inversa lo que indica que es posible pasar del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo.

$$f(t) \rightarrow F(\omega)$$

$$F(\omega) \rightarrow f(t)$$

Las ecuaciones que describen la transformada son:

Ecuación para pasar de $f(t)$ a $F(\omega)$.

$$f(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt$$

Ecuación 5 Transformada de Fourier

Ecuación para pasar de $F(\omega)$ a $f(t)$ o llamada transformada inversa de Fourier:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(t\omega)e^{i\omega t} d\omega$$

Ecuación 6 Transformada inversa de Fourier

Según la ecuación se puede observar que al multiplicar la función por una exponencial se va a obtener una parte real y una parte imaginaria (número complejo). Esto generará un conjunto de datos negativos y positivos. Sin embargo, el espectro de frecuencias trabajará con la magnitud de la señal generando pulsos con determinada amplitud.

El espectro de frecuencia es una herramienta útil de análisis de vibración que permite determinar a qué frecuencia hay fallas o exposición elevada tanto para máquinas como edificaciones y seres humanos. No obstante, en máquinas la transformada de Fourier puede facilitar la elaboración de otros tipos de espectros que ayudan a determinar fallas como lo son el espectro de potencia automático, y el espectro de potencia cruzada.

4.6.3 Raíz Cuadrática Media (RMS) [34]

Este término bastante utilizado en electrónica, electricidad y análisis de señales, es la representación estimada de la energía total de una señal alterna (variable) mediante un valor que es continuo. Matemáticamente es la raíz cuadrada de un promedio de magnitudes de la señal que han de ser elevadas al cuadrado de aquí surge su nombre (RMS del inglés Root Mean Square).

La ecuación que representa el cálculo del valor RMS para señales periódicas es:

$$RMS = \left(\frac{1}{T} \int_0^T |x(t)|^2 dt \right)^{1/2}$$

Ecuación 7 Cálculo de valor RMS para señales periódicas

Donde,

T es el periodo de la señal continua

$x(t)$ es la representación de una señal que varía en función del tiempo.

Cuando una señal continua es digitalizada pasa a ser una señal discreta, para este caso la ecuación que determina el valor RMS es:

$$RMS = \left(\frac{\sum_{i=1}^n |x_i|^2}{n} \right)$$

Ecuación 8 Valor RMS de señal digitalizada

Donde, n es el número de datos que describe la señal

x_i es la representación de la magnitud de los valores discretos

Usualmente el valor RMS se halla en función del tiempo pero por medio del teorema de Rayleigh es posible obtenerlo en función de la frecuencia. Éste teorema explica que la Transformada de Fourier es unitaria, esto quiere decir que la energía total de una señal en función del tiempo es igual a la energía total de esta señal en función de la frecuencia y su representación matemática es la siguiente:

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |X(f)|^2 df$$

Ecuación 9 Energía total según Rayleigh

Para demostrar cómo se obtiene el valor RMS de una señal sinusoidal representada por la función $A \sin(\omega t)$ según la ecuación número 7, se puede calcular de la siguiente forma:

$$RMS_{sen} = \left(\frac{1}{T} \int_0^T |A \sin(\omega t)|^2 dt \right)^{1/2}$$

Al sacar constantes de la integral

$$RMSsen = \left(\frac{A^2}{T} \int_0^T \text{sen}^2(\omega t) dt \right)^{1/2}$$

Según la identidad trigonométrica $\text{sen}^2(x) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos(2x)$ se tiene que,

$$RMSsen = \left(\frac{A^2}{T} \int_0^T \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos(2\omega t) \right) dt \right)^{1/2}$$

Resolviendo la integral y evaluando entre los límites T y 0 resulta

$$RMSsen = \left(\frac{A^2}{T} \left(\left(\frac{T}{2} - \frac{0}{2} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{\text{sen}(2\omega T)}{2\omega} - \frac{\text{sen}(0)}{2\omega} \right) \right) \right)^{1/2}$$

Donde T para una señal sinusoidal es $T = 2\pi/\omega$

$$RMSsen = \left(\frac{A^2}{T} \left(\left(\frac{T}{2} - \frac{0}{2} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{\text{sen} \left(2\omega \left(\frac{2\pi}{\omega} \right) \right)}{2\omega} - \frac{\text{sen}(0)}{2\omega} \right) \right) \right)^{1/2}$$

Al efectuar operaciones indicadas

$$RMSsen = \left(\frac{A^2}{T} \left(\left(\frac{T}{2} \right) - 0 \right) \right)^{1/2}$$

Se obtiene como resultado total de la integral

$$RMSsen = \left(\frac{A^2}{2} \right)^{1/2} = \frac{A}{\sqrt{2}}$$

Ecuación 10 Valor RMS de una señal sinusoidal

La amplitud (A) es operada por una constante $\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)$ que equivale a 0.707, dando un valor cercano al 71% de dicha amplitud. Mediante el siguiente ejemplo es posible corroborar lo mencionado anteriormente.

Al tener una señal con amplitud 5 el valor RMS es 3.54 aprox. mediante una regla de tres se puede determinar el porcentaje que corresponde al valor de 3.54 con respecto a 5.

$$5 \rightarrow 100\%$$

$$3.54 \rightarrow P\%$$

De esta forma se obtiene que el porcentaje del valor RMS (P%) es 71% aprox.

4.6.4 Auto Power Spectrum (APS) espectro de potencia automático [35]

Desde la matemática el espectro de potencia es el área bajo la curva de la señal analizada en un tiempo determinado que muestra como la potencia es distribuida en el dominio de la frecuencia. Para evidenciarla se requiere de un procesamiento digital en donde al computarizar una señal, se toman datos en un tiempo específico para luego aplicar la transformada rápida de Fourier y así obtener los valores de amplitud y frecuencia de la señal. Sin embargo, la potencia de la señal es la contribución de la parte positiva y negativa de este proceso, por lo tanto la potencia es el cuadrado de la magnitud de la transformada de Fourier en función del tiempo. De lo anterior se deduce que la potencia automática del espectro es descrita por la siguiente ecuación:

$$APS = |F(\omega)|^2$$

Ecuación 11 Potencia automática del espectro

El nombre de espectro de potencia automático es dado por la velocidad de procesamiento que podría llegar a tener el dispositivo que lo muestra. Si se quiere calcular la potencia total de un cuerpo se realiza una sumatoria de todas las magnitudes de potencia luego de haber realizado los pasos enunciados.

4.6.5 Cross Power Spectrum (CPS) Espectro de potencia cruzada [36]

El espectro de potencia cruzada (CPS) es una herramienta matemática que permite analizar la similitud de dos o más señales de potencia en donde al compararlas realizando una correlación cruzada se indicará el grado de similitud de estas, la manera de calcular la correlación es invertir el conjunto de datos de una de las señales para posteriormente aplicar una convolución, siendo esta la que permite encontrar la respuesta de un sistema mediante la respuesta al impulso.

$$Cross\ power\ spectrum = \frac{FFT(B) \times FFT^*(A)}{N^2}$$

Ecuación 12 Espectro de potencia cruzada

Donde FFT(B) y FFT(A) son espectros de potencia de las señales a comparar y N indica la longitud del espectro en la parte real e imaginaria.

4.7 Sistemas Embebidos [37] [38] [39] [40]

Los sistemas embebidos son una máquina o sistema computacional el cual consta de una específica e importante combinación de Software y Hardware para cumplir o realizar alguna tarea específica, estos sistemas son utilizados como componente de un sistema más grande el

cual está para cubrir necesidades específicas, este no puede ser igualado a un computador debido a que los ordenadores (PC's o Computadora personal) son dispositivos para cumplir con una gran cantidad de tareas y cubrir gran cantidad de necesidades. En estos sistemas compuestos el Hardware cumple con la función de proporcionar y garantizar el óptimo desempeño, comodidad y seguridad del embebido, y el software se encarga de proporcionar al sistema la funcionalidad específica y flexibilidad en el momento de su respectiva programación. Para que esto sea posible es necesario contar con una estructura determinada.

4.7.1 Arquitectura de los sistemas embebidos.

El Hardware se refiere a los componentes físicos que lo conforman y constituyen para realizar su respectiva tarea para el cual fue destinado, cabe resaltar que estos sistemas embebidos son diferentes en capacidad, tamaño y velocidad a los procesadores de un sistema de cómputo, a continuación se muestra un diagrama de bloques de la arquitectura general de un sistema embebido

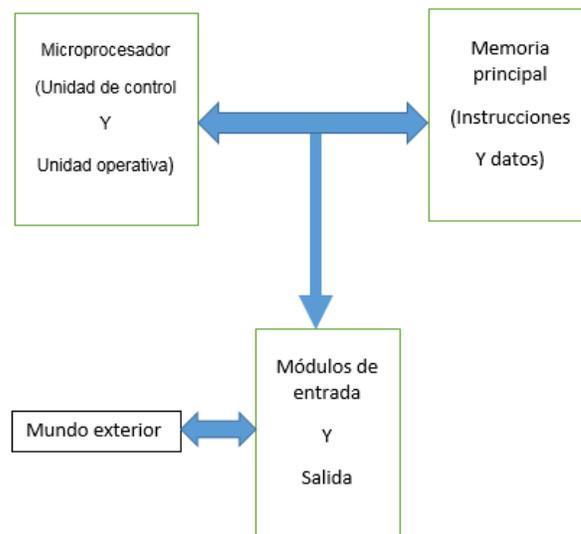


Ilustración 9. Arquitectura general de un sistema embebido. Tomado de: Microprocesadores y microcontroladores 8085, MCS-51 y ST-6.

Como se puede ver en la ilustración 7, un sistema embebido cuenta con tres bloques fundamentales para su funcionamiento, siendo estos, CPU (microprocesador), Memoria y módulos de entrada y salida. Por lo que son mencionados en los siguientes numerales

4.7.2 Microprocesador

Es un circuito integrado que contiene elementos que constituyen la CPU o unidad central de proceso dentro de una maquina programada, el microprocesador no es funcional por sí mismo y es necesario que se asocie y participe con otros componentes como la memoria y los módulos de entrada y salida como se muestra en la arquitectura general de un sistema embebido vista en la

ilustración 7, una vez logrado este conjunto el microprocesador se encarga de realizar la ejecución de las tareas y programas como el sistema operativo y las aplicaciones de usuario.

4.7.3 Memoria

El principal uso y función de la memoria es el almacenamiento de datos e información, el elemento primordial y básico de la memoria es la celda, las celdas de memoria comparten los estados estables los cuales se emplean para la representación del 1 y 0 binarios, existe la posibilidad de escribirse en ellas para fijar su estado y cada una de ellas pueden leerse y analizarse para detectar su estado. Existen dos tipos de memoria usadas en los sistemas embebidos: Memoria RAM y Memoria ROM.

La memoria RAM (Random Access Memory) una de las características que posee este tipo de memorias es la posibilidad de leer datos, como escribirlos rápidamente. Otra de sus características distintivas es que la memoria RAM es ligera. La memoria RAM siempre debe estar alimentada por corriente eléctrica, si la alimentación es interrumpida se pierden los datos en esta.

La Memoria ROM consiste en una memoria únicamente de lectura (Read Only Memory) que contiene una secuencia permanente de datos el cual no es posible alterarlo. La ROM es no volátil. Además, esta memoria suele ser utilizada para almacenar subrutinas de bibliotecas para funciones de uso frecuente.

4.7.4 Módulos de entrada y salida

Estos son los encargados de enviar o recibir las señales analógicas y digitales a los diferentes elementos del circuito que se encargan de generarlas o procesarlas, creando una comunicación entre el embebido y el mundo exterior. Esta comunicación se realiza mediante unos puertos de conexión que pueden ser aplicados por cableado físico o de forma inalámbrica. Entre los estándares más conocidos de puertos se encuentran RS232, RS485, USB, Ethernet, Fibra Optica, WiFi, Bluetooth, GPRS entre muchas otras.

4.7.5 Características de los sistemas embebidos

- Dispositivo que incluye un computador programable.
- Realiza esencialmente un grupo de funciones específicas
- No es un sistema de propósito general.
- Cantidades pequeñas de memoria, estas generalmente se establecen en el orden de los KB (KyloBytes)
- Sistema de alto desempeño con fuertes restricciones temporales
- Sistemas reactivos con características de tiempo real

4.7.6 Limitaciones de los sistemas embebidos

Todo sistema de cómputo presenta limitaciones en sus respectivos diseños, en los sistemas embebidos éstas se evidencian en las métricas de construcción y diseño ya que están ligadas al costo, tamaño, desempeño y consumo de energía. Esto quiere decir que al implementar componentes de mayor capacidad es necesario incrementar su tamaño y por ende el valor monetario del dispositivo.

4.7.7 Microcontrolador

Es un circuito integrado, “chip”, que está compuesto por bloques funcionales que componen un microordenador. Contando así con elementos como: CPU, Memorias ROM y RAM, y módulos de entradas y salidas (puertas paralelo y serie, temporizadores, etc). A continuación se muestra un ejemplo de la arquitectura de un microcontrolador (8048) de la familia MCS-48 con sus respectivos bloques funcionales.

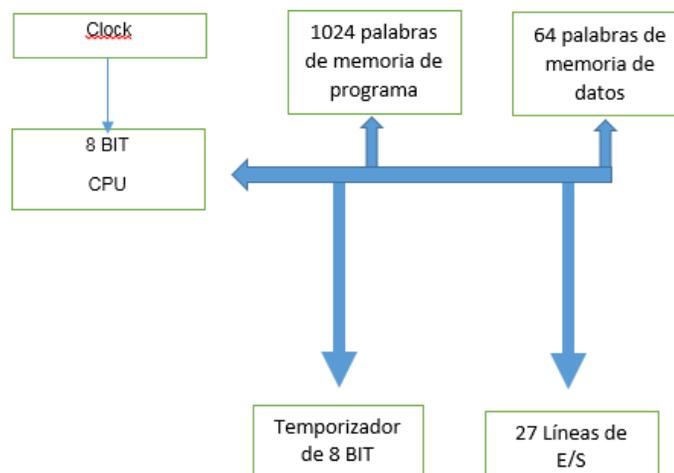


Ilustración 10. Arquitectura del microcontrolador 8048. Tomado de: *Microprocesadores y microcontroladores 8085, MCS-51 y ST-6.*

El microcontrolador se compone de un microprocesador que ha sido optimizado para aplicaciones de control embebidas, en donde uno de los microcontroladores más populares en la academia y en el mercado es el Arduino.

4.7.8 Arduino

Es una plataforma de desarrollo de prototipos de código abierto que se basa en un software y hardware de uso fácil y práctico, El entorno de programación de Arduino es una implementación de Wiring, una plataforma de computación física parecida, que a su vez se basa en Processing, un entorno de programación multimedia.

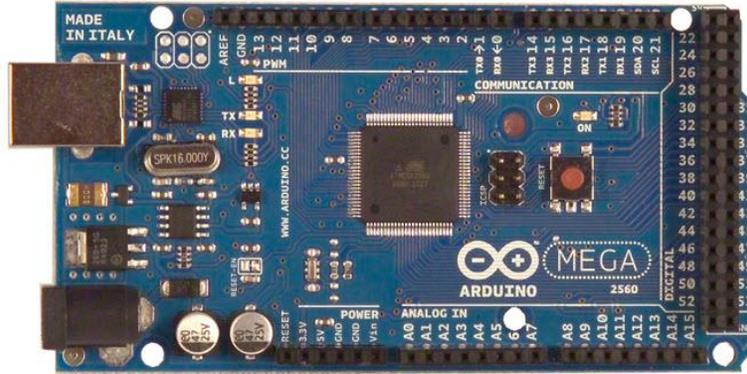


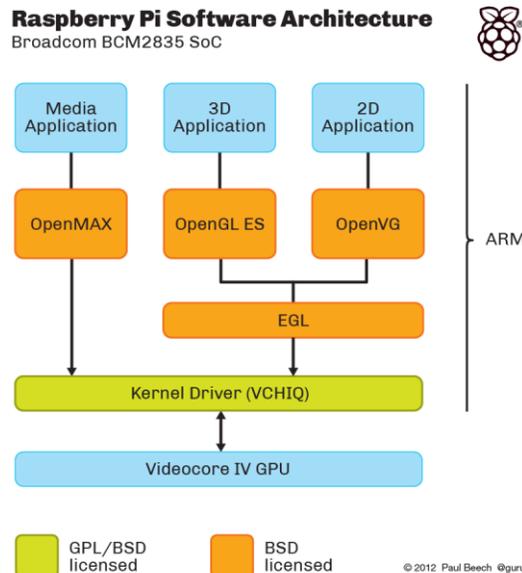
Ilustración 11. Arduino. Tomado de:
<http://co.mouser.com/newproducts/newproductsmanufacturers.aspx?mfg=arduino&virtualdir=arduinomega2560%2f>

A continuación, se presentan las características de este microcontrolador

- Procesador ATmega-2560
- Voltaje de alimentación: 5 voltios
- Memoria Flash: 256 KB
- Memoria RAM: 4KB
- Resolución de bits: 10 bits

4.7.9 Raspberry Pi B+

Es un microprocesador de bajo costo que se asemeja a un computador del tamaño de una tarjeta de crédito, este dispositivo utiliza pantalla, teclado y mouse de forma estándar, los principales lenguajes de programación para programar una Raspberry Pi son scratch y Python, la raspberry Pi se compone de una procesador de tipo ARM como lo muestra la ilustración 7, este tipo de procesador posee una arquitectura de tipo RISC (Reduced Instruction Set Computing) la cual permite desarrollar óptimamente aplicaciones de baja potencia de procesamiento.



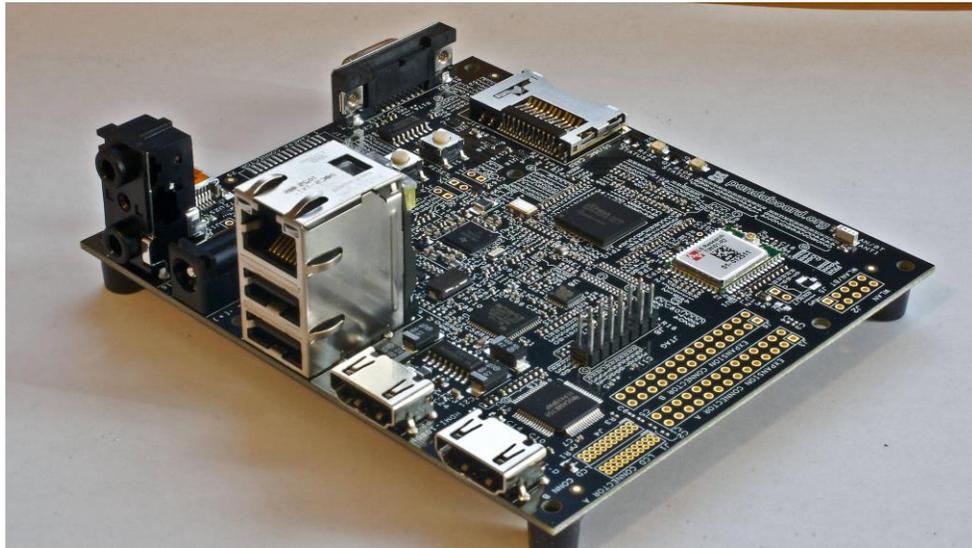
*Ilustración 12. Arquitectura de Raspberry Pi B+ tomado de:
<https://www.raspberrypi.org/products/model-b-plus/>*

A continuación, se presentan las características principales de éste Sistema Embebido

- Procesador: ARM1176
- Voltaje de Alimentación: 5 voltios
- Memoria RAM: 512 MB
- Resolución de bits: 12 bits

4.7.10 Panda Board

La PandaBoard es un sistema embebido de bajo costo y de bajo consumo, este sistema está desarrollado basado en el integrado OMAP4430 de *Texas instruments*, esta tarjeta es capaz de trabajar largos tiempos y este trabaja sobre una plataforma de software libre



*Ilustración 13. Tarjeta PandaBoard. Tomado de:
<http://pandaboard.org/pbirclogs/index.php?date=2011-07-06>*

5 Desarrollo Ingenieril

Para diseñar e implementar un sistema que permita medir y analizar las vibraciones fue necesario plantear una estrategia en donde se conozca, lo referente a la señal a capturar (la vibración), la adquisición de datos (los sensores, los filtros análogos, los atenuadores, los preamplificadores, el convertidor A/D, etc.), y el posterior procesamiento digital de la señal cómo es posible ver en la ilustración 10.

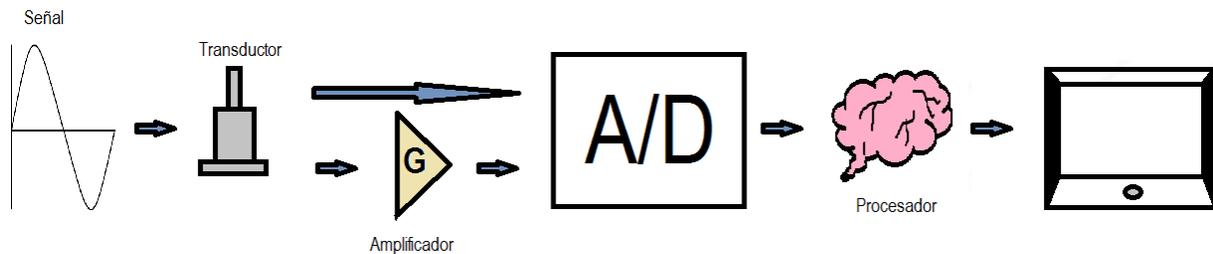


Ilustración 14 Implementación de la etapa del hardware. Fuente propia.

5.1 Referente a la señal:

La vibración es un movimiento oscilatorio u oscilación, en el cual un cuerpo ha salido de su posición de reposo, pero a su vez tiene la capacidad de volver a ella después de un intervalo de tiempo determinado (elasticidad del sistema). Al experimentar movimiento un cuerpo es posible conocer el desplazamiento, la velocidad y aceleración que éste tiene con respecto a su estado inicial o punto de equilibrio. [41] [42] De lo anterior se puede decir y agregar que la señal presenta características como magnitud (distancia entre el máximo y mínimo de elongación), frecuencia (ciclos por segundo), duración (tiempo que se presenta la vibración) y dirección (ejes donde se presenta la vibración). Para determinar el valor que pueden tener algunas de éstas características y cumplir con el objetivo general de éste proyecto, el cual indica la necesidad de medir y analizar la vibración en estructuras, máquinas y seres humanos, se tuvieron en cuenta normas que evalúan ésta señal en dichos cuerpos, como lo son: la ISO 2631 (humanos), BS 7385

(Estructuras arquitectónicas) e ISO 10816 (máquinas). Estas normas se han basado en estudios matemáticos y estadísticos, generando en el caso de los seres humanos curvas de ponderación que describen la respuesta del cuerpo a la exposición de vibración, según sus ejes perpendiculares y su posición. [43] Además Considerando que se utilizaron los acelerómetros con que cuenta el laboratorio de la facultad de ingeniería de sonido de la Universidad de San Buenaventura, sede Bogotá, el dispositivo implementado también fue acondicionado y limitado por las especificaciones de éstos transductores, para éste caso en particular se emplean los de la marca Wilcoxon Research, en donde el sensor que suele ser usado para medición de la vibración presente en estructuras es un acelerómetro denominado por sus fabricantes como sísmico, éste es un modelo 731A y requiere de un amplificador (P31) como fuente de alimentación para su operación, mientras que el transductor empleado para medir la exposición a vibraciones en los seres humanos y la vibración de las máquinas, es un acelerómetro que mide simultáneamente en 3 ejes ortogonales (X,Y y Z) denominado triaxial modelo 993A (Como se muestra en la tabla N°1). Cabe aclarar que estos sensores son lineales según las hojas de especificaciones dadas por el fabricante (como se ilustran en la tabla1), esto quiere decir que la respuesta en frecuencia que tienen los transductores va a ser plana para el rango de frecuencias en el que estos capturan la señal. Para demostrar la veracidad de las afirmaciones anteriores (respuesta en frecuencia plana de ambos sensores) se requería un sistema que permitiera generar una amplitud constante a lo largo del rango de frecuencias. Sin embargo no se contaba con dicho sistema, por tal motivo se asume que los datos brindados por el fabricante son veraces. [44]

A continuación se muestran las tablas (2 y 3) que resumen los datos que sirvieron para determinar los valores característicos de la señal.

Los siguientes son datos tomados de las hojas de especificaciones proporcionadas por el fabricante de los transductores:

TRANSDUCTOR	N° 1 Sísmico	N°2 Triaxial
Sensibilidad	Ac-10 V/G Vel-10 V/in/s	Ac-100 mV/G
Respuesta en frecuencia	Vel 0.8-150 Hz	2-2000 Hz
Rango máximo de vibración	0.5 Gpico	50 Gpico
Impedancia de salida	2500Ω	100Ω
Alimentación	36V	18-30V

Tabla 2 Resumen hojas de especificaciones transductores empleados. Tomado de: <http://www.wilcoxon.com/prodpdf/731A-P31%2098079a1.pdf>

Según la tabla 1 se dedujo que el vibrómetro fue limitado en frecuencia y amplitud por éstos transductores, ya que en los casos N° 1 y N° 2 el máximo voltaje de salida es cercano a 5Vpico, lo que indicó que el rango de amplitud que se utilizó para digitalizar fue ± 5 Vpico. Posterior a esto, se encontró el valor mínimo en las normas previamente mencionadas.

Los siguientes son datos de los valores mínimos, rangos de frecuencias y unidades de medida tomados de normas internacionales referentes a las vibraciones:

Normas	Estructuras BS 7385	Máquinas ISO 10816	Seres humanos ISO 2631
Rango de frecuencias	4Hz-250Hz	Depende de la máquina. Anteriormente el rango fijo era: 10Hz-1000Hz	0.1Hz-1250Hz
Amplitud mínima relevante	$15 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ F<4Hz Am= 0.6mm	$0.28 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ 0.22 G	$0.015 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
Unidades de medida	$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$ Velocidad Pico F<4Hz mm Desplazamiento	$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$ Velocidad RMS $\frac{\text{mm}}{\text{s}^2}$ Aceleración RMS	$\frac{\text{mm}}{\text{s}^2}$ Aceleración RMS

Tabla 3 Resumen valores mínimos, rangos de frecuencias y unidades de medida tomados de normas internacionales Tomado de: ISO 10816, ISO2631 y BS7385.

De las tablas anteriormente vistas se quiere aclarar al lector el uso de los acelerómetros según el tipo de medición y norma utilizada para el análisis de vibraciones, la siguiente tabla muestra lo anteriormente mencionado.

	Estructuras	Máquinas	Seres humanos
--	-------------	----------	---------------

Normas	BS 7385	ISO 10816	ISO 2631
Acelerómetro usado	Sísmico	Triaxial	Triaxial

Tabla 4 Especificación del uso del acelerómetro según el tipo de medición.

Con respecto a las tablas 2 y 3, se diseñó e implementó el sistema que permite medir y analizar las vibraciones, obteniendo como resultado las especificaciones necesarias que requería el sistema y que se muestran a continuación.

Sistema	Vibrómetro
Canales de entrada	4 (3 tri-axial, 1 sísmico)
Impedancia de entrada	$Z > 10 * 2500 \Omega$
Respuesta en frecuencia	Vel 0.8 - 150 Hz 2-2000 Hz
Frecuencia de Muestreo	$F_s > 2 * F_{\text{máx}}$ $F_s > 2 * 2000 \text{Hz}$
Amplitud mínima	$V = 0.28 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ $\text{Acc} = 0.015 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
Rango dinámico	$\pm 5 \text{ Vpeak}$

Tabla 5 Especificaciones para diseño de sistema Tomado de: Fuente propia.

Para la elección de la tarjeta de adquisición de datos que se ajustó a lo necesario, fue indispensable determinar las características mínimas que garantizaron la correcta toma de información.

5.2 Adecuación de la señal y adquisición de datos

5.2.1 Alimentación del acelerómetro triaxial

Los acelerómetros piezo eléctricos IEPE requieren cierto voltaje de alimentación para poder funcionar. En el caso particular del acelerómetro Triaxial Wilcoxon 993A es necesario un voltaje de alimentación entre 18VDC y 30VDC. Para lo cual se implementó un circuito conocido como “booster” o elevador de voltaje que toma los 5VDC provenientes de uno de los puertos USB del sistema embebido elegido y lo eleva hasta 18VDC. Sin embargo este elemento eleva también la

Ilustración 16 Datos alimentación eléctrica acelerómetro Wilcoxon 993A. Tomado de [http://www.wilcoxon.com/prodpdf/993A\(98292d3\).pdf](http://www.wilcoxon.com/prodpdf/993A(98292d3).pdf)

El circuito de regulación es presentado y explicado a continuación.

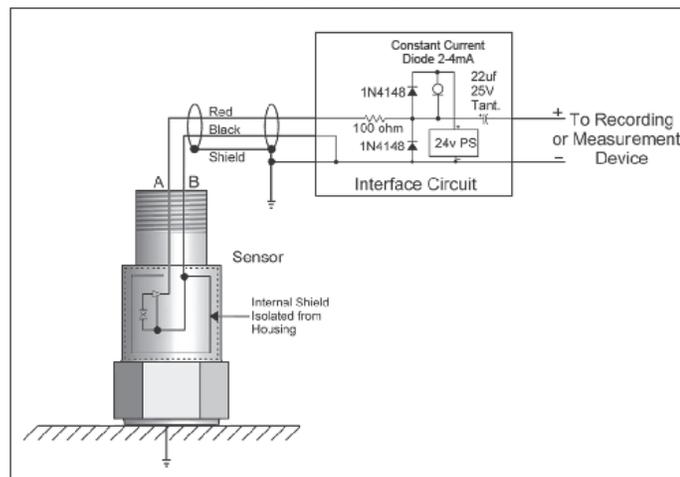


Ilustración 17. Datos alimentación eléctrica acelerómetro Wilcoxon 993A. Tomado de http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/123456789/4783/BARBOZA_ANDERSON_SISTEMA_FALLAS_BOMBA_CENTRIFUGA_ANEXOS.pdf?sequence=2

Los diodos 1N4148 hacen que la corriente fluya en un solo sentido, evitando que la corriente otro camino que no sea el del diodo regulador de corriente. El condensador de 22uF hace un desacople de la señal DC evitando que esta se sume con la señal que es captada por el acelerómetro. El diodo regulador de corriente de referencia 1N5308, es el componente principal del circuito ya que es el responsable de limitar y regular la corriente a un valor nominal de 2,7mA.

5.2.1 Muestreo, cuantificación y codificación:

Según Nyquist para digitalizar una señal es necesario que la frecuencia de muestreo sea como mínimo el doble de la frecuencia máxima de la señal análoga (frecuencia de Nyquist). Para este caso se determinó la frecuencia de Nyquist en 2000Hz (según especificaciones dadas por el fabricante del sensor N°2 debido a que esta frecuencia era mayor a la del sensor N°1), por lo tanto la frecuencia de muestreo tenía que ser mínimo 4000Hz.

Para determinar la profundidad en bits o cuantificación requerida se tuvo en cuenta el rango de voltaje (para el caso 10Vpico-pico ± 5 Vpico) y los pasos de obtención de voltajes (cuantos datos se tomaron en amplitud). Para entender mejor la manera correcta de seleccionar el número de bits necesarios se puede considerar el rango como una línea recta.

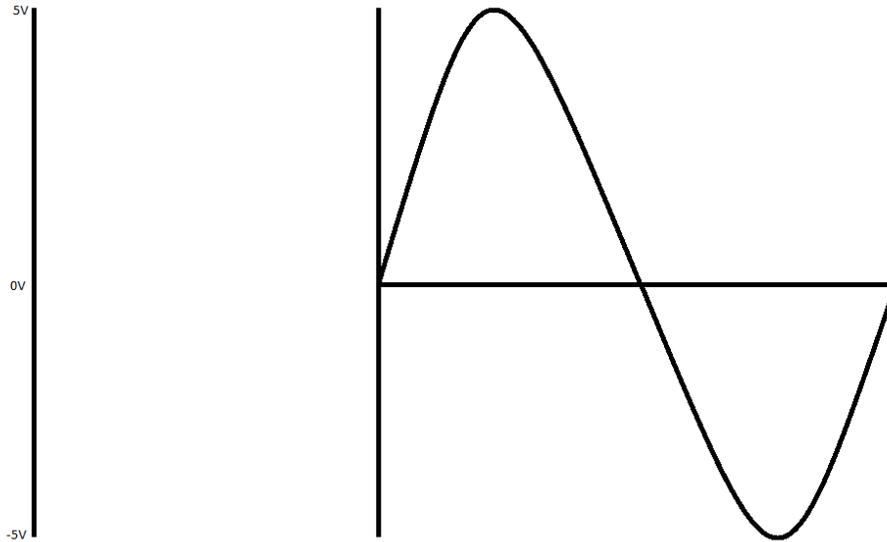


Ilustración 18. Ejemplo de rango dinámico. Fuente propia.

Por lógica matemática al querer fraccionar una línea recta en partes iguales se presenta la siguiente expresión:

$$P = \frac{R}{D}$$

Ecuación 13 Cantidad de fracciones de la señal

En donde R va a ser el rango de la línea, D en cuantas partes se va a dividir R y P cada cuanto se va a fraccionar R o cuántos “P” son necesarios para cubrir el largo de R desde D. Un ejemplo sería una línea con un largo de 10 unidades (R=10), que se quiere dividir en 4 (D=4) dando como resultado un paso o posiciones de 2.5 (P=2.5).

Para encontrar P para el vibrómetro se tenía R=10V y $D=0.28 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ o $0.015 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$. Ahora bien, al ser una relación adimensional era necesario que tanto R como D tuvieran las mismas unidades. Aplicando una regla de tres se determinó el voltaje equivalente a la velocidad o aceleración. La hoja de especificaciones del acelerómetro sísmico presenta la sensibilidad en unidades de pulgadas por lo que se debía primero pasar de milímetros a esta referencia.

$$1 \frac{\text{in}}{\text{s}} \rightarrow 25.4 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

$$x \rightarrow 0.28 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

$$x = 0.011024 \frac{\text{in}}{\text{s}} \text{ aprox}$$

Al trabajar bajo la misma unidad solo faltaba encontrar su voltaje equivalente

$$10V \rightarrow 1 \frac{\text{in}}{\text{s}}$$

$$v1 \rightarrow 0.011024 \frac{\text{in}}{\text{s}}$$

$$v1 = 110.24\text{mV}$$

Se obtuvo que el voltaje RMS mínimo necesario para 0.28 mm/s es 110.24mV al medir con el transductor sísmico (N°1).

El mismo proceso se realizó para el acelerómetro triaxial (N°2) en donde según la sensibilidad dada en la hoja de especificaciones fue posible encontrar el voltaje RMS mínimo necesario para digitalizar.

$$100\text{mV} \rightarrow 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$v2 \rightarrow 0.015 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$v2 = 0.153\text{mV}$$

Esto indicaba que al medir una vibración con una aceleración de 0.015m/s² el transductor entregaría un voltaje RMS de 0.153mV.

Una vez que se obtuvieron los valores de referencia (v1 y v2) se procedió a encontrar el número de pasos necesarios para cuantificar la señal o la cantidad de números indispensable para cubrir todo el rango desde el denominador D. Sin embargo al ser esta una relación de voltajes pico a pico es necesario hacer una conversión antes de operar. Este valor fue posible encontrarlo teniendo en cuenta lo estipulado en el numeral 3.1.10 de la norma ISO 8041 donde se indica que la señal de referencia es sinusoidal y según la ecuación 10 vista en el numeral 4.6.3: para una señal de este tipo su valor RMS permite despejar la amplitud (A) y así obtener el valor pico. Ahora bien al saber que la señal cuenta con un valor pico positivo y negativo (valor pico-pico) Este valor se obtiene de multiplicar la amplitud por dos.

$$v1p = 110.24\text{mV} * \sqrt{2}$$

$$v_{2p} = 0.153\text{mV} * \sqrt{2}$$

$$v_{1pp} = 155.9\text{mV} * 2$$

$$v_{2pp} = 0.216\text{mV} * 2$$

$$v_{1pp} = 311.8\text{mV}$$

$$v_{2pp} = 0.432\text{mV}$$

$$P1 = \frac{10\text{V}}{311.8\text{mV}}$$

$$P1 = 32.07$$

$$P2 = \frac{10\text{V}}{0.432\text{mV}}$$

$$P2 = 23148.15 \text{ aprox}$$

Al ser los bits números binarios, se definieron por la ecuación 2^N en donde cualquier número pudo ser representado mediante dos valores, típicamente 0 y 1, N es el número de bits que son necesarios para representar el número. En este caso se igualaron P1 y P2 a la ecuación de combinaciones necesarias para representar los números binarios obteniendo la siguiente ecuación:

$$P = 2^N - 1$$

Ecuación 14 Cantidad de bits necesarios

Para cumplir con la igualdad y no alterar la ecuación 14, en el caso de que N tenga como valor el número 0 entonces P será -1 y debería ser 0 razón por la cual se agrega el -1.

Se despeja N y se obtiene el número de bits necesarios para cuantificar desde la mínima división D de la señal hasta el rango o límites R. Para los casos P1 y P2 se muestran los resultados correspondientes.

$$N1 = \log_2(32.07 + 1)$$

$$N2 = \log_2(65359.48 + 1)$$

$$N1=5.05 \text{ aprox}$$

$$N2=14.5 \text{ aprox}$$

Al ser los bits números enteros se debe tomar el valor del entero siguiente entonces para este caso $N1=6$ y $N2=15$.

En conclusión, fue necesario un conversor análogo digital que tenga una frecuencia de muestreo mayor o igual a 16KHz (4KHz para 4 canales multiplexados), y una resolución de bits no menor a 15 bits. Sin embargo la norma ISO 8041 indica que el rango dinámico de la señal debe ser mayor a 60dB es decir que es posible tener 10 bits de resolución en la tarjeta de adquisición de datos. Esto se debe a que la variación de amplitud determina cual es el rango máximo de voltaje que entra en la tarjeta, por lo tanto es posible que R sea menor a 10 V y permita captar valores aún menores a los 153 mV. Sin embargo si se quisiera garantizar adquirir un valor RMS de 153mV para un rango de 10, se pensó en aplicar una regla de tres en donde al saber que el valor RMS es cercano al 70% o 71% de la energía pico de la señal, es posible encontrar el valor correspondiente al 1% y así adquirir datos de dicho valor RMS. Ejemplo:

$$153\text{mV} \rightarrow 71\%$$

$$v \rightarrow 1\%$$

$$v = 2.155\text{mV}$$

Este valor indicaría el valor mínimo requerido para digitalizar un valor RMS de 153mV. Ahora bien si se tiene en cuenta que éste valor pretende juzgar la percepción humana, no es necesario garantizar el 1% de dicho voltaje porque según las características de la señal esta puede ser de amplitud variable o constante. En caso que la amplitud sea constante, la adquisición de datos depende y se ajusta según el valor máximo de la señal teniendo como tope $\pm 5V_{\text{pico}}$ pero al tener valores menores como máximo de amplitud la resolución aumenta y se pueden obtener datos de menor amplitud dando posibilidad de captar niveles menores al requerido. Por otro lado cuando la amplitud de la señal varía, se tienen diferentes magnitudes en donde algunas presentan un nivel mayor a otras, representando más energía y permitiendo discriminar las pequeñas variaciones que aunque presentes y posiblemente algunas perceptibles por el ser humano, no suelen contribuir energéticamente como las de gran amplitud.

5.2.2 Tarjeta de adquisición de datos

Según las tarjetas de adquisición de datos estudiadas en el marco teórico se realizó una comparación para determinar cuál de estas serviría para el correcto desarrollo del proyecto teniendo en cuenta las características que se muestran en la tabla 6

Características	NI myDAQ	USB-1208FS
Resolución de bits	16 bits	12 bits
Velocidad de muestreo	200 kS	50 kS

Entradas análogas	2 entradas	8 entradas
Entradas y salidas digitales	8	16

Tabla 6 Comparación tarjetas de adquisición de datos

La tarjeta NI myDAQ no pudo ser utilizada a pesar de su amplia resolución de bits y de una frecuencia de muestreo suficiente para el proyecto, en consecuencia que solo posee dos canales de entrada sencilla como muestra la Tabla 6 no fue suficiente para la utilización en el vibrómetro que requiere mínimo tres entradas para el acelerómetro triaxial, en cambio la tarjeta USB 1208FS cumplió con la mayoría de las características más importantes requeridas por el vibrómetro. Como se puede identificar en las características de esta tarjeta de *mc computing*, el número de canales es suficiente ya que solo se necesitaron mínimo tres canales y esta tarjeta cuanta con ocho.

5.2.3 Filtro Anti Aliasing

Cuando una señal análoga es muestreada a una frecuencia menor que la de Nyquist se presenta un solapamiento de frecuencias que alteran la señal original. De esta forma cuando la señal es reconstruida se generan errores en esta.

La solución a este fenómeno consiste en el diseño de un filtro pasa bajas “anti-aliasing” cuya frecuencia de corte debe ser la mitad de la frecuencia de muestreo $F_s/2$. [48]

La razón por la cual este filtro no se implementa en el dispositivo es porque los acelerómetros no registran a más de 2KHz y la frecuencia de muestreo de la tarjeta de adquisición de datos USB 1208FS es de 12,5KHz.

5.2.4 Preamplificador

Para este proyecto se decidió utilizar la tarjeta de adquisición USB1208Fs debido a que cumple con la mayoría de las características más importantes requeridas por el vibrómetro y por la disponibilidad de uso de la tarjeta (mencionado en el anterior apartado). En la norma ISO 8041 se determina que un equipo de medición debe estar por encima de 10 bits permitiendo usar la tarjeta seleccionada sin ninguna restricción. Sin embargo la resolución de bits aunque suficiente para cuantificar el mínimo valor de voltaje requerido para la percepción de los seres humanos a vibración, según lo visto en el numeral 5.3, es posible que se quiera estudiar más a fondo estas amplitudes de bajo nivel en normas próximas. Por lo tanto se decide realizar una amplificación de la señal teniendo en cuenta como valor de referencia el valor RMS de 0.153mV y así poder desarrollar un dispositivo que permite el ingreso de nuevas o futuras normativas. En conclusión para solucionar el problema de la baja resolución de bits en caso de querer estudiar la percepción de seres humanos a vibración se implementó un preamplificador el cual elevará el valor de voltaje adquirido por el sensor como se ha mencionado anteriormente.

Para esto se implementó un preamplificador no inversor que se diseñó teniendo en cuenta que el voltaje de variación mínima para 11 bits es 4.88mV y la variación mínima deseada según la

normativa y transductores a emplear es 0.153mv, relacionando ambos voltajes se obtiene una ganancia necesaria de 31.91 que para efectos de diseño se va a aproximar a 32. El circuito del amplificador no inversor es el siguiente:

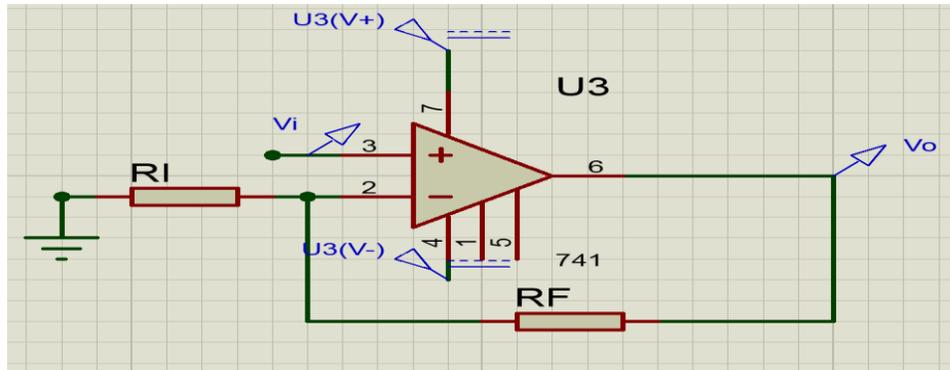


Ilustración 19. Circuito amplificador no inversor. Fuente propia

Por análisis de circuitos mediante leyes de Kirchoff y Ohm se puede determinar la ganancia del circuito. [46]

Vo o voltaje de salida va a ser la suma del voltaje de entrada y el voltaje que cae en Rf.

$$V_o = V_i + V_{RF}$$

Ecuación 15 Voltaje de salida

El voltaje en Rf puede ser descrito por la I que pasa por esa resistencia multiplicada por su valor.

$$V_o = V_i + I * R_f$$

Ecuación 16 Voltaje de salida en términos de Rf

La corriente en términos de Ri es descrita por el voltaje de entrada sobre su valor.

$$V_o = V_i + \frac{V_i}{R_i} * R_f$$

Ecuación 17 Voltaje de salida en términos de Ri

Al realizar factor común del voltaje de entrada la expresión queda:

$$V_o = V_i \left(1 + \frac{R_f}{R_i} \right)$$

Ecuación 18 Voltaje de salida en términos de Rf y Ri

Al ser la ganancia la relación del voltaje de salida con el de entrada la ecuación será:

$$G = \frac{V_o}{V_i} = \left(1 + \frac{R_F}{R_i}\right)$$

Ecuación 19 Ganancia

Para $G=32$ y $R_i=1000\Omega$:

$$R_F = (32 - 1) * 1K\Omega = 31K\Omega$$

Se simuló el circuito propuesto para determinar si cumple con las expectativas obteniendo los siguientes datos:

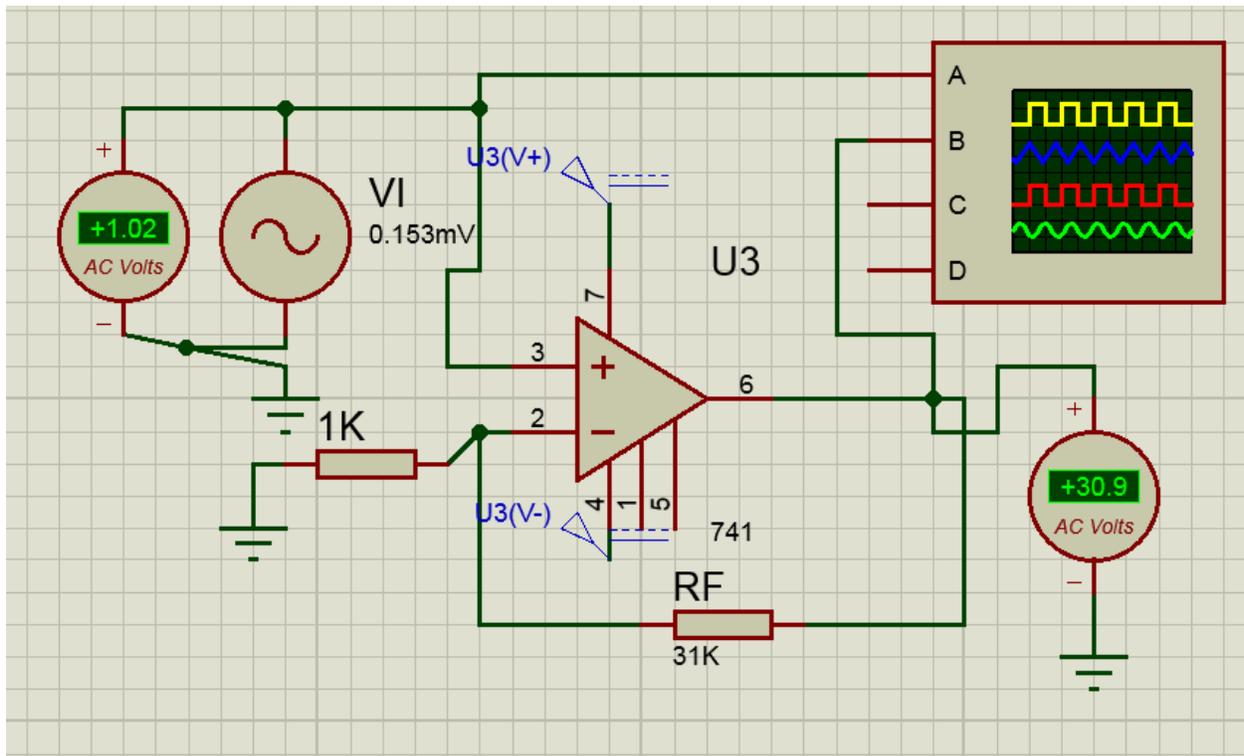


Ilustración 20. Circuito empleado para simular amplificador no inversor. Fuente propia.

Según el voltaje medido en los nodos V_i y V_o la ganancia que puede describir el circuito es:

$$G = \frac{30.9}{1.02} = 30.29$$

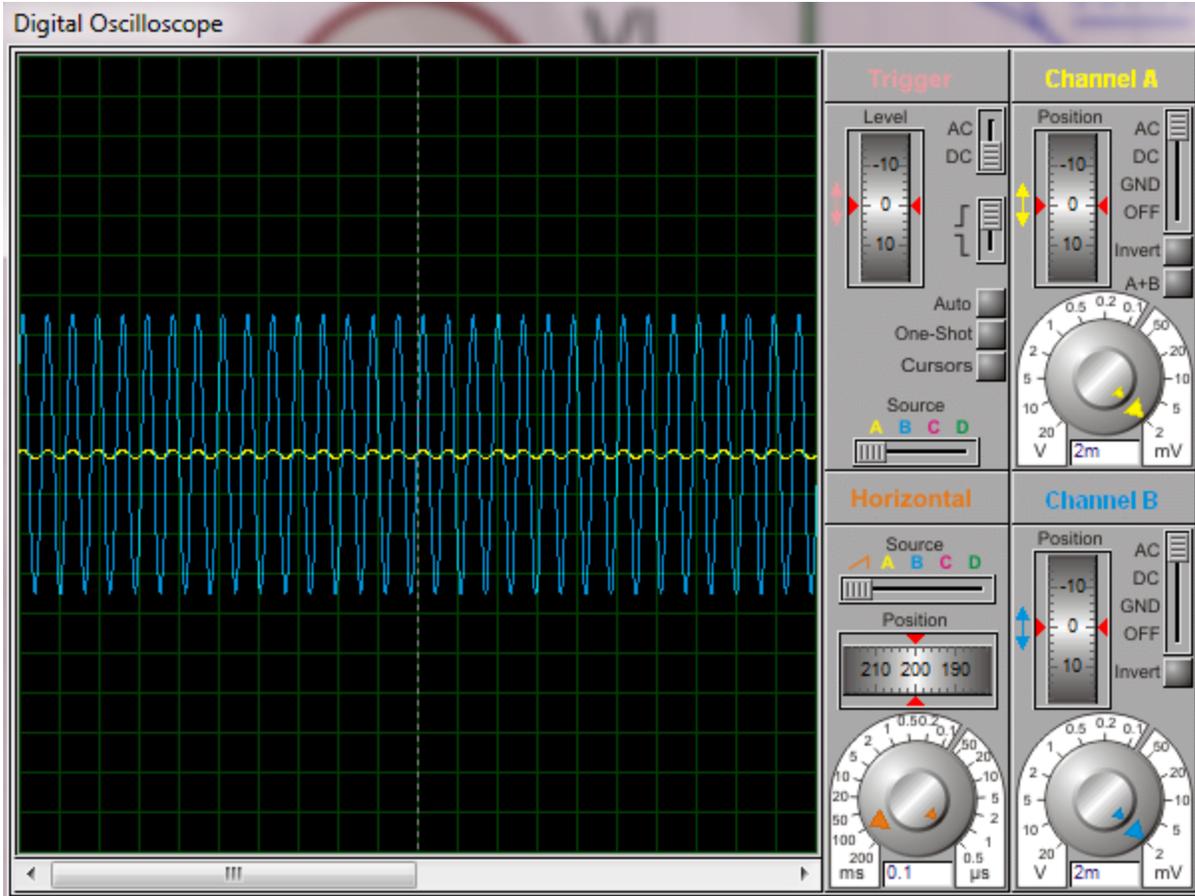


Ilustración 21. Simulación osciloscopio amplificador no inversor. Fuente propia.

Gráficamente se puede observar que la ganancia está cercana a 32 veces como se había estipulado anteriormente debido a que cada cuadro representa 2mV, el voltaje de salida del circuito (azul) representa tres cuadros y medio de amplitud alrededor de 7mV, al ser una onda seno su valor RMS, que se calcula como el voltaje pico*0.707, es de 4.949mV mientras que en la entrada el voltaje no alcanza a superar los 0.2mV (menos de la mitad de un cuadro), Determinando que el preamplificador puede satisfacer las necesidades.

El amplificador operacional de referencia LF351N necesita para su funcionamiento ser alimentado con un voltaje positivo y uno negativo de igual magnitud. La forma más común de obtener estos voltajes es creando una fuente dual con transformador y etapas de rectificación, la desventaja de esto es que el circuito ocupa mucho espacio y necesita de una fuente continua de alimentación, provocando que el dispositivo deje de ser portátil. Por lo tanto se ha utilizado un circuito que consiste en un divisor de voltaje, que por medio de transistores PNP y NPN permiten crear una fuente simétrica con la mitad del voltaje que se suministra. En este caso se utiliza la alimentación que genera la fuente conmutada del integrado XL6009 de 18V teniendo una fuente dual con +9V y -9V y una tierra virtual para poder alimentar los amplificadores operacionales utilizados en los preamplificadores.

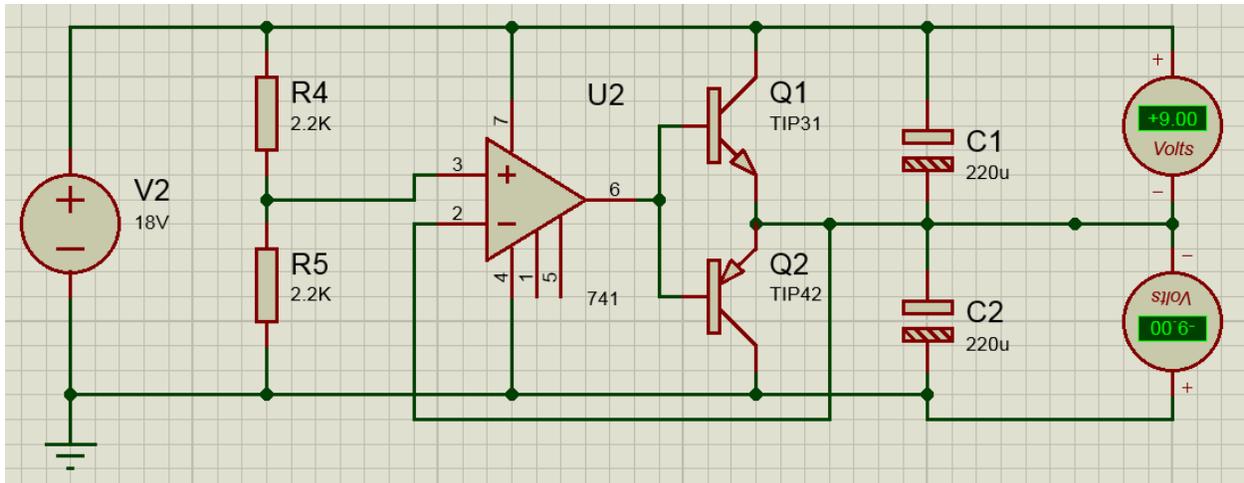


Ilustración 22. Esquemático de fuente dual a partir de fuente simple. Fuente propia.

5.3 Hardware

5.3.1 Formas de eliminar o disminuir el ruido eléctrico [47]

Siempre que se tenga un circuito eléctrico o electrónico la posibilidad que señales parásitas intervengan y afecten el correcto funcionamiento del circuito. En el caso de circuitos o dispositivos utilizados para medición es importante que todas las señales que se vayan a recibir y transmitir sean lo más limpias posibles.

Las interferencias o señales parásitas más comunes que se pueden presentar en un circuito son el ruido de tierra (HUM), y las interferencias electromagnéticas. Para esto se utilizan dos herramientas que son los filtros de desacople y los planos o polígonos de tierra.

Los filtros de desacople consisten en un diseño de filtro pasa-altas el cual elimina las componentes de corriente continua que tenga la señal, estos filtros se colocan al inicio de cualquier etapa análoga del circuito. También se colocan en los terminales VCC y GND del circuito para eliminar el ruido eléctrico proveniente de la alimentación del circuito.

Los polígonos de tierra o planos de masa son configuraciones que se realizan en la placa del circuito PCB para conducir las señales parásitas hacia el terminal de tierra GND a través de caminos conductores de baja impedancia.

Otro elemento que permite el bloqueo de señales parásitas es la jaula de Faraday, este sistema consiste en una malla metálica ubicada alrededor del circuito electrónico. El efecto que produce este cerramiento es anular el campo electromagnético existente.

5.1.1 Acople de impedancias

Las impedancias de entrada y salida presentes en la adquisición de datos del dispositivo son:

- Impedancia de entrada Tarjeta de Adquisición de Datos USB 1208FS **122K Ω**
- Impedancia de Salida Acelerómetro Triaxial Wilcoxon 993A **100 Ω**
- Impedancia de Salida Acelerómetro Sísmico Wilcoxon 731A **2,5K Ω**

Por conceptos de máxima transferencia de voltaje y de pérdidas de energía existe una regla en la cual la impedancia de salida de una etapa debe ser mucho menor que la impedancia de entrada de la siguiente etapa.

Además, se presenta una fórmula con la cual se puede calcular el porcentaje de energía que no se perderá entre etapas.

$$n = \frac{Z_i}{Z_i + Z_o}$$

Ecuación 20 Porcentaje de energía no perdida entre etapas

Siendo:

n; Porcentaje de energía que no se pierde

Z_i; Impedancia de entrada de la tarjeta de adquisición de datos

Z_o; Impedancia de salida de los acelerómetros

De esta forma se tiene que al conectar el acelerómetro triaxial Wilcoxon 993A el porcentaje es de 99,92% y al conectar el acelerómetro sísmico Wilcoxon 731A el porcentaje es de 98.12%, ya que las pérdidas en estos casos son mínimas, el uso de una etapa para acoplar impedancias no es necesaria.

5.1.2 Especificaciones del hardware

Las características del sistema montado se presentan a continuación.

- Tarjeta madre Toshiba LA-5841P con procesador Intel Atom N450 velocidad de reloj 1,66 GHZ.
- Memoria RAM DDR2 de 1GB.
- Disco Duro de 120GB y 5400rpm.
- Pantalla LED de 10" Resolución 1024x600.
- Bus Gráfico de Datos Mobile Intel GMA 3150.
- Interfaz USB 2.0 Integrada en Tarjeta Madre.

Además de esto se adaptó una batería de litio de 10,8V y 5300mAh para alimentar el dispositivo durante 3 horas de funcionamiento aproximadamente. Para cargar la batería se implementó un adaptador de corriente de 110V a 10,8V 1200mA.

Para ingresar datos en el software y navegar a través de la interfaz de usuario se utilizó un teclado inalámbrico con trackpad referencia 08RF/2.2 con alcance de hasta 10 metros.

Ya que la tarjeta madre solo tiene un puerto USB se adaptó un Hub USB de 4 Puertos para conectar el receptor del teclado inalámbrico, el conector USB serial de la tarjeta de adquisición de datos 1208FS, y un puerto libre adicional para guardar datos, cargar drivers de la tarjeta de adquisición y el software que se ha creado para el análisis de vibraciones.

5.1.3 Características del hardware utilizado respecto a otros sistemas embebidos

COMPARACIÓN DE LOS SISTEMAS EMBEBIDOS		
	Raspberry Pi B+	Tarjeta Madre Toshiba LA-5841P
Procesador	ARM1176 con reloj de 750MHZ	Intel Atom N450 velocidad de reloj 1,66 GHZ.
Memoria RAM	RAM de 512MB	Memoria RAM DDR2 de 1GB
Capacidad de almacenamiento	memoria SD de hasta 32GB	Disco Duro de 120GB y 5400rpm
Puertos USB	Multiplexor con 4 puertos USB	Interfaz USB 2.0 (3 puertos)
Costo total	420.000 COP	200.000 COP

Tabla 7 Comparación de los sistemas embebidos contemplados para el proyecto.

Al observar las características de ambos sistemas embebidos que se ven en la tabla se puede notar que la tarjeta madre tiene muchas más ventajas que la Raspberry Pi B+, y sería conveniente la mayor velocidad de procesamiento posible. Para poder correr el software de análisis de vibraciones es necesario una memoria RAM de mínimo 1GB y que permita instalar el sistema operativo de Windows, algo que la Raspberry Pi B+ no puede, tan solo el Raspberry Pi 2 posee la instalación de este sistema operativo.

Respecto a los costos de estos sistemas embebidos, la Raspberry Pi B+ se encuentra en el mercado alrededor de \$160,000 y la tarjeta de almacenamiento de 8GB tiene un costo aproximado de \$40,000, la pantalla HDMI cuesta alrededor de \$80,000. Con esto más los demás periféricos, el sistema completo costaría \$420,000 aproximadamente.

La tarjeta madre junto con el disco duro, memoria RAM y pantalla LED cuesta \$100,000 aproximadamente. Esto más los demás periféricos el sistema completo costaría \$200,000 aproximadamente un poco menos de la mitad que el otro sistema y con todas las características necesarias para el correcto funcionamiento e implementación de este proyecto.

5.1.4 Medición e implementación de la etapa del hardware

Como se menciona en los numerales anteriores, para la correcta adquisición de datos fue necesario verificar el rango dinámico de entrada al convertor A/D con el fin de obtener una señal digital similar a la análoga. Por lo tanto se realizaron las mediciones de elevador, fuente dual y amplificadores obteniendo los voltajes de entrada y salida por medio de multímetro y osciloscopio digital.

Medición de puntos de entrada del Elevador:



Ilustración 23 Medición de puntos del elevador. Fuente propia.

- El voltaje DC que entra en el elevador es de 5.014VDC comprobando el voltaje de salida del puerto USB.
- El voltaje DC que sale del elevador es de 17.9VDC.
- El voltaje DC entra en la fuente dual es de 18.1VDC.
- El voltaje DC Vcc que sale de la fuente dual es de 9.14VDC.
- El voltaje DC Vee que sale de la fuente dual es de -9.02VDC.

Medición de los amplificadores de voltaje de salida del transductor triaxial:

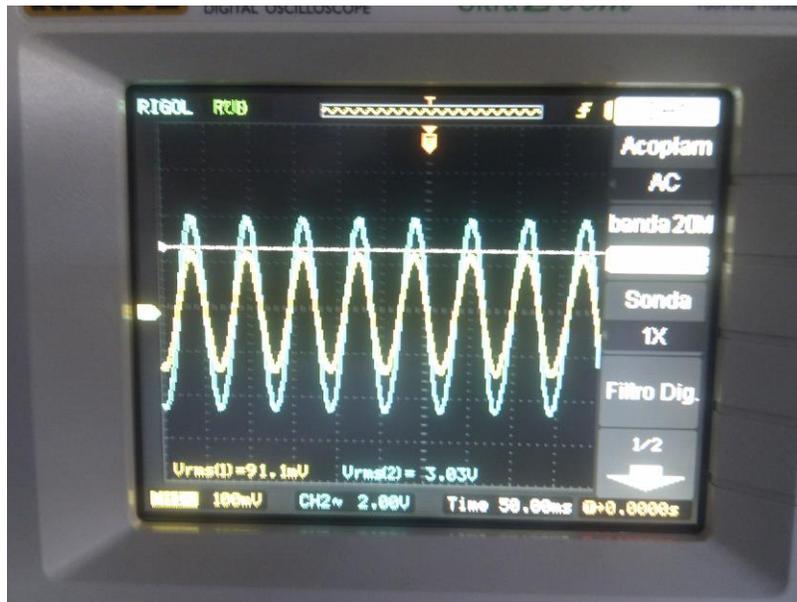


Ilustración 24 Medición de los amplificadores de voltaje de salida del transductor triaxial. Fuente propia.

- El voltaje de salida del amplificador del eje x es 3.03V (señal de color azul) y el de entrada 91.1mV (señal de color amarillo).
- El voltaje de salida del amplificador del eje y es 2.98V (señal de color azul) y el de entrada 91.3mV (señal de color amarillo).
- El voltaje de salida del amplificador del eje z es 2.98V (señal de color azul) y el de entrada 91.6mV (señal de color amarillo).

Según las mediciones de todas las etapas se puede comparar los resultados con las simulaciones determinando que la señal que entra al convertor A/D presenta un margen de error posiblemente dado por las tolerancias de los componentes electrónicos. Este margen de error es aproximadamente de $\pm 3.9\%$.

5.1.5 Diseño y ensamble de carcasa para vibrómetro portátil VCDP

En este diseño se ajustaron las medidas para que la tarjeta madre, la pantalla, la batería y la tarjeta de adquisición de datos no tuvieran contacto directo para evitar posibles cortos circuitos sin perjudicar su estética, tamaño y peso.

Los materiales utilizados para esto fueron láminas de MDF de 3mm de grosor cubiertas con lámina de fórmica de 0.5mm con pintura antiestática.

A continuación, se presentan planos del diseño de la carcasa realizados en Sketch up e imágenes de la carcasa finalizada junto con el montaje final del dispositivo.

- Este fue el diseño realizado en Sketchup

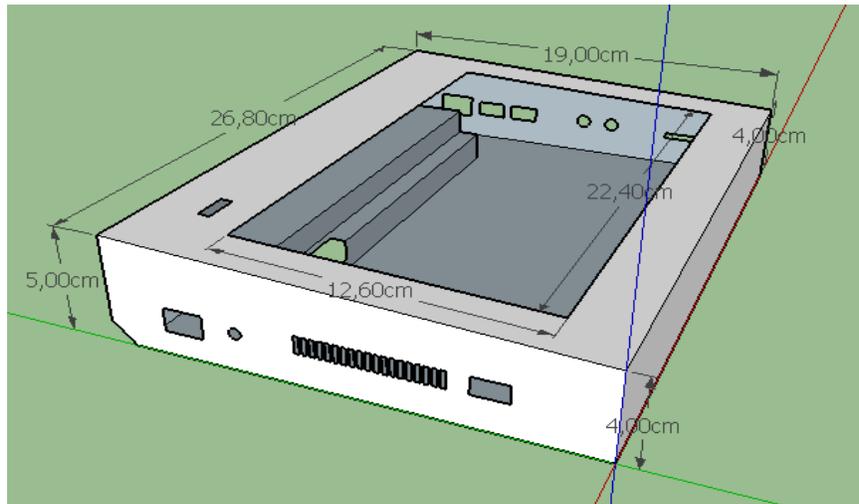


Ilustración 25 Plano de diseño de carcasa (Vista lateral). fuente: propia



Ilustración 26 Fotografía carcasa terminada (Vista lateral). fuente: propia

5.1.6 Ensamble completo del dispositivo VCDP

A continuación, se explicará detalladamente el funcionamiento principal del conjunto de elementos que conforman el dispositivo.

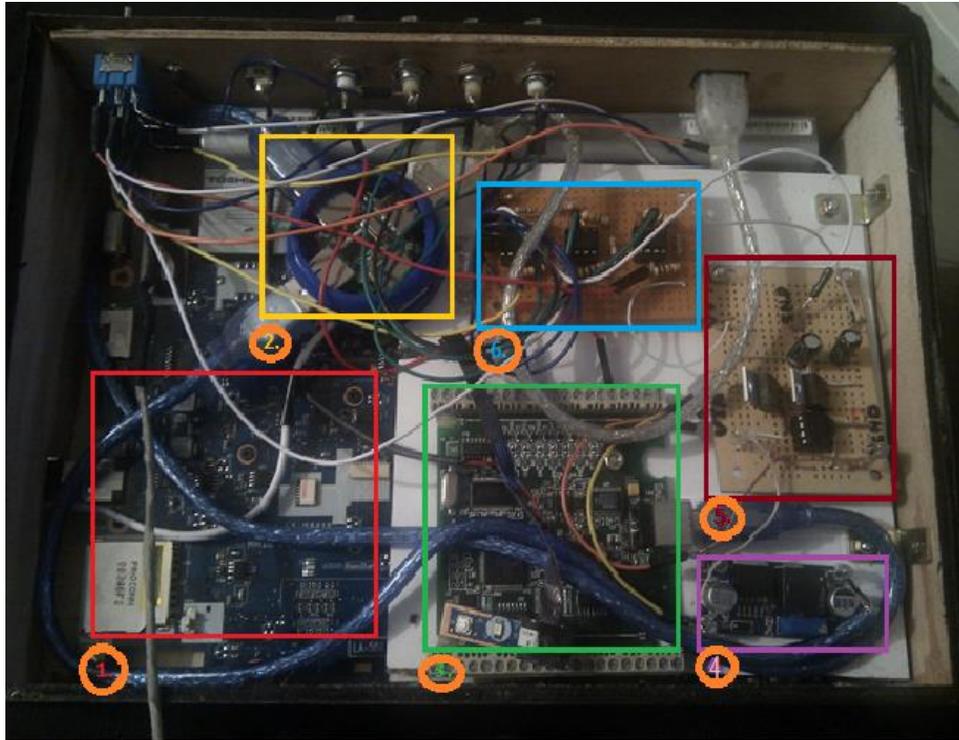


Ilustración 27 División de los puntos más importantes del Hardware. fuente: propia

1. La tarjeta madre es el componente que contiene “el cerebro” del dispositivo, capaz de procesar y analizar la información obtenida por la tarjeta de adquisición de datos.
2. Ya que la tarjeta madre solo cuenta con un bus de datos fue necesario conectar un multiplicador de puertos USB que consta de un multiplexor que aumenta la cantidad de conectores. Aunque este distribuye la velocidad por el número de puertos, no se existe pérdida de datos, y este multiplexor permite alimentar los circuitos de adecuación de señal, el teclado inalámbrico y la tarjeta de adquisición de datos.
3. La tarjeta de adquisición de datos es la responsable de convertir los datos analógicos provenientes de los acelerómetros en datos digitales que serán procesados y analizados por el software desarrollado.
4. Para que el acelerómetro triaxial funcione correctamente es necesario alimentarlo con un voltaje entre 18V y 30V, es por esto que se utiliza un elevador de voltaje que funciona al conectarse a un puerto USB que brinda un voltaje que oscila entre 1,5V y 35V.
5. La mayoría de configuraciones de amplificadores operacionales requieren ser alimentados con fuentes duales simétricas, en el caso de la etapa de amplificación de la señal fue necesario convertir la tensión positiva que entrega el elevador en una fuente

dual que genera voltajes, positivo y negativo, necesarios para alimentar los amplificadores operacionales.

6. Para cumplir con el rango dinámico requerido por la normativa para seres humanos es necesario aumentar la amplitud de la señal obtenida, para esto se diseña e implementa un circuito de amplificación para cada eje del acelerómetro triaxial.

5.2 Sistema de calibración para el vibrómetro portátil (Shaker VCDP)

Debido a la necesidad de obtener una señal de referencia con la cual comparar las mediciones obtenidas con el acelerómetro se diseñó e implementó un sistema el cual permitiera una relación entre el voltaje de salida y la aceleración que este mismo producía por la oscilación del shaker VCDP.

5.2.1 Diseño y construcción del shaker VCDP

Para la construcción de este sistema se necesitaba como primera instancia un dispositivo que actuara como excitador de vibraciones, es decir un sistema que oscilara como un todo, para acoplar el acelerómetro al calibrador y así obtener la señal de referencia. Por lo que se utilizó un parlante de 8" (Ilustración 28) al cual se le recortó el cono, quedando únicamente la estructura, el imán y la suspensión del parlante (Ilustración 29), después de tener el parlante de esta manera se



Ilustración 28 Parlante utilizado para implementar el shaker. Fuente: Propia

acopló a la suspensión una estructura conformada por una arandela, un tornillo y una tuerca en la parte inferior para que este actuara como unidad con la suspensión; en la parte superior se utilizaron dos ajustes para así poder acoplar el acelerómetro al sistema.



Ilustración 29 Parlante sin cono y con el sistema acoplado. Fuente: Propia

Después de finalizada la parte mecánica del dispositivo, para darle practicidad de uso a este, se realizó el montaje del TDA2003 para la amplificación de la señal de entrada, y para la respectiva alimentación del circuito del TDA2003 se usó un adaptador de 9 voltios, implementando un interruptor para el encendido y apagado del dispositivo.

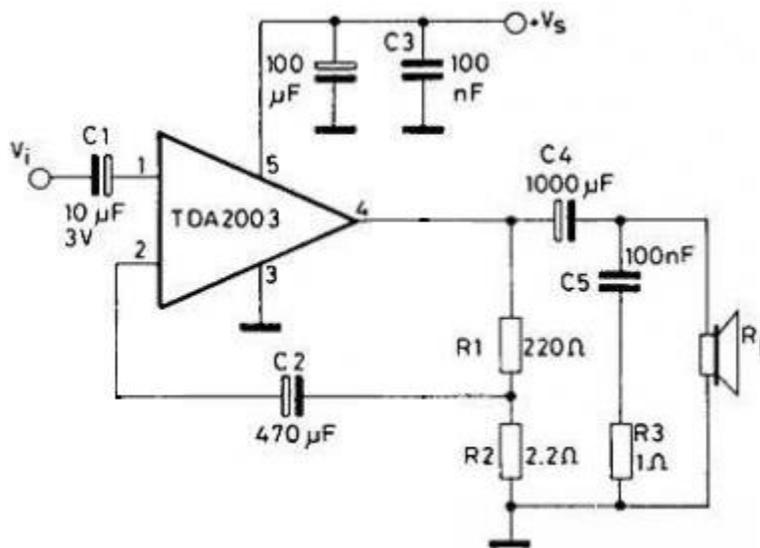


Ilustración 30. Circuito esquemático de amplificador TDA2003



Ilustración 31 Calibrador terminado con acople para acelerómetro. Fuente: Propia

Con el fin de realizar la correcta calibración del acelerómetro triaxial se debe garantizar que el shaker genere una aceleración de una gravedad (9.8 m/s^2), con la cual será excitado el sensor. Para garantizar esta aceleración en el calibrador se establece una frecuencia a la cual excitar el sensor para calibración (15.92 Hz), esta frecuencia se estandariza para calibración en la norma ISO 8041 a partir de esto se calculan y miden los demás valores donde para hallar la aceleración, se parte desde la fórmula de desplazamiento:

$$X = A * \cos(w * t)$$

Ecuación 21 Desplazamiento

Como se necesita la aceleración se realiza la derivada para obtener la velocidad

$$\frac{dx}{dt} = -A * w * \sin(w * t)$$

Ecuación 22 Derivada para obtener la velocidad

Se realiza la derivada para obtener la aceleración

$$\frac{d\ddot{x}}{dt} = -A * w^2 * \text{Cos}(w * t)$$

Ecuación 23 Derivada para obtener la aceleración

Cuando el desplazamiento es cero la aceleración es máxima, por lo tanto, $\text{Cos}(w*t)$ es igual a uno

$$\frac{d\ddot{x}}{dt} = -A * w^2$$

Ecuación 24 Derivada para obtener la aceleración cuando el desplazamiento es cero

Como la aceleración (a) deseada es una gravedad (9.8 m/s²)

$$a = A * w^2$$

$$\frac{A * w^2}{\sqrt{2}} = 9.8 \text{ m/s}^2$$

Se despeja la Amplitud (A) para saber cuánta excursión necesita el shaker para garantizar esta aceleración

$$A = \frac{a * \sqrt{2}}{w^2}$$

Reemplazando se tiene que

$$A = \frac{9,8 \frac{m}{s^2} * \sqrt{2}}{(2 * \pi * 15.92)^2}$$

$$A = 1.38 \text{ mm}$$

Según el cálculo realizado la amplitud de la excursión del shaker necesaria para obtener la aceleración deseada es de 1.38 mm.

Para obtener y comprobar este valor de amplitud se implementó sobre el shaker una masa que simulara el peso del acelerómetro triaxial (95.5g) con un lápiz en la parte superior para que al poner una hoja de papel frontal al lápiz marcara la amplitud de la excursión realizada con el voltaje inyectado por el generador de frecuencias posterior a esto se midió la línea trazada.

El diagrama de conexionado para la calibración del Shaker se presenta a continuación.

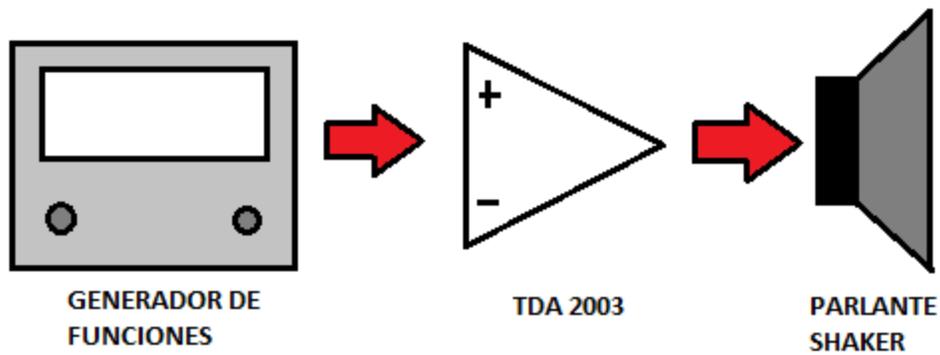


Ilustración 32 Diagrama de medición para cálculo de desplazamiento del cono Fuente: Propia

Realizando este proceso se halló que el voltaje necesario para garantizar la aceleración en la excitación del shaker es de 6.3 Vpp. Sin embargo el voltaje de entrada que maneja el amplificador TDA2003 para una señal sinusoidal no puede ser mayor de 0.85Vpp. Por tal razón no fue posible comprobar el correcto funcionamiento del calibrador.



Ilustración 33 Medición para el cálculo del desplazamiento del cono Fuente: Propia

5.3 Software

El software se desarrolló teniendo en cuenta la siguiente estructura en donde se puede observar a gran escala como se diseñó el programa.

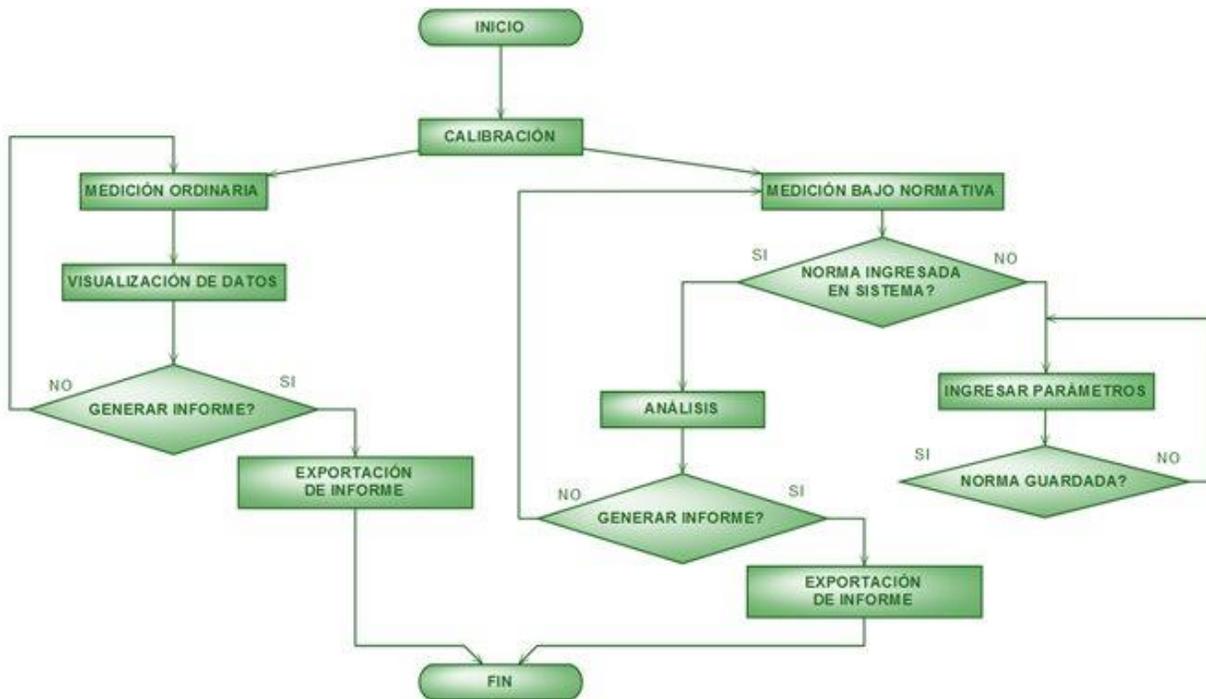


Ilustración 34 Estructura de diseño del programa. Fuente propia

5.3.1 Programación del software para adquisición de datos

Se desarrolla un software en la plataforma de programación MATLAB que permite obtener los datos adquiridos por la tarjeta USB 1208FS de MCC Measurement Computing Corporation.

La plataforma de programación cuenta con un “toolbox” de nombre “Data Acquisition Toolbox” que permiten de manera sencilla configurar la tarjeta para enviar o recibir datos a través de entradas y salidas análogas o digitales.

Ya que los acelerómetros son sensores análogos se utilizarán 4 entradas análogas de la tarjeta. El comando para inicializar la tarjeta se hace de la siguiente forma:

$$A_i = \text{analoginput}('mcc', 1);$$

Donde ‘mcc’ es el nombre del driver de la tarjeta y el número 1 es un identificador estándar.

Para configurar las entradas y salidas de la tarjeta se utiliza el comando `addchannel` de la siguiente forma:

$$A_{n0} = \text{addchannel}(A_i, 0);$$

De esta manera se configura la entrada analógica 0 para recibir datos. En el caso de utilizar más de una entrada se modifica la sintaxis de la siguiente forma:

```
An0_3=addchannel(Ai,0:3);
```

De esta manera se configuran las entradas analógicas 0, 1, 2 y 3 para recibir datos.

Ya teniendo configurada la tarjeta con sus entradas y salidas se ajustan los parámetros de frecuencia de muestreo y muestreo total de la adquisición, con los comandos mostrados a continuación:

```
set = (Ai, 'SampleRate', Fs);
```

```
set(Ai,'SamplesPerTrigger',Muestras);
```

En donde el número de muestras indica el tiempo de adquisición por la frecuencia de muestreo.

Para iniciar la toma de datos se utiliza el comando start, y para la visualización de estos datos se utiliza el comando getdata de la siguiente forma:

```
start(Ai);
```

```
Datos=getdata(Ai);
```

La siguiente imagen muestra la adquisición de una señal de 10 segundos generada por el sensor sísmico.

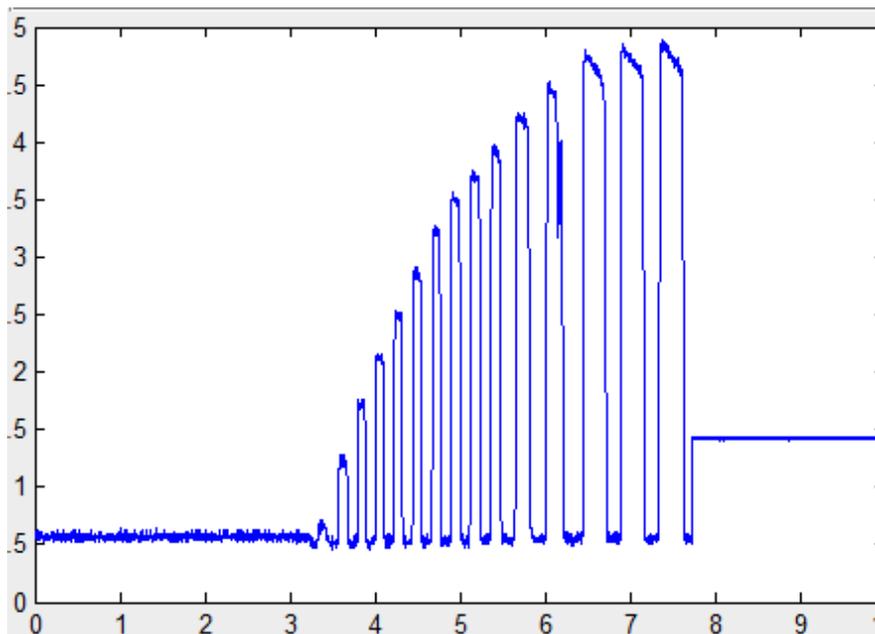


Ilustración 35 Representación señal de prueba de adquisición de datos. Fuente propia

5.3.2 Medición general del dispositivo

Se realizaron dos mediciones por cada eje en donde se utilizó el módulo de medir sin normativa (este módulo se explica en el manual de usuario que se encuentra en los anexos de este proyecto) el cual permite observar la forma de onda y el espectro de frecuencias. Se aplicaron dos señales conocidas (sinusoidales con amplitud y frecuencia determinada en un generador de señales) con el fin de determinar la correcta adquisición de datos, estas señales tenían una frecuencia de 0.1Hz (Ilustración 39) y 6KHz (Ilustración 40), rango mínimo y máximo que puede medir el dispositivo. Se obtuvieron resultados en donde se puede apreciar la señal de entrada relativamente igual a la mostrada en el dispositivo, sin embargo hay un aumento de la energía de éstas señales de aproximadamente 2% posiblemente ocasionados por cargas parasitas que no fueron eliminadas con todos los métodos contemplados en el numeral 5.3.1. A continuación, se muestran las imágenes respectivas a las peores mediciones registradas.

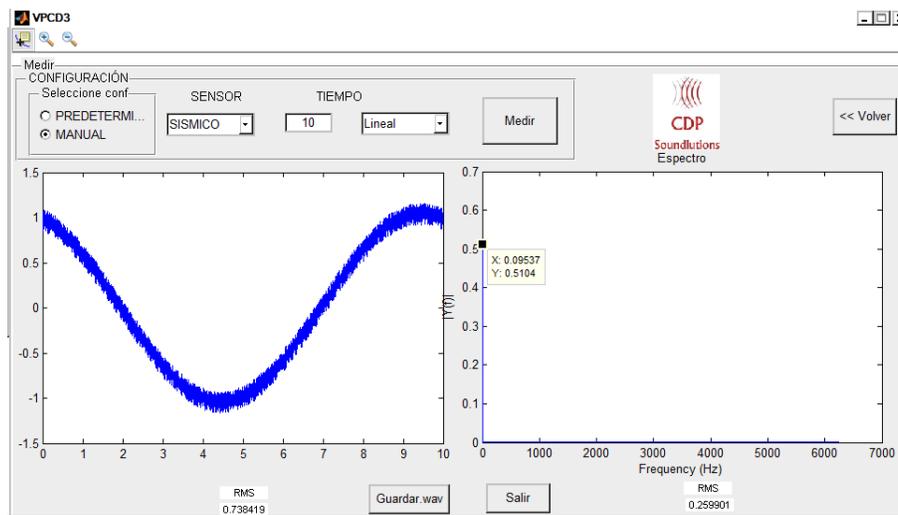


Ilustración 36 medición de prueba a 0.1 Hz

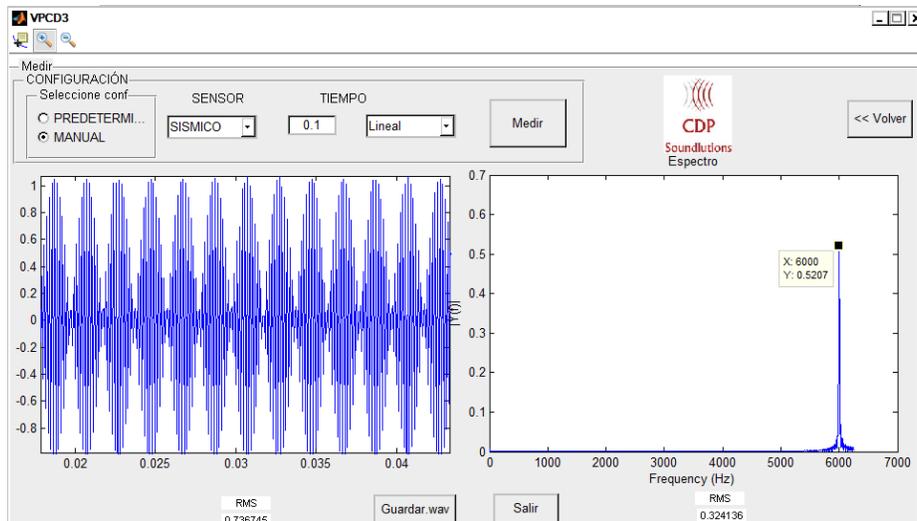


Ilustración 37 medición de prueba a 6 KHz

6 Presentación y análisis de resultados

Para verificar el funcionamiento del dispositivo se realizaron mediciones según normativas existentes ingresadas en el módulo de ingresar nueva norma del Vibration Analyzer VCDP (el manual de usuario de este dispositivo se encuentra en los anexos de este proyecto), comparando los datos con un sistema de uso profesional (tarjeta dB04 y software dBFA conjunto denominado Pro 117/EXT), se construyó un splitter para recibir la misma señal de los transductores en los dos dispositivos para permitir una mejor comparación de estos.

Las normas empleadas fueron la ISO 10816 (máquinas), BS7385 (estructuras) y la ISO 2631 (cuerpo completo). La medición tuvo lugar en la Universidad de san Buenaventura sede Bogotá, Con el fin de contribuir a la población bonaaventuriana generando un reporte de la vibración presente en cada uno de los sistemas a medir y analizar. Se escogió medir la sierra cortadora (máquina), el carro podador (para evaluar las vibraciones que este transmite a los seres humanos) que se encontraban en el taller de ebanistería y el cuarto piso del edificio Guillermo de Ockham (estructura arquitectónica).

La medición se realizó el día sábado 24 de octubre desde las 11:35am hasta las 12:20pm, según la estación meteorológica de la Universidad de San Buenaventura la temperatura en el momento fue 20°C y la humedad relativa 52%. La calibración de ambos sistemas fue realizada por la sensibilidad del transductor.

6.1 Medición de estructuras Guillermo de Ockham según BS7385 parte 2:

Esta medición se realizó según los parámetros y requisitos dados en la BS7385-1 como medirla variable velocidad en los tres ejes ortogonales, ubicar el transductor en la planta más alta o si el edificio presenta más de 8 pisos medir cada 4 pisos. Esta edificación consta de 5 pisos, sin

embargo, se colocó el sensor en el penúltimo piso debido a que en este es posible que se genere mayor vibración por el caminar de los estudiantes, porque en él hay un auditorio y laboratorios de electrónica, física y telecomunicaciones, mientras que en el último piso está la oficina de las directivas en donde normalmente pasan menos personas y además en el momento se encontraba cerrado. A continuación, se muestra la imagen de cómo se conectaron los dispositivos Pro 117/EXT y Vibration Analyzer VCDP.



Ilustración 38 Medición de estructuras. Fuente: Propia

Se puede observar de arriba hacia abajo el preamplificador que requiere el acelerómetro sísmico, el splitter que divide la señal, la dB04 (tarjeta de adquisición que requiere el sistema de la universidad), el computador portátil y el dispositivo Vibration Analyzer VCDP.

Ahora se muestra la ubicación del sensor según los ejes pedidos por la norma (X o axial Y u horizontal y Z vertical):



Ilustración 39 Medición de estructuras en el edificio Guillermo de Ockham Fuente Propia

Posterior a la medición se realiza el análisis de la vibración presente en la edificación con los dos dispositivos. En la norma se puede apreciar una tabla en donde se establecen dos límites uno de estos es para edificaciones reforzadas o comerciales y la segunda para edificaciones sin refuerzo o de uso residencial al sobrepasar estos umbrales se dice que puede haber daño cosmético. Se compara según la velocidad pico de componente de partícula que es la mayor velocidad pico de la medición de los 3 ejes. El rango a medir es de 4Hz hasta la vibración mayor que presente la estructura, por lo tanto son necesarios 0.25s de medición, sin embargo por parámetros establecidos en el software del Vibration Analyzer VCDP esta comparación se realizará respecto a 10s ya que es el mínimo tiempo a registrar. Ahora se mencionaran los pasos que hay que seguir en cada uno de los software para llegar al análisis de esta norma.

6.1.1 Medición con Pro 117/EXT- dBFA

Pasos para analizar la estructura en el dispositivo Pro 117/EXT:

1. Seleccionar o determinar la duración o el rango de tiempo a analizar. Para esto se abre la forma de onda de cada uno de los ejes medidos que se encuentran en la ventana principal, luego se desplazan las líneas azules ubicadas en los límites del gráfico, se oprime click derecho y se selecciona Start and End.
2. Abrir y generar un espectro por cada eje. Se debe seleccionar el eje en la ventana principal luego dar click en el botón que se encuentra en la parte superior izquierda Computation server Y/N, en la pequeña ventana que se ha abierto se selecciona en el menú la opción Signal analysis se oprime el botón Configure select script que se encuentra justo debajo del menú, en la lista de Active processings se selecciona

cada opción que allí se encuentran y se les da click en remove una vez borrado todo lo de esta lista se da click en Narrow band spectrum y luego se oprimen los botones >> y OK, por último se da click en Run select script.

3. Se busca el pico mas alto que este dentro del rango que se quiere analizar y se toma el valor en amplitud para compararlo con la norma.

Lo anterior muestra 3 gráficas en donde se puede apreciar el espectro de banda angosta y buscar la frecuencia que tiene mayor nivel de amplitud que son:

- Eje X o Axial:

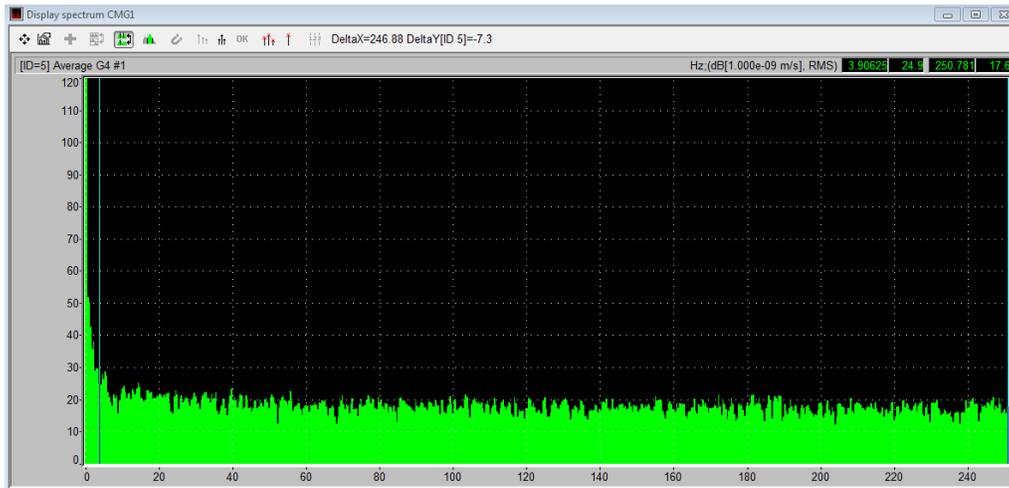


Ilustración 40 Resultado de la medición en el dBFA. Fuente: Propia

En la gráfica anterior se puede observar el comportamiento o distribución de energía en frecuencia, mostrando que la mayor cantidad de esta se encuentra en frecuencias menores a 3.5Hz, sin embargo la norma indica que al evaluar el daño cosmético que puede sufrir la estructura, el rango de frecuencia que hay antes de 4Hz debe ser evaluado por sensores de desplazamiento por tal razón se comparará en el rango de frecuencia comprendido entre 4Hz y 2KHz, debido a que se dispone únicamente de sensor de velocidad y acelerómetros. Al analizar más a fondo la ilustración anterior se ve que la amplitud mayor se encuentra después de la frecuencia de 4Hz y está localizada en 5.46Hz con un promedio de energía de 28.2 dB de Velocidad para convertir este valor (RMS en decibeles) a RMS lineales necesario emplear la siguiente ecuación que relaciona velocidades y dB de velocidad:

$$Lv = 20 \log \left(\frac{V}{V_{ref}} \right)$$

Tomada de: Industrial noise control and acoustics. Randall F. Barron

En donde la velocidad de referencia como se puede apreciar en el costado superior derecho de la imagen es 1 nm/s^2 , para este caso “Lv” es el valor de “Ec*” y V el valor RMS dependiendo del eje a analizar.

Al despejar V se obtiene que la velocidad para dicha frecuencia encontrada en el eje x es:

$$V=25.70\text{nm/s.}$$

Una vez encontrada la velocidad se realiza el mismo procedimiento para los ejes que faltan (Y y Z).

- Eje Y u Horizontal:

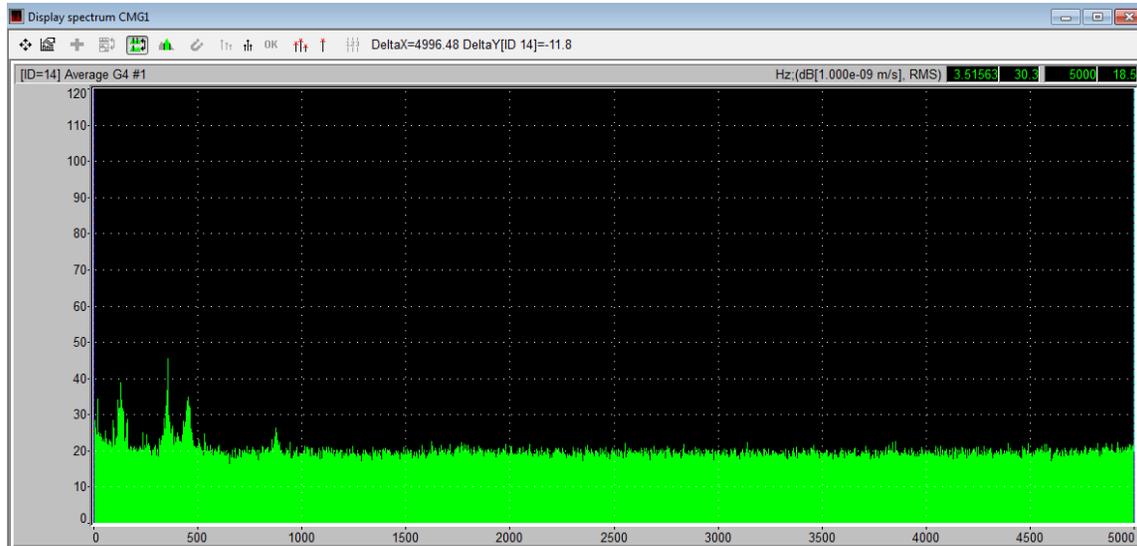


Ilustración 41 Resultado de la medición en el dBFA. Fuente: Propia

Se puede deducir de la ilustración anterior que la mayor cantidad de energía se localiza en el rango de frecuencia comprendido entre 100Hz y 500Hz y que además la amplitud mayor se encuentra en 360Hz con 45.7 dB de velocidad en donde al convertir este valor a lineal por medio de la ecuación que relaciona velocidades con decibeles se tiene que:

$$V=192.8\text{nm/s.}$$

- Eje Z o Vertical:

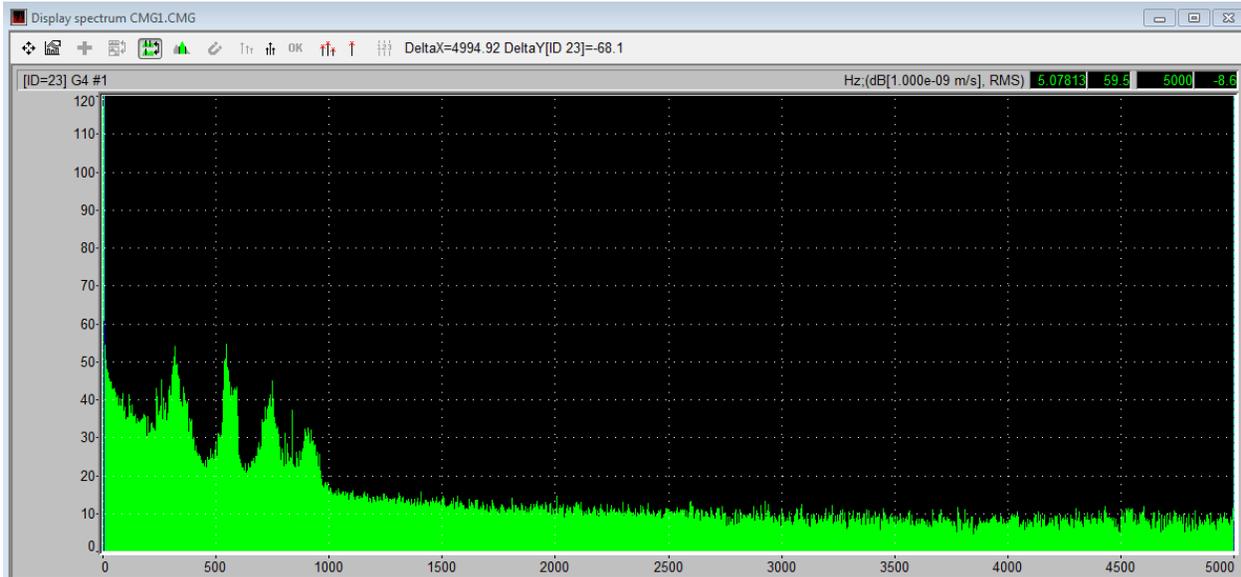


Ilustración 42 Resultado de la medición en el dBFA. Fuente: Propia

La anterior ilustración muestra que la amplitud mayor después de la frecuencia de 4Hz es una localizada en 5.07Hz con 59.5 dB de velocidad que al convertir a lineal por medio de la ecuación que relaciona velocidades y decibeles se consigue que:

$$V=0.944\mu\text{m/s.}$$

Posterior a esto se debe comparar cada valor con la tabla guía del daño cosmetico que se encuentra en estos anexos y es tomada de la BS7385-2, para esta comparación se tomó el edificio como una estructura residencial o sin refuerzo alguno, en donde el valor de comparación asignado a esta categoria es 50mm/s dando como resultado :

Ejes medidos	Velocidad pico eje X	Velocidad pico eje Y	Velocidad pico eje Z	Valor de velocidad pico mayor luego de comparar
Velocidades pico	V=25.70nm/s.	V= es 192.8nm/s.	V=0.944um/s.	V=0.944um/s.

La respuesta final es determinar si la velocidad mayor sobrepasa o no el umbral dado en la norma, este proceso se muestra a continuación mediante una tabla de resultado final.

Valor de volidad pico mayor luego de comparar	Umbral estipulado en la norma para edificios sin refuerzo alguno	Resultado final
V=0.944um/s.	V=50mm/s	El umbral no ha sido sobrepasado

Ahora se prosigue a utilizar el dispositivo diseñado e implementado en este proyecto para analizar la norma BS7385-2.

6.1.2 Medición con Vibration Analyzer VCDP

Vibration Analyzer VCDP:



Ilustración 43 Resultado de la medición en el VCDP Fuente: Propia

Se puede ver según la imagen que el dispositivo entrega la mayor velocidad pico tomada de los tres ejes ortogonales en donde indica que el umbral no ha sido superado y que este resultado salió del eje Z. A continuación se muestra una tabla que permite observar estos resultados.

Valor de velocidad pico mayor luego de comparar	Umbral estipulado en la norma para edificios sin refuerzo alguno	Resultado final
V=0.93um/s.	V=50mm/s	El umbral no ha sido sobrepasado

Tabla 8 Resultados de la medición es Estructuras

Al tener analizadas las vibraciones en la estructura arquitectonica se prosigue a realizar el análisis en seres humanos y maquinas, para posteriormente comparar todos los resultados entregados por ambos dispositivos (Pro 117/EXT y Vibration Analyzer VCDP)

6.2 Medición de vibraciones en el cuerpo humano

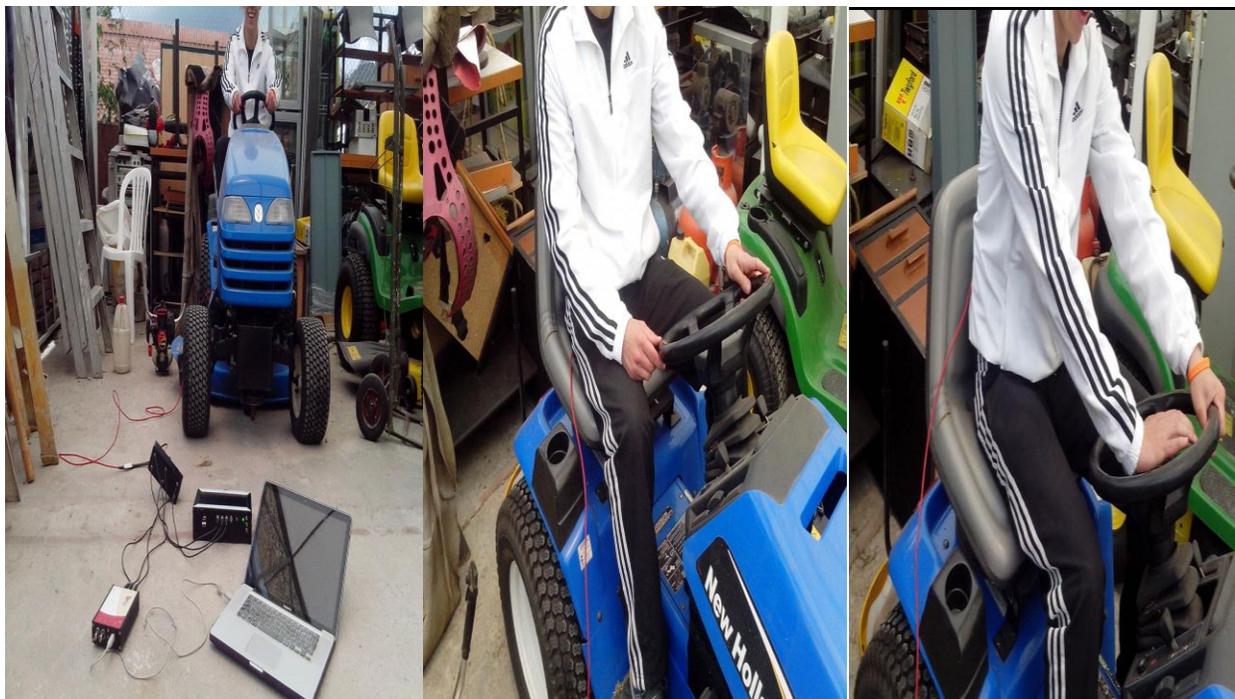


Ilustración 44 Medición en el cuerpo humano Fuente: Propia

Falta por decir que el rango de frecuencias que sugiere la norma es desde 0.1Hz hasta 80Hz sin embargo se menciona que hay 3 parámetros que pueden ser evaluados y el rango mencionado va a cambiar dependiendo de cuál se quiera evaluar, la salud (0.5Hz-80Hz), el bienestar (0.5Hz-80Hz) y el mal de movimiento (0.1Hz-0.5Hz). El tiempo que estipula la norma es de 227s, pero al no contar con un acelerómetro ergonómico (adaptado al cuerpo), solo se midieron 10s debido

al tornillo de 5 cm que tiene el acelerómetro que no permitía una postura normal entre la fuente y el receptor de la vibración. Posterior a la medición se realizó el análisis de vibración para evaluar el bienestar de la persona que utiliza el carro podador.

A continuación, se mencionan los pasos a seguir para analizar la norma y los resultados correspondientes en ambos dispositivos (Pro 117/EXT y Vibration Analyzer VCDP)

6.2.1 Medición con Pro117/EXT – dBFA

Pro 117/EXT:

1. Para este sistema el primer paso es sacar el valor RMS ponderado para cada eje, determinando el tiempo a analizar, se debe tener en cuenta que dependiendo de la postura y ubicación del acelerómetro se emplean diferentes filtros de ponderación, para este caso al estar ubicar el transductor en los pies el factor de ponderación estando sentado es W_k (ejes X, Y y Z), pero para el trasero se aplican los filtros W_d (ejes X y Y) y W_k (eje Z) mientras que para la zona lumbar se utilizan los filtros W_c (eje X) y W_d (Y y Z). Estos filtros que se determinan en la norma y se encuentran en los anexos de este proyecto tienden a simular la respuesta del cuerpo a las vibraciones. A continuación se muestran las gráficas que permiten encontrar la aceleración ponderada para cada eje.

- Pies Eje x:



Ilustración 45 Resultado de la medición en el dBFA Fuente: Propia

La ilustración anterior muestra que la energía predomina en las bandas de 50Hz, 63Hz y 80Hz siendo estas las que más energía presentan, además se puede observar con respecto al número de bandas que el software muestra desde la banda de 3.15Hz hasta la banda de 80 Hz. Sin embargo, para hallar el valor A_{wx} se debe tomar el valor de energía de todas

las bandas, por lo que para este caso se seleccionan las bandas existentes, en la ilustración se puede apreciar como la banda “Ec*” donde su valor es de 82dB de aceleración, luego se debe utilizar la ecuación que relaciona aceleraciones lineales con decibeles.

$$La = 20 \log \left(\frac{A}{A_{ref}} \right)$$

Ecuación 25 Relación de aceleración lineal con decibeles

En donde la aceleración de referencia como se puede apreciar en el costado superior derecho de la imagen es $1 \mu\text{m}/\text{s}^2$, para este caso “La” es el valor de “Ec*” y A el valor de Awx, Awy y Awz dependiendo del eje a analizar.

Despejando A se obtiene que:

$$A_{wx} = 0.0126 \text{ m}/\text{s}^2 \text{ aproximado}$$

Ahora se realiza el mismo procedimiento para el eje y

- Pies eje Y:



Ilustración 46 Resultado de la medición en el dBFA Fuente: Propia

Se evidencia que la energía predomina en la banda de 50Hz siendo causante de que la energía total de vibración sea de 109dB aceleración, por lo tanto, al despejar A se obtiene que:

$$A_{wy} = 0.282 \text{ m}/\text{s}^2 \text{ aproximado}$$

- Pies eje Z:

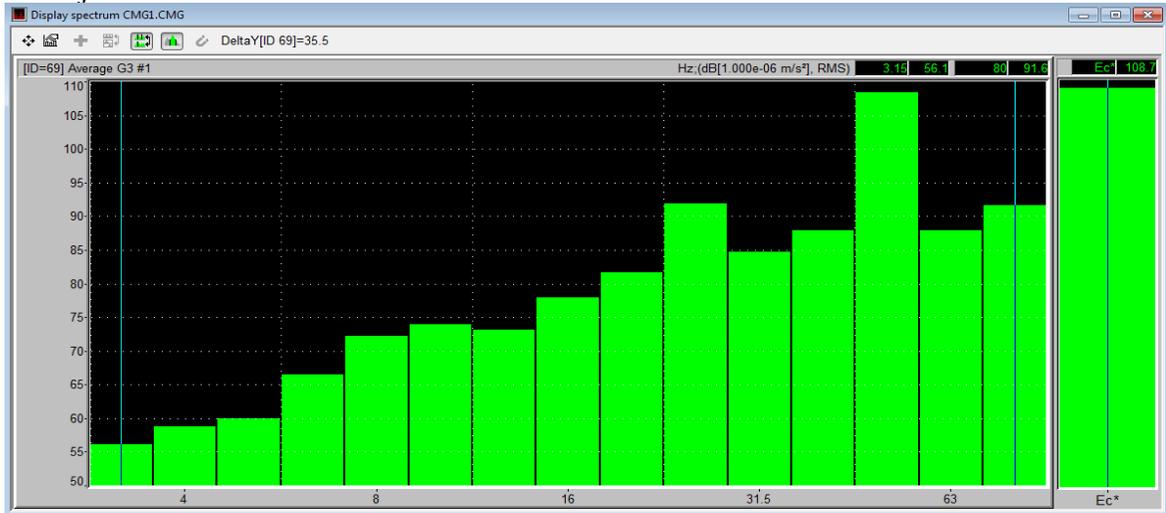


Ilustración 47 Resultado de la medición en el dbFA Fuente: Propia

Se continúa observando predominancia en la banda de 50 Hz provocando que la energía total de vibración sea de 108.7dB aceleración, por lo tanto, al despejar A se obtiene que:

$$Awz=0.27 \text{ m/s}^2$$

Ahora se realiza el mismo procedimiento para la zona del trasero

- Zona del trasero eje X:



Ilustración 48 Resultado de la medición en el dbFA Fuente: Propia

La ilustración anterior muestra al igual que las mediciones realizadas en la zona de los pies reiterada predominancia en la frecuencia de 50Hz generando que la energía total de vibración sea de 78dB aceleración, por lo tanto, al despejar A se obtiene que:

$$A_{wx}=0.0079m/s^2 \text{ aproximado}$$

- Zona del trasero eje Y:

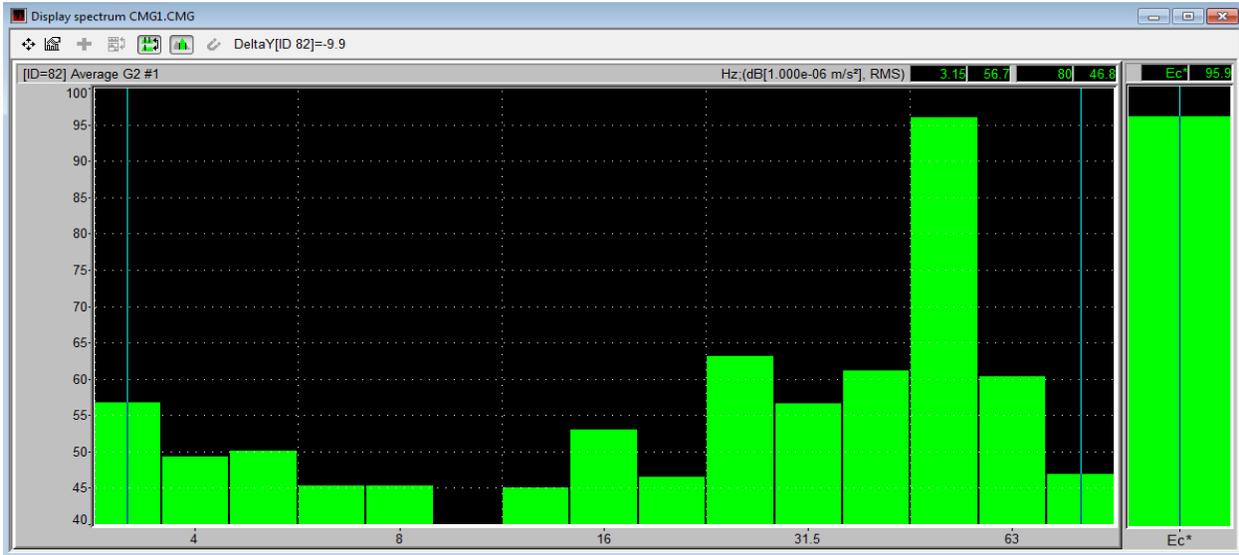


Ilustración 49 Resultado de la medición en el dBFA Fuente: Propia

Se puede observar que la energía total de vibración es de 95.9dB aceleración, provocada en su gran mayoría por la ya mencionada predominancia en la banda de 50Hz en donde al despejar A se obtiene que:

$$A_{wy}=0.062m/s^2 \text{ aproximado}$$

- Zona del trasero eje Z:

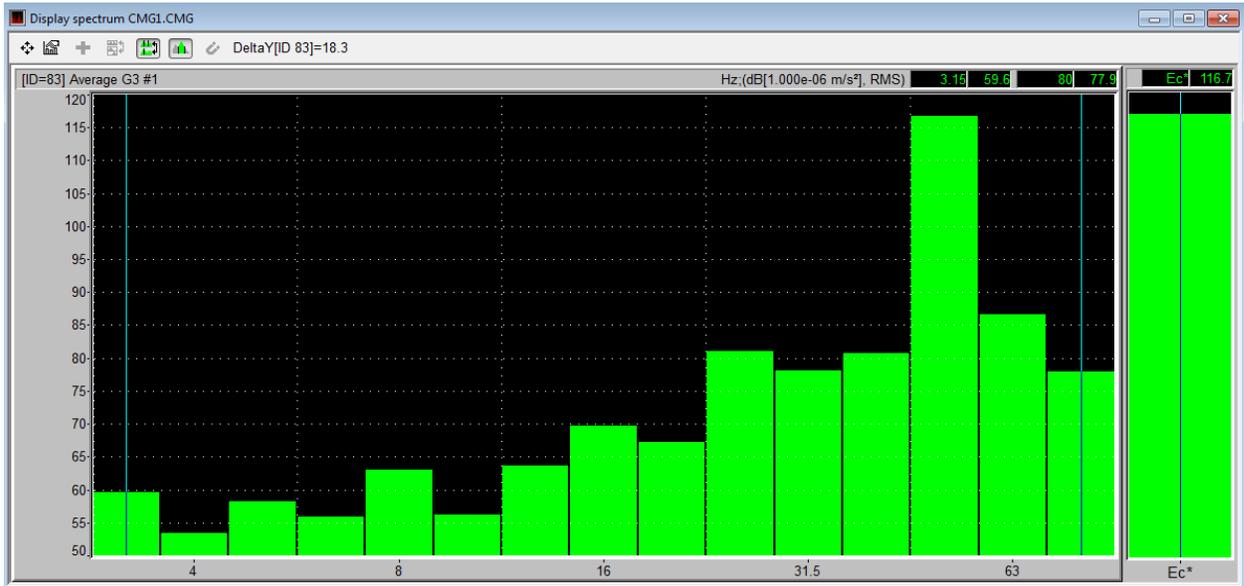


Ilustración 50 Resultado de la medición en el dBFA Fuente: Propia

La anterior ilustración muestra que la energía total de vibración es de 116.7dB aceleración y es causada por la banda de 50Hz, por lo tanto, al despejar A se obtiene que:

$$Awz=0.68m/s^2 \text{ aproximado}$$

- Zona lumbar eje X:

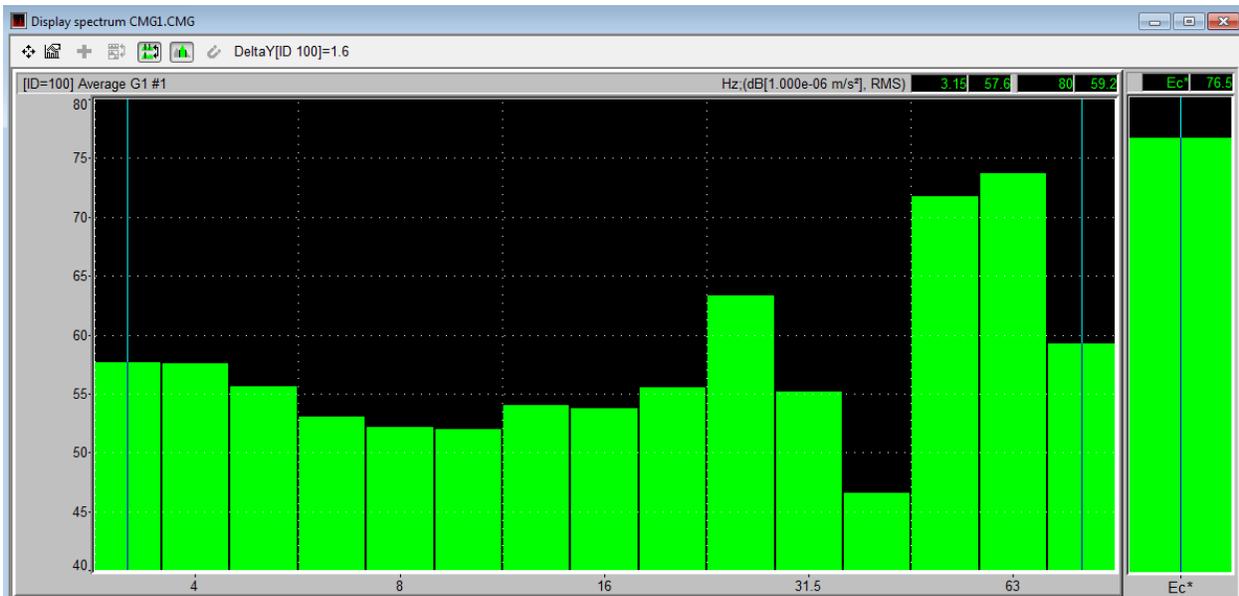


Ilustración 51 Resultado de la medición en el dBFA Fuente: Propia

La medición del eje x de la zona lumbar tiene una energía total de vibración de 76.5dB aceleración que se aprecia en la ilustración anterior en donde al despejar A se obtiene:

$$A_{wx}=0.0066m/s^2 \text{ aproximado}$$

- Zona lumbar eje Y:



Ilustración 52 Resultado de la medición en el dBFA. Fuente: Propia

La energía total de vibración que se puede evidenciar en la ilustración anterior es de 89.2dB aceleración en donde se puede apreciar que la banda de 50 Hz aporta considerablemente a este resultado provocando que la aceleración lineal sea:

$$A_{wy}=0.028m/s^2 \text{ aproximado}$$

- Zona lumbar eje Z:

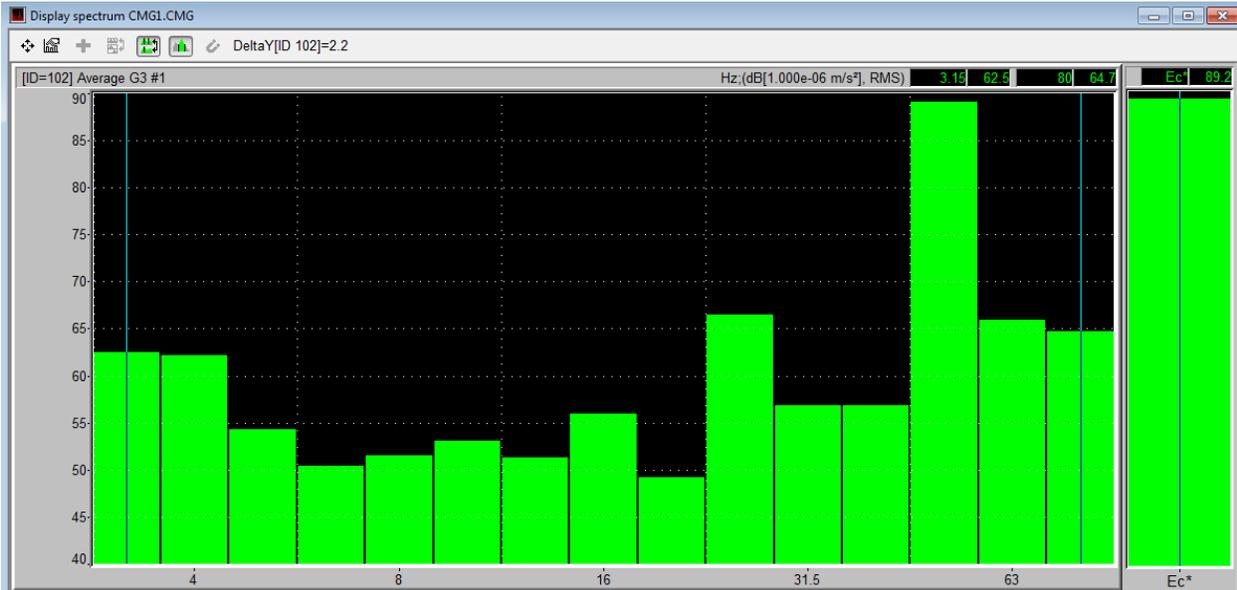


Ilustración 53 Resultado de la medición en el dBFA. Fuente: Propia

La ilustración permite observar que la energía total de vibración es de 89.2dBaceleración en donde se continúa evidenciando la predominancia de la banda de 50 Hz causante de que la aceleración lineal sea:

$$Awz=0.028m/s^2 \text{ aproximado}$$

2. Posterior a esto de multiplica por un factor de corrección (k) donde el subíndice indica el eje al cual se debe aplicar. Para la zona de los pies ($k_x=0.25$, $k_y=0.25$ y $k_z=0.4$), Para la zona del trasero ($k_x=1$, $k_y=1$ y $k_z=1$) y por último para la zona lumbar ($k_x=0.8$, $k_y=0.5$ y $k_z=0.4$). Además, se determina el valor “Av” o aceleración promedio de los 3 ejes ortogonales que se calcula de la siguiente ecuación:

$$Av = \sqrt{(Aw_x^2 k_x^2 + Aw_y^2 k_y^2 + (Aw_z^2 k_z^2)}$$

Ecuación 26 Aceleración promedio para los tres ejes ortogonales

Aceleración promedio para la zona de los pies “Av”:

$$Av = 0.129 \frac{m}{s^2}$$

Aceleración promedio para la zona del trasero “Av”:

$$Av = 686.79 \frac{mm}{s^2}$$

Aceleración promedio para la zona lumbar “Av”:

$$Av = 19.2 \frac{mm}{s^2}$$

Por último, se compara la aceleración promedio con la tabla de valores totales de vibraciones globales que propone la ISO2631-1 como guía para determinar el bienestar de un ser humano en transporte público, se utiliza dicha tabla porque en la norma no se estipula otro método de evaluación o comparación.

En la siguiente tabla se muestran los resultados generales luego de haber comparado el valor promedio con los límites que determina la tabla denominada valores totales de vibraciones globales:

Ubicación del acelerómetro	Zona de los Pies	Zona del trasero	Zona Lumbar
Aceleración ponderada	$A_{wx}=0.0126m/s^2$ $A_{wy}=0.282m/s^2$ $A_{wz}=0.27 m/s^2$	$A_{wx}=0.0079m/s^2$ $A_{wy}=0.062m/s^2$ $A_{wz}=0.68m/s^2$	$A_{wx}=0.0066m/s^2$ $A_{wy}=0.028m/s^2$ $A_{wz}=0.028m/s^2$
Aceleración promedio de los 3 ejes ortogonales “Av”	$Av = 0.129 \frac{m}{s^2}$	$Av = 0.68 \frac{m}{s^2}$	$Av = 0.0187 \frac{m}{s^2}$
Según la tabla de valores de vibraciones globales el nivel medido:	No molesta	Algo molesta	No molesta

Tabla 9 Resultados de la medición en seres humanos según dBFA

6.2.2 Medición con Vibration Analyzer VCDP

Vibration Analyzer VCDP:

Para este dispositivo los pasos a emplear para el análisis son los siguientes:

1. Se selecciona el filtro de ponderación y el factor correspondiente a cada eje. Luego se selecciona sobre que comparar en este caso Bienestar y luego se selecciona analizar obteniendo los siguientes resultados:

Para la zona de los pies:

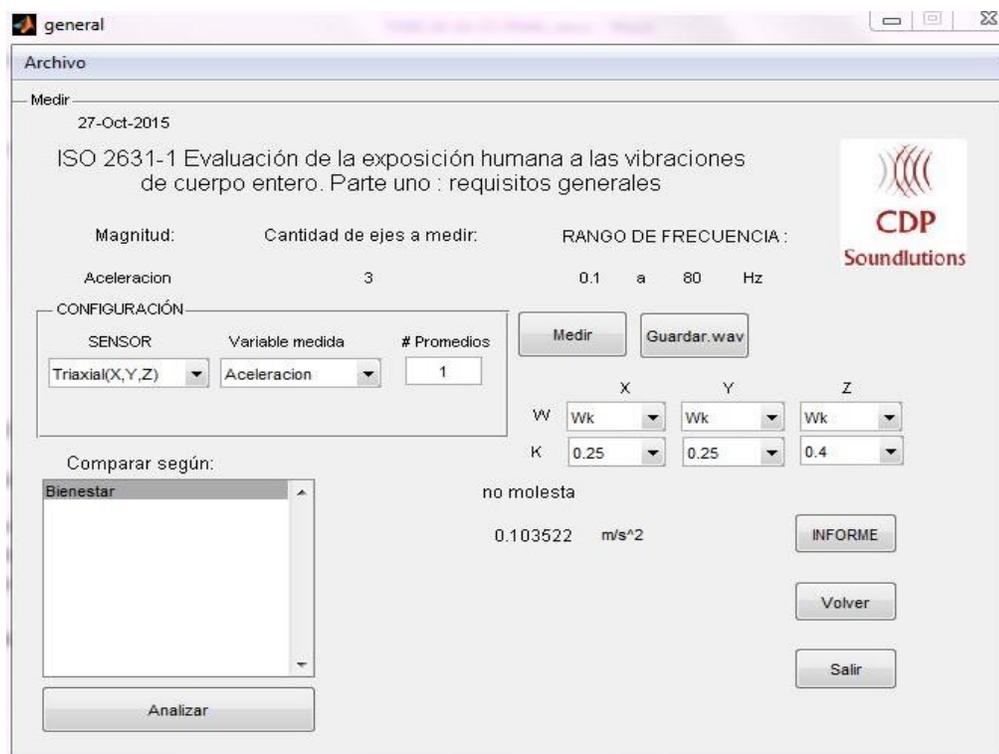


Ilustración 54 Resultado de la medición en el VCDP Fuente: Propia

Se puede observar que el programa automáticamente entrega la comparación del nivel de aceleración promedio de los 3 ejes ortogonales con la tabla de valores de vibraciones globales. Entregando un valor de $A_v=0.104 \text{ m/s}^2$ que según normativa corresponde a “no molesta”.

Para la zona del trasero:

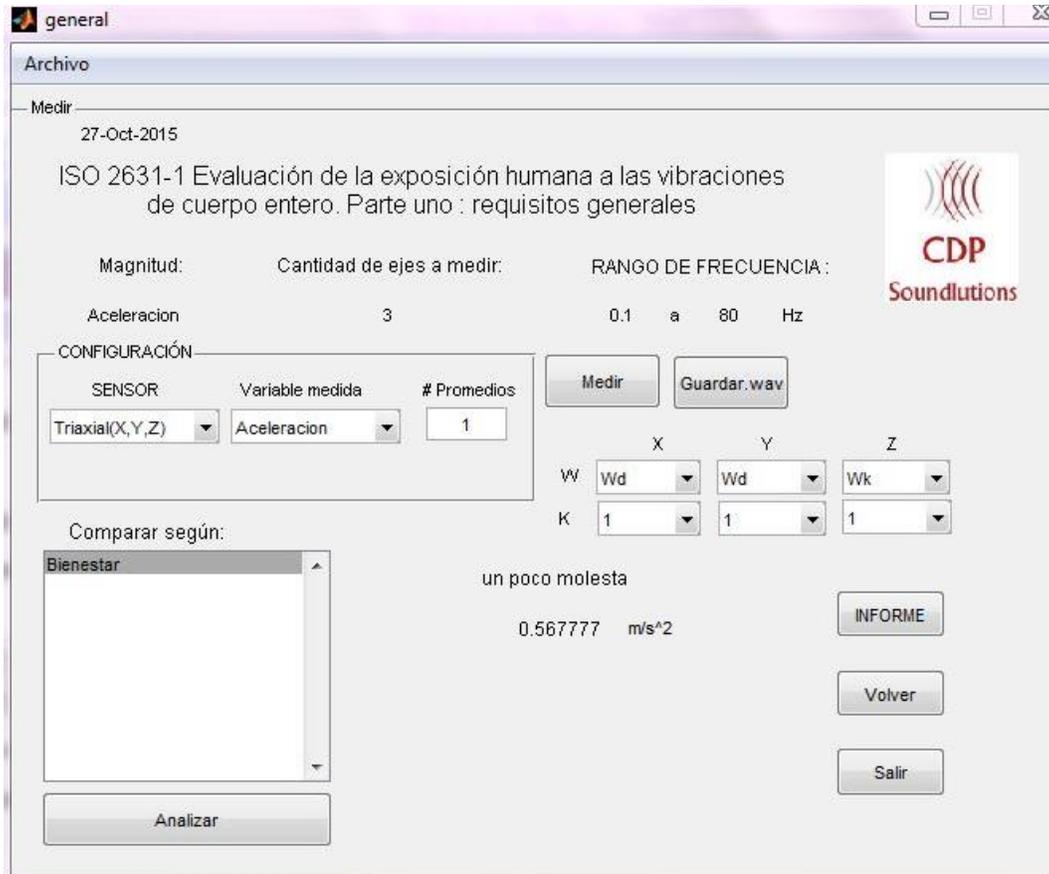


Ilustración 55 Resultado de la medición en el VCDP Fuente: Propia

La interfaz gráfica de usuario que se ve en la ilustración anterior muestra la aceleración promedio de los 3 ejes ortogonales para la medición realizada en la zona del trasero teniendo un valor de $A_v=0.57 \text{ m/s}^2$ que según normativa “un poco molesta”.

Para la zona lumbar:

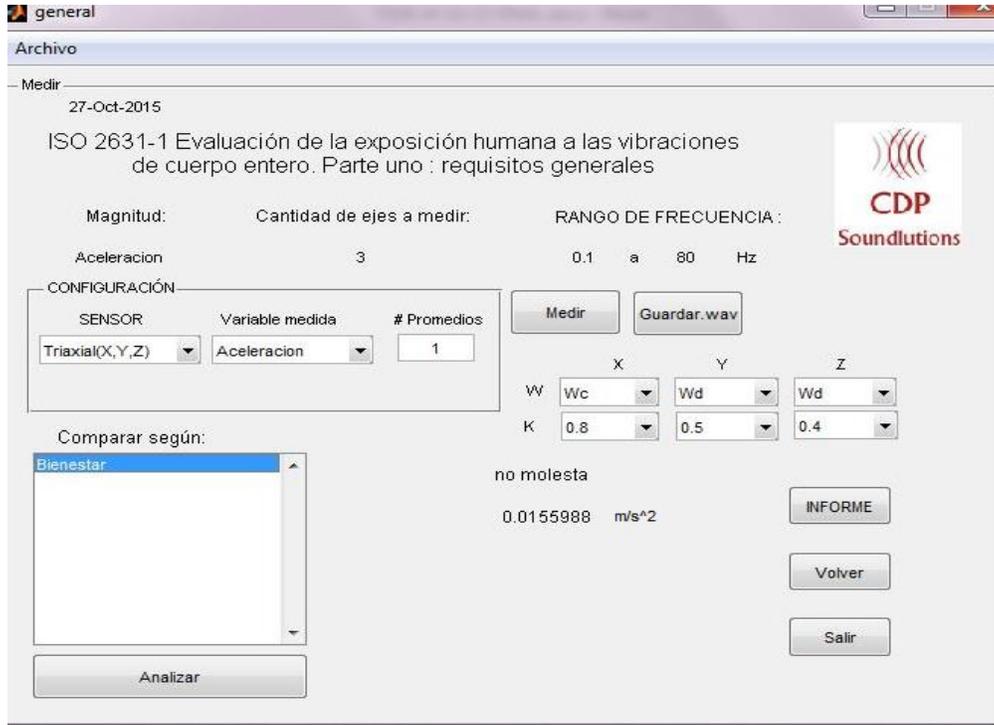


Ilustración 56 Resultado de la medición en el VCDP Fuente: Propia

Se evidencia que para el programa el valor de la aceleración promedio de los 3 ejes ortogonales obtenidos en la medición de la zona lumbar es $A_v=0.016 \text{ m/s}^2$ que la ISO2631-1 califica como “no molesta”.

En la siguiente tabla se muestran los resultados generales luego de haber realizado el análisis con el dispositivo Vibration Analyzer VCDP:

Ubicación del acelerómetro	Zona de los Pies	Zona del trasero	Zona Lumbar
Aceleración promedio de los 3 ejes ortogonales “ A_v ”	$A_v=0.104 \text{ m/s}^2$	$A_v=0.57 \text{ m/s}^2$	$A_v=0.016 \text{ m/s}^2$

Según la tabla de valores de vibraciones globales el nivel medido:	No molesta	Un poco molesta	No molesta
--	------------	-----------------	------------

Tabla 10 Resultados de la medición en los Seres Humanos según VCDP

6.3 Medición de la vibración de una sierra eléctrica según la ISO10816-1

Esta medición se realizó según los parámetros y requisitos dados en la ISO10816-1, Se midió la aceleración en los tres ejes ortogonales con los dispositivos Pro 117/EXT y Vibration Analyzer VCDP, sobre el motor, como se muestra en la siguiente imagen:



Ilustración 57 Medición para normativa en máquinas ISO 10816 fuente: propia

Es importante conocer lo que más se pueda de la máquina para de esta manera saber que frecuencias se podrán encontrar, se sabe que el motor en condiciones ideales gira a 3600RPM y trabaja a 3.58Kw por su placa, por lo tanto, se decide utilizar un rango de 10 a 1000Hz que alcanza a cubrir la vibración generada por este.

6.3.1 Medición con Pro117/EXT - dBFA

Pro 117/EXT:

Los pasos para realizar el análisis según la ISO 10816-1 son:

1. Mostrar el espectro de frecuencias por medio de la FFT, para posteriormente sacar el valor RMS comprendido entre las frecuencias determinadas o también es posible utilizar un filtro paso de banda que corte para este caso en 10Hz y 1000Hz, luego hallar el valor RMS.

Eje X:

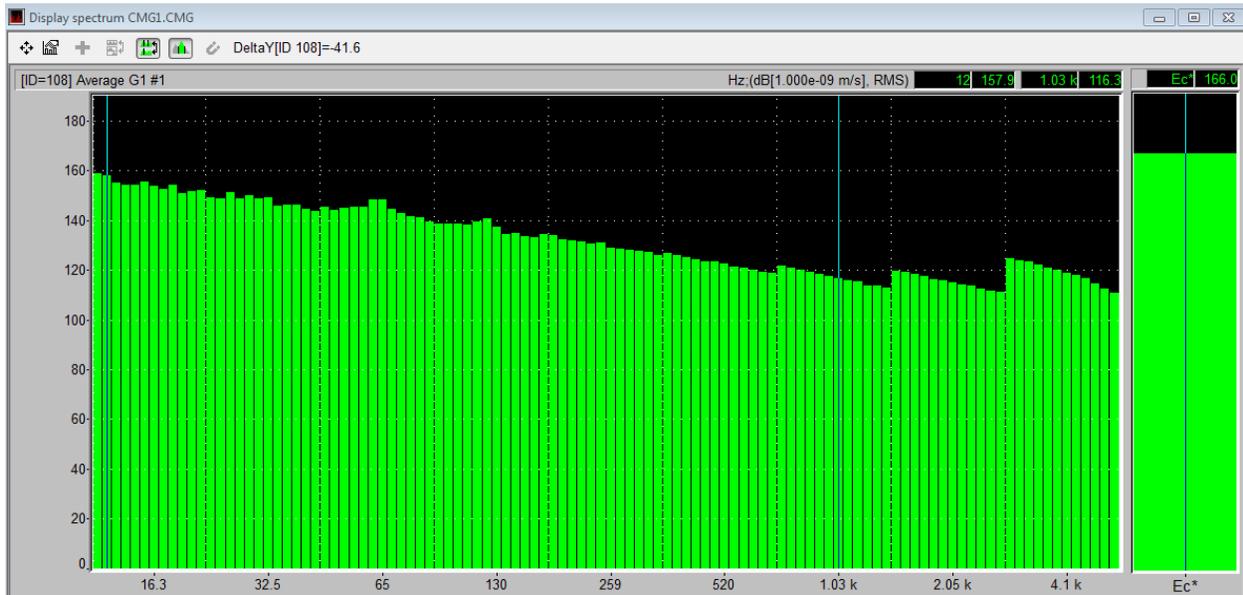


Ilustración 58 Resultado de la medición en el dBFA Fuente: Propia

La imagen muestra el espectro del eje x el cual presenta alto contenido en frecuencias bajas además se puede ver actividad notoria cercana a 60Hz, 120Hz y 180 Hz. Provocando una energía “EC*” de 166dB Velocidad por lo tanto para hacer la conversión a RMS se va a emplear una ecuación que las relacione.

$$Lv = 20 \log \left(\frac{V}{V_{ref}} \right)$$

En donde la velocidad de referencia como se puede apreciar en el costado superior derecho de la imagen es 1 nm/s^2 , para este caso “Lv” es el valor de “Ec*” y V el valor RMS dependiendo del eje a analizar.

Al despejar V se obtiene:

$$V=0.199 \text{ m/s}$$

Eje Y:

Este eje se analizará con el segundo método que consiste en aplicar un filtro pasa banda y luego mostrar el valor RMS, para realizar este procedimiento se debe seleccionar el archivo a procesar, posterior a esto se utiliza la herramienta llamada “computation server”, se selecciona la opción signal analysis y se oprime el botón “configure select script” luego se elige “band pass filtering” en donde se determinan las frecuencias de corte, luego se pulsa “OK” y “run select script”. Una vez aplicado el filtro se selecciona la opción statistics y se obtiene:

D:\DOC tesis\mediciones comparación\mediciones\maquinaesta\CMG1.CMG													
ID	Beginning abs.	End abs.	Duration	Number of points	Min Value	Local Min.	Max Value	Local Max	Average	Standard deviation	RMS value	Skew	Kurtosis
98	0,0000 s	27,3289 s	27,3289 s	349785	-0,0252 m/s	13,4273 s	0,0430 m/s	13,0859 s	0,0000 m/s	0,0058 m/s	0,0058 m/s	0,2728 m/s	4,9401

Ilustración 59 Resultado de la medición en el dBFA Fuente: Propia

Se evidencia que el valor RMS correspondiente al filtrado entre 10Hz y 1000Hz es:

$$V=0.0058 \text{ m/s}$$

Eje Z:

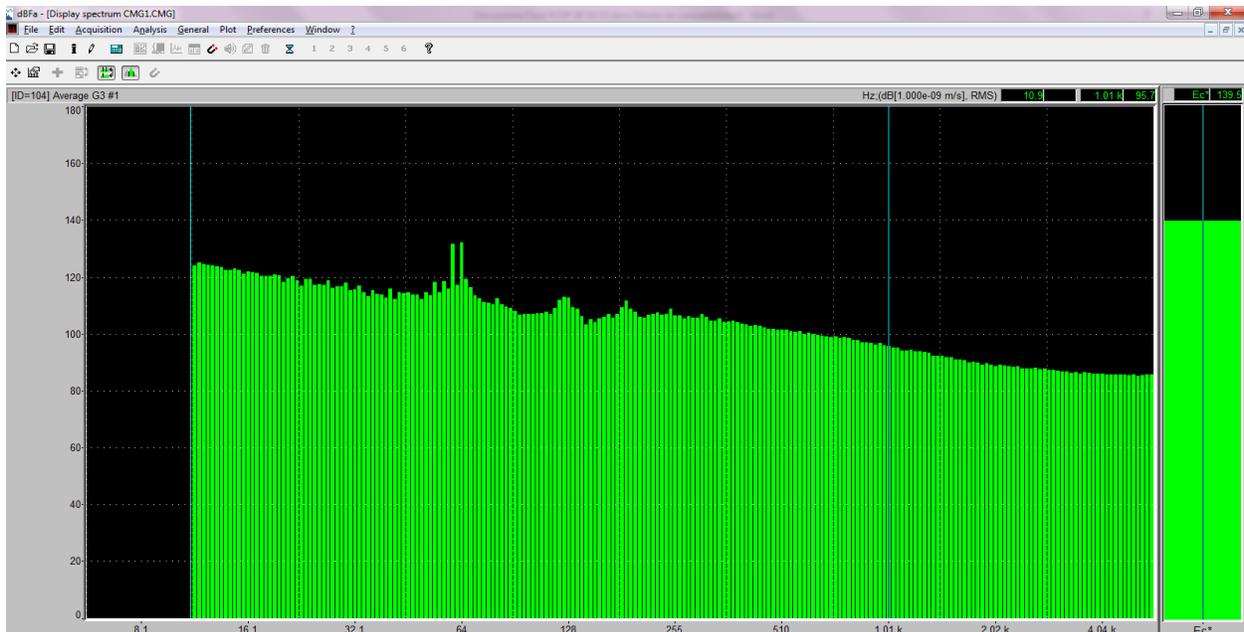


Ilustración 60 Resultado de la medición en el dBFA Fuente: Propia

Se observa que la energía comprendida entre 10Hz y 1Khz es 139.5dB de velocidad, lo que al despejar V el resultado es:

$$V=0.0094m/s$$

En general estos espectros presentan múltiplos de 60Hz y contienen alta energía en frecuencias menores a la velocidad de giro de la máquina cabe señalar que para un informe de mantenimiento predictivo, según Eshleman, esto puede indicar fallas como desgaste de correas de transmisión, falla de rodamientos, desbalanceo, soltura mecánica, desalineación, entre otros. Sin embargo, para poder detallar estos problemas es necesario ser detallado en la frecuencia siendo necesario utilizar la FFT sin división por banda y aplicar diferentes métodos de medición y análisis que no son contemplados en las normativas utilizadas. [50]

A continuación, se comparan las velocidades con la tabla estipulada por la ISO10816-1 para evaluar el estado de la máquina. Se compara según la clase o categoría uno definida en la norma ya que el motor se encuentra en esta zona por su potencia de 3.58Kwhay que tener en cuenta que esta parte de la norma solo hace énfasis en comparar los niveles generados por la máquina y no en diagnosticarlas fallas podrían generar dicho nivel.

Ejes	X	Y	Z
Velocidad RMS	$V=0.199 m/s$	$V=0.0058 m/s$	$V=0.0094m/s$
Estado de la máquina	Peligro inminente	Peligro inminente	Peligro inminente

Tabla 11 Resultados medición en Maquinas según dBFA

6.3.2 Medición con Vibration Analyzer VCDP

Vibration Analyzer VCDP:

Para analizar la máquina con este dispositivo los pasos son los siguientes:

Elegir en que clase se encuentra la máquina según potencia de trabajo, luego se oprime el botón analizar y la interfaz gráfica de usuario entregará el análisis como se muestra en la siguiente imagen:

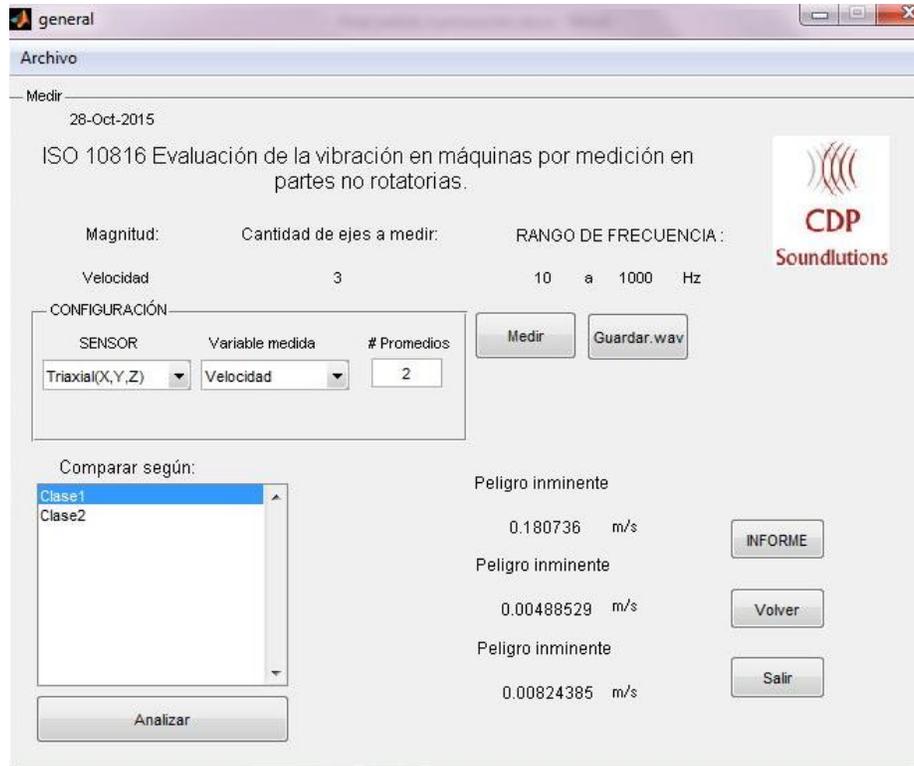


Ilustración 61 Resultado de la medición en el VCDP Fuente: Propia

En la imagen se observa la vibración en unidades de velocidad RMS en donde se muestra también el resultado de la comparación según la clase 1 como se estipula en la ISO 10816-1 los resultados son los siguientes:

Ejes	X	Y	Z
Velocidad RMS	V=0.18 m/s	V=0.0049 m/s	V=0.0082m/s
Estado de la máquina	Peligro inminente	Peligro inminente	Peligro inminente

Tabla 12 Resultados de la medición en Maquinas según VCDP

6.4 Error relativo

Una vez analizadas las vibraciones que se encontraron en la máquina se prosigue a comparar los resultados obtenidos con los dispositivos (Pro 117/EXT y Vibration Analyzer VCDP) en estructuras, seres humanos y máquinas determinando el error absoluto y relativo que tiene el dispositivo Vibration Analyzer VCDP tomando como valor de referencia o verdadero el resultado del análisis realizado en el sistema Pro 117/EXT:

	Ejes	Pro/Ext117	Vibration Analyzer VCDP	Error Absoluto	Error relativo [%]
<i>Estructuras</i>	Z	$V=0,944\mu\text{m/s}$	$V=0.93\mu\text{m/s}$	0,000000014	1,029411765
<i>Máquinas</i>	X	$V=0.199\text{ m/s}$	$V=0.18$	0,019	10
	Y	$V=0.0058\text{ m/s}$	$V=0.0049$	0,0009	15,51724138
	Z	$V=0.0094\text{ m/s}$	$V=0.0082$	0,0012	12
<i>Seres humanos</i>	<i>Promedio de los 3 ejes medidos en la zona de los pies</i>	$A_v = 0.129\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	$A_v=0,104\text{ m/s}^2$	0,025	19,37984496
	<i>Promedio de los 3 ejes medidos en la zona del trasero</i>	$A_v = 0.68\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	$A_v=0,57\text{ m/s}^2$	0,11	16,17647059
	<i>Promedio de los 3 ejes medidos en la zona lumbar</i>	$A_v = 0.0187\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	$A_v=0,016\text{ m/s}^2$	0,0027	16,875

Tabla 13 Comparación de las mediciones obtenidas con ambos sistemas

La tabla muestra que la mayor discrepancia de los datos se encuentra en la medición y análisis de la exposición a la vibración en seres humanos posiblemente causada por los filtros de ponderación utilizados, por lo tanto, se mostrarán algunas imágenes de la FFT antes y después de aplicar cualquier filtro en el dispositivo Pro 117/EXT.

- Zona pies eje X sin aplicar filtro Wk:

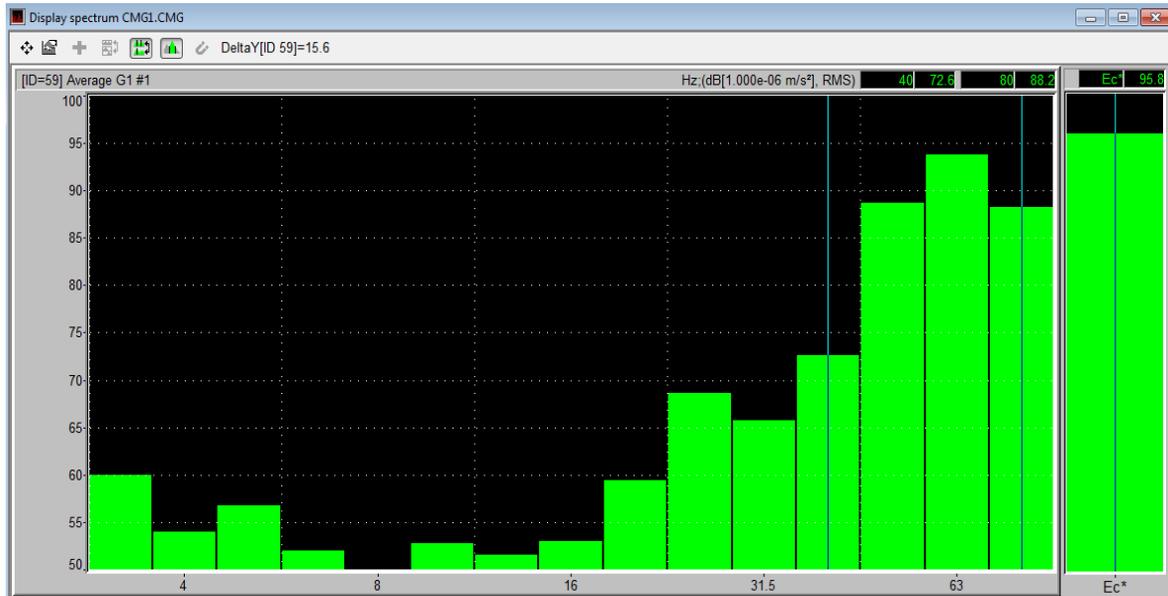


Ilustración 62 Resultado de la medición en el dBFA. Fuente: Propia

Para comparar los valores y poder encontrar el valor de corrección que aplica el dispositivo Pro 117/EXT se toman los valores más significativos, para este caso son las cuatro bandas del final que corresponden a 40Hz, 50Hz, 63Hz y 80Hz que generan un valor RMS de 95.8dB de aceleración. Los valores respectivos a las bandas son 72.6dB (40Hz), 88.6dB (50Hz), 93.7dB (63Hz) y 88.2 dB (80Hz) de aceleración. Posterior a esto se sacaran los mismos valores luego de aplicar el filtro.

- Zona pies eje X con filtro Wk:



Ilustración 63 Resultado de la medición en el dBFA Fuente: Propia

Según la gráfica los valores luego de aplicar el filtro son: 62.5dB (40Hz), 76.8dB (50Hz), 79.6dB (63Hz) y 71.5dB (80Hz) de aceleración, provocando un RMS de 82 dB de aceleración, mostrando una disminución del nivel total. Al tabular y comparar estos resultados se obtiene:

Valores significativos de la señal	Sin aplicar filtro Wk [dB]	Con filtro Wk [dB]	Diferencia (con filtro-sin filtro) [dB]	Según ISO2631-1 el factor de corrección para el filtro Wk es [dB]:	Diferencia (factor de corrección dado en la norma y el utilizado en el Pro 117/EXT) [dB]
Banda de 40 Hz	72,60	62,50	-10,10	-10,05	0,05
Banda de 50 Hz	88,60	76,80	-11,80	-12,19	-0,39
Banda de 63 Hz	93,70	79,60	-14,10	-14,61	-0,51
Banda de 80 Hz	88,20	71,50	-16,70	-17,56	-0,86
RMS	95,80	82,00	-13,80	N/A	N/A

Tabla 14 Valores finales después de aplicar el filtro wk

Según la tabla se puede decir que, aunque el nivel total disminuye por la corrección del filtro de ponderación la norma indica que no es suficiente lo que el nivel ha disminuido. Sin embargo, se comparará con el resto de los ejes para tener mayor certeza de lo visto.

- Zona de pies eje Y sin filtro Wk:



Ilustración 64 Resultado de la medición en el dBFA Fuente: Propia

Según la ilustración se observa que el valor RMS de la señal es 120.8dB de aceleración en donde en su mayoría este nivel es provocado por la banda de 50Hz con un nivel de 120.7dB y la banda de 80 Hz con 104.1 dB de aceleración. Ahora se sacarán estos mismos resultados luego de aplicar el filtro.

- Zona pies eje Y con filtro Wk:



Ilustración 65 Resultado de la medición en el dBFA Fuente: Propia

Posterior a la aplicación del filtro se puede observar según la ilustración que los niveles han disminuido notablemente, encontrándose ahora el RMS de la señal en 109dB de aceleración ponderada además con respecto a las bandas de 50 Hz y 80Hz sus niveles se encuentran en 108.9 dB y 87.4 dB respectivamente.

Al comparar se puede observar que la energía ha disminuido 11.8dB mientras que en las bandas de 50Hz y 80Hz hay una disminución de 11.8dB y 16.7dB. Según la norma ISO2631-1 los factores de corrección en decibeles para la banda de 50Hz y 80 Hz respectivamente son -12.19dB y -17.56dB. A continuación, se muestra un resumen por medio de una tabla de comparación.

Valores significativos de la señal	Sin aplicar filtro Wk [dB]	Con filtro Wk [dB]	Diferencia (con filtro-sin filtro) [dB]	Según ISO2631-1 el factor de corrección para el filtro Wk es:	Diferencia (factor de corrección dado en la norma y el utilizado en el Pro 117/EXT)
Banda de 50 Hz	120.7	108.9	-11.8	-12.19	-0.39
Banda de 80 Hz	104.1	87.4	-16.7	-17.56	-0.86
RMS	120.8	109	-11.8	N/A	N/A

Tabla 15 Valores finales después de aplicar el filtro wk

Los resultados de la tabla anterior muestran que la diferencia es un número mayor que el factor de corrección para el filtro Wk que indica la norma ISO2631-1 generando un nivel un poco mayor al esperado. Ahora bien, se prosigue a comparar con el eje Z para corroborar lo encontrado.

- Zona de pies eje Z sin filtro Wk:

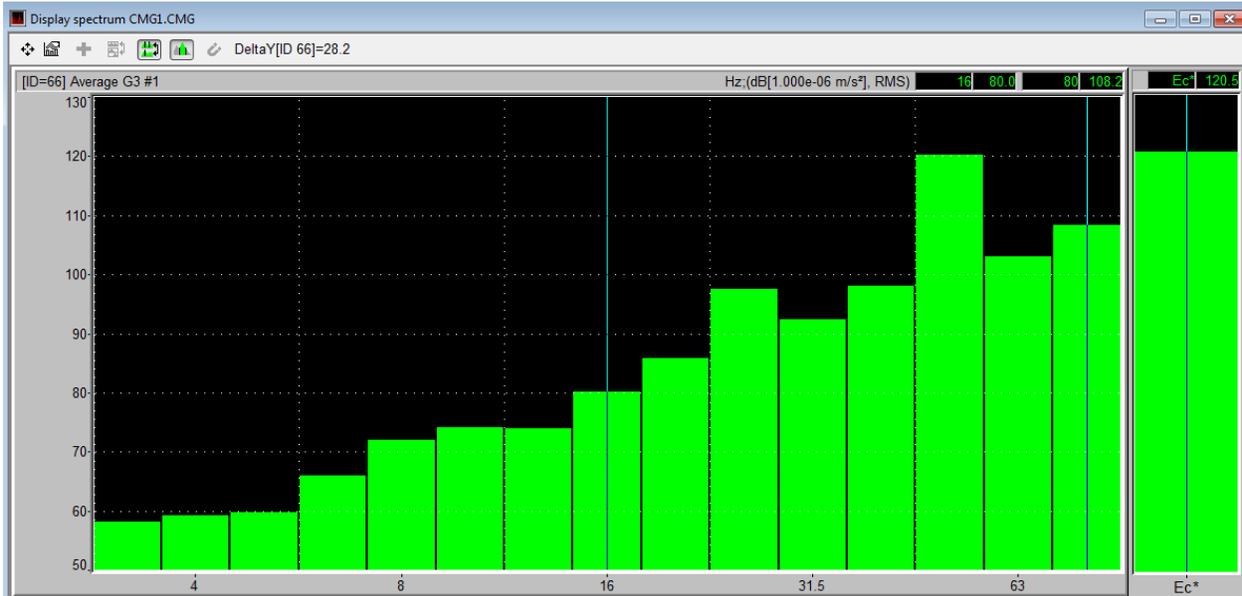


Ilustración 66 Resultado de la medición en el dBFA Fuente: Propia

La ilustración anterior muestra el contenido energético por división de tercio de banda de donde se tomarán las cuatro últimas bandas para determinar que factor utiliza el dispositivo Pro 117/EXT. El nivel que tienen las bandas son: 97.9dB (40Hz), 120.1dB (50Hz), 103dB (63Hz) y 108.2 dB (80Hz) de aceleración causando que el nivel RMS sea 120.5 dB de aceleración.

Zona de pies eje Z con filtro Wk:



Ilustración 67 Resultado de la medición en el dBFA Fuente: Propia

Luego de aplicar el filtro según la ilustración anterior se observa que el nivel en general disminuye dando como resultado un RMS de 108.7 con nivel de 87.8 dB en la banda de 40 Hz, 108.4dB en la banda de 50Hz, 87.8 dB en la banda de 63 Hz y 91.6 dB en la banda de 80 Hz.

Comparando los resultados mediante una tabla se obtiene:

Valores significativos de la señal	Sin aplicar filtro Wk [dB]	Con filtro Wk [dB]	Diferencia (con filtro-sin filtro) [dB]	Según ISO2631-1 el factor de corrección para el filtro Wk es [dB]:	Diferencia (factor de corrección dado en la norma y el utilizado en el Pro 117/EXT) [dB]
Banda de 40 Hz	97,90	87,80	-10,10	-10,05	0,05
Banda de 50 Hz	120,10	108,40	-11,70	-12,19	-0,49
Banda de 63 Hz	103,00	87,80	-15,20	-14,61	0,59
Banda de 80 Hz	108,20	91,60	-16,60	-17,56	-0,96
RMS	120,50	108,70	-11,80	N/A	N/A

Tabla 16 Valores finales después de aplicar el filtro wk

Se corrobora que el factor de corrección que aplica el Pro 117/EXT es diferente al de la norma ISO2631-1 por lo tanto parte de este porcentaje de error relativo se debe a esto, si se observa el resultado “Av” en decibeles se tendrá que la diferencia es de casi +-2 dB y gracias a la comparación del filtro aplicado se obtiene que puede haber una diferencia de casi +-1dB.

En conclusión es posible que los porcentajes de error relativo de todas las mediciones sean causados por resolución del espectro, diferencia de tiempos de inicio de medición (Al no poseer un sistema que dé inicio simultaneo a ambos dispositivos), diferencia en el muestreo de la señal (Vibration Analyzer muestrea a 12500 Hz mientras que el Pro 117/ext fue configurado a 12800Hz), ruidos o cargas espurias de los sistemas y resolución de cuantificación (Vibration Analyzer cuenta con 11 bits mientras que Pro 117/EXT 24 bits de resolución).

7 Conclusiones y Recomendaciones

7.1 Conclusiones

- Con el desarrollo de este proyecto, se logró implementar en la universidad de San Buenaventura un vibrómetro portátil dentro de un rango de frecuencias limitado por los acelerómetros usados, el cual permite el análisis de las mediciones según la norma escogida por el usuario (para demostrar el correcto funcionamiento del dispositivo se escogieron las normas: BS 7385-2, ISO 2631-1 e ISO 10816) y el ingreso de nuevas normas que el usuario desee utilizar.
- La tarjeta de adquisición de datos USB 1208FS se ajustó adecuadamente a las necesidades del vibrómetro portátil, teniendo los canales necesarios para recibir los datos provenientes de los acelerómetros, con una frecuencia de muestreo de 12,5KHz para cada canal, lo que es suficiente para registrar el rango de frecuencias requerido. También

cuenta con un rango de voltaje de entrada adecuado (+/-10V en entrada single-ended), para no perder información en la toma de datos. Además de esto la tarjeta es compatible con el software Matlab, que fue utilizado para el almacenamiento y procesado de los datos debido a que este fue diseñado para análisis y procesamiento de señales.

- Se diseñó un programa informático que permite el ingreso de nuevos parámetros de comparación existentes en normas no especificadas dentro del vibrómetro portátil, mediante el módulo “Ingresar nueva Norma”. También es posible analizar y comparar los datos que son medidos con el sistema análogo gracias a los módulos “Seleccionar Norma” y “Seleccionar Norma para analizar .wav”, mostrando como resultado final la valoración o evaluación de la vibración que puede afectar a máquinas, estructuras arquitectónicas y seres humanos, logrando lo que hasta el momento no se había desarrollado según lo investigado en este proyecto.
- Se comparó el vibrómetro portátil con un sistema de uso profesional (Pro 117/EXT) encontrando que el Vibration Analyzer VCDP posiblemente muestra con mayor facilidad los resultados de la evaluación de vibración, teniendo en cuenta que la cantidad de pasos necesarios para obtener ésta son menores con respecto al dispositivo mencionado. Sin embargo hay discrepancias en el análisis de resultados con respecto al sistema Pro117/EXT, tal vez ocasionadas por diferentes métodos matemáticos de desarrollo empleados y características o especificaciones de ambos vibrómetros, como frecuencia de muestreo, resolución de bits, entre otras.
- En conclusión el vibrómetro es una herramienta útil para medir y analizar niveles de vibración por lo tanto es necesaria para el ingeniero de sonido que opte por desempeñarse en el campo de las vibraciones, con el fin de desarrollar métodos para prevenir o controlar niveles de vibración que según normativas afecten a máquinas, estructuras arquitectónicas y seres humanos. De este modo se pretende generar inquietudes o motivaciones para explorar sistemas de medición y análisis portátil como el realizado en este proyecto (Vibration Analyzer VCDP) para el cual fue necesario aplicar conocimientos de física mecánica, electrónica y programación vistos durante la carrera.

7.2 Recomendaciones

- Utilizar acelerómetros cuyas características cumplan las especificaciones requeridas en cada normativa.
- Para mayor calidad de digitalización y eficiencia del dispositivo la tarjeta de adquisición de datos debe tener una resolución de cuantificación no menor a 16 bits.
- Comparar con un dispositivo de uso profesional que tenga la misma resolución de bits.
- Mejorar la velocidad de procesamiento y capacidad de almacenamiento del sistema embebido evitando aumentar las dimensiones y el peso del dispositivo.
- Buscar un sistema de referencia de alta calidad que permita probar el correcto funcionamiento del sistema excitador de vibraciones (shaker).

8 Bibliografía

- [1] Scheffer Cornelius, Girdhar Paresh. *Machinery vibration Analysis & Predictive maintenance*. ELSEIVER .
- [2] GRIFFIN, Michael. Vibraciones. Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo. Capítulo 50.
- [3] Deiana Susana, Baseggio Miguel, Giudici Fernando, Co autores: Rollán Cristina, Lillo Alfredo, Balmaceda Marisa, Gabinete Formas. Área Morfología FAUD – UNSJ Encuentro de investigadores de Ciencias Sociales de la Región Centro - Oeste Instituto de Investigaciones Socioeconómicas. Facultad de Ciencias Sociales de la Universidad Nacional de San Juan.
- [4] Galiana Llinares, Antonio Nadal. *Sistemas embebidos*. Tomado de: <http://server-die.alc.upv.es/asignaturas/PAEEES/2005-06/A07%20-%20Sistemas%20Embebidos.pdf>.
- [5] Medición y análisis de las vibraciones como técnica de inspección de equipos y componentes, aplicaciones, normativas y certificación, Pedro Nelson Saavedra. Facultad de Ingeniería - Universidad de Concepción, Casilla 160 - Concepción – Chile.
- [6] HUERTA LÓPEZ, Carlos. SALVADOR LOMELÍ Daniel. ESPARZA FUENTES, Manuel. ESPINZA BARRERA Fortunato. CONTRERAS PORRAS, Rosalba. BALTAZAR CIFUENTES, Yuriam frecuencias de vibración teóricas y experimentales de un edificio de nueve niveles localizado en la vecindad de la zona río de Tijuana, BC, México. <http://academic.uprm.edu/laccei/index.php/RIDNAIC/article/viewFile/209/210>.
- [7] Oscar Esneider Acosta, Juan Martín Aponte. (2010). 2.1.4 Diseño y montaje de un dispositivo, para determinar las frecuencias vibratorias de objetos, en los ejes X, Y, Z, en un rango de 0.5 Hz – 500 Hz. Bogotá-Colombia: Universidad de san Buenaventura.
- [8] SKF. *Microlog inspector. Microlog inspector datasheet. SKF Suecia*. Tomado de: <http://www.skf.com/binary/21-49218/CM-P8-11314-10-EN-SKF-Microlog-Inspector-data-sheet.pdf>.
- [9] SEMAPI. *DSP Logger Expert. DSP Logger Expert datasheet. SEMAPI Argentina*. Tomado de: http://media.wix.com/ugd/b0a75f_d157e87647b94be09980b8facd8bb40a.pdf.
- [10] Acoustic1 – NetdB Pro Series – Pro- 117/ EXT: Sound&Vibration Analysis
- [11] Svantek.es, (2015). *Calibrador de Vibraciones - Calibrador de Vibraciones SV111 / Svantek España*. Disponible en: <http://www.svantek.es/calibrador-vibraciones/sv111> [21 Ago. 2015]
- [12] GRIFFIN, Michael. Vibraciones. Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo. Capítulo 50.

- [13] ANÓNIMO. Criterios de aceptación de vibraciones. *Vibraciones*. <http://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/vibraciones/34564-8.pdf> Rev. Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 9(1-2) 97.
- [14] Medición y análisis de las vibraciones como técnica de inspección de equipos y componentes, aplicaciones, normativas y certificación, Pedro Nelson Saavedra. Facultad de Ingeniería - Universidad de Concepción, Casilla 160 - Concepción – Chile.
- [15] Organización mundial de la salud. (2004). Significado de salud. Ginebra Suiza: OMS.
- [16] UNE-ISO 2631, *Evaluación de la exposición humana a las vibraciones de cuerpo entero*. Partes 1 y 2.
- [17] ÁGUILA SOTO, Antonio. Procedimiento de evaluación de riesgos ergonómicos y psicosociales. <http://www.ual.es/GruposInv/Prevencion/evaluacion/procedimiento/B-%20Condiciones%20f%EDsico-ambientales/6-Vibraciones.pdf>
- [18] COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Norma sismo resistente (NSR-10). 17 de enero de 2011. http://www.ing-davirbonilla.com/archivos/decreto_092_17ene11.pdf
- [19] GRIFFIN, Michael. Vibraciones. Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo. Capítulo 50.
- [20] PERNIA MÁRQUEZ, Daniel. Introducción a la medición de vibración. Facultad de Ingeniería. Universidad de los Andes Venezuela. http://mendiola.comli.com/UTCV_IMIGZ/NOVENO/PREDICTIVO/Medicion%20de%20la%20vibracion_mecanica.pdf
- [21] Ronald Eshleman. (1999). Basic Machinery Vibrations. Nevada: Vibration Institute.
- [22] Saavedra, P. Análisis de vibraciones nivel II. Facultad de Ingeniería. Universidad de Concepción. Chile (1997).
- [23] ANÓNIMO. Introducción al fenómeno de las vibraciones mecánicas. Normativa sobre vibraciones. Departamento de ingeniería mecánica, energética y de materiales. Universidad de Navarra. http://www.imac.unavarra.es/web_imac/pages/docencia/asignaturas/emyv/pdfdoc/vib/vib_normativa.pdf
- [24] MONJE CENTENO, Daniel. Conceptos electrónicos en la medida de la aceleración y la vibración. Escuela politécnica de Sevilla. Universidad de Sevilla. <http://www.tav.net/transductores/acelerometros-sensores-piezoelctricos.pdf>
- [25] ANÓNIMO. Introducción al fenómeno de las vibraciones mecánicas. Normativa sobre vibraciones. Departamento de ingeniería mecánica, energética y de materiales. Universidad de Navarra.

http://www.imac.unavarra.es/web_imac/pages/docencia/asignaturas/emyv/pdfdoc/vib/vib_normativa.pdf

[26] Brüel & Kjær. Shakers y excitadores de vibración. De Brüel & Kjær Sitio web: <http://www.bksv.es/Products/shakers-exciter>

[27] Brüel & Kjær. Excitadores de bajo rango de fuerza LDS. De Brüel & Kjær Sitio web: <http://www.bksv.es/Products/shakers-exciter/lds-vibration-test/shakers/low-force>

[28] Proakis, Jhon G. (1998) Tratamiento digital de señales. Tercera edición. Madrid: Prentice Hall.

[29] Ambardar, AShok. (2002) Procesamiento de señales analógicas y digitales. Segunda edición. México: Thomson.

[30] Harris, F. J. (1978). On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform. *Proceedings of the IEEE*, 66(1), 51-83.

[31] PINTO RAMOS, M. A. (2008). *Procesamiento de señales utilizando el análisis tiempo-frecuencia*.

[32] Briceño Marquez. José *PRINCIPIO DE LAS COMUNICACIONES*. ULA. Merida Venezuela Capitulo 1 y 2.

[33] Docentes matemática aplicada y estadística. *LA TRANSFORMADA DE FOURIER*. http://matap.dmae.upm.es/Asignaturas/MetodosMatematicos_eiae/Transformada_Fourier.pdf

[34] Briceño Marquez. José *PRINCIPIO DE LAS COMUNICACIONES*. ULA. Merida Venezuela páginas 29a31.

[35] Vibrant technology, Inc *AUTO POWER SPECTRUM AND PSD MEASUREMENTS*. <http://www.altracustica.org/docs/vesappnote08.pdf>

[36] National Instruments. The Fundamentals of FFT-Based Signal Analysis and Measurement in LabVIEW and LabWindows/CVI. <http://www.ni.com/white-paper/4278/en/>

[37] Cassials, Ricardo (2014) *Sistemas Embebidos FPGA*. Primera Edición. Argentina: Marcombo Alfaomega.

[38] Camargo, C. (2011). *Transferencia tecnológica y de conocimientos en el diseño de sistemas embebidos*. (Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Colombia).

[39] Chen-Mou, C. "An Operating System Architecture for Embedded Systems – Design and Implementation". Department of Electrical Engineering. National Taiwan University. 1998.

[40] *Sistemas Embebidos y Sistemas Operativos Embebidos* Prof. David A. Pérez A.

- [41] Raymond A. Serway, Jerry S. Faughn. (2001). Física, 5a. ed. México: Pearson. Parte 3 pág. 403-433.
- [42] Singiresu S. Rao. (2010). Mechanical Vibrations Fifth Edition. USA: Pearson.
- [43] UNE-ISO 2631, *Evaluación de la exposición humana a las vibraciones de cuerpo entero*. Partes 1 y 2.
- [44] Datasheets acelerómetros. <http://www.wilcoxon.com/prodpdf/731A-P31%2098079a1.pdf>
- [45] Measurement Computing. (2014). User's guide. Massachusetts: Measurement Computing Corporation.
- [46] C.J. Savant, Martin S. Roden, Gordon Carpenter. (N/A). Diseño electrónico, 3ra, edición. USA: Prentice Hall.
- [47] Sendra, J. (1991). *Interferencias electromagnéticas en sistemas electrónicos*. Barcelona, Marcombo.
- [48] Maynar, F. M. (1992). *Agregación temporal y solapamiento o "aliasing"*. *Estadística española*, (130), 309-346.
- [49] Boylestad, R., & Nashelsky, L. (2003). *Electrónica: Teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*. México: Pearson Education.
- [50] Ronald Eshleman. (1999). Basic Machinery Vibrations. Nevada: Vibration Institute.

9.Anexos

Filtros de ponderación tomados de la ISO 2631-1

Número de banda de frecuencia ^D <i>x</i>	Frecuencia <i>f</i> Hz	W_z		W_x		W_j	
		factor × 1 000	dB	factor × 1 000	dB	factor × 1 000	dB
-10	0,1	62,4	-24,11	62,5	-24,08	31,0	-30,18
-9	0,125	97,2	-20,25	97,5	-20,22	48,3	-26,32
-8	0,16	158	-16,03	159	-15,98	78,5	-22,11
-7	0,2	243	-12,30	245	-12,23	120	-18,38
-6	0,25	364	-8,78	368	-8,67	181	-14,86
-5	0,315	527	-5,56	536	-5,41	262	-11,65
-4	0,4	708	-3,01	723	-2,81	351	-9,10
-3	0,5	843	-1,48	862	-1,29	417	-7,60
-2	0,63	929	-0,64	939	-0,55	458	-6,78
-1	0,8	972	-0,24	941	-0,53	478	-6,42
0	1	991	-0,08	880	-1,11	484	-6,30
1	1,25	1 000	0,00	772	-2,25	485	-6,28
2	1,6	1 007	0,06	632	-3,99	483	-6,32
3	2	1 012	0,10	512	-5,82	482	-6,34
4	2,5	1 017	0,15	409	-7,77	489	-6,22
5	3,15	1 022	0,19	323	-9,81	524	-5,62
6	4	1 024	0,20	253	-11,93	628	-4,04
7	5	1 013	0,11	202	-13,91	793	-2,01
8	6,3	974	-0,23	160	-15,94	946	-0,48
9	8	891	-1,00	125	-18,03	1 017	0,15
10	10	776	-2,20	100	-19,98	1 030	0,26
11	12,5	647	-3,79	80,1	-21,93	1 026	0,22
12	16	512	-5,82	62,5	-24,08	1 018	0,16
13	20	409	-7,77	50,0	-26,02	1 012	0,10
14	25	325	-9,76	39,9	-27,97	1 007	0,06
15	31,5	256	-11,84	31,6	-30,01	1 001	0,00
16	40	199	-14,02	24,7	-32,15	991	-0,08
17	50	156	-16,13	19,4	-34,24	972	-0,24
18	63	118	-18,53	14,8	-36,62	931	-0,62
19	80	84,4	-21,47	10,5	-39,55	843	-1,48
20	100	56,7	-24,94	7,07	-43,01	708	-3,01
21	125	34,5	-29,24	4,31	-47,31	539	-5,36
22	160	18,2	-34,80	2,27	-52,86	364	-8,78
23	200	9,71	-40,26	1,21	-58,33	243	-12,30
24	250	5,06	-45,92	0,63	-63,99	158	-16,03
25	315	2,55	-51,88	0,32	-69,94	100	-19,98
26	400	1,25	-58,08	0,16	-76,14	62,4	-24,10

1) El índice *x* es el número de banda de frecuencia de acuerdo con la Norma IEC 1260.

NOTAS

1 Para las tolerancias de las ponderaciones en frecuencia, véase el apartado 6.4.1.2.

2 Si se ha establecido que el rango de frecuencia por debajo de 1 Hz no es importante para el valor de la aceleración ponderada, se recomienda un rango de frecuencia entre 1 Hz y 80 Hz.

3 Los valores han sido calculados incluyendo la limitación de banda de frecuencia.

Número de banda de frecuencia ¹⁾ <i>x</i>	Frecuencia <i>f</i> Hz	<i>W_k</i>		<i>W_d</i>		<i>W_t</i>	
		factor × 1 000	dB	factor × 1 000	dB	factor × 1 000	dB
-17	0,02					24,2	-32,33
-16	0,025					37,7	-28,48
-15	0,031 5					59,7	-24,47
-14	0,04					97,1	-20,25
-13	0,05					157	-16,10
-12	0,063					267	-11,49
-11	0,08					461	-6,73
-10	0,1	31,2	-30,11	62,4	-24,09	695	-3,16
-9	0,125	48,6	-26,26	97,3	-20,24	895	-0,96
-8	0,16	79,0	-22,05	158	-16,01	1 006	0,05
-7	0,2	121	-18,33	243	-12,28	992	-0,07
-6	0,25	182	-14,81	365	-8,75	854	-1,37
-5	0,315	263	-11,60	530	-5,52	619	-4,17
-4	0,4	352	-9,07	713	-2,94	384	-8,31
-3	0,5	418	-7,57	853	-1,38	224	-13,00
-2	0,63	459	-6,77	944	-0,50	116	-18,69
-1	0,8	477	-6,43	992	-0,07	53,0	-25,51
0	1	482	-6,33	1 011	0,10	23,5	-32,57
1	1,25	484	-6,29	1 008	0,07	9,98	-40,02
2	1,6	494	-6,12	968	-0,28	3,77	-48,47
3	2	531	-5,49	890	-1,01	1,55	-56,19
4	2,5	631	-4,01	776	-2,20	0,64	-63,93
5	3,15	804	-1,90	642	-3,85	0,25	-71,96
6	4	967	-0,29	512	-5,82	0,097	-80,26
7	5	1 039	-0,33	409	-7,76		
8	6,3	1 054	-0,46	323	-9,81		
9	8	1 036	-0,31	253	-11,93		
10	10	988	-0,10	212	-13,91		
11	12,5	902	-0,89	161	-15,87		
12	16	768	-2,28	125	-18,03		
13	20	636	-3,93	100	-19,99		
14	25	513	-5,80	80,0	-21,94		
15	31,5	405	-7,86	63,2	-23,98		
16	40	314	-10,05	49,4	-26,13		
17	50	246	-12,19	38,8	-28,22		
18	63	186	-14,61	29,5	-30,60		
19	80	132	-17,56	21,1	-33,53		
20	100	88,7	-21,04	14,1	-36,99		
21	125	54,0	-25,35	8,63	-41,28		
22	160	28,5	-30,91	4,55	-46,84		
23	200	15,2	-36,38	2,43	-52,30		
24	250	7,90	-42,04	1,26	-57,97		
25	315	3,98	-48,00	0,64	-63,92		
26	400	1,95	-54,20	0,31	-70,12		

1) El índice *x* es el número de banda de frecuencia de acuerdo con la Norma IEC 1260.

NOTAS

1 Para las tolerancias de las ponderaciones en frecuencia, véase el apartado 6.4.1.2.

2 Si se ha establecido que el rango de frecuencia por debajo de 1 Hz no es importante para el valor de la aceleración ponderada, se recomienda un rango de frecuencia entre 1 Hz y 80 Hz.

3 Los valores han sido calculados incluyendo la limitación de banda de frecuencia.

Tabla de comparación para bienestar según ISO2631-1

- | | |
|---|------------------------|
| Menos de 0,315 m/s ² : | no molesta |
| De 0,315 m/s ² a 0,63 m/s ² : | un poco molesta |
| De 0,5 m/s ² a 1 m/s ² : | algo molesta |
| De 0,8 m/s ² a 1,6 m/s ² : | molesta |
| De 1,25 m/s ² a 2,5 m/s ² : | muy molesta |
| Mayor de 2 m/s ² : | extremadamente molesta |

Tabla de comparación para evaluar máquinas según ISO10816-1

R.m.s. vibration velocity mm/s	Class I	Class II	Class III	Class IV
0,28	A	A	A	A
0,45				
0,71				
1,12	B	B	B	B
1,8				
2,8	C	C	C	C
4,5				
7,1	D	D	D	D
11,2				
18				
28				
45				

Vibration Analyzer VCDP Manual

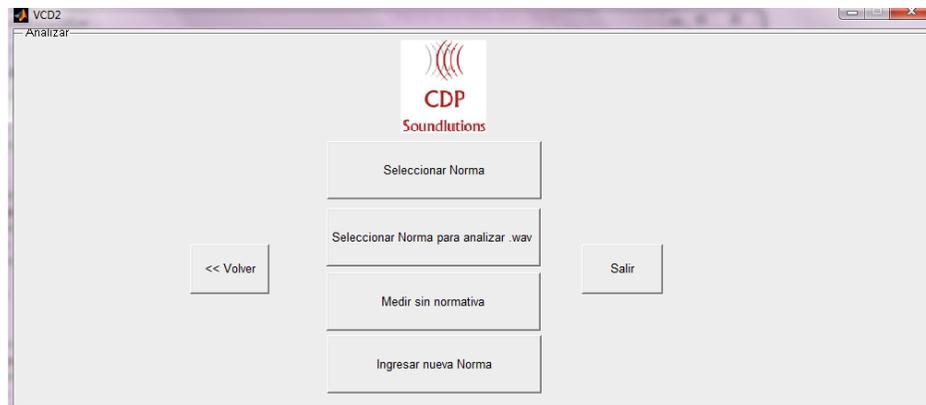
Vibration analyzer VCDP es un software desarrollado en la plataforma de programación MATLAB, que se encuentra instalado en el dispositivo de medición y análisis portátil VCDP, consta de 10 interfaces gráficas de usuario que pretenden ser de fácil manejo y entendimiento. A continuación se muestran algunas de las interfaces del software.

1. Inicio:



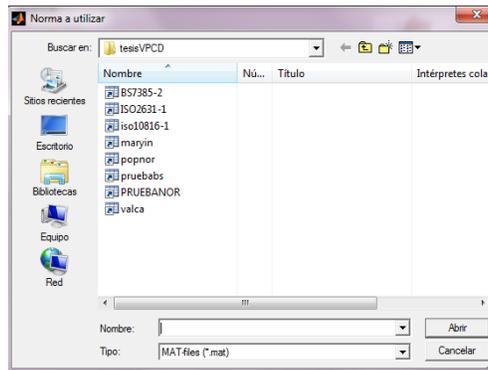
La primera interfaz o interfaz de inicio es aquella que al prender el dispositivo corre automáticamente, consta de una imagen que muestra un logo y 3 botones en donde los dos primeros permiten ir a otra interfaz y el salir apaga el dispositivo. Al dar click en el botón analizar aparece lo siguiente:

2. General



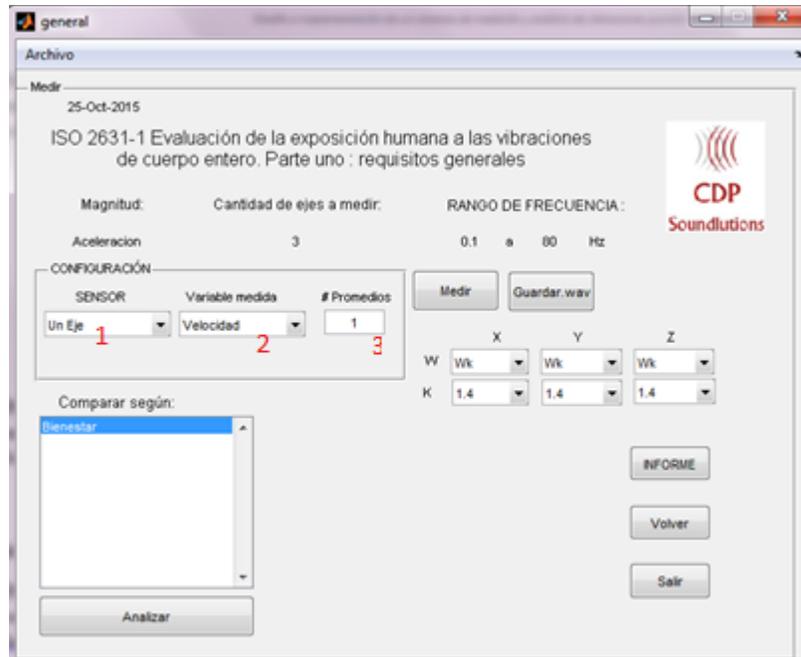
Se puede observar que la interfaz contiene 6 botones en donde 5 de ellos son usados para ir a otras interfaces. Si se da click sobre volver el programa vuelve a la ventana de inicio, a continuación se oprime el botón **seleccionar norma** y se muestra que sucede.

2.1 Seleccionar norma para analizar



Primero aparece una ventana en donde se selecciona que norma de las ya ingresadas, con la cual se quiere medir y analizar. En este caso se va a seleccionar la ISO2631 luego se selecciona abrir y aparece lo siguiente.

2.1.2 Interfaz Seleccionar Norma

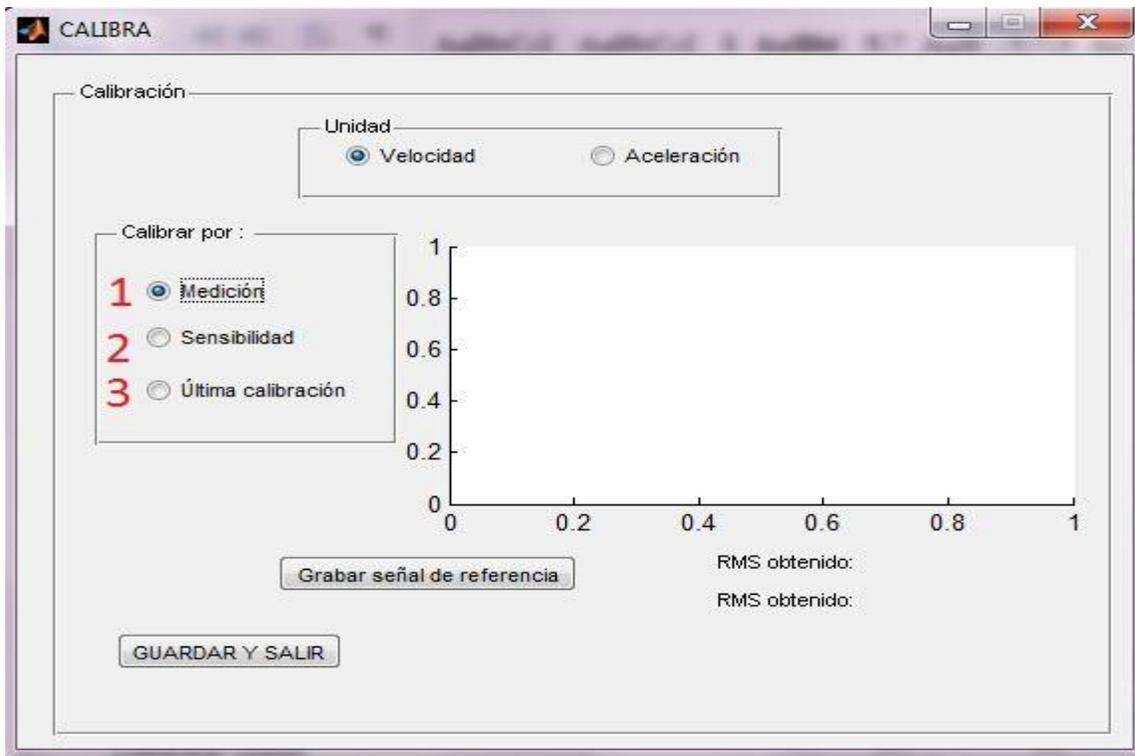


Una interfaz en donde se puede observar título, magnitud o variable a medir, cantidad de ejes a medir, rango de frecuencias la opción de implementar filtros de ponderación denominados W y factores de corrección llamados K, el usuario simplemente debe ingresar los parámetros que se

piden en el panel de configuración, sensor (1), variable medida (2) y número de promedios (3), en donde el número de promedio va a significar que tantas tomas se quieren realizar, el sistema siempre esta predeterminado para adquirir 10 segundos de señal por lo que si la persona que utiliza el dispositivo requiere medir más de este tiempo debe ingresar un número mayor a 1, por tal razón si se ingresa 6 en el número de promedios se obtendrá un minuto de la señal a adquirir. Siempre antes de pulsar el botón medir es necesario que se realice una calibración del sistema por lo tanto se debe oprimir el botón archivo ubicado en la parte superior izquierda.



Desplegando un pequeño menú o lista en donde se puede pulsar calibrar, esto abre la siguiente ventana.

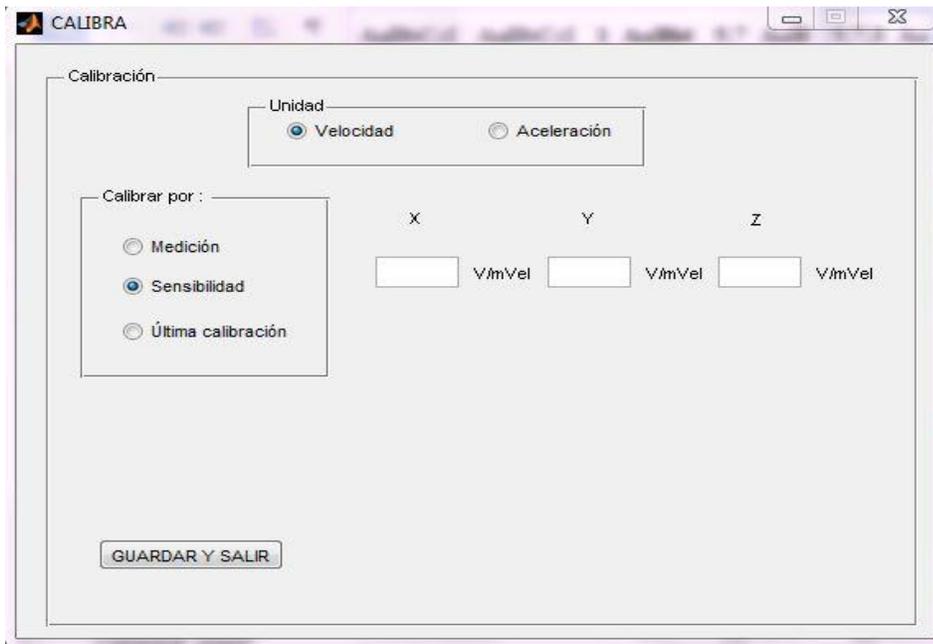


2.1.2 Calibración

En esta ventana se da la posibilidad de calibrar los sensores para obtener una medición más precisa como vemos en la anterior imagen por el método de **medición (1)**, el cual permite grabar la señal de referencia y después de grabar muestra en la interfaz el valor RMS obtenido.

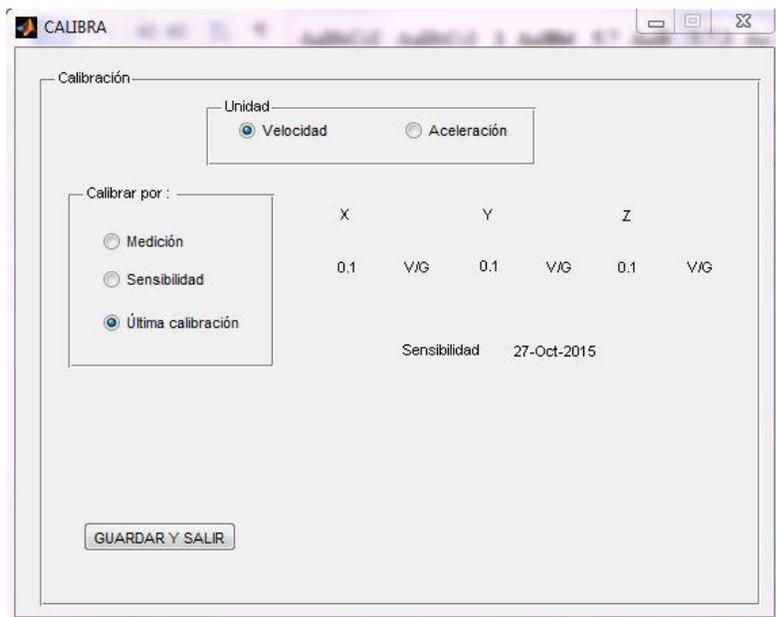
Sensibilidad (2)

En el modo sensibilidad le pide al usuario que ingrese los valores respectivos para cada eje dados por el fabricante de los acelerómetros.



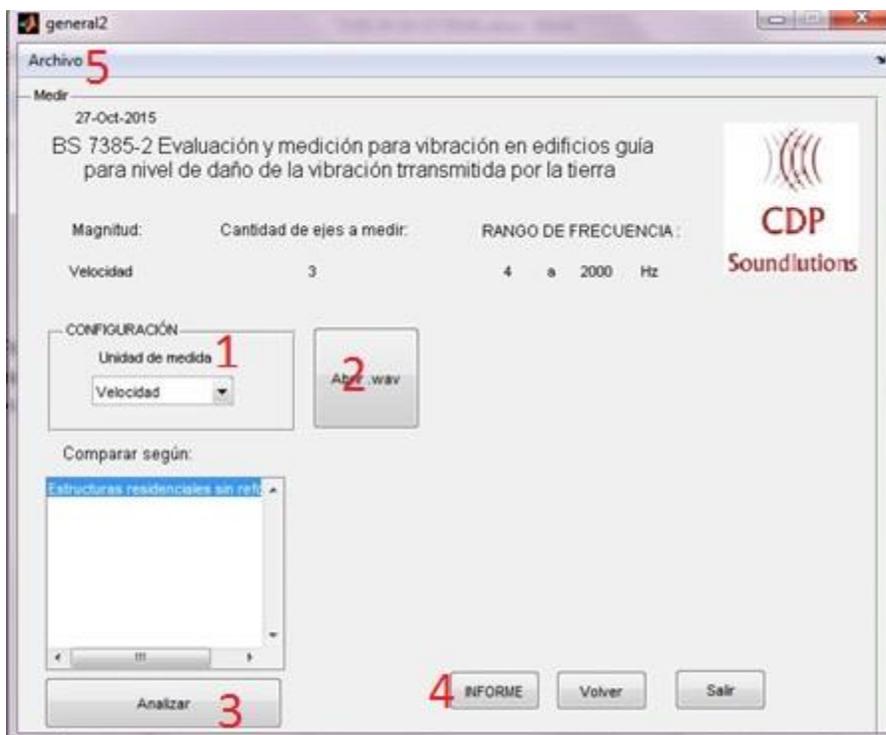
Última medición (3)

Como su nombre lo dice el programa guarda el último parámetro de calibración usado y le da la opción al usuario de utilizar ese parámetro de calibración.



2.2 Seleccionar norma para analizar .wav

Para que esta interfaz pueda ser usada de manera correcta al seleccionar esta opción debe seleccionar la norma según la cual desea comparar su medición.

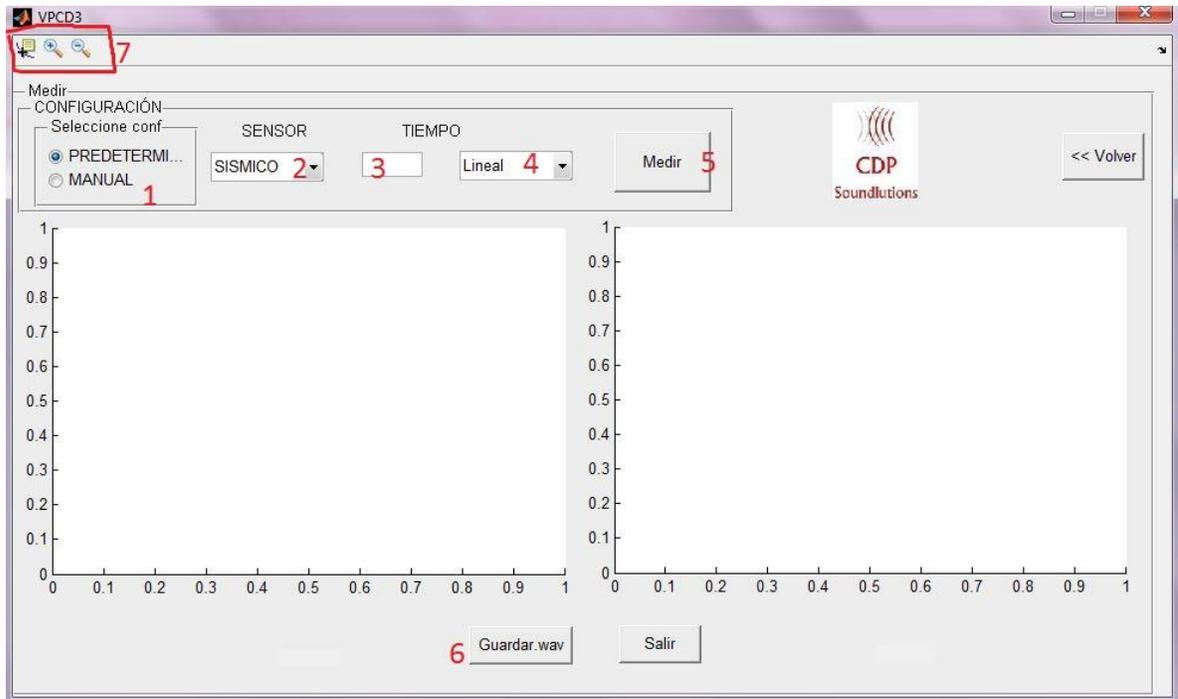


Esta interfaz está diseñada para facilitar al usuario el análisis de una medición anteriormente realizada en este software o con algún otro software de medición el cual permita exportar un archivo en formato wav.

En “**configuración**” (1) se puede seleccionar la unidad de medición que se utilizó para realizar la medición que se va a importar, en “**abrir.wav**” (2) permite importar el archivo que se desea analizar, en “**Analizar**” (3) después de haber sido importado el archivo se analiza según la norma escogida anteriormente, si desea realizar un informe del análisis hecho por el software debe dar click en el botón de “**INFORME**” (4), en “**Archivo**” (5) se encuentra la opción de calibrar con el mismo proceso mencionado en el numeral 2.1.2

2.3 Medir sin Normativa

Esta interfaz le permite hacer al usuario una medición sin ningún tipo de normativa con la cual comparar y exportar esta medición en formato wav para el posterior análisis en este software o en alguno otro.



En la primera parte de la interfaz tenemos para seleccionar la “**configuración**” de la medición, primero se selecciona (1) si se desea poner los valores predeterminados por el software o si se desean ingresar manualmente, después se selecciona el tipo de “**Sensor**” (2) que se va a utilizar ya sea triaxial o sísmico, el “**Tiempo**” (3) de integración de la medición y el ventaneo que se desea utilizar (4) por ultimo de esta sección se encuentra el botón para “**Medir**” (5) que debe ser accionado cuando se tenga la configuración completa, después de realizar por completo la medición si desea guardarla debe hacer click en el botón de “**Guardar .wav**” (6), en el numeral (7) se encuentran la herramientas para hacer zoom in y zoom out en la forma de onda de la medición realizada y el selector para cuando el usuario quiera ver un determinado valor en X y Y.

2.4 Ingresar nueva normativa

La interfaz para ingresar una nueva norma es una de las funciones más novedosas en este software de análisis de vibraciones, y cuenta con un extenso proceso de ingreso para que la norma sea lo suficientemente específica para que después pueda ser usada para el análisis de vibraciones de cualquier tipo de medición.

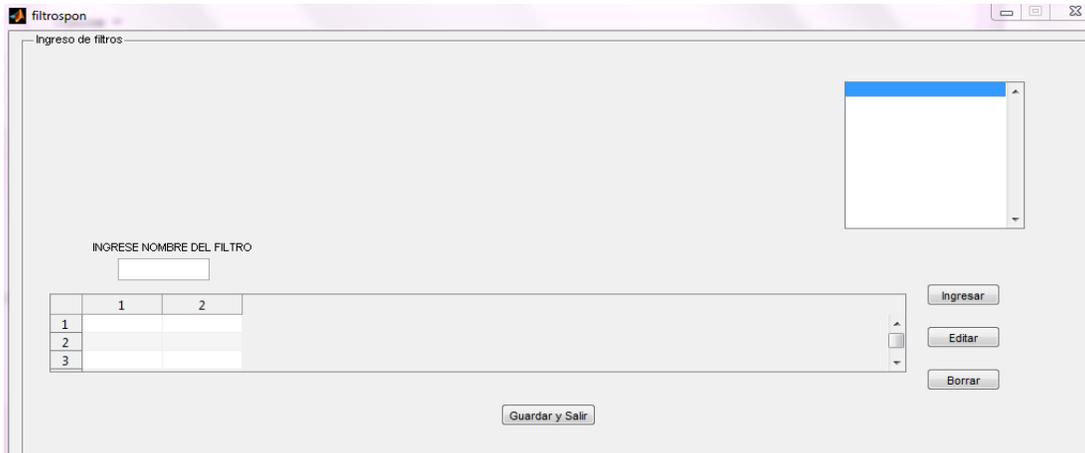
El usuario debe ingresar en que **“Variable a medir”** (1) debe ser medido según la norma que quiere ingresar ya sea en velocidad o aceleración.

Como segundo paso debe seleccionar la **“cantidad de ejes”** (2) que quiere medir cuando se use la norma que el usuario ingresó.

Después el usuario ingresa el **“rango de frecuencias”** (3) que la norma estipula para el análisis de vibraciones y su correspondiente división por banda. Las **“Operaciones a la magnitud”** (4) hacen referencia al tipo de operación y procesamiento que se debe realizar con los valores obtenidos por el dispositivo como:

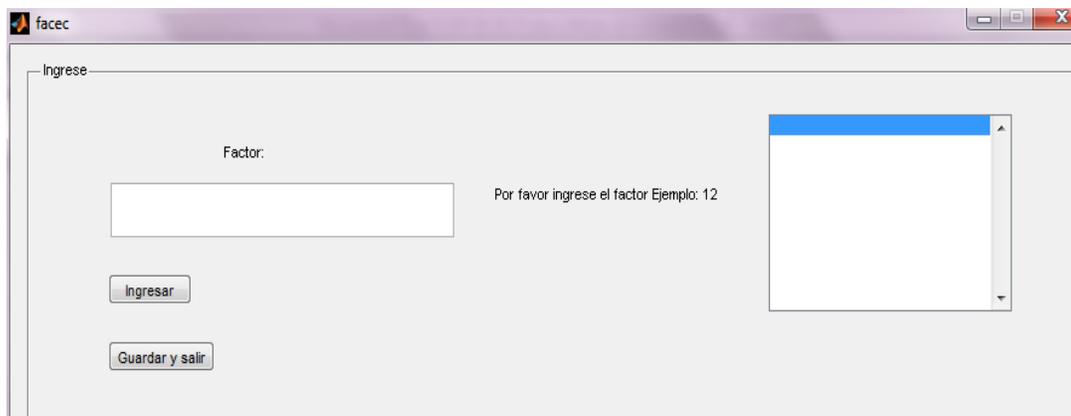
- **“Filtros de Ponderación”** (5)

Al dar clic en filtros de ponderación se abrirá la siguiente interfaz:



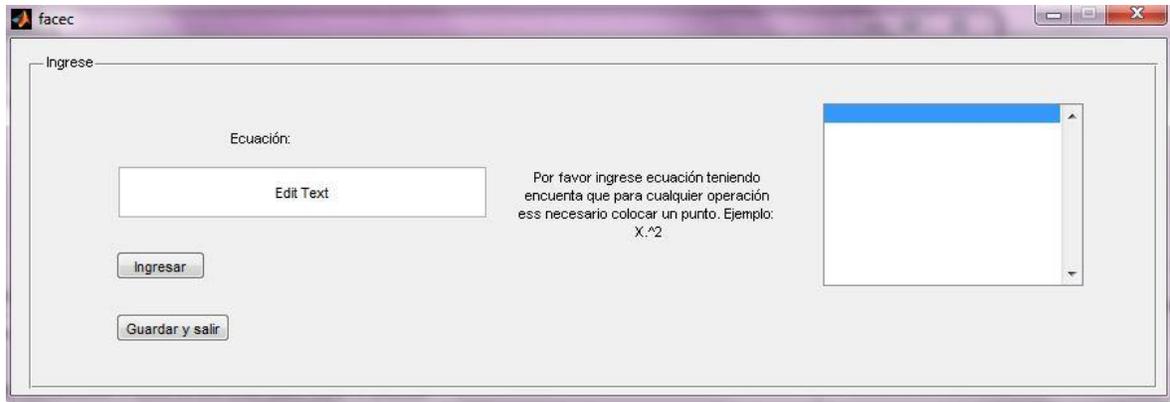
- **“Factores” (6)**

Si la norma utiliza algún factor para operar las mediciones realizadas debe ser ingresado en esta interfaz.



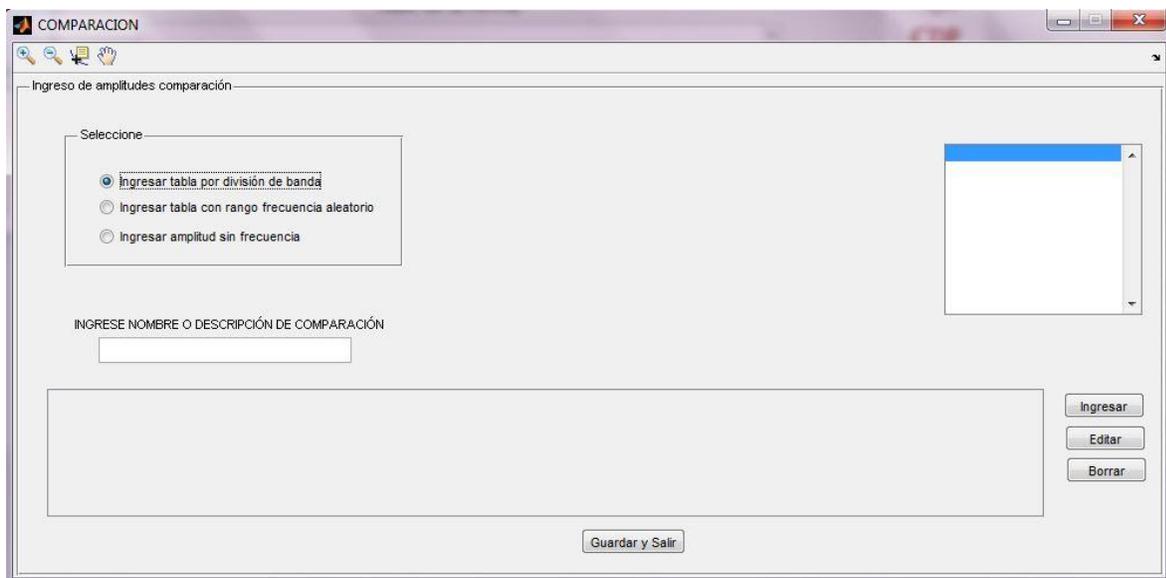
- **“Ecuaciones” (7)**

Si la norma utiliza alguna ecuación específica para operar y procesar las mediciones realizadas debe ser ingresado en esta interfaz.



Como último parámetro para las **“Operaciones a la magnitud”** (8) de cada medición se define la magnitud a manipular ya sea velocidad o Aceleración, según lo defina la norma que se desea ingresar.

Para ingresar los parámetros de comparación según la norma se debe ingresar las **“Amplitudes de comparación”** (9)



Cuando se desea ingresar estos parámetros de comparación de la norma, el software ofrece tres opciones distintas según se vea expresado en la norma, **Ingresar tabla por división de banda**, **ingresar tabla con rango de frecuencia aleatorio** e **ingresar amplitud sin frecuencia**, como uno de los últimos pasos para realizar el ingreso de las normas se solicita al usuario definir en comparación (10) a cual respuesta se definen los resultados, como último paso después de ingresar todos los parámetros de la norma que se desea se procede a guardar con todos los parámetros establecidos por la norma e ingresados por el usuario en el botón de **“Guardar”** (11).

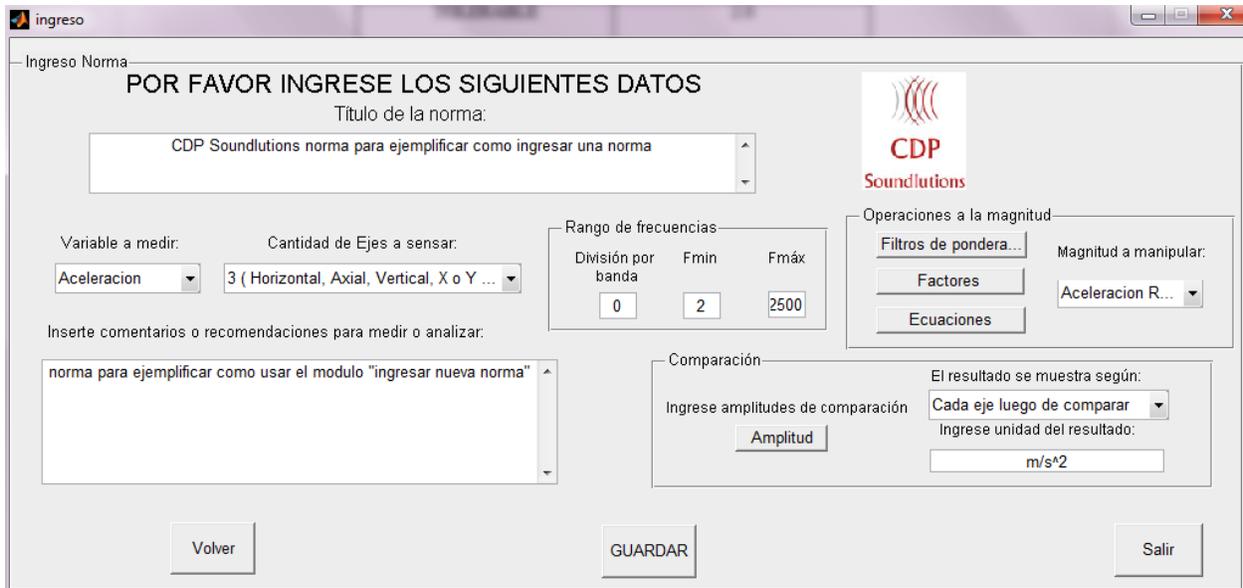
Ejemplo del módulo ingresar nombre

Para ejemplificar como ingresar una norma en el software del Vibration Analyzer VCDP se explicará paso a paso con una norma creada por CDP Soundlutions.

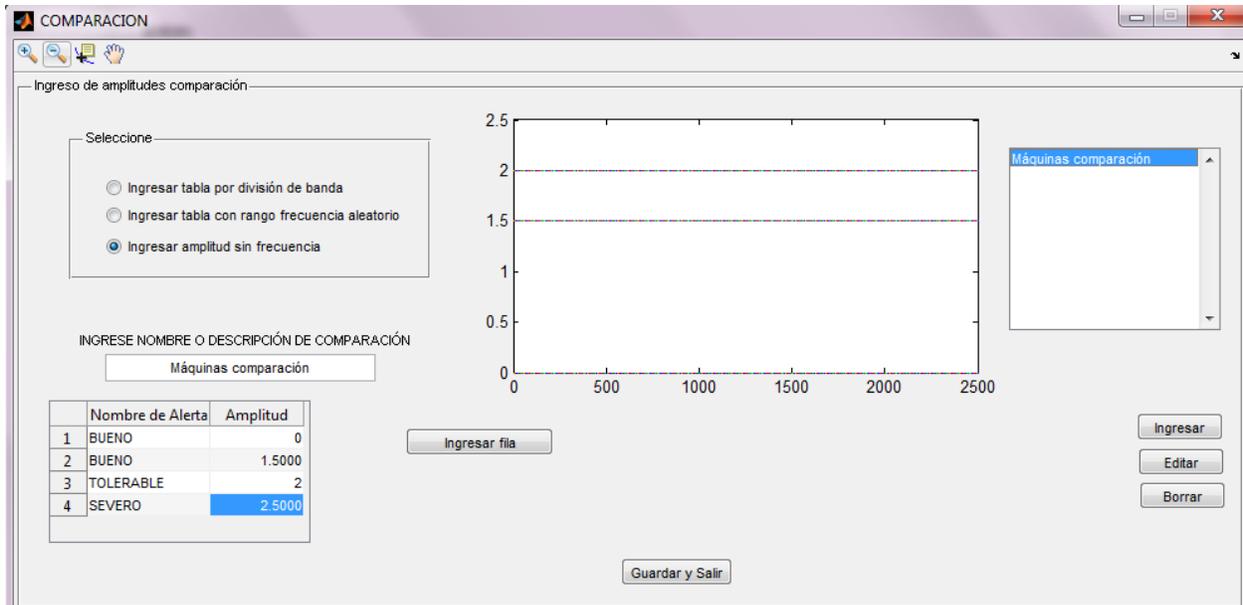
Esta norma es enfocada en máquinas en donde se evaluará la aceleración RMS y se recomienda medir en Aceleración, el rango de frecuencia predeterminado es de 2Hz a 2500Hz, es necesario medir en los tres ejes ortogonales y se compara según 3 niveles que se pueden observar en la siguiente tabla:

Mensaje de alarma	Aceleración RMS
BUENO	1.5
TOLERABLE	2.0
SEVERO	2.5

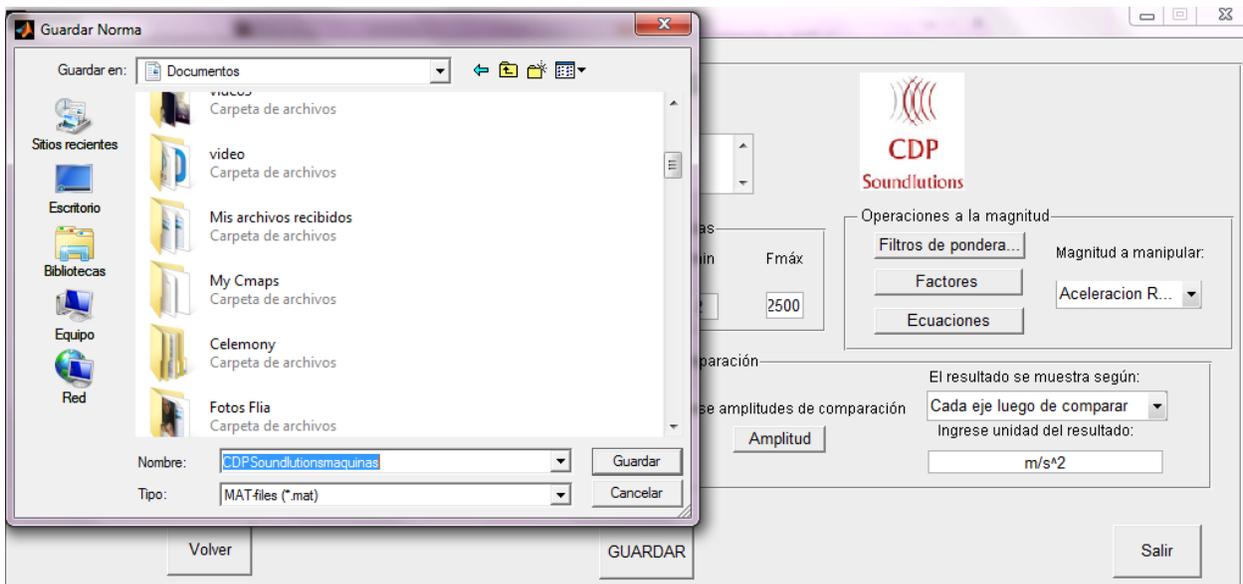
Se debe abrir el modulo “Ingresar nueva norma” en donde se abrirá una interfaz gráfica de usuario que al llenar con los datos mencionados anteriormente quedaría así.



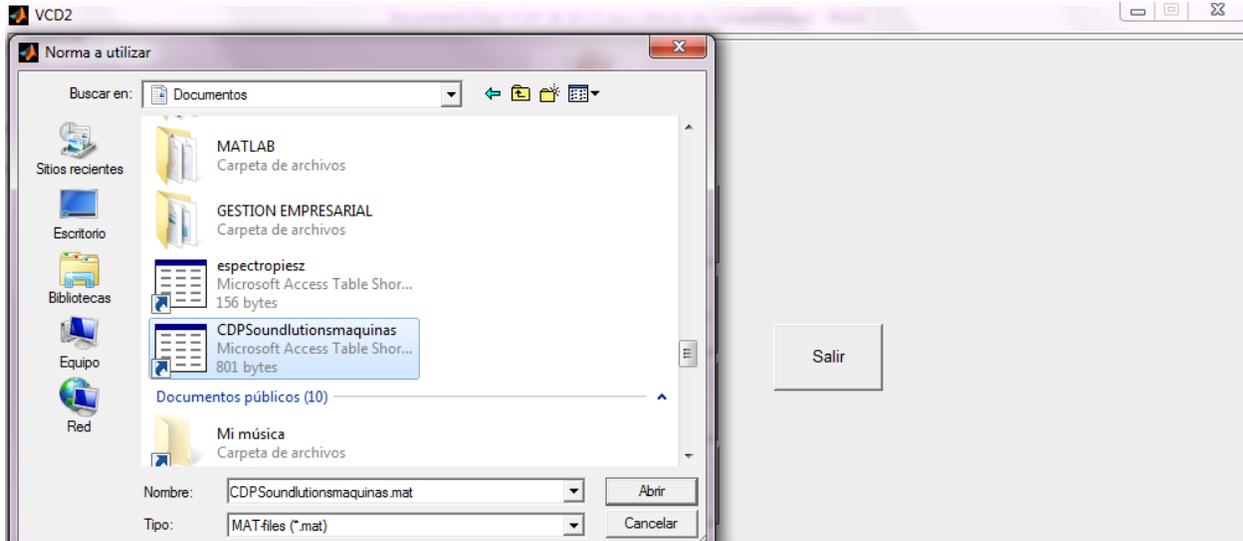
Se puede observar en la anterior imagen que se han ingresado casi todos los requisitos de la norma menos la amplitud y los que no requiere la norma como filtros de ponderación, factores o ecuaciones. Ahora se continúa ingresando las amplitudes de comparación en donde al dar clic en Amplitud saldrá la siguiente imagen:



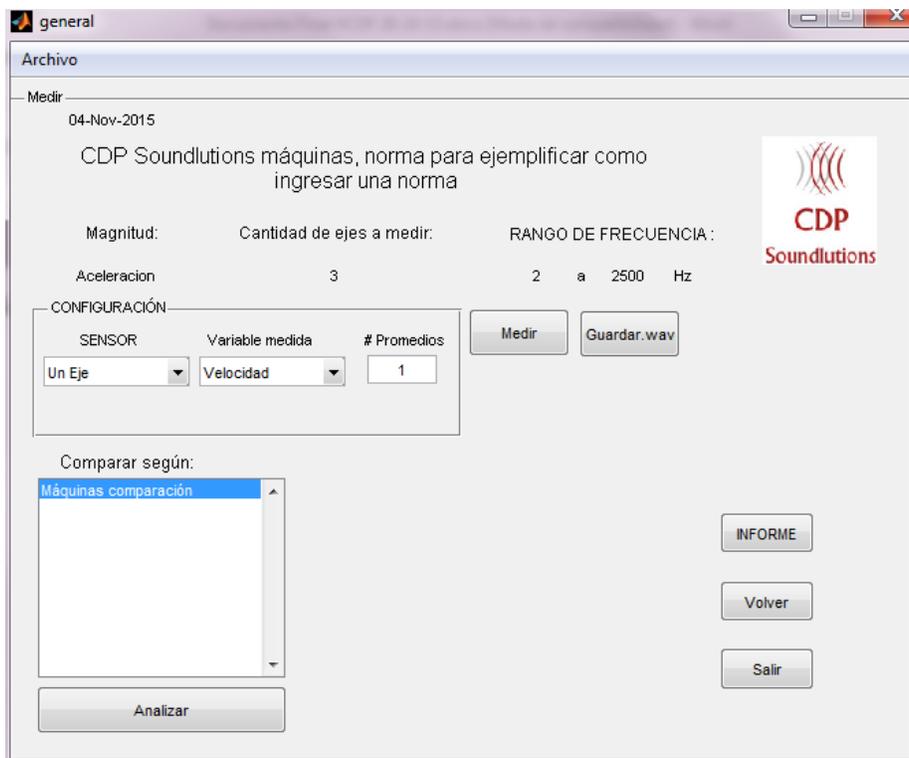
En la imagen anterior se puede observar el ingreso de la tabla de comparación en donde se seleccionó la opción ingresar amplitud sin frecuencia, luego se ingresó la norma y se comprueba en la lista que se encuentra en la parte superior derecha. Posterior a esto se da clic en Guardar y Salir, apareciendo de nuevo la interfaz de ingresar nueva norma en donde luego de ingresar todo los requerimientos se oprime el botón guardar que permite guardar un archivo .mat en cualquier carpeta.

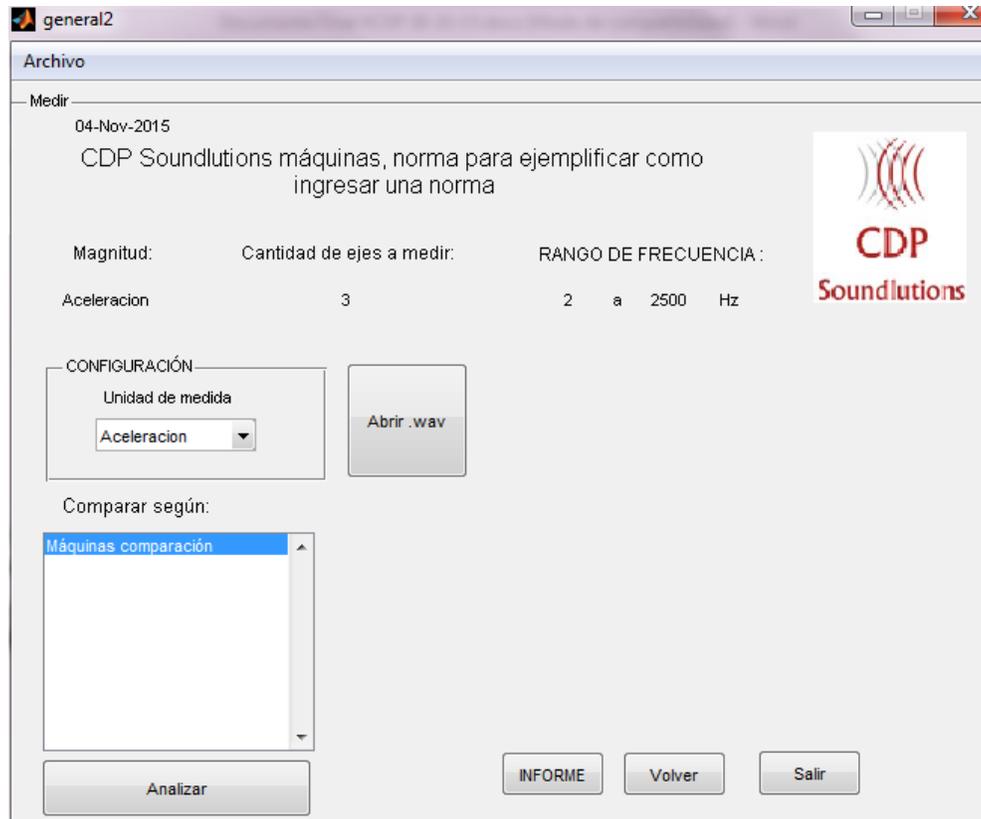


En la imagen anterior se guardó la norma como CDPSoundlutionsmaquinas en la carpeta documentos. Ahora bien se va a revisar que la norma ha sido ingresada correctamente dando clic a los módulos “Seleccionar Norma” y “Seleccionar Norma para analizar .wav” en donde se buscará la norma ingresada en la carpeta documentos como se muestra en la siguiente imagen.



Luego de seleccionar la norma guardada se deben abrir las siguientes ventanas:





Se puede observar que la norma creada por CDP Soundlutions ha sido ingresada correctamente según las imágenes anteriores en donde se aprecian los requerimientos de la normativa.

Presupuesto

PRESUPUESTO			
RUBROS	Fuentes		TOTAL
	Universidad San Buenaventura	Contrapartida	
Equipos	\$22.096.000	\$3.600.000	\$25.696.000
Materiales	\$-	\$1.210.000	\$1.210.000
Servicios Externos	\$-	\$70.000	\$70.000
Documentación	\$-	\$150.000	\$150.000
Software	\$8.320.000	\$-	\$8.320.000
TOTAL	\$30.416.000	\$5.030.000	\$35.446.000

DESCRIPCION Y CUANTIFICACION DE LOS EQUIPOS DE USO PROPIO	
EQUIPO	VALOR
Computadores	\$3.600.000
TOTAL	\$3.600.000

DESCRIPCION Y CUANTIFICACION DE LOS EQUIPOS DE LA UNIVERSIDAD	
EQUIPO	VALOR
Osciloscopio	\$5.000.000
Computador	\$1.200.000
Generador De Funciones	\$1.000.000
Acelerómetros Wilcoxon	\$7.696.000
Tarjeta de adquisición dB04	\$7.200.000
TOTAL	\$22.096.000

MATERIALES Y SUMINISTROS	
MATERIALES	VALOR
Tarjeta Madre	\$80.000
Cables y Conectores	\$50.000
Elementos Electrónicos	\$200.000
Tarjeta De Adquisición 1208FS	\$880.000
TOTAL	\$1.210.000

SERVICIOS EXTERNOS	
TIPO DE SERVICIO	VALOR
Estructura de Protección (chasis)	\$70.000
TOTAL	\$70.000

DOCUMENTACION	
TIPO	VALOR
Papelería	\$150.000
TOTAL	\$150.000

SOFTWARE	
NOMBRE	VALOR DE LA LICENCIA
MATLAB	\$8.320.000
TOTAL	\$8.320.000