

FECHA	04 Junio 2010
NÚMERO RAE	
PROGRAMA	Ingeniería de sonido
AUTOR (ES)	APONTE Juan Martín; ACOSTA Oscar Esneider
TÍTULO	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
PALABRAS CLAVES	Vibración, aceleración, vibrómetro, acelerómetro, triaxial, LabVIEW.
DESCRIPCIÓN	Se describe el diseño y construcción de un dispositivo para medir vibraciones, en un rango de 0.5 Hz a 500 Hz. El vibrómetro implementado consta de dos partes, la primera se encarga de adquirir la señal de aceleración por medio de un acelerómetro capacitivo triaxial y la segunda realiza el análisis de la señal capturada, mediante un software desarrollado en LabVIEW.
FUENTES BIBLIOGRÁFICAS	<p>AMBARDAR, Ashok, Procesamiento de Señales analógicas y digitales. Segunda edición. México: Thomson, 2002.</p> <p>BOYLESTAD, Robert L, Electrónica: Teoría de circuitos y dispositivos electrónicos. Octava edición. México: Pearson, 2003.</p> <p>DORF, Richard C, Circuitos eléctricos. Quinta edición. México: Alfaomega, 2003.</p> <p>HARRIS, Cyril M, Shock and vibration handbook. Quinta edición. McGraw Hill. 2002.</p> <p>HSU, Hwei P, Análisis de Fourier. Primera edición. México: Pearson, 1998.</p> <p>KREYSZIG, Erwin, Matemáticas avanzadas para ingeniería. Tercera edición. México: Limusa S.A., 2004.</p> <p>LABVIEW, National Instruments. Manual de usuario y ejemplos.</p> <p>MAGGIOLO, Gustavo Daniel, Detector Sísmico con acelerómetro XYZ MMA7260Q. UTN. Argentina, 2007. 3P.</p> <p>PALLÁS ARENY, Ramón. Sensores y acondicionamiento de señal. Barcelona: Marcombo, 2007.</p> <p>SERWAY, Raimond A. Física para ciencias e ingenierías. Sexta edición. México: Thomson, 2005.</p>

NÚMERO RAE	
PROGRAMA	Ingeniería de sonido
CONTENIDOS	INTRODUCCIÓN
	1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA
	1.1 ANTECEDENTES
	1.1.1 Vibrómetro PCE-VT 2600
	1.1.2 Vibrómetro 4447 de Brüel & Kjær
	1.1.3 Acelerómetro triaxial 5313a Dytran
	1.1.4 Tarjeta de adquisición de datos para el análisis vibratorio de Maquinaria rotativa
	1.2 DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA
	1.3 JUSTIFICACIÓN
	1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN
	1.4.1 Objetivo general
	1.4.2 Objetivos específicos
	1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES DEL PROYECTO
	1.5.1 Alcances
	1.5.2 Limitaciones
	2. METODOLOGÍA
	2.1 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN
	2.2 POBLACIÓN Y MUESTRA
	2.3 HIPÓTESIS
	2.4 VARIABLES
2.4.1 Variables independientes	

NÚMERO RAE	
PROGRAMA	Ingeniería de sonido
CONTENIDOS	2.4.2 Variables dependientes
	3. LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DE LA UNIVERSIDAD / LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DE LA FACULTAD / NÚCLEOS PROBLÉMICOS
	3.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN
	4. MARCO TEÓRICO – CONCEPTUAL
	4.1.1 Sistemas de medida
	4.1.2 Transductores y sensores
	4.1.3 Acondicionamiento y presentación
	4.1.4 Tipos de sensores
	4.1.5 Micromecanizado
	4.1.6 Posición, velocidad, rapidez y aceleración
	4.1.7 Objetos en caída libre
	4.1.8 Leyes de Newton
	4.1.9 Señales
	4.1.10 Procesamiento de señales
	4.1.11 Muestreo y cuantización
	4.1.12 Sistemas
	4.1.13 Transformada discreta de Fourier
	4.1.14 Transformada Rápida de Fourier <i>FFT</i>
	4.1.15 Filtros
	4.1.16 Acelerómetro capacitivo
4.2 MARCO LEGAL O NORMATIVO	

NÚMERO RAE	
PROGRAMA	Ingeniería de sonido
CONTENIDOS	5. DESARROLLO INGENIERIL
	5.1 Hardware de medición y transmisión de datos
	5.1.1 Acelerómetro ADXL330
	5.1.1.1 Características técnicas ADXL330
	5.1.1.2 Modo de operación
	5.1.1.3 Medición de sensibilidad
	5.1.2 Señal de calibración
	5.1.3 Circuito de alimentación
	5.1.3.1 Alimentación ADXL330
	5.1.3.2 Alimentación XR2206
	5.1.4 Recepción de la señal y transmisión hacia tarjetas de audio
	5.1.4.1 Circuito impreso acelerómetro
	5.1.4.2 Circuito impreso principal
	5.1.5 Tarjetas de audio
	5.1.5.1 Tarjeta de audio <i>Creative Sound Blaster X-Fi Surround 5.1 USB</i>
	5.1.5.2 Tarjeta de audio integrada <i>Conexant HP Pavilion dv2000</i>
	5.2 Software de análisis, visualización y grabación de datos
	5.2.1 Procesamiento de señal con LabVIEW
	5.2.1.1 Configuración
	5.2.1.2 Forma de onda
5.2.1.3 Espectro	
5.2.1.4 Datos	

NÚMERO RAE	
PROGRAMA	Ingeniería de sonido
CONTENIDOS	<p>6. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS</p> <p>6.1 Elementos usados en las mediciones</p> <p>6.1.1 Subwoofer Kenwood KFC-W1012</p> <p>6.1.2 Generador de funciones</p> <p>6.1.3 Osciloscopio digital TDS2024B</p> <p>6.1.4 Amplificador de audio Alesis RA150</p> <p>6.2 Señal de calibración</p> <p>6.3 Medición ruido propio del ADLX330</p> <p>6.4 Medición en octavas de señales sinusoidales</p> <p>6.4.1 Señal sinusoidal de 8 Hz</p> <p>6.4.2 Señal sinusoidal de 125 Hz</p> <p>6.4.3 Resumen de los datos obtenidos en las mediciones</p>
METODOLOGÍA	<p>1. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN</p> <p>Para obtener los valores eléctricos se hará uso de instrumentos de medición, tanto análogos como digitales, con los cuales se obtendrán directamente las mediciones de frecuencia, corriente, voltaje y potencia eléctrica. Todas estas mediciones servirán para obtener las características técnicas del dispositivo.</p> <p>La visualización y análisis de datos de la información recibida desde el acelerómetro, será realizada con el <i>software LabVIEW</i> (versión 8.6 licencia Universidad de San Buenaventura) de la empresa <i>National Instruments</i>. En este, se desarrollará un programa que le permita al usuario, además de ver en tiempo real la forma de onda y espectro de la fuente vibratoria, hacer la grabación de esta señal en formato de audio WAV.</p> <p>Para el diseño y simulación del circuito electrónico, se usará el <i>software ORCAD</i> de la empresa <i>Cadence</i> (Versión Demo). Este permitirá ver el comportamiento del circuito de acople y acondicionamiento de señal para el sensor.</p>

NÚMERO RAE	
PROGRAMA	Ingeniería de sonido
METODOLOGÍA	<p data-bbox="597 310 1458 373">El diseño del circuito impreso, será diseñado mediante el software Eagle, de Cadsoft (versión Freeware 5.6.0).</p> <p data-bbox="597 422 959 447">2. POBLACIÓN Y MUESTRA</p> <p data-bbox="597 499 1458 701">La población serán todos los datos eléctricos obtenidos con las simulaciones y las mediciones prácticas hechas con los respectivos instrumentos; de allí se tomará una muestra que contendrá los valores que permitan determinar las características técnicas del dispositivo elaborado, como voltajes de operación, ancho de banda efectivo, corrientes, aceleraciones, entre otros.</p> <p data-bbox="597 747 792 772">3. HIPÓTESIS</p> <p data-bbox="597 825 1458 1026">Construyendo un vibrómetro que se acerque a las especificaciones que exige la norma ISO 8041, será muy factible medir frecuencias de vibración a un bajo costo, gracias al acelerómetro ADXL330 a usar, el cual captura datos en los ejes X, Y y Z, sin necesidad de hacer uso de tres sensores diferentes para cada eje, en el ancho de banda requerido para la medición en baja frecuencia.</p> <p data-bbox="597 1066 824 1092">4 VARIABLES</p> <p data-bbox="597 1140 992 1165">4.1 Variables Independientes</p> <p data-bbox="597 1213 1458 1310">Ruido electromagnético y acústico: Existe la posibilidad de que señales acústicas o electromagnéticas no deseadas, afecten el resultado de las mediciones aportadas por el acelerómetro.</p> <p data-bbox="597 1358 1458 1455">La sensibilidad del acelerómetro: El valor de la sensibilidad del sensor, depende las condiciones medioambientales del entorno, donde se realice la medición.</p> <p data-bbox="597 1503 971 1528">4.2 Variables Dependientes</p> <p data-bbox="597 1577 1458 1673">Aceleraciones mayores a 3 g: Aceleraciones mayores a esta magnitud, provocan una respuesta no confiable del sistema por las características técnicas del acelerómetro.</p> <p data-bbox="597 1722 1458 1818">Calibración del dispositivo: Si el dispositivo no está calibrado, a pesar de dar la información en frecuencia correcta, el valor en amplitud será erróneo.</p>

NÚMERO RAE	
PROGRAMA	Ingeniería de sonido
METODOLOGÍA	Montaje del dispositivo: Si el dispositivo no está adecuadamente montado y sujeto sobre la superficie a medir, se producirán mediciones erróneas.
CONCLUSIONES	<p>Con el desarrollo de este proyecto, se logró implementar en la universidad un vibrómetro de muy bajo costo y fácil uso, sin embargo el sensor no cumple totalmente con los requerimientos establecidos en la norma ISO 8041, lo que no permitiría hacer mediciones oficiales de vibraciones en seres humanos. Para lograr que el vibrómetro cumpla con estos requerimientos, el acelerómetro ADXL330 debe cambiarse por uno que se ajuste a las exigencias internacionales.</p> <p>Con el vibrómetro desarrollado no es posible medir vibraciones más bajas a 3 Hz, debido a que los condensadores usados a la entrada de las tarjetas de audio, para suprimir el contenido <i>DC</i>, tienden a recortar, suprimir y alterar la forma de onda de señales de muy baja frecuencia.</p> <p>Con base en la figura 47, se puede concluir que el funcionamiento del dispositivo es óptimo en el rango de, 16 Hz a 500 Hz, debido a que el error relativo en frecuencia no supera el 1 %, contrario al funcionamiento entre 8 Hz y 16 Hz, en donde se presenta un error del 12.5 %.</p> <p>Con base en el análisis de resultados, se determinó que el vibrómetro tiene mayor precisión detectando los valores de frecuencia, en comparación con los valores de voltaje. En estos últimos el error relativo tiene una variación más considerable, llegando en algunos casos al 10.71 %.</p> <p>Las características técnicas de las tarjetas que se usen como dispositivos de entrada, para el análisis de señal del vibrómetro, pueden alterar el nivel de voltaje procedente del sensor y el calibrador, debido al acople de impedancias entre el hardware del vibrómetro y la entrada de las tarjetas usadas, generando un margen de error en la medición. Así mismo se debe tener en cuenta que tarjetas de audio de baja calidad, presentarán mayores márgenes de error en las mediciones.</p>

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

OSCAR ESNEIDER ACOSTA AGUDELO
JUAN MARTÍN APONTE GAYÓN

UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA DE SONIDO
BOGOTÁ D.C.
2010

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

OSCAR ESNEIDER ACOSTA AGUDELO
JUAN MARTÍN APONTE GAYÓN

Proyecto de grado para optar por el título de Ingeniero de Sonido

Asesor de Fondo

MIGUEL PÉREZ PEREIRA

Ingeniero de Electrónico

UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA DE SONIDO
BOGOTÁ D.C.
2010

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C. 04 de Junio de 2010

DEDICATORIA

Este proyecto está dedicado a nuestros padres, quienes nos han apoyado siempre en todos nuestros proyectos y en esta etapa como profesionales.

A nuestros hermanos y familias por el soporte y apoyo para alcanzar el sueño de ser Ingenieros de sonido.

AGRADECIMIENTOS

Al ingeniero Miguel Pérez, tutor de fondo y docente de Ingeniería de Sonido, por su acompañamiento y asesoría prestada durante el desarrollo de este proyecto.

Al ingeniero Luis Fernando Hermida, por su apoyo y orientación en el campo especializado de las vibraciones.

Al físico y director del programa académico, Luis Jorge Herrera y en general a todos los docentes de los programas de ingeniería de sonido e ingeniería electrónica, por la enseñanza recibida.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
1.1 ANTECEDENTES	16
1.1.1 Vibrómetro PCE-VT 2600	16
1.1.2 Vibrómetro 4447 de Brüel & Kjær	17
1.1.3 Acelerómetro triaxial 5313a Dytran	19
1.1.4 Tarjeta de adquisición de datos para el análisis vibratorio de Maquinaria rotativa	20
1.2 DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	21
1.3 JUSTIFICACIÓN	22
1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	23
1.4.1 Objetivo general	23
1.4.2 Objetivos específicos	23
1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES DEL PROYECTO	24
1.5.1 Alcances	24
1.5.2 Limitaciones	24
2. METODOLOGÍA	25
2.1 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	25

2.2	POBLACIÓN Y MUESTRA	25
2.3	HIPÓTESIS	25
2.4	VARIABLES	26
2.4.1	Variables independientes	26
2.4.2	Variables dependientes	26
3.	LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DE LA UNIVERSIDAD / LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DE LA FACULTAD / NÚCLEOS PROBLÉMICOS	27
3.1	ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN	27
4.	MARCO TEÓRICO – CONCEPTUAL	28
4.1.1	Sistemas de medida	28
4.1.2	Transductores y sensores	29
4.1.3	Acondicionamiento y presentación	29
4.1.4	Tipos de sensores	30
4.1.5	Micromecanizado	31
4.1.6	Posición, velocidad, rapidez y aceleración	33
4.1.7	Objetos en caída libre	34
4.1.8	Leyes de Newton	34
4.1.9	Señales	35
4.1.10	Procesamiento de señales	36
4.1.11	Muestreo y cuantización	37
4.1.12	Sistemas	38

4.1.13	Transformada discreta de Fourier	38
4.1.14	Transformada Rápida de Fourier <i>FFT</i>	39
4.1.15	Filtros	39
4.1.16	Acelerómetro capacitivo	40
4.2	MARCO LEGAL O NORMATIVO	42
5.	DESARROLLO INGENIERIL	43
5.1	Hardware de medición y transmisión de datos	43
5.1.1	Acelerómetro ADXL330	43
5.1.1.1	Características técnicas ADXL330	44
5.1.1.2	Modo de operación	45
5.1.1.3	Medición de sensibilidad	46
5.1.2	Señal de calibración	47
5.1.3	Circuito de alimentación	49
5.1.3.1	Alimentación ADXL330	49
5.1.3.2	Alimentación XR2206	50
5.1.4	Recepción de la señal y transmisión hacia tarjetas de audio	52
5.1.4.1	Circuito impreso acelerómetro	52
5.1.4.2	Circuito impreso principal	53
5.1.5	Tarjetas de audio	54
5.1.5.1	Tarjeta de audio <i>Creative Sound Blaster X-Fi Surround 5.1 USB</i>	54

5.1.5.2	Tarjeta de audio integrada <i>Conexant HP Pavilion dv2000</i>	55
5.2	Software de análisis, visualización y grabación de datos	55
5.2.1	Procesamiento de señal con LabVIEW	55
5.2.1.1	Configuración	56
5.2.1.2	Forma de onda	59
5.2.1.3	Espectro	61
5.2.1.4	Datos	63
6.	PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	65
6.1	Elementos usados en las mediciones	65
6.1.1	Subwoofer Kenwood KFC-W1012	65
6.1.2	Generador de funciones	66
6.1.3	Osciloscopio digital TDS2024B	67
6.1.4	Amplificador de audio Alesis RA150	68
6.2	Señal de calibración	69
6.3	Medición ruido propio del ADLX330	70
6.4	Medición en octavas de señales sinusoidales	72
6.4.1	Señal sinusoidal de 8 Hz	72
6.4.2	Señal sinusoidal de 125 Hz	76
6.4.3	Resumen de los datos obtenidos en las mediciones	76
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	80

7.1	CONCLUSIONES	80
7.1	RECOMENDACIONES	81
	BIBLIOGRAFÍA	82
	GLOSARIO	83
ANEXO 1	(Manual de usuario)	86
ANEXO 2	(Presupuesto)	97

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Características técnicas PCE-VT 2600	17
Tabla 2. Características técnicas 4524-B-000 y 4515-B-002	18
Tabla 3. Las características técnicas del 5313a dadas por Dytran	19
Tabla 4. Clasificación de los sensores	31
Tabla 5: Comparación ISO 8041 y ADXL330	43
Tabla 6. Características técnicas ADXL330	44
Tabla 7. Selección del condensador de filtrado	45
Tabla 8. Características técnicas XR2206M/P.	47
Tabla 9: Características Técnicas <i>Creative Sound Blaster X-Fi Surround 5.1 USB</i>	55
Tabla 10: Características KFC-W1012	65
Tabla 11: Características GFG-8255A	66
Tabla 12: Características TDS2024B	67
Tabla 13: Características Alesis RA300	68
Tabla 14: Mediciones de frecuencia sobre el eje X	76
Tabla 15: Mediciones de voltaje sobre el eje Y	76
Tabla 16: mediciones de frecuencia sobre el eje Z	77
Tabla 17: Mediciones de voltaje sobre el eje X	77
Tabla 18: Mediciones de frecuencia sobre el eje Y	77
Tabla 19: Mediciones de voltaje sobre el eje Z	78

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Vibrómetro PCE-VT 2600	16
Figura 2. Vibrómetro 4447, acelerómetros 4524-B-00, 4515-B-002, Accesorios de montaje.	18
Figura 3. Acelerómetro triaxial 5313a de <i>Dytran</i>	19
Figura 4. Estructura general de un sistema de medida y control.	28
Figura 5: Microestructuras obtenidas por micromecanizado.	32
Figura 6: Señales analógica, muestreada, cuantizada y digital	35
Figura 7. Procesamiento de señales analógicas y digitales	36
Figura 8. Acelerómetro capacitivo	40
Figura 10. Diagrama de bloques vibrómetro	43
Figura 11. Tarjeta para el ADXL330 fabricada por <i>Sparkfun</i>	44
Figura 12: Tensión de salida en cada eje bajo aceleración estática causada por la gravedad.	46
Figura 13. Plano electrónico para la generación de una onda sinusoidal con el XR2206.	48
Figura 14. Diagrama electrónico regulador LM317	49
Figura 15. Duplicador de tensión	50
Figura 16. Simulación (duplicado) de voltaje entre 0 y 20 ms.	51
Figura 17. Simulación (duplicado) de voltaje entre 0 y 1 s.	51
Figura 18. Carcasa y circuito impreso para el montaje del acelerómetro	52
Figura 19. Montaje del hardware en carcasa del vibrómetro	53

Figura 20. <i>Creative Sound Blaster X-Fi Surround 5.1 USB</i>	54
Figura 21. Panel frontal <i>LabVIEW</i>	56
Figura 22. Diagrama de bloques <i>LabVIEW</i>	57
Figura 23. Panel frontal “Grabación” <i>LabVIEW</i>	58
Figura 25. Forma de onda panel frontal	59
Figura 26. Diagrama de bloques forma de onda	60
Figura 27. Espectro panel frontal	61
Figura 28. Espectro diagrama de bloques	62
Figura 29. Datos panel frontal	63
Figura 30. Datos diagrama de bloques	64
Figura 31. KFC-W1012	65
Figura 32. Generador de funciones GFG-8255A	66
Figura 33. Generador de funciones TDS2024B	67
Figura 34. Amplificador de audio Alesis RA300	68
Figura 35. Señal de calibración sin conexión a tarjetas de audio	69
Figura 36. Señal de calibración conectada a tarjeta de audio Creative USB 5.1	69
Figura 37. Señal de calibración conectada a tarjeta de audio interna <i>HP Pavilion DV2135la</i>	70
Figura 38. Nivel de ruido a la salida Z del acelerómetro ADLX330	71
Figura 39. Nivel de ruido a la salida X del acelerómetro ADLX330	71
Figura 40. Nivel de ruido a la salida Y del acelerómetro ADLX330	72
Figura 41. Salida del ADXL330 aplicando una señal sinusoidal de 8 Hz	72

Figura 42. Forma de onda obtenida mediante el software del vibrómetro para 8 Hz	73
Figura 43. Valores de amplitud en voltaje y aceleración, obtenidos mediante el <i>software</i> del vibrómetro para 8 Hz	73
Figura 44. Salida del ADXL330 aplicando una señal sinusoidal de 125 Hz	74
Figura 45. Forma de onda obtenida mediante el software del vibrómetro para 125 Hz	75
Figura 46. Valores de amplitud en voltaje y aceleración, obtenidos mediante el software del vibrómetro para 125 Hz	75
Figura 47. Error relativo para frecuencia	78
Figura 48. Error relativo para voltaje	79

INTRODUCCIÓN

Un vibrómetro es un dispositivo que sirve para medir y analizar las vibraciones presentes sobre una superficie, determinando sus valores de aceleración y frecuencia en un instante de tiempo; está compuesto por dos bloques principales que son, adquisición y análisis de datos. Este dispositivo convierte la aceleración de las vibraciones en una señal eléctrica por medio de un acelerómetro, el cual dependiendo de su fabricación puede ser capacitivo, piezoeléctrico, efecto Hall, láser, entre otros.

Con el desarrollo de este dispositivo se pretende mejorar el proceso de medición de ruido generado por vibraciones, aportando un instrumento de menor costo, cuyas características técnicas permitan complementar las labores de medición y análisis en baja frecuencia, para el control de ruido activo y pasivo.

Este dispositivo también es aplicable en el campo de la salud ocupacional, al permitir medir y analizar las vibraciones presentes en el cuerpo de un trabajador, durante el desarrollo de su actividad laboral. De esta manera es posible establecer los efectos negativos en la salud, que causaría la prolongada exposición a una determinada frecuencia vibratoria, según recomendaciones de la OMS.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 ANTECEDENTES

Para la medición de vibraciones se requieren dos elementos, primero el transductor que se encarga de adquirir la señal desde la fuente vibratoria y segundo la parte que realiza el procesamiento de señal, para entregar los datos y realizar así su posterior análisis.

En el mercado se venden vibrómetros que cuentan con el transductor y analizador incluido, y en otros casos se puede encontrar el solo acelerómetro (específico para un tipo de medición especializada) y por aparte el analizador.

Los siguientes son ejemplos comerciales.

1.1.2 Vibrómetro PCE-VT 2600

Aparato de mano para medir la velocidad de vibración (*RMS*), la aceleración de vibración (*peak*) y amplitud de vibración (*peak - peak*) en máquinas e instalaciones.

Figura 1. Vibrómetro PCE-VT 2600



Fuente: PCE IBERIA. <http://www.pce-iberica.es/medidor-detalles-tecnicos/instrumento-de-vibracion/vibrometro-pce-vt-2600.htm>

Características técnicas PCE-VT 2600

El precio dado en su página web por el fabricante es de 395 EUR y sus características técnicas siguientes:

Tabla 1. Características técnicas PCE-VT 2600

Velocidad de vibración Aceleración de vibración Amplitud de vibración	0,01 ... 199,9 mm/s 0,01 ... 199,9 m/s ² 0,001 ... 1,999 mm
Resolución	0,01 mm/s; 0,01 m/s ² ; 1 µm
Precisión	±5 %
Velocidad de vibración Aceleración de vibración Amplitud de vibración	10 Hz ... 1 kHz 10 Hz ... 1 kHz 10 Hz ... 500 Hz
Indicador	Pantalla LCD de 3,5 posiciones, se muestra el último valor medición
Batería	2 baterías de botón de 1,5 V duración aprox. 5 h en uso continuo
Desconexión del aparato	Desconexión automática a los 2 minutos sin actividad para proteger la batería
Rango de temperatura operativa	0 ... 40 °C
Dimensiones	150 x 22 x 15 mm
Peso	55 g

Fuente: PCE IBERIA. <http://www.pce-iberica.es/medidor-detalles-tecnicos/instrumento-de-vibracion/vibrometro-pce-vt-2600.htm>

1.1.2 Vibrómetro 4447 de Brüel & Kjær

Este instrumento se encarga de hacer el análisis de datos, de la señal proveniente de un acelerómetro que es conectado a este. El transductor se elige dependiendo del tipo de medición que se desee realizar, entre estos se encuentran el 4524-B-00 para manos y 4515-B-002 para medición de cuerpo completo.

Figura 2. Vibrómetro 4447, acelerómetros 4524-B-00, 4515-B-002, accesorios de montaje.



Fuente: BRÜEL & KJÆR.

<http://www.bksv.es/Products/VibrationMeters/HumanVibrationAnalyzerType4447.aspx>

Características técnicas acelerómetros 4524-B-00 y 4515-B-002 para el 4447

El valor del sensor 4524-B-00 dado por el fabricante en la internet es de 761 EUR.

Tabla 2. Características técnicas 4524-B-000 y 4515-B-002

Referencia	4524-B-000	4515-B-002
Rango en Frecuencia	Medición en brazo y mano	Medición en cuerpo completo
Sensibilidad Nominal	2 Hz a 7 KHz	0.25 a 900 Hz
Ruido	<0.1 m/s ²	<0.01 m/s ²

Fuente:<http://www.bksv.es/doc/bp2147.pdf?document=%2fdoc%2fbp2147.pdf&r=http%3a%2f%2fwww.bksv.es%2fProducts%2fVibrationMeters%2fHumanVibrationAnalyzerType4447.aspx>

1.1.3 Acelerómetro triaxial 5313a de *Dytran*

Este acelerómetro sirve para medir vibraciones de cuerpo completo y cumple con la norma ISO 8041.

Figura 3. Acelerómetro triaxial 5313a de *Dytran*



Fuente: <http://www.dytran.com/go.cfm/en-us/content/product/435/TRIAXIALSEATACCELEROMETER-5313A/x?SID=>

Características técnicas acelerómetro 5313a

El precio dado por el distribuidor *Superlogisc* en su portal de internet es de 1365 USD.

Tabla 3. Las características técnicas acelerómetro 5313a

Rangos de frecuencia	0,5-3000 Hz
Frecuencia de Resonancia	25 KHz
Impedancia de salida	100 ohm
Voltaje de operación	18-20 Voltios

Fuente: <http://www.dytran.com/img/products/5313A.pdf>

1.1.4 Tarjeta de adquisición de datos para el análisis vibratorio de maquina rotativa

Este trabajo de grado fue desarrollado por los estudiantes de ingeniería electrónica de la Universidad de San Buenaventura sede Bogotá, Oscar Humberto Chacón y Cesar Alexander León en el año 2000. En este trabajo se realizó una tarjeta de adquisición de datos, para medir vibraciones en motores eléctricos usando el acelerómetro 1210-L200 de *Silicon Desings*, el cual posee un ancho de banda de 2.5 Khz y proporciona dos salidas análogas para la aceleración. La conversión analógica a digital se realizó con el conversor ADC12451 de *National Instrumets*.

El software de análisis fue implementado en *Matlab*, donde se recibía la información en forma digital a través del puerto paralelo de un PC, para hacer su posterior análisis en frecuencia y tiempo.

Una limitante del proyecto fue la imposibilidad de realizar análisis en tiempo real, debido a que la información debía ser previamente guardada, en el software implementado.

La eficiencia de comunicación entre la tarjeta de adquisición de datos y el PC, fue del 99.96 %, arrojando un margen de error de 0.04 %.

1.2 DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Cuando el cuerpo humano es expuesto a vibraciones de baja frecuencia aparecen sensaciones que causan molestia e incomodidad, algunas incluso pueden llegar a afectar en un alto grado la salud de la persona que está expuesta a este fenómeno; entre las dificultades más notorias se encuentran: dolor de cabeza, fatiga visual, mareo, dolor abdominal, lumbalgias, entre otros.

Los vibrómetros comerciales usados para determinar la frecuencia de vibración de algún elemento en los ejes x, y, z, son instrumentos muy costosos y la vez necesarios para diversas aplicaciones, en el campo de la salud ocupacional y control de ruido en baja frecuencia.

¿Cómo construir un vibrómetro de menor costo y características similares a los comerciales?

1.3 JUSTIFICACIÓN

Aprovechando los acelerómetros que se encuentran en el mercado, como es el caso del ADXL330, es posible diseñar un vibrómetro, que permita hacer mediciones en los ejes X, Y, Z, determinando las frecuencias de vibración de elementos y personas que los manipulan.

Si se construye un vibrómetro dentro de la Universidad de San Buenaventura, habrá una solución para determinar la frecuencia de las vibraciones presentes en lugares como el hangar, en donde se encuentran múltiples fuentes vibratorias que pueden afectar la salud de operarios, estudiantes, docentes y en general a la comunidad universitaria.

Con el desarrollo de este dispositivo se tendrá un instrumento que podrá ser usado en todas las áreas de la línea de acústica, para la medición de ruido generado por vibraciones, permitiéndole a estudiantes y docentes complementar las labores de medición y análisis en baja frecuencia, en el control de ruido activo y pasivo.

Para la construcción de este dispositivo electrónico se incursiona en áreas como las ciencias básicas, electrónica y procesamiento de señales, con lo que el vibrómetro es muy viable para estudiantes, profesores y aquellas personas que requieren de este tipo de elementos para determinar frecuencias de vibración.

1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1 Objetivo General

Diseñar un vibrómetro que permita determinar las frecuencias a las que vibra cualquier elemento en los ejes X, Y, Z, con un ancho de banda de 0.5Hz - 500Hz.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Diseñar y construir el circuito de acople y acondicionamiento de señal para el transductor.
- Analizar los datos obtenidos por el transductor para obtener frecuencia y aceleración de la señal capturada.
- Obtener un archivo de audio digital con las señales provenientes del transductor.
- Visualizar gráfica y numéricamente en PC los resultados obtenidos con el dispositivo.

1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES DEL PROYECTO

1.5.1 Alcances

Con el dispositivo construido se tendrá un vibrómetro capaz de medir, analizar y procesar valores de aceleración y frecuencia, con el fin de implementarlo en lugares donde debido a las condiciones de trabajo, las personas ven afectada su salud por la exposición continua a vibraciones.

Se podrá medir en frecuencias entre 0.5 y 500 Hz con aceleraciones no mayores a 3.0 G.

Este dispositivo podrá ser aplicado en la medición y análisis de vibraciones, para el control de ruido activo y pasivo, al poder determinar la aceleración en muy bajas frecuencias que difícilmente pueden ser medidas con sonómetros convencionales.

1.5.2 Limitaciones

Las limitaciones serán determinadas por las características técnicas de los elementos electrónicos usados principalmente por el acelerómetro. Debido a que los que cumplen con la norma ISO-8041 son muy costosos se deberá usar el ADXL330 el cual se encuentra a un precio razonable, cumple con los requerimientos del proyecto y se acerca a las especificaciones de la norma internacional.

La mayor aceleración a medir será +/- 3.0G

La respuesta en baja frecuencia de la tarjeta de sonido, determinará la mínima frecuencia medible y la precisión de las mediciones realizadas.

La movilidad del dispositivo será limitada debido a que se requiere un PC para análisis, procesamiento y presentación de resultados.

2. METODOLOGÍA

2.1 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

Para obtener los valores eléctricos se hará uso de instrumentos de medición, tanto análogos como digitales, con los cuales se obtendrán directamente las mediciones de frecuencia, corriente, voltaje y potencia eléctrica. Todas estas mediciones servirán para obtener las características técnicas del dispositivo.

La visualización y análisis de datos de la información recibida desde el acelerómetro, será realizada con el *software LabVIEW* (versión 8.6 licencia Universidad de San Buenaventura) de la empresa *National Instruments*. En este, se desarrollará un programa que le permita al usuario, además de ver en tiempo real la forma de onda y espectro de la fuente vibratoria, hacer la grabación de esta señal en formato de audio WAV.

Para el diseño y simulación del circuito electrónico, se usará el *software ORCAD* de la empresa *Cadence* (Versión Demo). Este permitirá ver el comportamiento del circuito de acople y acondicionamiento de señal para el sensor.

El diseño del circuito impreso, será diseñado mediante el *software Eagle*, de *Cadsoft* (versión *Freeware* 5.6.0).

2.2 POBLACIÓN Y MUESTRA

La población serán todos los datos eléctricos obtenidos con las simulaciones y las mediciones prácticas hechas con los respectivos instrumentos; de allí se tomará una muestra que contendrá los valores que permitan determinar las características técnicas del dispositivo elaborado, como voltajes de operación, ancho de banda efectivo, corrientes, aceleraciones, entre otros.

2.3 HIPÓTESIS

Construyendo un vibrómetro que se acerque a las especificaciones que exige la norma ISO 8041, será muy factible medir frecuencias de vibración a un bajo costo, gracias al acelerómetro ADXL330 a usar, el cual captura datos en los ejes X, Y y Z, sin necesidad de hacer uso de tres sensores diferentes para cada eje, en el ancho de banda requerido para la medición en baja frecuencia.

2.4 VARIABLES

2.4.1 Variables Independientes

Ruido electromagnético y acústico: Existe la posibilidad de que señales acústicas o electromagnéticas no deseadas, afecten el resultado de las mediciones aportadas por el acelerómetro.

La sensibilidad del acelerómetro: El valor de la sensibilidad del sensor, depende las condiciones medioambientales del entorno, donde se realice la medición.

2.4.2 Variables Dependientes

Aceleraciones mayores a 3 g: Aceleraciones mayores a esta magnitud, provocan una respuesta no confiable del sistema por las características técnicas del acelerómetro.

Calibración del dispositivo: Si el dispositivo no está calibrado, a pesar de dar la información en frecuencia correcta, el valor en amplitud será erróneo.

Montaje del dispositivo: Si el dispositivo no está adecuadamente montado y sujeto sobre la superficie a medir, se producirán mediciones erróneas.

3. LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DE LA UNIVERSIDAD / LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DE LA FACULTAD / NÚCLEOS PROBLÉMICOS

3.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN

El enfoque de la investigación es este trabajo de grado será empírico analítico, ya que se hará uso del conocimiento adquirido en ciencias básicas, electrónica e ingeniería de sonido, para dar solución al problema planteado.

En este proyecto se busca implementar un vibrómetro con acelerómetro triaxial capacitivo fiable y práctico. Cuando se finalice este proyecto se habrá dado una solución ingenieril práctica, aplicable al campo control de ruido por vibraciones y disminución del impacto en estaciones de trabajo, que se ajusta al núcleo problémico análisis y procesamiento de señales, en la línea de investigación de la facultad análisis y procesamiento de señales, en la línea de investigación de la universidad, tecnologías actuales y sociedad.

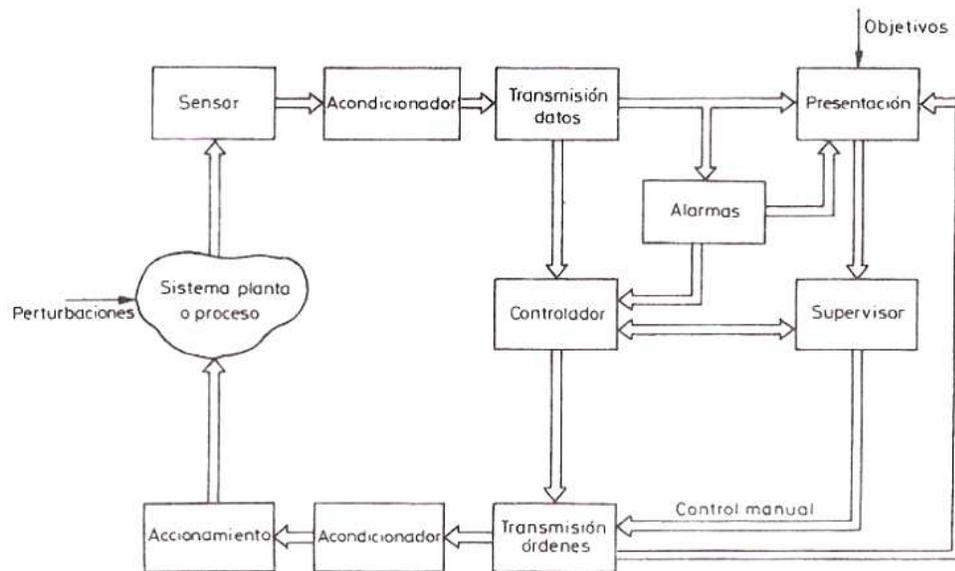
4. MARCO TEÓRICO – CONCEPTUAL

4.1.1 Sistemas de medida

Se denomina sistema a la combinación de dos o más elementos, subconjuntos y partes necesarias para realizar una o varias funciones. En los sistemas de medida, esta función es la asignación objetiva y empírica de un número a una propiedad o cualidad de un objeto o evento, de tal forma que la describa. Es decir, el resultado de la medida debe ser: independiente del observador (objetiva), basada en la experimentación (empírica), y de tal forma que exista una correspondencia entre las relaciones numéricas y las relaciones entre las propiedades descritas.

En la figura 4 se describe la estructura general de un sistema de medida y control. En un sentido amplio, la realización de una medida implica, pues, además de la adquisición de la información, realizada por un elemento sensor o transductor, también el procesamiento de dicha información y la presentación de resultados, de forma que puedan ser percibidos por nuestros sentidos. Cualquiera de estas funciones puede ser local o remota, implicando ello, en este segundo caso, la necesidad de transmitir la información.¹

Figura 4. Estructura general de un sistema de medida y control.



Fuente: PALLÁS ARENY, Ramón. Sensores y acondicionamiento de señal. Barcelona: Marcombo, 2007. 2 p.

¹ PALLÁS ARENY, Ramón. Sensores y acondicionadores de señal. Barcelona: Marcombo, 2007. 1 p.

4.1.2 Transductores y sensores

Se denomina transductor, en general, a todo dispositivo que convierte una señal de una forma física en una señal correspondiente pero de otra forma física distinta. Es, por tanto, un dispositivo que convierte un tipo de energía en otro. Esto significa que la señal de entrada es siempre una energía o potencia, pero al medir, una de las componentes de la señal suele ser tan pequeña que puede despreciarse, y se interpreta que se mide sólo la otra componente.

Al medir una fuerza, por ejemplo, se supone que el desplazamiento del transductor es despreciable, es decir, que no se carga al sistema, ya que de lo contrario podría suceder que éste fuera incapaz de aportar la energía necesaria para el desplazamiento. Pero en la transducción siempre se extrae una cierta energía del sistema donde se mide, por lo que es importante garantizar que esto no lo perturba.

Un sensor es un dispositivo que, a partir de la energía del medio donde se mide, da una señal de salida transducible que es función de la variable medida.

Sensor y transductor se emplean a veces como sinónimos, pero sensor sugiere un significado más extenso: la ampliación de los sentidos para adquirir un conocimiento de cantidades físicas que, por su naturaleza o tamaño, no pueden ser percibidas directamente por los sentidos. Transductor, en cambio, sugiere que la señal de entrada y la de salida no deben ser homogéneas. Para el caso en que lo fueran se propuso el término modificador, pero no ha encontrado aceptación.

La distinción entre transductor de entrada (señal física/señal eléctrica) y transductor de salida (señal eléctrica/presentación) está prácticamente en desuso. La tendencia actual, particularmente en robótica, es emplear el término sensor (o captador en bibliografía francesa) para designar el transductor de entrada, y el término actuador o accionamiento para designar el transductor de salida. Los primeros pretenden la obtención de información, mientras que los segundos buscan la conversión de energía.²

4.1.3 Acondicionamiento y presentación

Los acondicionadores de señal, adaptadores o amplificadores, en sentido amplio, son los elementos del sistema de medida que ofrecen, a partir de la señal de salida de un sensor electrónico, una señal apta para ser presentada o registrada o que simplemente permita un procesamiento posterior mediante un equipo o instrumento estándar. Consisten normalmente en circuitos electrónicos que ofrecen, entre otras funciones, las siguientes: amplificación, filtrado, adaptación de impedancias y modulación o demodulación.

² PALLÁS ARENY, Ramón. Sensores y acondicionadores de señal. Barcelona: Marcombo, 2007. 3 p.

Si se considera, por ejemplo, el caso en que una de las etapas de tratamiento de la señal de medida es digital, si la salida del sensor es analógica, que es lo más frecuente, hará falta un convertidor A/D. Éstos tienen una impedancia de entrada limitada, exigen que la señal aplicada sea continua o de frecuencia de variación lenta, y que su amplitud esté entre unos límites determinados, que no suelen exceder de 10 V. Todas estas exigencias obligan a interponer un acondicionador de señal entre el sensor, que muchas veces ofrece señales de apenas unos milivoltios, y el convertidor A/D.

La presentación de los resultados puede ser de forma analógica (óptica, acústica o táctil) o numérica (óptica). El registro puede ser magnético o sobre papel, e incluso electrónico (memorias eléctricas), y exige siempre que la información de entrada esté en forma eléctrica.³

4.1.4 Tipos de sensores

El número de sensores disponibles para las distintas magnitudes físicas es tan elevado que no se puede proceder racionalmente a su estudio sin clasificarlos previamente de acuerdo con algún criterio.

Según el aporte de energía, los sensores se pueden dividir en moduladores y generadores. En los sensores moduladores o activos, la energía de la señal de salida procede, en su mayor parte, de una fuente de energía auxiliar. La entrada sólo controla la salida. En los sensores generadores o pasivos, en cambio, la energía de salida es suministrada por la entrada.

Según la señal de salida, los sensores se clasifican en analógicos o digitales. En los analógicos la salida varía a nivel macroscópico de forma continua y la información está en la amplitud. En los sensores digitales la salida varía en forma de saltos o pasos discretos; no requieren conversión A/D y la transmisión de su salida es más fácil, tienen también mayor fidelidad y mayor fiabilidad, y muchas veces mayor exactitud pero lamentablemente no hay modelos digitales para muchas de las magnitudes físicas de mayor interés.⁴

En la tabla 4 se recogen todos estos criterios de clasificación y se dan ejemplos de sensores de cada clase. Cualquiera de estas clasificaciones es exhaustiva, y cada una tiene interés particular para diferentes situaciones de medida. Ahora bien, para el estudio de un gran número de sensores se suele acudir a su clasificación de acuerdo con la magnitud medida. Se habla en consecuencia de sensores de temperatura, presión, caudal,

³ PALLÁS ARENY, Ramón. Sensores y acondicionadores de señal. Barcelona: Marcombo, 2007. 4 p.

⁴ Ibídem. 6 p.

humedad, posición, velocidad, aceleración, fuerza, par, etc. Sin embargo, esta clasificación difícilmente puede ser exhaustiva ya que la cantidad de magnitudes que se pueden medir es prácticamente inagotable.⁵

Tabla 4. Clasificación de los sensores

Criterio	Clases	Ejemplos
Aporte de energía	Moduladores Generadores	Termistor Termopar
Señal de salida	Analógicos Digitales	Potenciómetro Codificador de posición
Modo de operación	De deflexión De comparación	Acelerómetro de deflexión Servo acelerómetro

Fuente: Pallás Areny, Ramón. Sensores y acondicionadores de señal. Barcelona: Marcombo, 2007. 7 p.

4.1.5 Micromecanizado

El micromecanizado es un conjunto de procesos para producir componentes micromecánicos tridimensionales. Se trata de procesos similares a los empleados para fabricar circuitos integrados, por ejemplo técnicas fotolitográficas para transferir la trama de una máscara a la superficie de una oblea. Después se elimina el material (Si, AsGa o cuarzo) en las zonas y direcciones de interés mediante ataque selectivo de dicha superficie (en las zonas no protegidas por la máscara). Las micra estructuras obtenidas son planares, y se interconectan varias capas para definir microestructuras tridimensionales.

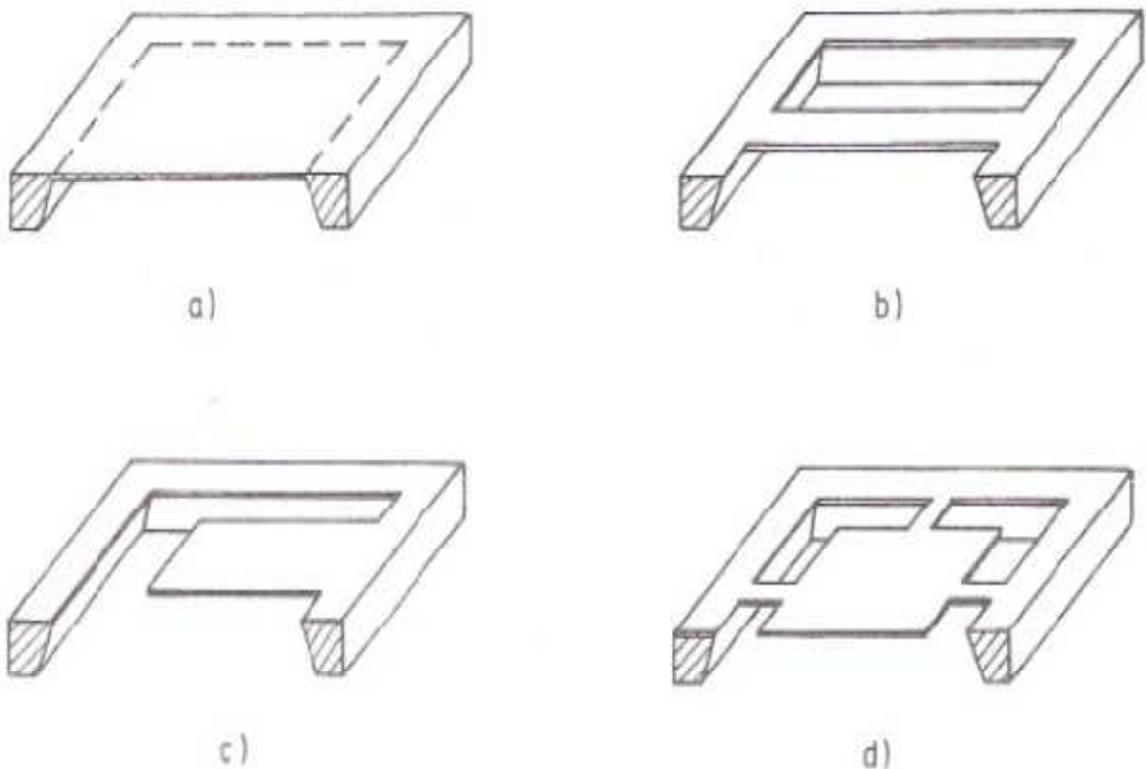
Hay dos procesos básicos para eliminar selectivamente el material en microsensores: ataque químico anisótropo (húmedo) y ataque por plasma (seco). La velocidad del ataque químico depende de la orientación cristalográfica, del reactivo y del material semiconductor de partida. Para el silicio, por ejemplo, el tipo n es atacado con una velocidad más de 50 veces mayor que el silicio tipo p , y por esto se suele partir de silicio tipo n . El cuarzo, en cambio, es prácticamente inatacable en todos los planos paralelos al

⁵ Pallás Areny, Ramón. Sensores y acondicionadores de señal. Barcelona: Marcombo, 2007. 7 p.

eje z, y esto permite definir flancos muy abruptos en las direcciones perpendiculares a dicho eje (corte z).

El ataque en seco usa un plasma en vez de un líquido. El material se elimina isotrópicamente, con independencia de la orientación cristalográfica del sustrato. Pero el equipamiento necesario es más caro. El método más satisfactorio es el *RIE (Reactive Ion Etching)*. En éste se deposita el sustrato en un electrodo que se mantiene a una diferencia de potencial (de radiofrecuencia) de cientos de voltios respecto a un plasma (CF_4 , CF_3Cl , C_2F_6) que se aspira hacia la cámara donde está el electrodo. Esto acelera los iones positivos del plasma hacia el sustrato, y este bombardeo iónico, en dirección casi perpendicular, lo va erosionando.⁶

Figura 5: Microestructuras obtenidas por micromecanizado. a) Diafragma. b) Puente. c) Voladizo. d) Membrana flotante.



Fuente: PALLÁS ARENY, Ramón. Sensores y acondicionadores de señal. Barcelona: Marcombo, 2007. 51 p.

⁶ PALLÁS ARENY, Ramón. Sensores y acondicionadores de señal. Barcelona: Marcombo, 1994. 1 p.

4.1.6 Posición, velocidad, rapidez y aceleración

El movimiento de una partícula se conoce por completo, si la posición de la partícula en el espacio se conoce en todo momento. La posición de una partícula, es el lugar de la partícula con respecto a un punto de referencia escogido, que podemos considerar como el origen de un sistema de coordenadas.

El desplazamiento de una partícula se define, como su cambio en posición en algún intervalo de tiempo. Cuando se mueve de una posición inicial x_i a una posición final x_f , el desplazamiento de la partícula está dado por $x_f - x_i$. Por lo tanto

$$\Delta x \equiv x_f - x_i$$

Dónde Δ denota un cambio de cantidad.⁷

Es importante reconocer la diferencia entre desplazamiento y distancia recorrida. Distancia es la longitud de una trayectoria seguida por una partícula.

La velocidad promedio V_x de una partícula se define como el desplazamiento de la partícula, Δx , dividido entre el intervalo, Δt , durante el cual ocurre ese desplazamiento:

$$V_x \equiv \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

La rapidez promedio de una partícula, una cantidad escalar, se define como la distancia total recorrida dividida entre el intervalo total necesario para recorrer esa distancia:

$$\text{Rapidez promedio} = \frac{\text{distancia total}}{\text{tiempo total}}$$

La unidad del SI de la rapidez promedio es igual que la unidad de la velocidad promedio: metros por segundo. Sin embargo, a diferencia de la velocidad promedio, la rapidez promedio no tiene dirección y por lo tanto no lleva signo algebraico.⁸

Cuando la velocidad de de una partícula cambia con el tiempo, se dice que la partícula está acelerando. Por ejemplo, la magnitud de la velocidad de un auto aumenta cuando se pisa el acelerador y disminuye cuando se aplican los frenos.⁹

⁷ SERWAY, Raimond A. Física para ciencias e ingenierías. Sexta edición. México: Thomson, 2005. 25 p.

⁸ IBÍDEM. 27 p.

⁹ IBÍDEM. 31 p.

La aceleración promedio ax de una partícula, se define como el cambio en velocidad Δv_x dividido entre el intervalo Δt durante el cual ocurre ese cambio:

$$ax \equiv \frac{\Delta v_x}{\Delta t} = \frac{v_{xf} - v_{xi}}{t_f - t_i}$$

4.1.7 Objetos en caída libre

Es bien conocido que, en ausencia de la resistencia del aire, todos los objetos que se dejen caer cerca de la superficie de nuestro planeta caen hacia este con la misma aceleración constante bajo la influencia de la gravedad de la tierra.

Un objeto en caída libre es aquel que se mueve libremente bajo la influencia sólo de la gravedad, cualquiera que sea su movimiento inicial. Los objetos lanzados hacia arriba o hacia abajo, así como los que son soltados desde el reposo, caen todos libremente una vez que sean soltados. Cualquier objeto en caída libre experimenta una aceleración dirigida hacia abajo, independientemente de su movimiento inicial.

La magnitud de la aceleración en caída libre se denotará por el símbolo g . El valor de g cerca de la superficie terrestre decrece si la altitud decrece. Además, se presentan ligeras variaciones en g con cambios en latitud. En la superficie de la Tierra, el valor de g es aproximadamente 9.80 m/s^2 .¹⁰

4.1.8 Leyes de Newton

La primera ley de Newton del movimiento, a veces llamada ley de inercia, define un conjunto especial de marcos de referencia llamados marcos inerciales (el cuerpo tiene aceleración cero). Desde un punto de vista más práctico, la primera ley de Newton se puede plantear de la siguiente manera: En ausencia de fuerzas externas, cuando se vea desde un marco de referencia inercial, un cuerpo en reposo permanece en reposo y un cuerpo en movimiento continua en movimiento con una velocidad constante (esto es, con una rapidez constante en línea recta).

En la segunda ley de Newton, cuando se ve desde un marco de referencia inercial, la aceleración de un objeto es directamente proporcional a la fuerza neta que actúa sobre él, e inversamente proporcional a su masa.¹¹

¹⁰ SERWAY, Raimond A. Física para ciencias e ingenierías. Sexta edición. México: Thomson, 2005. 41 p.

¹¹ IBÍDEM. 117 p.

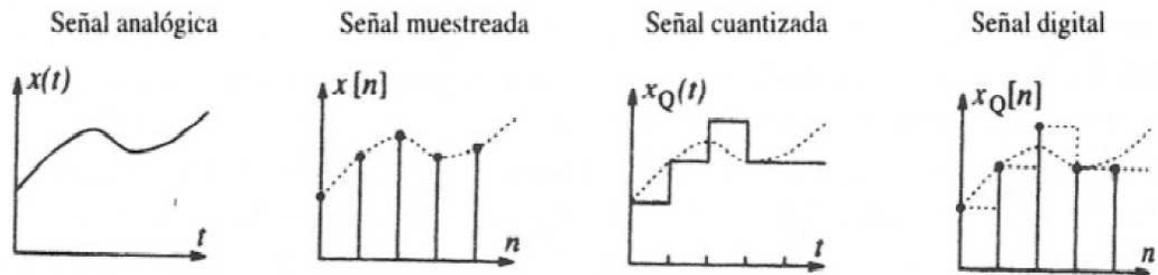
$$\sum F = m * a$$

4.1.9 Señales

Nuestro mundo está lleno de señales, tanto naturales como las que produce el hombre. Algunos ejemplos son la variación en la presión del aire cuando hablamos, los ascensos y descensos diarios de la temperatura y las señales eléctricas periódicas que genera el corazón. Las señales representan información. A menudo, las señales no llevan directamente la información necesaria y es posible que no estén libres de perturbaciones. Es en este contexto que el procesamiento de señales forma la base para resaltar, extraer, almacenar o transmitir información útil. Las señales eléctricas quizás ofrecen el ámbito más amplio para tales manipulaciones. De hecho, es común convertir las señales en forma eléctrica para su procesamiento.

El valor de una señal, en cualquier instante, corresponde a su amplitud (instantánea). El tiempo puede asumir un continuo de valores, t , o valores discretos, nt_s , donde t_s es un intervalo muestreado y n es un entero. La amplitud también puede tomar valores continuos o estar cuantizada en un número finito de niveles discretos entre sus extremos. Esto resulta en cuatro tipos posibles de señales, como se muestra en la figura 6.

Figura 6. Señales analógica, muestreada, cuantizada y digital



Fuente: AMBARDAR, Ashok, Procesamiento de Señales analógicas y digitales. Segunda edición. México: Thomson, 2002. 1 p.

La música que usted escucha de un reproductor de discos compactos (CD), debido a cambios en la presión del aire causados por la vibración en el diafragma del altavoz, es una señal analógica porque la variación de la presión es una función continua del tiempo. Sin embargo, la información almacenada en el disco compacto está en forma digital. Ésta debe procesarse y convertirse en una forma analógica antes de que pueda escucharse la música. Un registro del aumento anual de la población mundial describe tiempo medido en incrementos de uno (año), y el aumento poblacional se mide en incrementos de uno

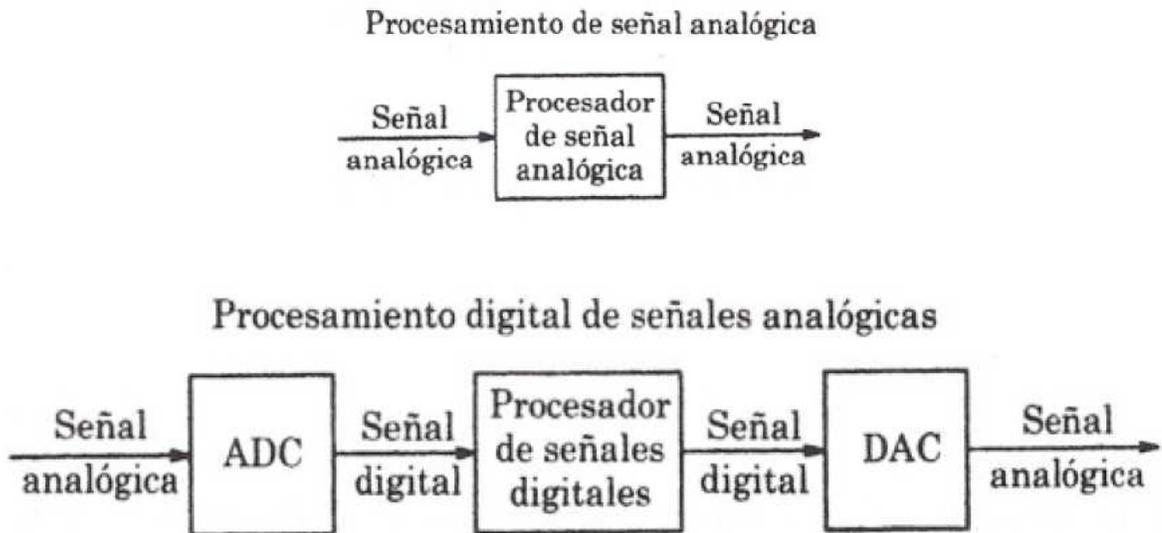
(persona). Esto es una señal digital con valores discretos tanto para el tiempo como para la población.¹²

4.1.10 Procesamiento de señales

Las señales analógicas han sido tema de mucho estudio en el pasado. En décadas recientes, las señales digitales han recibido una atención cada vez más amplia. Puesto que son números, pueden procesarse por medio de los mismos circuitos lógicos utilizados en computadores digitales.

Dos esquemas conceptuales para el procesamiento de señales se ilustran en la figura 7. El procesamiento digital de señales analógicas necesita que usemos un convertidor analógico a digital (*ADC*) para muestrear la señal analógica antes del procesamiento y un convertidor digital a analógico (*DAC*) para convertir la señal digital procesada de nuevo a la forma analógica.¹³

Figura 7. Procesamiento de señales analógicas y digitales



Fuente: AMBARDAR, Ashok, *Procesamiento de Señales analógicas y digitales*. Segunda edición. México: Thomson, 2002. 1 p.

¹² AMBARDAR, Ashok, *Procesamiento de Señales analógicas y digitales*. Segunda edición. México: Thomson, 2002. 1 p.

¹³ IBÍDEM. 2 p.

Pocas tecnologías han revolucionado el mundo tan profundamente como las basadas en el procesamiento de señales digitales. Por ejemplo, la tecnología de música grabada fue, hasta hace poco, completamente analógica de principio a fin, y la fuente comercial más importante de música grabada solía ser el disco *LP* (larga duración). La llegada del disco compacto digital ha cambiado todo en sólo unos cuantos años y ha hecho al disco de larga duración prácticamente obsoleto. El procesamiento de señales, tanto analógicas como digitales, forma el corazón de esta aplicación y de muchas otras.¹⁴

4.1.11 Muestreo y cuantización

El muestreo de señales analógicas es muchas veces un asunto de necesidad práctica. Constituye también el primer paso en el procesamiento de señales digitales (DSP). Para procesar una señal analógica por medios digitales, debemos convertirla en una señal digital en dos pasos. Primero, debemos muestrearla, por lo común en intervalos uniformes t_s . La cantidad discreta nt_s se relaciona con el índice entero n . Luego, debemos cuantizar los valores de la muestra (amplitudes). Tanto el muestreo como la cuantización conducen a una pérdida potencial de información. La buena noticia es que la señal puede muestrearse sin pérdida de información si es de banda limitada a una frecuencia más alta f_B y muestreada a intervalos menores que $\frac{1}{2f_B}$. Éste es el célebre teorema de muestreo. La mala noticia es que la mayoría de las señales no son de banda limitada e incluso un intervalo de muestreo pequeño tal vez no sea lo suficiente pequeño. Si el intervalo de muestreo supera el valor crítico $\frac{1}{2f_B}$, un fenómeno conocido como alias se manifiesta por sí solo. Componentes de la señal analógica a altas frecuencias aparecen (por el alias) a bajas frecuencias en la señal muestreada. Esto resulta en una señal muestreada con una menor frecuencia máxima. Los efectos de alias son imposibles de suprimir una vez que se adquieren las muestras. Por ello es común limitar la banda de la señal antes del muestreo (empleando filtros pasa-bajas).

El procesamiento numérico mediante computadoras digitales requiere datos finitos con precisión finita. Debemos limitar las amplitudes de la señal a un número finito de niveles. Este proceso, denominado cuantización, produce efectos no lineales que pueden describirse sólo en términos estadísticos. La cuantización conduce asimismo a una pérdida irreversible de información y se considera casi siempre solo en la etapa final en cualquier diseño. Por tanto, los términos tiempo discreto (*DT*), muestreo y digital se usan a menudo como sinónimos.¹⁵

¹⁴ AMBARDAR, Ashok, Procesamiento de Señales analógicas y digitales. Segunda edición. México: Thomson, 2002. 2 p.

¹⁵ IBÍDEM. 2 p.

4.1.12 Sistemas

Los sistemas pueden procesar señales analógicas o digitales. Todos los sistemas cumplen con la conservación de la energía. Hablando vagamente, el estado de un sistema se refiere a variables, como voltajes en el capacitor y corrientes por el inductor, las cuales producen una medida de la energía del sistema. El estado inicial está descrito por el valor inicial de estas variables o condiciones iniciales. Un sistema está relajado si las condiciones iniciales son cero. En los sistemas lineales la relación entrada-salida, es una línea recta que pasa por el origen. Si una entrada complicada puede dividirse en formas más simples, la linealidad nos permite encontrar la respuesta como la suma de la respuesta para cada una de las formas más simples. Esto es superposición. Muchos sistemas son en realidad no lineales. El estudio de sistemas no lineales implica a menudo hacer suposiciones de simplificación, como la linealidad.¹⁶

Un enfoque útil para el análisis de sistemas se basa en transformaciones, las cuales mapean las señales y sistemas en un dominio transformado tal como el dominio de la frecuencia. Esto origina operaciones matemáticas más simples para evaluar el comportamiento del sistema. Puesto que la respuesta se evalúa en el dominio transformado, debemos tener los medios para remapear esta respuesta para el dominio del tiempo a través de una transformación inversa. Los ejemplos de este método incluyen el análisis de fasores (para senoides y señales periódicas), transformadas de Fourier y transformadas de Laplace. El análisis fasorial sólo nos permite encontrar la respuesta de estado estacionario o estable de sistemas relajados a señales periódicas. La transformada de Fourier, por otra parte, posibilita analizar sistemas relajados con entradas arbitrarias. La transformada de Laplace emplea una frecuencia compleja para extender el análisis tanto a una clase más grande de entradas, como a sistemas con condiciones iniciales diferentes de cero. Los distintos métodos del análisis de sistemas permiten perspectivas diferentes acerca tanto del sistema como de los resultados del análisis. Algunos son más adecuados para el dominio del tiempo, otros ofrecen una perspectiva en el dominio de la frecuencia, e incluso otros son más sencillos en la computación numérica.¹⁷

4.1.13 Transformada discreta de Fourier

El análisis en frecuencia de señales en tiempo discreto se realiza, normalmente de forma más conveniente en procesadores de señales digitales, que pueden ser ordenadores digitales multipropósito o hardware digital especialmente diseñado. Para realizar el análisis en frecuencia de una señal en tiempo discreto $\{x(n)\}$, se convierte la secuencia en

¹⁶ AMBARDAR, Ashok, Procesamiento de Señales analógicas y digitales. Segunda edición. México: Thomson, 2002. 3 p.

¹⁷ IBÍDEM. 7 p.

el dominio del tiempo en una forma equivalente en el dominio de la frecuencia. Esta forma viene dada por la transformada de Fourier, $X(\omega)$, de la secuencia $\{x(n)\}$. Sin embargo, $X(\omega)$ es una función continua de la frecuencia y, por lo tanto no es una forma computacionalmente conveniente de la secuencia $\{x(n)\}$, se expresa de la siguiente manera:¹⁸

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

4.1.14 Transformada Rápida de Fourier *FFT*

La transformada discreta de Fourier (*DFT*), juega un papel muy importante en numerosas aplicaciones del procesamiento digital de señales, incluyendo el filtrado lineal, el análisis de la correlación y el análisis espectral. Una de las razones fundamentales de su importancia radica en la existencia de algoritmos eficientes para el cálculo de la *DFT*. En particular, la *FFT* es un algoritmo computacional usado para calcular la *DFT* cuando el tamaño N de ésta es una potencia de dos o de cuatro.¹⁹

4.1.15 Filtros

El término filtro se emplea a menudo para denotar sistemas que procesan la entrada de una manera específica, suprimiendo ciertas frecuencias, por ejemplo. En la práctica, ningún proceso de medición es perfecto o libre de perturbaciones o ruido. En un sentido amplio, una señal puede verse como algo que es deseable, y el ruido puede considerarse como una característica indeseable que tiende a degradar la señal. En este contexto, el filtrado describe una operación de procesamiento de señales que permite la intensificación de las mismas, reducción de ruido, o una relación señal a ruido incrementada. Los sistemas para el procesamiento de señales de tiempo discretas se llaman filtros digitales. Los filtros analógicos se emplean tanto en el procesamiento de señales analógicas como en la limitación de banda de la entrada a procesadores de señales digitales. La utilización de los filtros digitales se presenta en tareas tales como interpolación, extrapolación, alisado y predicción. El procesamiento de señales digitales continúa desempeñando un papel cada vez de mayor importancia en campos que van literalmente de la A (astronomía) a la Z (zeugmatografía, u obtención de imágenes por resonancia magnética) y abarca aplicaciones como reproductores de discos compactos,

¹⁸ PROAKIS, John G. Tratamiento digital de señales. Tercera edición. Madrid: Prentice hall, 1998. 401 p.

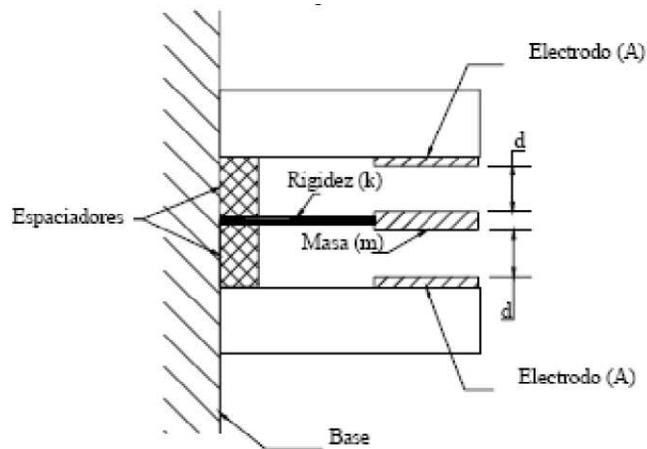
¹⁹ IBÍDEM. 457 p.

reconocimiento de voz, cancelación de eco en sistemas de comunicación, intensificación de imágenes, exploración geofísica y obtención no invasiva de imágenes médicas.²⁰

4.1.16 Acelerómetro capacitivo

En los sensores más simples, los acelerómetros capacitivos operan con una técnica donde la capacitancia del elemento sensor interno cambia en proporción a la aceleración aplicada. Esto se ejemplifica con la representación mostrada en la Figura 8.

Figura 8. Acelerómetro capacitivo



Fuente: MAGGIOLO, Gustavo Daniel, Detector Sísmico con acelerómetro X,Y,Z MMA7260Q. UTN. Argentina, 2007. 2P.

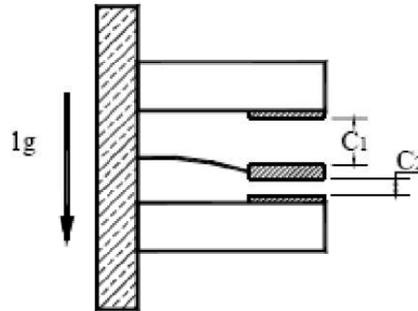
En la figura 8 se representa el sensor, que consiste en dos placas conductoras paralelas tipo electrodo, con área de exposición (A) y una masa (m) suspendida por medio de un elemento con rigidez (k). Entre la masa y los electrodos existe una distancia base (d) simétrica, que se controla con precisión, por lo que el aire que existe en el hueco entre cada electrodo y la masa sísmica forma un “capacitor mecánicamente variable”.

Cuando el elemento es acelerado, como se muestra en la Figura 9, de acuerdo con la Segunda Ley de Newton, se presenta una fuerza inercial (F), proporcional a la aceleración que sufre la masa (m):

$$\sum F = m * a$$

²⁰ AMBARDAR, Ashok, Procesamiento de Señales analógicas y digitales. Segunda edición. México: Thomson, 2002. 28 p.

Figura 9: Acelerómetro capacitivo



Fuente: MAGGIOLO, Gustavo Daniel, Detector Sísmico con acelerómetro XYZ MMA7260Q. UTN. Argentina, 2007. 3P.

Esta fuerza produce que la masa se mueva cierta distancia (x) cercana y lejana, respectivamente al electrodo inferior y al electrodo superior. Puesto que el elemento de soporte tiene una rigidez (k), la distancia de separación se expresa como:

$$x = F / k \quad (3-2)$$

El cambio en la distancia corresponde a los cambios en la capacitancia (C):

$$C1 = (A\epsilon)/(d + x)$$

$$C2 = (A\epsilon)/(d - x)$$

Donde:

A: área del electrodo

ϵ : Permisividad del aire (constante dieléctrica)

d: distancia entre la masa y el electrodo en la condición de $0g$

x: desplazamiento de la masa

Estos acelerómetros incorporan circuitos micro eléctrico que usan puentes capacitivos para convertir el cambio de capacitancia a una señal de voltaje útil.²¹

²¹ MAGGIOLO, Gustavo Daniel, Detector Sísmico con acelerómetro XYZ MMA7260Q. UTN. Argentina, 2007. 3P.

4.2 MARCO LEGAL O NORMATIVO

Para desarrollar un dispositivo con el cual se puedan realizar mediciones oficiales, el vibrómetro y en especial el sensor usado, debe ajustarse a las especificaciones técnicas que exige la Norma ISO 8041 (*Human response to vibration- measuring instrumentation*). En la tabla 5 se realiza un paralelo describiendo las especificaciones técnicas principales del sensor que exige la norma internacional, con las propias del acelerómetro ADXL330.

La norma ISO 8041 presenta las características técnicas requeridas para realizar mediciones en mano, brazo y en el cuerpo entero dentro de vehículos y construcciones. Las presentadas a continuación hacen referencia a la medición de vibraciones en el cuerpo entero dentro de vehículos, en donde no se cumple con la Norma, únicamente en el rango de transducción de aceleración g.

Tabla 5: Comparación ISO 8041 y ADXL330

CARACTERÍSTICA TÉCNICA	ADXL330	ISO 8041
Máxima transducción de vibración	3 g	50 g
Rango de temperatura	-25 a 70 °C	-10 a 50 °C
Sensibilidad transversal	±1 %	<5 %
Mínima frecuencia de resonancia	5500 Hz	800 Hz
Sensor	Triaxial	Triaxial

Fuente: Datos técnicos ADXL330 y norma ISO 8041

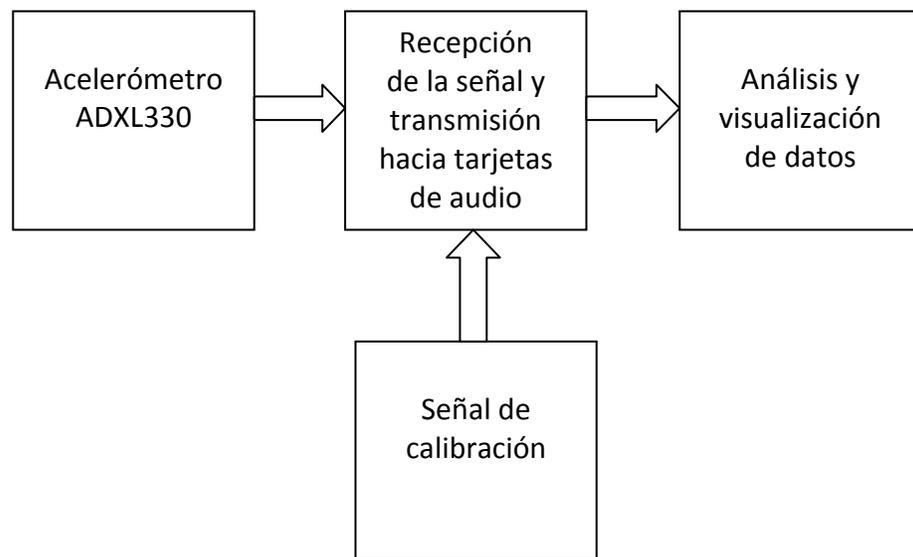
5. DESARROLLO INGENIERIL

El desarrollo del vibrómetro se dividió en dos bloques principales, el primero abarca la parte del hardware de medición y transmisión de datos obtenidos por el acelerómetro, y el segundo encargado del análisis, grabación y visualización de las vibraciones.

5.1 Hardware de medición y transmisión de datos.

El hardware del vibrómetro se encuentra constituido de la siguiente manera:

Figura 10. Diagrama de bloques vibrómetro



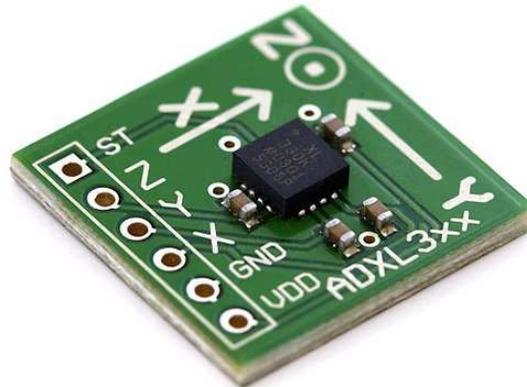
5.1.1 Acelerómetro ADXL330

El ADXL330 es un circuito integrado micro-maquinado capaz de medir la aceleración estática causada por la gravedad, así mismo como la aceleración dinámica causada por el movimiento.

Este sensor está compuesto por una masa inercial suspendida sobre resortes y rodeada por una estructura micro-maquinada; la desviación de esta estructura es medida usando un condensador diferencial, el cual consiste en placas fijas independientes (accionadas por señales cuadradas que se encuentran fuera de fase 180°) y placas adheridas a la masa inercial. La aceleración desvía la masa y desbalancea el condensador diferencial, generando como resultado una salida cuya amplitud es proporcional a la aceleración.

Para realizar la implementación del ADXL330 se adquirió la tarjeta fabricada por la empresa *Sparkfun*, la cual incluye en sensor con los condensadores de filtrado y la salidas con orificios para un conector *PDIP*. Los condensadores de 0.1 uF se cambiaron por otros de 0.01 uF para aumentar el ancho de banda de operación del acelerómetro.

Figura 11. Tarjeta para el ADXL330 fabricada por *Sparkfun*



Fuente: <http://www.sparkfun.com/tutorial/Eagle-DFM/Labels3.jpg>

5.1.1.1 Características técnicas ADXL330

Tabla 6. Características técnicas ADXL330

Parámetro	Condiciones	Min.	Típ.	Máx.	Unidad
Rango de medición	En cada eje	±3	±3.6		g
Sensibilidad para las salidas x, y, z	V _s =3V	270	300	330	mV/g
Voltaje de salida a cero g para x, y, z	V _s =3V	1.2	1.5	1.8	V
Ancho de banda eje x, y	Sin filtrado	1600			Hz
Ancho de banda eje z	Sin filtrado	550			Hz
Frecuencia de resonancia		5.5			kHz
Rango voltaje de operación		2		3.6	V
Corriente	V _s =3V		320		μA
Tiempo de encendido	Sin filtrado	1			ms
Temperatura de operación		-25		70	°C

Fuente: www.sparkfun.com/datasheets/Components/ADXL330_0.pdf

5.1.1.2 Modo de operación

El acelerómetro fue limitado para que operara a una frecuencia máxima de 500 Hz, debido a que este es un valor muy cercano a la máxima frecuencia medible en el eje z. Una vez hecho lo anterior se obtuvo un dispositivo con iguales condiciones de medición en los tres ejes, con un ancho de banda apropiado para vibraciones de baja frecuencia.

Para limitar el ancho de banda se utilizaron condensadores no polarizados de 0.01 μF . El uso de los condensadores a la salida de cada eje, forma un filtro pasa bajos con una resistencia interna de 32 $\text{k}\Omega$ (cuya tolerancia es de $\pm 15\%$) evitando el efecto *aliasing* y reduciendo el ruido de la señal de salida.

La ecuación para determinar el ancho de banda del filtro en 3dB es:

$$F_{-3dB} = \frac{1}{2\pi(32\text{k}\Omega) * C}$$

$$F_{-3dB} = \frac{1}{2\pi(32\text{k}\Omega) * 0.01\mu\text{F}}$$

$$F_{-3dB} = 497,4 \text{ Hz}$$

$$F_{-3dB} \cong 500 \text{ Hz}$$

El fabricante proporciona una tabla para la elección del ancho de banda, dados unos valores de capacitancia.

Tabla 7. Selección del condensador de filtrado

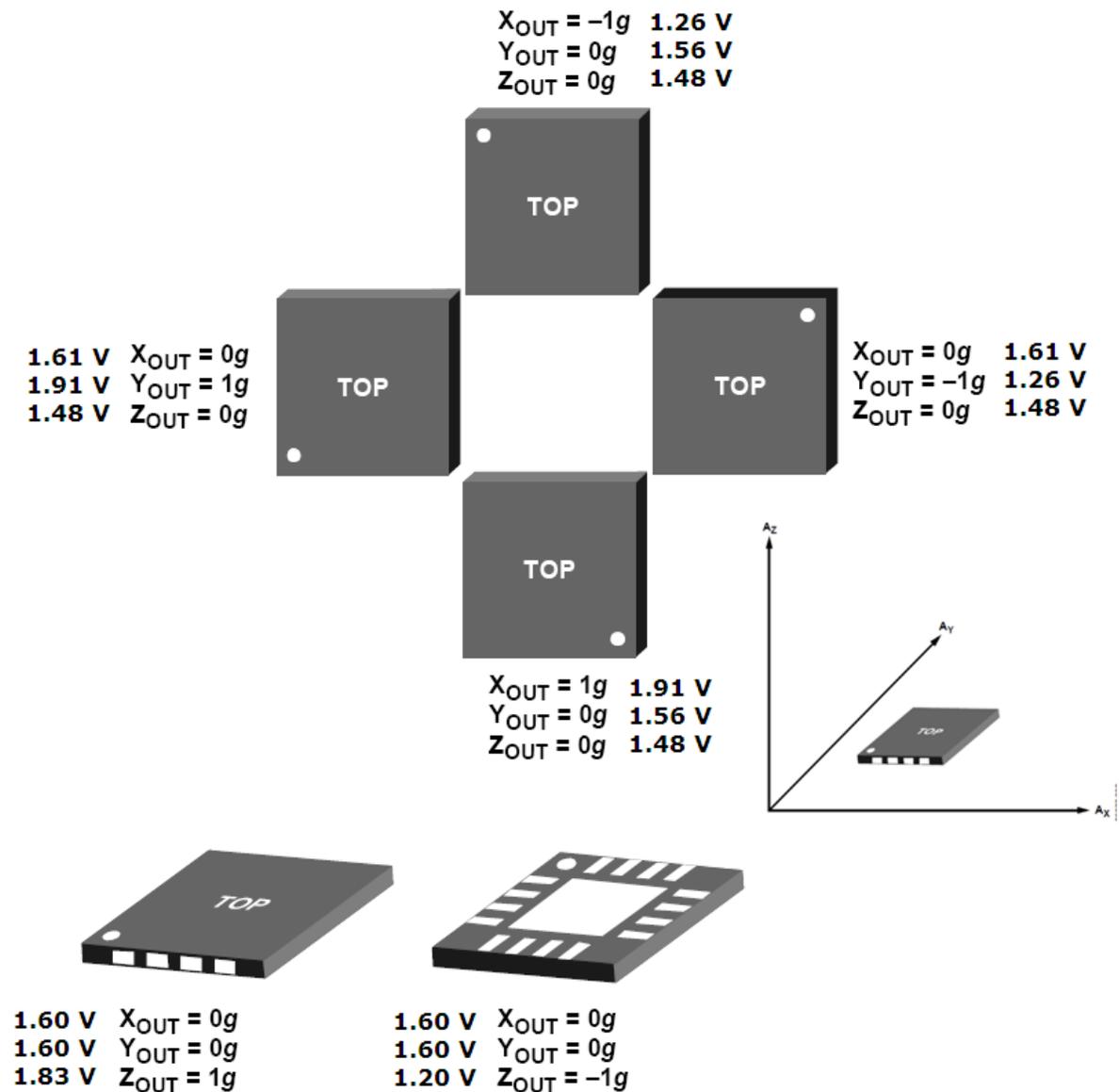
Ancho de banda (Hz)	Condensador (μF)
1	4.7
10	0.47
50	0.10
100	0.05
200	0.027
500	0.01

Fuente: www.sparkfun.com/datasheets/Components/ADXL330_0.pdf

5.1.1.3 Medición de sensibilidad

Para la medición de la sensibilidad del acelerómetro, este se ubicó sobre una superficie totalmente plana y luego se alimentó con un voltaje de 3.1 V para tomar valores de tensión sobre la salida de cada eje, los resultados obtenidos se muestran en la figura 12.

Figura 12: Tensión de salida en cada eje bajo aceleración estática causada por la gravedad.



Fuente: www.sparkfun.com/datasheets/Components/ADXL330_0.pdf

Con los datos registrados, se obtuvo el punto medio de la diferencia entre el voltaje obtenido a 1g y a -1g:

$$\frac{X_{out\ 1g} - X_{out\ (-1g)}}{2} = \text{Sensibilidad}$$

$$\frac{1.91\ V - 1.26\ V}{2} \cong 0.325\ V$$

Una vez realizada la medición se determinó que la sensibilidad del acelerómetro con una alimentación de 3.17 V era de 0.325 V/g, lo cual es bastante cercano al valor dado por el fabricante en su información técnica para una alimentación de 3 V.

5.1.2 Señal de calibración

Con el objetivo de proporcionar al usuario una señal de referencia constante, que le permita calibrar el software de análisis, se implementó un circuito oscilador basado en el integrado XR2206M/P.

Este circuito integrado permite generar señales periódicas, con formas de onda rectangular, triangular y sinusoidal con un rango en frecuencia de hasta 1 MHz. En la tabla 7 se presentan algunas de sus características técnicas.

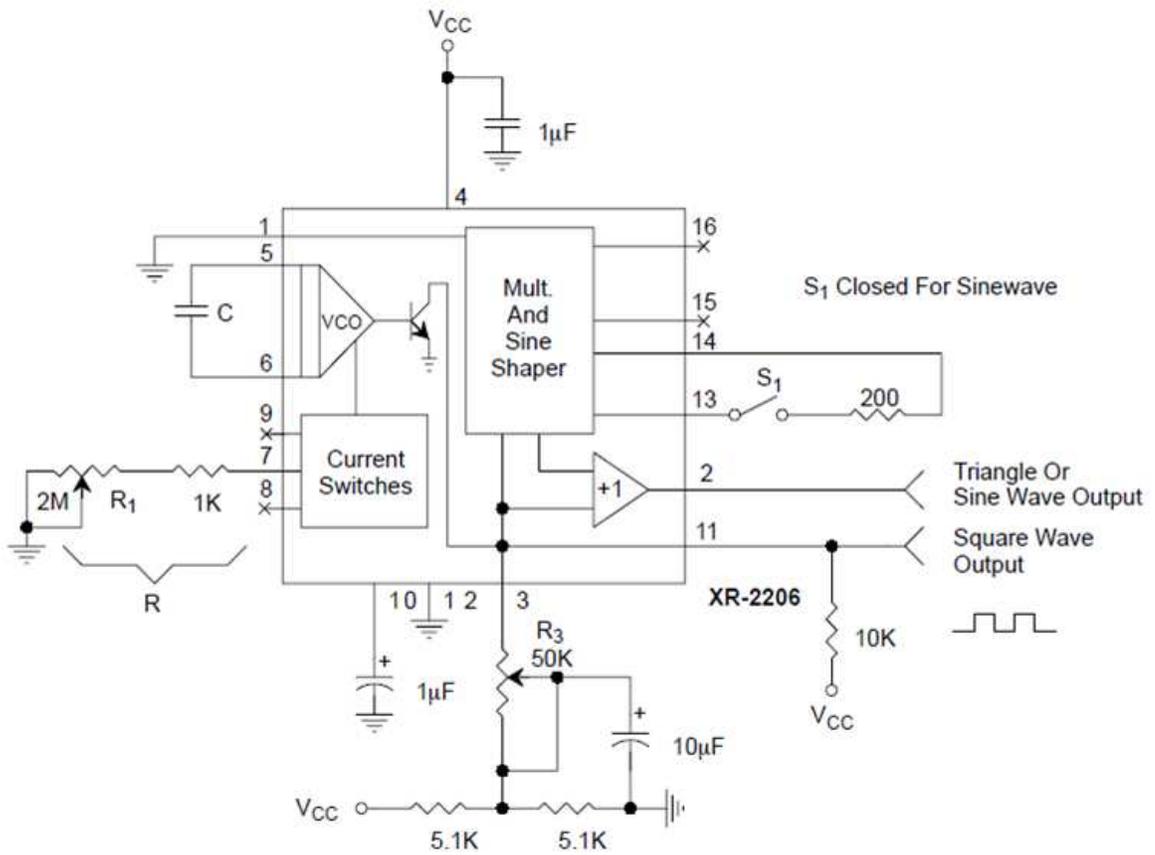
Tabla 8. Características técnicas XR2206M/P

Parámetro	Min.	Típ.	Máx.	Unidad
Voltaje de operación	10		26	V
Corriente de operación	12			mA
Máx. Frecuencia de operación	0.5	1		Hz
Mín. Frecuencia práctica de operación	0.01			Hz
Impedancia de salida	600			Ω

Fuente: http://www.jaycar.com.au/images_uploaded/XR2206V1.PDF

El XR2206 requiere de unos pocos elementos externos para lograr ajustar los valores de amplitud, frecuencia y tipo de onda de la señal de salida. Para determinar dichos elementos el fabricante proporciona la ecuación de cálculo de la frecuencia de operación y el plano electrónico para el montaje del integrado, el cual se puede apreciar en la figura 13.

Figura 13. Plano electrónico para la generación de una onda sinusoidal con el XR2206.



Fuente: http://www.jaycar.com.au/images_uploaded/XR2206V1.PDF

La frecuencia de operación es establecida con la variación del potenciómetro R1 y el condensador C. Matemáticamente se calcula mediante la ecuación:

$$F_o = \frac{1}{RC}$$

$$F_o = \frac{1}{1k\Omega * 10\mu F}$$

$$F_o = 100Hz$$

Para dejar fijos los valores de amplitud y frecuencia, los potenciómetros R1 y R3 de la figura 13, fueron reemplazados por resistencias fijas de valores comerciales, como resultado se estableció una señal sinusoidal con frecuencia de 100 Hz y con amplitud de 0.5 V pico, como señal de calibración.

5.1.3 Circuito de alimentación

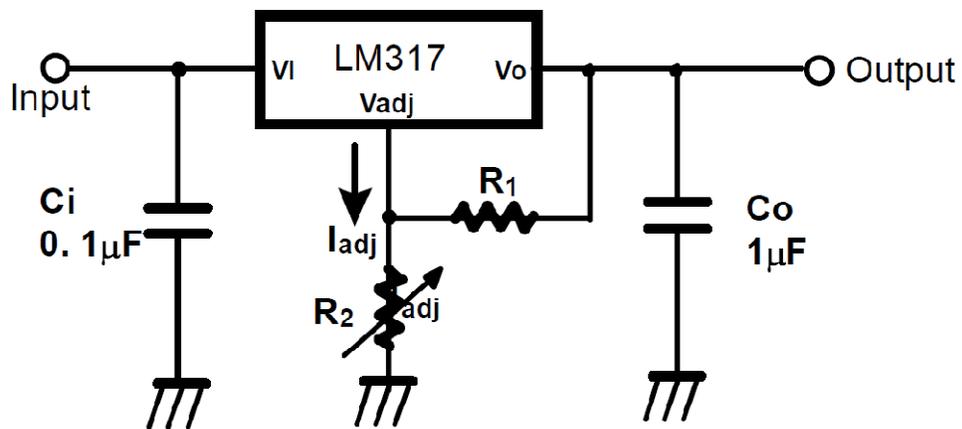
Con el objetivo de mantener la portabilidad del vibrómetro y ante la necesidad de un PC para hacer el análisis y medición de los datos, el circuito fue alimentado haciendo uso del puerto USB 2.0 de un PC, el cual proporciona una tensión de 5 VDC a su salida y 500 mA.

Cada elemento activo dentro del circuito requería de un voltaje diferente para su operación, por lo cual se implementaron medidas de regulación y multiplicación de voltaje según la necesidad de cada elemento.

5.1.3.1 Alimentación ADXL330

Debido a que el voltaje proporcionado por el puerto USB es de 5 voltios, fue necesario ajustarlo a un valor en el cual el acelerómetro pudiera operar dentro de las características técnicas dadas por *Analog Device*. Para lograr esto se utilizó el regulador positivo de voltaje lineal LM317, el cual permite fijar el voltaje en su salida entre 1.2 y 37 voltios DC.

Figura 14. Diagrama electrónico regulador LM317



Fuente: <http://www.fairchildsemi.com/ds/LM%2FLM317.pdf>

La ecuación para obtener el voltaje de salida en este regulador es:

$$V_o = 1.25 * \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

$$V_o = 1.25 * \left(1 + \frac{330}{220}\right)$$

$$V_o \cong 3.1 \text{ Voltios}$$

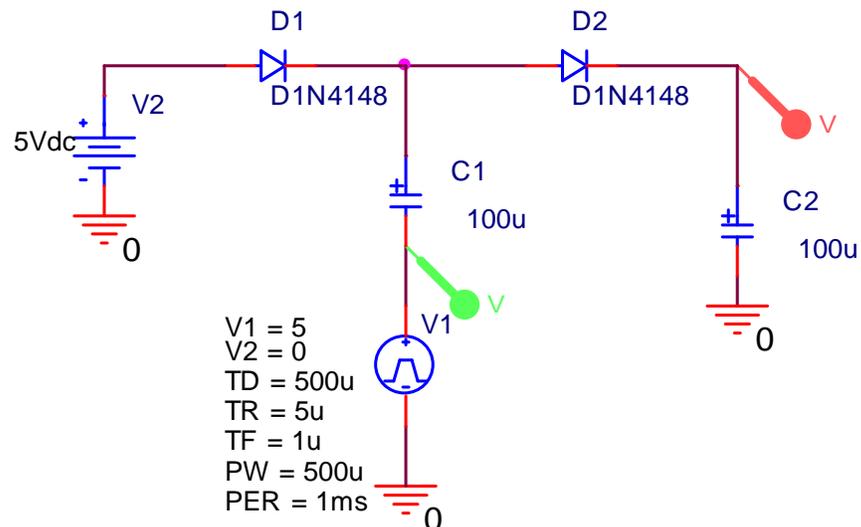
Usando en R2 una resistencia de 330 Ω y en R1 otra de 220 Ω se fijó un voltaje de 3.1 voltios, con el cual el sensor fue alimentado.

5.1.3.2 Alimentación XR2206

Para lograr que el generador de funciones XR2206 funcionara, se construyó un circuito duplicador de voltaje. En este circuito una vez que el condensador C1 es cargado mantiene su nivel de tensión ya que el diodo D1 bloquea el paso de corriente hacia la fuente V2, permitiendo que la sumatoria de la fuente V2 y el voltaje sobre el condensador C1 carguen el condensador C2. Como resultado la diferencia de potencia sobre C2 es el doble del voltaje de la fuente V2 menos las pérdidas en los diodos.

Mediante pruebas y mediciones realizadas, se determinó que el XR2206 podía funcionar correctamente con una tensión mínima de 9 voltios, por esta razón se decidió implementar este circuito para su alimentación.

Figura 15. Duplicador de tensión

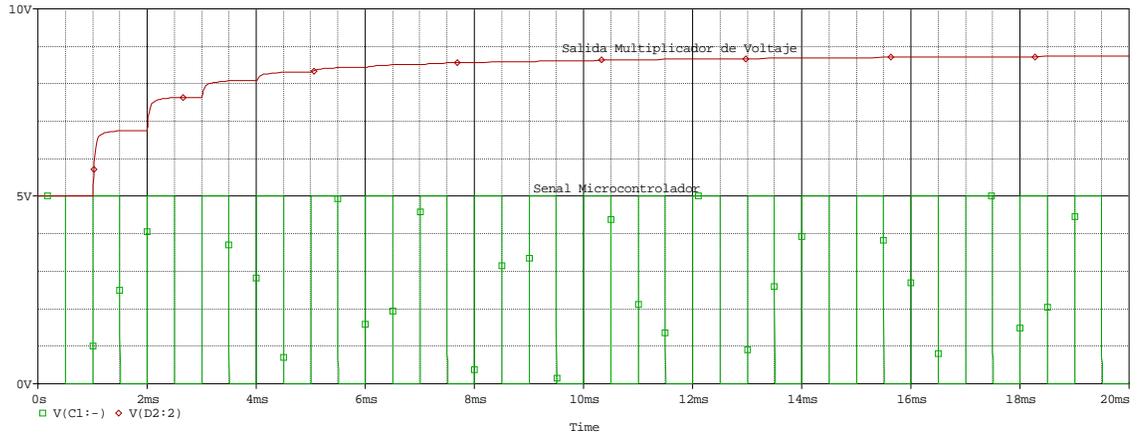


Fuente: Software de simulación electrónica Orcad

Para que este circuito funcione se necesita usar una fuente que genere una señal cuadrada de alta frecuencia V1, sobre el terminal negativo del condensador C1. En este

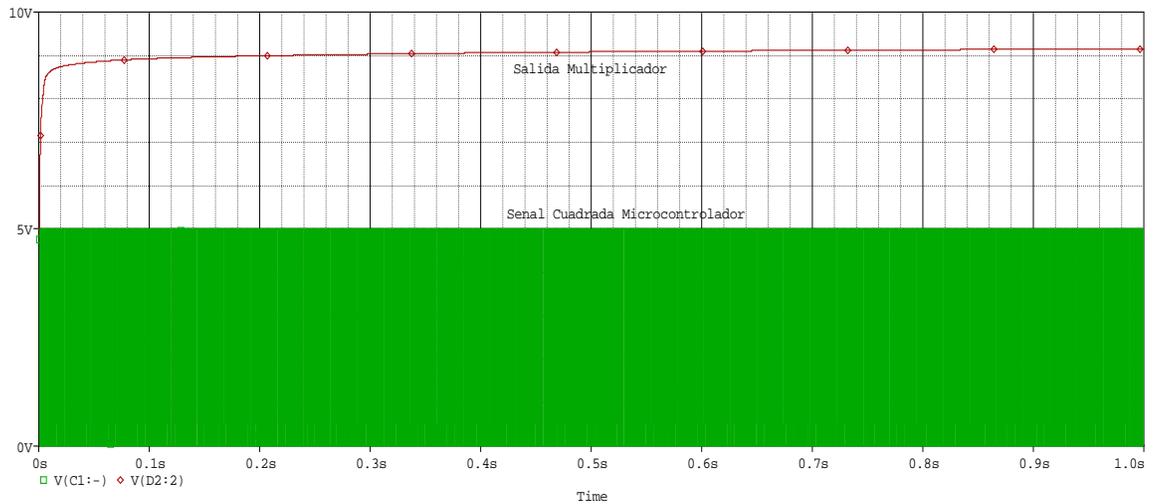
caso se usó el módulo *timer* del microcontrolador 68HC908QY4 de *Freescale*, para generar la onda cuadrada a una frecuencia de 1kHz con voltaje pico de 5 VDC.

Figura 16. Simulación (duplicado) de voltaje entre 0 y 20 ms.



Fuente: Software de simulación electrónica Orcad

Figura 17. Simulación (duplicado) de voltaje entre 0 y 1 s.



Fuente: Software de simulación electrónica Orcad

En la figuras 16 y 17 se puede apreciar la salida de del circuito doblador de voltaje sobre el condensador C2. Durante los primeros 10 ms el voltaje aumenta gradualmente hasta 8.7 voltios, luego de 1 segundo la salida se estabiliza en 9.1 VDC permitiendo de esta manera operar al XR2206.

5.1.4 Recepción de la señal y transmisión hacia tarjetas de audio

5.1.4.1 Circuito impreso acelerómetro

El montaje de todos los componentes electrónicos se dividió en dos circuitos impresos. En el primero se montó el sensor y un conector mini DIN 6, el cual llevaría al sensor la alimentación y traería la información en tensión de la aceleración captada en los ejes x, y, z por el acelerómetro.

Figura 18. Carcasa y circuito impreso para el montaje del acelerómetro



Fuente: Fotografía montaje del acelerómetro

5.1.4.2 Circuito impreso principal

En el segundo impreso se agrupó la sección de alimentación, calibración y transmisión de datos hacia las tarjetas de sonido.

Una vez que las señales de aceleración se recibían desde el acelerómetro, eran llevadas a dos *jacks* de 3.5 mm, los cuales permitirían la conexión con las tarjetas de audio. Uno de ellos se usó para la aceleración en X y Y, por los canales derecho e izquierdo respectivamente, y un segundo *jack* para la aceleración en el eje Z por un solo canal. El tercer *jack* fue necesario para transmitir la señal de calibración procedente del XR2206.

Figura 19. Montaje del hardware en carcasa del vibrómetro



Fuente: Fotografía montaje del circuito principal

En la figura 19 se encuentra el montaje del hardware en carcasa del vibrómetro implementado. Se puede apreciar el cable mini DIN 6 que conecta el sensor con la tarjeta principal, un puerto USB de alimentación, los jacks de audio de salida para la conexión con las tarjetas de audio, y finalmente los interruptores para el encendido del circuito y para la activación de la señal de calibración.

5.1.5 Tarjetas de audio

Debido que la señal de aceleración y calibración provenientes del hardware del vibrómetro son análogas, se usaron dos tarjetas de audio para la captura de datos en el PC, las cuales para ser compatibles con el software del vibrómetro, no deben funcionar con drivers ASIO. La primera de ellas se encarga de la aceleración en X, Y, y la segunda de la aceleración en el eje Z; en las dos se usó la entrada de línea para la adquisición de la señal análoga.

5.1.5.1 Tarjeta de audio *Creative Sound Blaster X-Fi Surround 5.1 USB*

Descripción general

Esta tarjeta de audio es fabricada por la empresa *Creative* y cuenta con la tecnología *X-Fi*, para compensar en la reproducción las pérdidas causadas por la compresión de audio. La conexión con el PC se realiza por puerto *USB*, por lo cual no requiere fuente de poder externa; cuenta con entrada de micrófono, entrada de línea y salidas para sonido envolvente.

Figura 20. *Creative Sound Blaster X-Fi Surround 5.1 USB*



Fuente: <http://us.store.creative.com/shared/viewProductImage.html?http://ecx.images-amazon.com/images/I/41g2P1RbAUL.jpg>

Características Técnicas

Tabla 9: Características Técnicas *Creative Sound Blaster X-Fi Surround 5.1 USB*

Reproducción	Hasta 24-Bit/96kHz 5.1
Relación señal ruido	>100dB
Distorsión armónica total + Ruido a 1kHz	0.01%
Grabación	Hasta 24-bit/96kHz

Fuente: <http://us.store.creative.com/Sound-Blaster-XFi-Surround-5.1/M/B0017QQQAE.htm>

5.1.5.2 Tarjeta de audio integrada *Conexant HP Pavilion dv2000*

La tarjeta de audio integrada del PC portátil dv2135la, fue usada para la captura de la aceleración del eje Z. También es posible usar cualquier otra tarjeta de audio interna o externa, recordando siempre que, el vibrómetro no es compatible con aquellas que usan drivers ASIO.

5.2 Software de análisis, visualización y grabación de datos

5.2.1 Procesamiento de señal con LabVIEW

Para procesar la señal capturada por el transductor (acelerómetro triaxial ADXL330), se diseñó y construyó un programa dentro de un entorno grafico de fácil acceso y uso, en donde se programaron funciones integradas, con el fin de realizar el análisis de medida y presentación de los datos.

En un PC (computador personal) portátil con la previa instalación de LabVIEW y con la correcta conexión del *hardware* y *software*, (ver ANEXO 1) se integraron las tres señales provenientes del sensor, a las tres entradas del software para su procesamiento independiente.

LabVIEW trabaja con dos terminales o pantallas principales que son:

-Panel frontal

-Diagrama de bloques

Panel frontal

Es el diseño de la interfaz de usuario, que contiene el equivalente de toda la programación hecha desde el diagrama de bloques. Cada botón, pantalla, indicador, tiene una correspondencia lógica y configuración de acuerdo al diagrama de bloques; en ella los usuarios pueden observar los datos del programa actualizados en tiempo real.

Diagrama de bloques

Es donde se hace toda la configuración y programación del instrumento virtual, permitiendo direccionar el flujo de señal hacia procesos digitales específicos, en las diferentes etapas de análisis y representación de datos. Es el programa propiamente dicho, aquí se colocan cajas que realizan una determinada función.

El panel frontal del programa consta de cuatro etapas principales que son:

- ✓ Configuración
- ✓ Forma de onda
- ✓ Espectro
- ✓ Datos

5.2.1.1 Configuración

Figura 21. Panel frontal *LabVIEW*

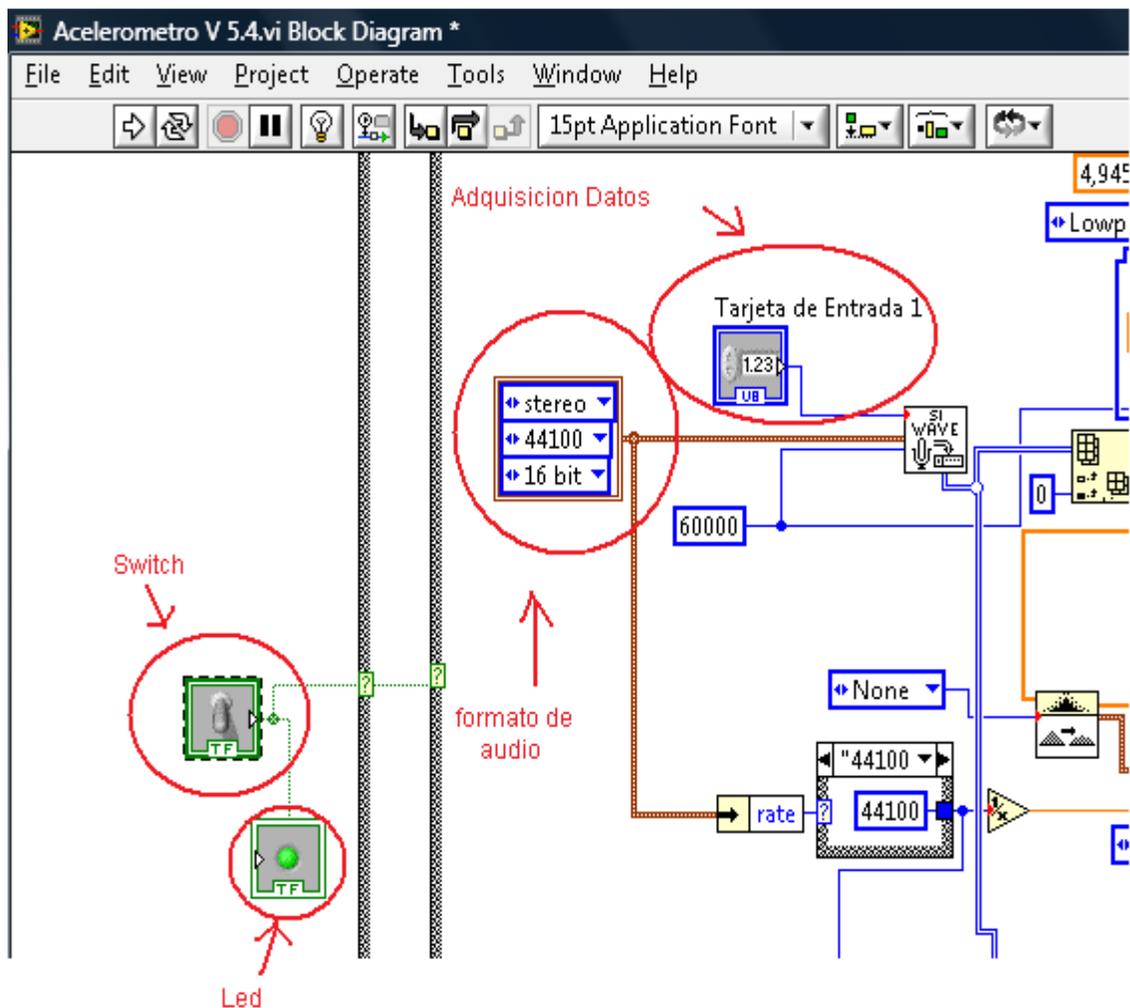


Fuente: Software desarrollado en *LabVIEW*

En esta pestaña se encuentran dos recuadros, uno para el análisis y otro para la Grabación.

El recuadro análisis permite habilitar el programa con un interruptor y su respectivo *LED* de encendido, además de configurar las entradas al sistema por la tarjeta de sonido del PC o por la tarjeta externa vía USB.

Figura 22. Diagrama de bloques *LabVIEW*



Fuente: Software desarrollado en *LabVIEW*

En el diagrama de bloques de la figura 22, se muestra la manera en que son asignados el *LED* y el interruptor de habilitación del programa, así mismo, la manera de adquirir y permitir que los datos se digitalicen, dando como resultado un archivo en formato de audio a la entrada del programa, permitiendo escoger la tarjeta de entrada de datos.

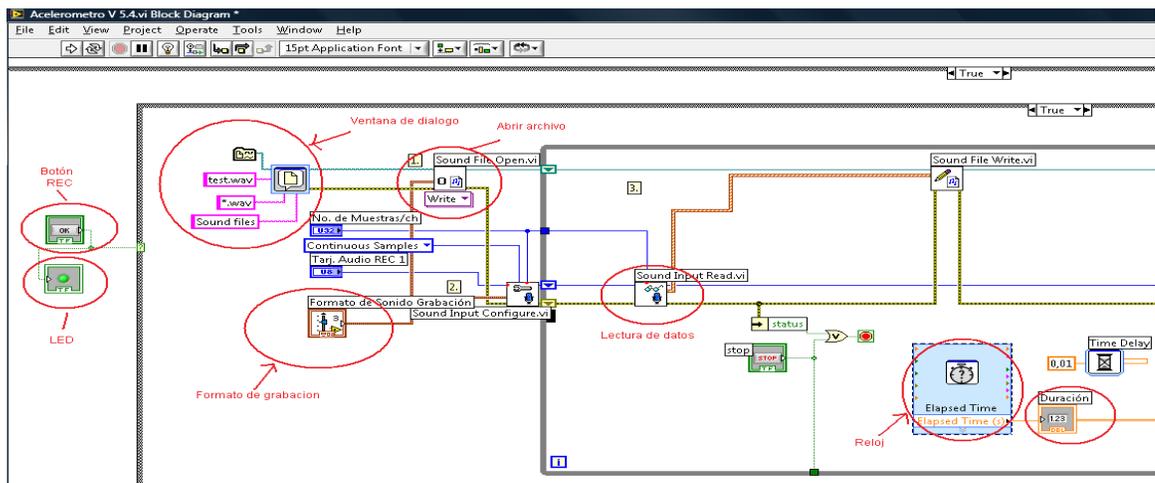
Figura 23. Panel frontal “Grabación” LabVIEW



Fuente: Software desarrollado en LabVIEW

El recuadro grabación permite realizar la configuración para la grabación de un archivo de audio de la señal capturada por el sensor, haciendo ajustes en la tasa de muestreo y los bits de resolución, también posee un indicador del tiempo de grabación. Al pulsar en el botón REC automáticamente envía a una ventana de exploración, para seleccionar la ubicación y destino del archivo de audio.

Figura 24: Diagrama de bloques “Grabación” LabVIEW

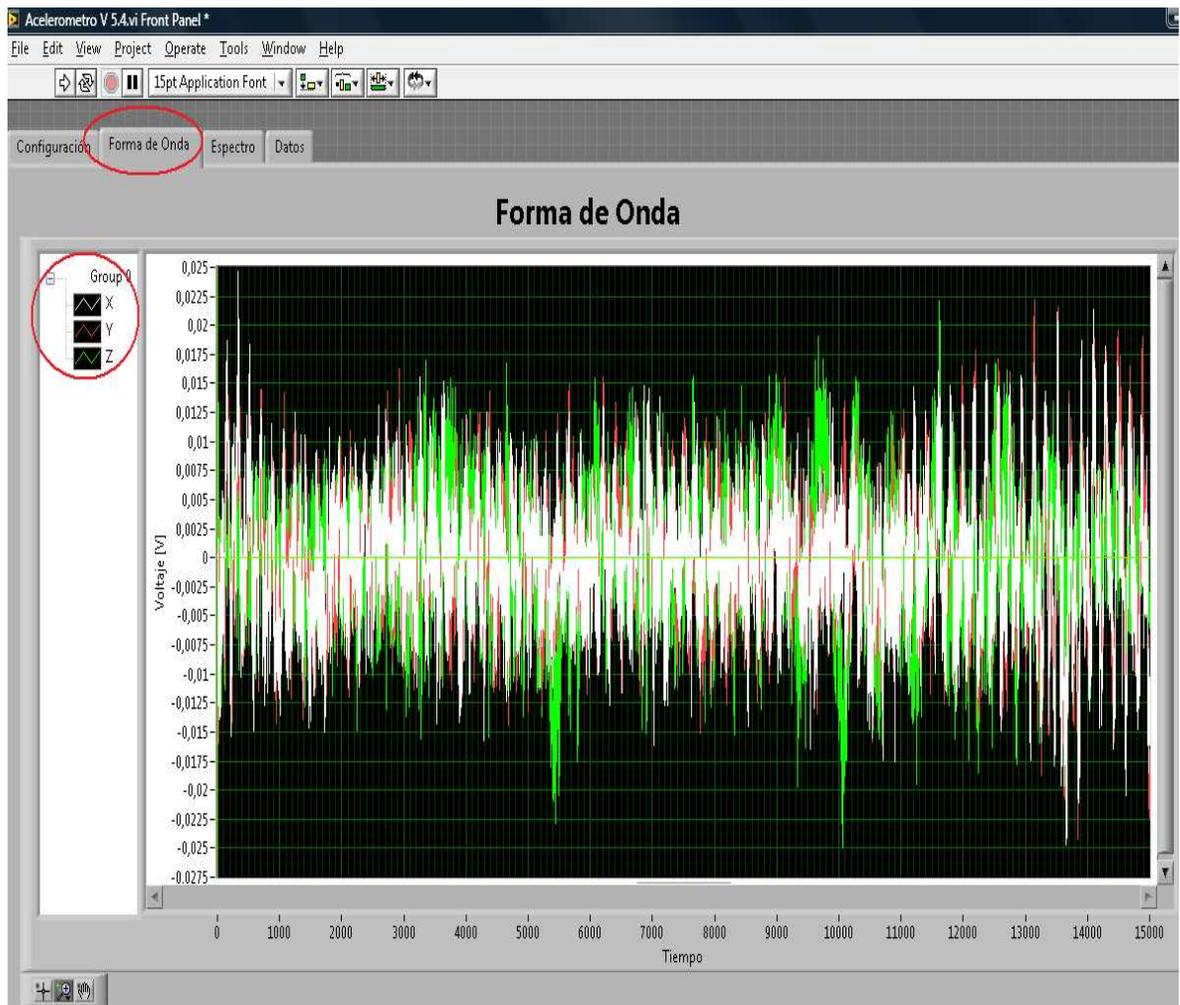


Fuente: Software desarrollado en LabVIEW

En el diagrama de bloques de la figura 24, se muestra la manera en que se asignan los botones *REC*, *STOP*, el *LED* de activación o desactivación del modo de grabación, el tiempo de grabación y el flujo de señal, que permite al usuario configurar la tasa de muestreo y la resolución de la grabación.

5.2.1.2 Forma de onda

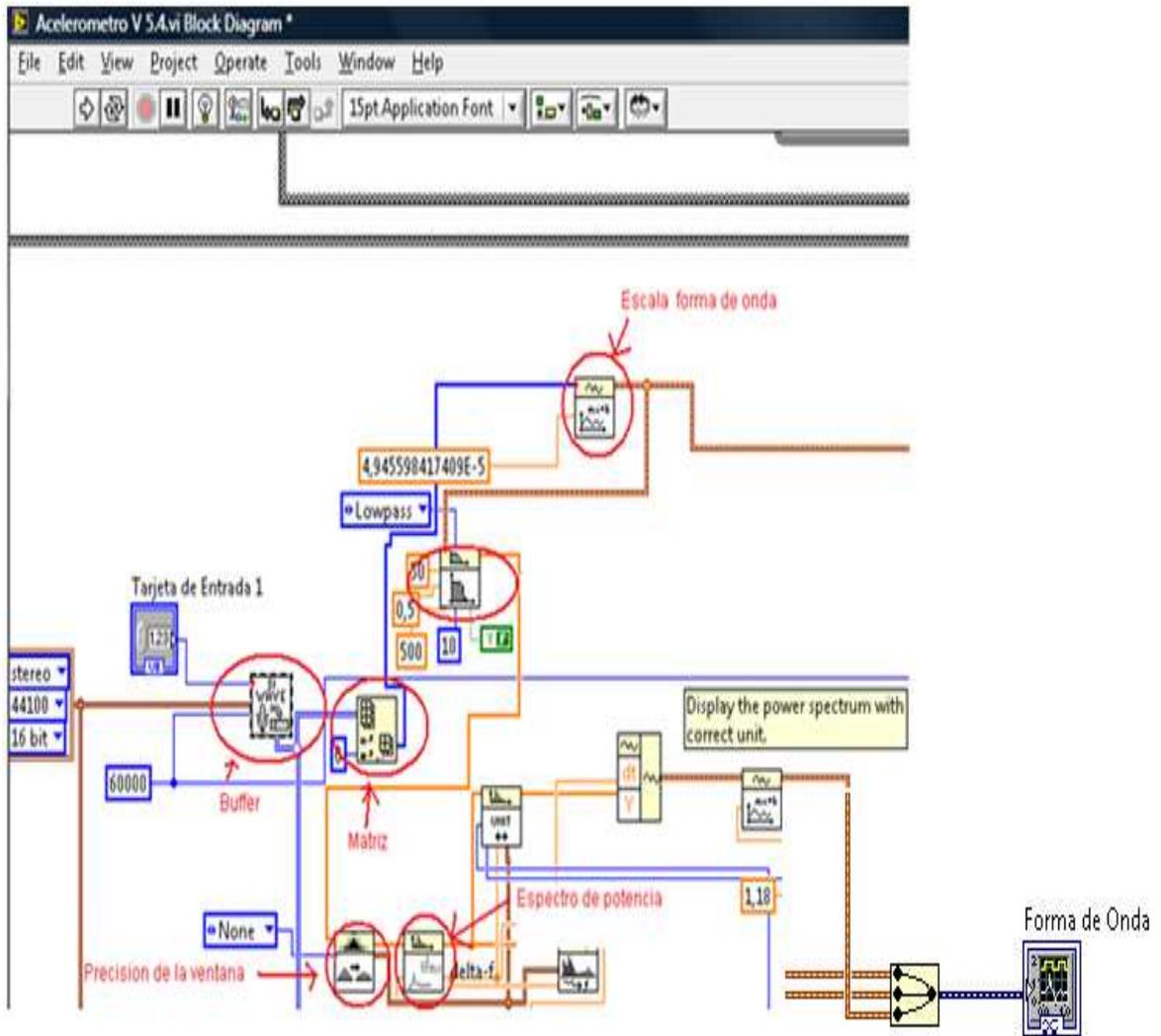
Figura 25. Forma de onda panel frontal



Fuente: Software desarrollado en *LabVIEW*

En esta pestaña se muestran las diferentes formas de onda de las tres señales X, Y, Z, en el dominio de tiempo, análogo a la pantalla de un osciloscopio. Es una representación visual o gráfica del valor instantáneo de las señales, trazadas en el tiempo.

Figura 26. Diagrama de bloques forma de onda



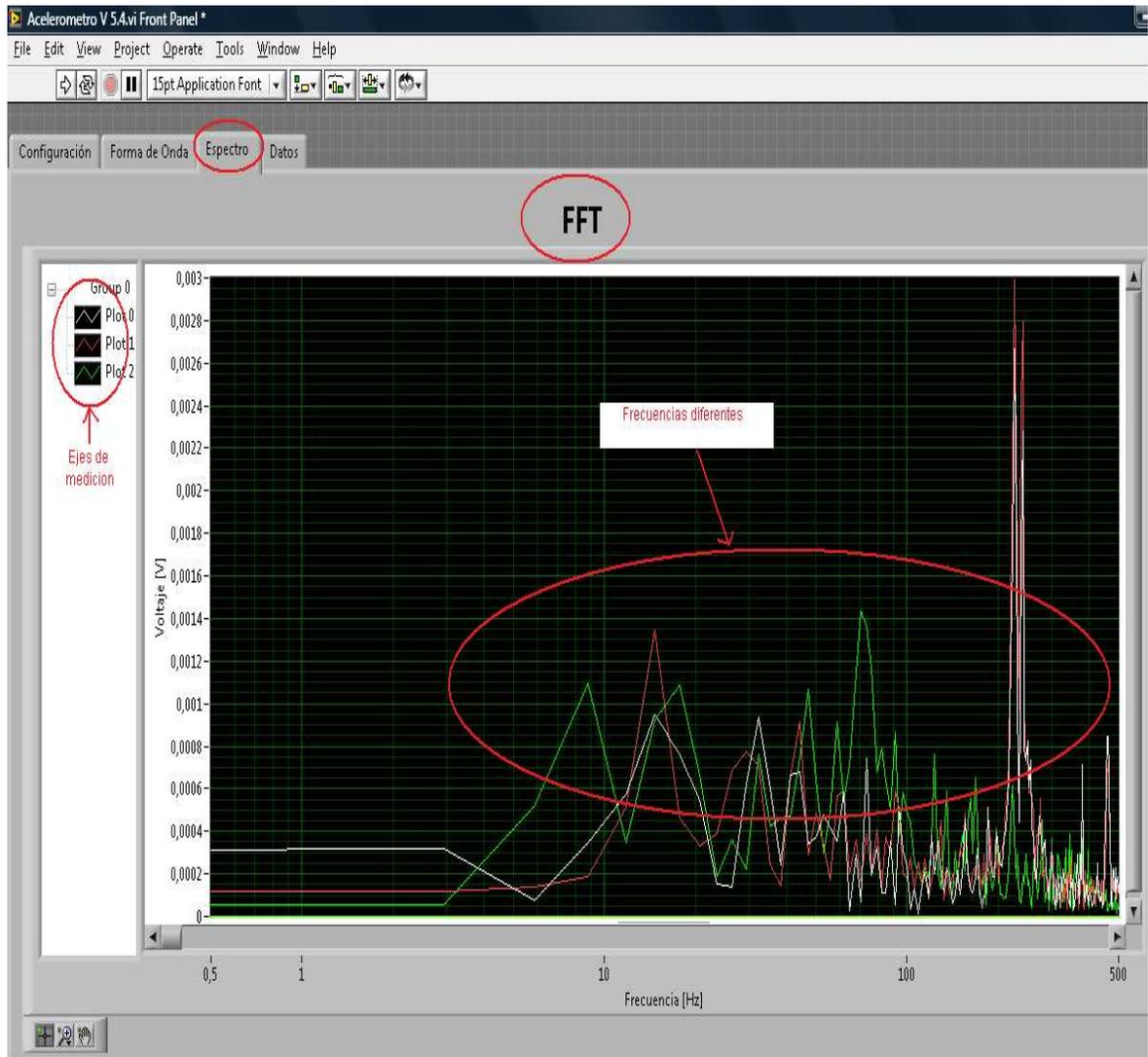
Fuente: Software desarrollado en *LabVIEW*

En el diagrama de bloques de la figura 26, se observa la manera en que luego de ser digitalizadas las señales, ingresan a un buffer en el que se almacenan los datos temporalmente, el cual no permite que el programa se quede en determinado momento sin datos, luego en la matriz, la función cambia de tamaño automáticamente para mostrar las entradas de índice para cada entrada.

Después de realizado el anterior proceso, las señales pasan por cajas de cálculos que permiten determinar los valores *RMS*, escala y ventanas utilizadas de cálculo, para luego ser graficadas en pantalla, mostrándole al usuario en formato lineal la amplitud de las tres señales en el tiempo, provenientes del sensor en tiempo real.

5.2.1.3 Espectro

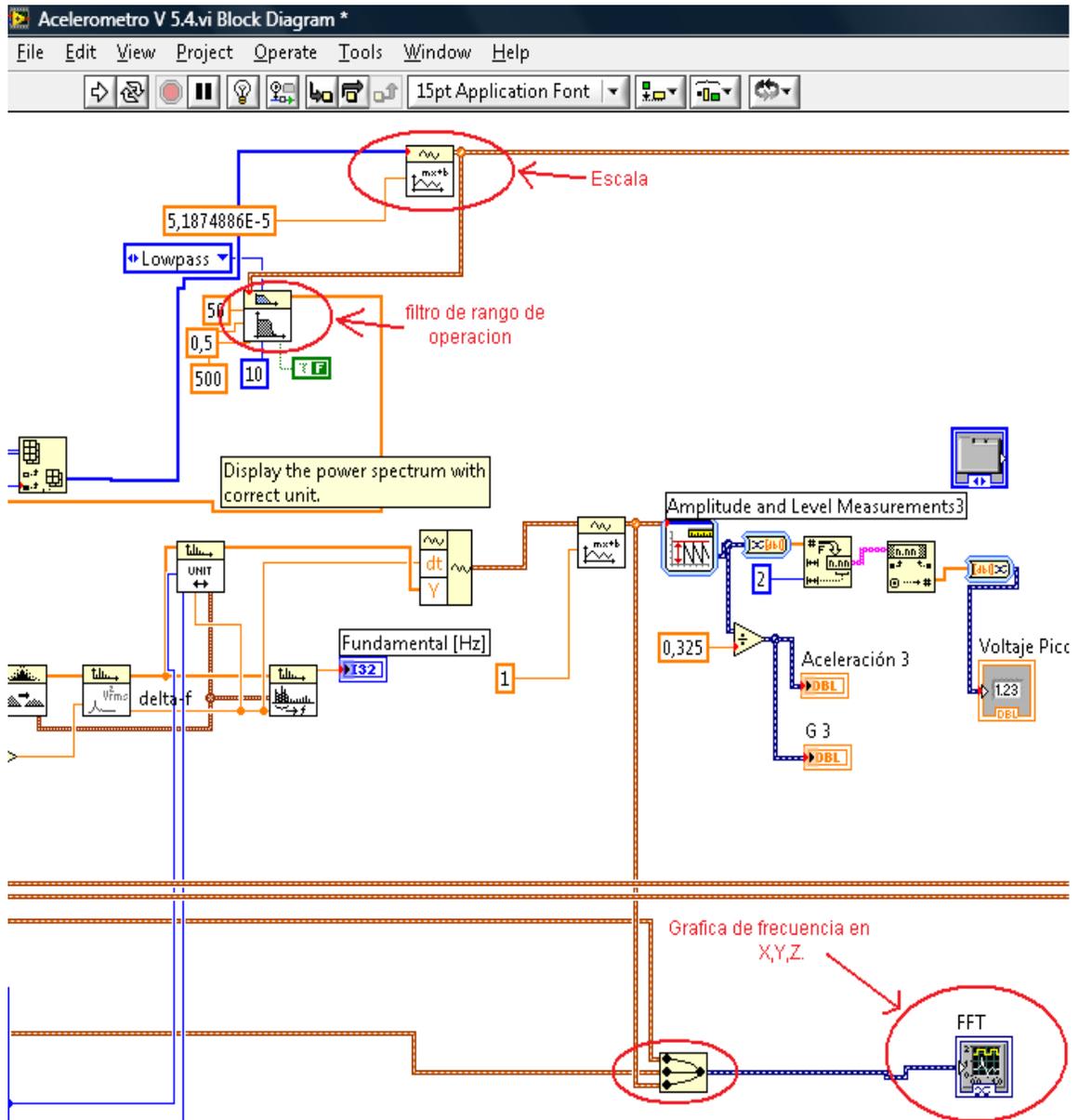
Figura 27. Espectro panel frontal



Fuente: Software desarrollado en *LabVIEW*

En la pestaña espectro es posible observar la frecuencia de cada señal, análogo a la pantalla de un osciloscopio con el proceso matemático y algoritmo incorporado *FFT*. Es una representación gráfica del espectro frecuencial instantáneo de la señal, con lo que son determinadas las frecuencias de oscilación de una maquina o sistema en los ejes X, Y, Z, dentro del rango de 0.5 – 500 Hz, mostrando al usuario en tiempo real el resultado de operación del sistema en escala semilogarítmica.

Figura 28. Espectro diagrama de bloques

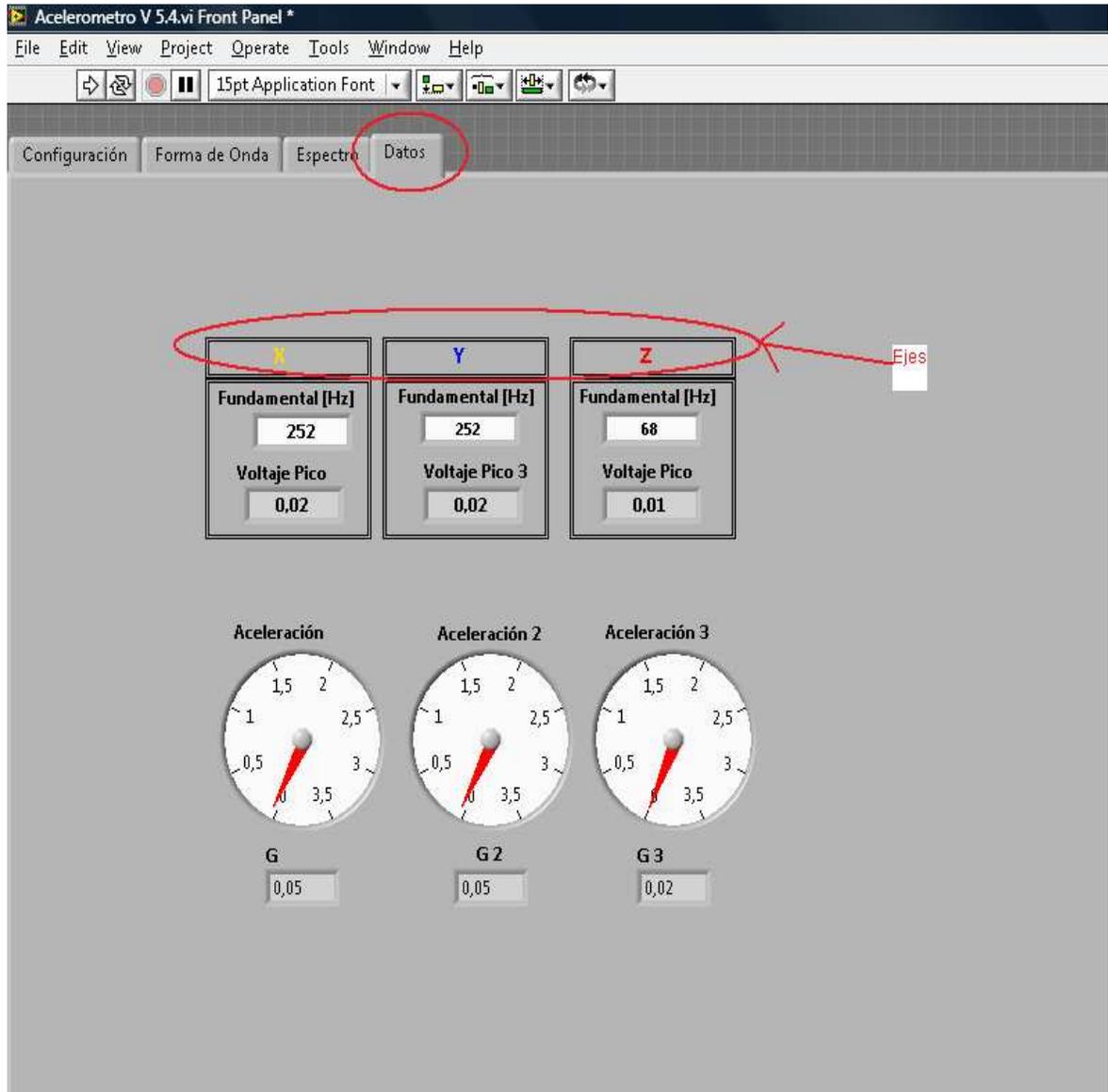


Fuente: Software desarrollado en *LabVIEW*

En el diagrama de bloques de la figura 28, la pestaña espectro es representada y diseñada implementando un filtro que permita que la señal proveniente del proceso de transformación a unidades y escala de frecuencia, solo sea analizada dentro de un rango de 0.5 – 500 Hz, para luego ser enviada a la pantalla donde el usuario puede observar las gráficas de las frecuencias en formato semilogarítmico, correspondientes a cada eje de medición del sensor.

5.2.1.4 Datos

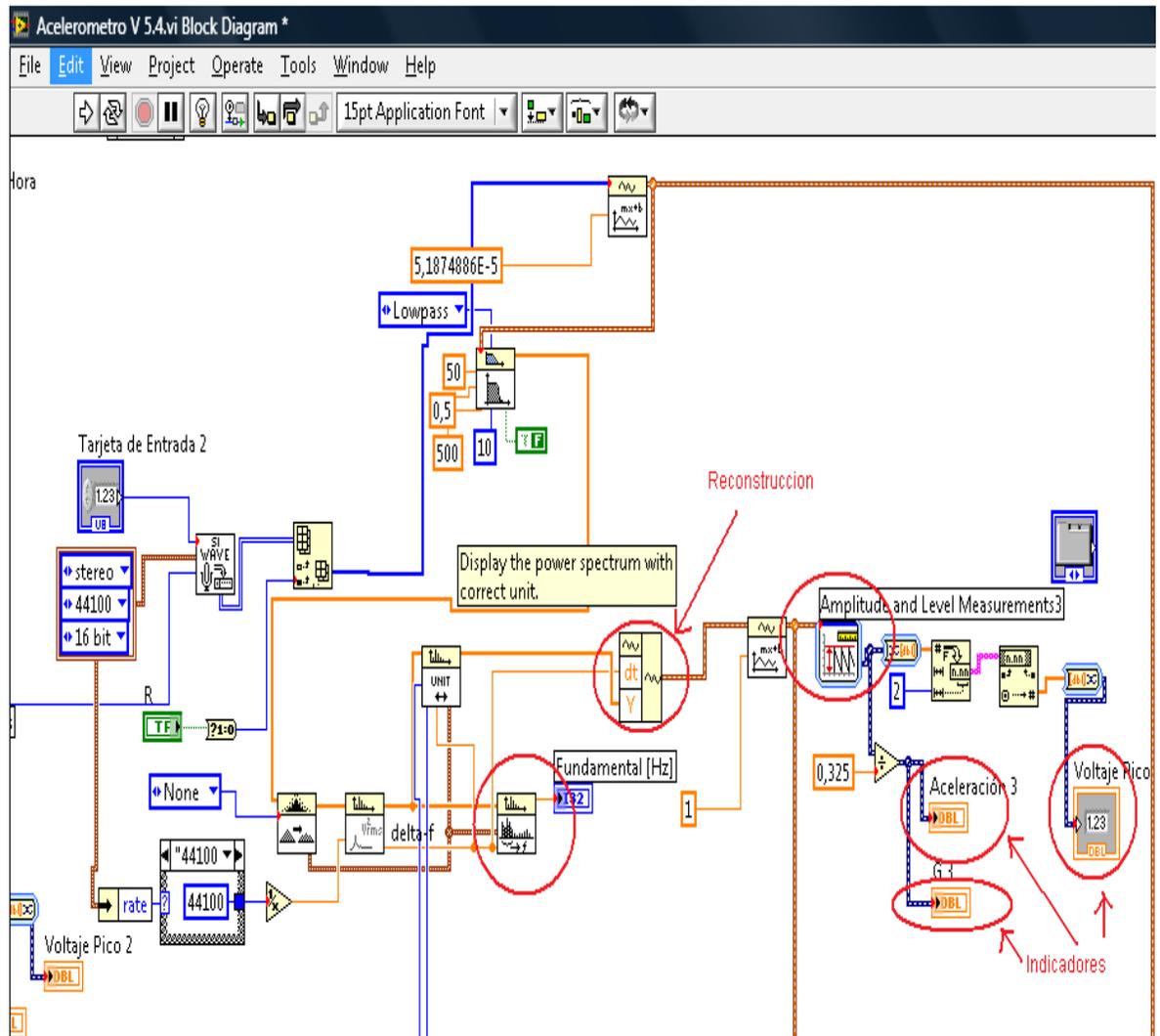
Figura 29. Datos panel frontal



Fuente: Software desarrollado en *LabVIEW*

En esta pestaña el usuario puede visualizar integralmente los valores de frecuencia, voltaje pico y aceleración, de cada eje de medición en tiempo real. Da información rápida de la frecuencia predominante o fundamental, que es captada por el vibrómetro, así mismo como su correspondiente valor en aceleración en unidades g.

Figura 30. Datos diagrama de bloques



Fuente: Software desarrollado en LabVIEW

En el diagrama de bloques de la figura 30, se muestra la manera como todos los resultados de los procesos para determinar la frecuencia, valores de amplitud y aceleración se envían a la ventana datos, para que el usuario visualice en conjunto los tres ejes procesados en el programa.

6. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 Elementos usados en las mediciones

Las mediciones del vibrómetro implementado, fueron realizadas en los laboratorios de electrónica de la universidad, con los siguientes elementos:

6.1.1 Subwoofer Kenwood KFC-W1012

Como fuente vibratoria se usó el subwoofer KFC-W1012. Este parlante de 12 pulgadas, nos permitió aplicar señales sinusoidales entre 1 Hz y 500 Hz, para medir el comportamiento del vibrómetro.

Figura 31. KFC-W1012



Fuente:

http://www.kenwood.com.pa/Productos_para_Carro/Sistemas_de_Altavoces/Altavoces_Subgraves/KFC-W1012

Características KFC-W1012

Tabla 10. Características KFC-W1012

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
Potencia Admisible Máxima	800 W
Potencia Admisible Continua	200 W

Repuesta de Frecuencia	28 Hz – 800 Hz
Impedancia	4 Ω
Sensibilidad	90dB

Fuente:

http://www.kenwood.com.pa/Productos_para_Carro/Sistemas_de_Altavoces/Altavoces_Subgraves/KFC-W1012

6.1.2 Generador de funciones

Para excitar el subwoofer con la señal sinusoidal, se usó el generador de funciones GFG-8255A. Este cuenta con un canal de salida, cuya impedancia es de 50 ohmios, y proporciona señales sinusoidales, triangulares, diente de sierra y cuadradas.

Figura 32. Generador de funciones GFG-8255A



Fuente: http://www.gwinstek.com/product/images/picture/FC_2009915111954.jpg

Características GFG-8255A

Tabla 11. Características GFG-8255A

Parámetro	Valor
Rango de frecuencia	0.5 Hz – 5 MHz
Formas de onda	Sinusoidal, triangular, cuadrada, diente de sierra. Con salida TTL y Cmos

Modulación	AM / FM
Modo de barrido frecuencial	Lineal / Logarítmico
Atenuación	Dos posiciones (-20dBx2)

Fuente: <http://www.gwinstek.com/en/product/productdetail.aspx?pid=5&mid=73&id=99>

6.1.3 Osciloscopio digital TDS2024B

Este instrumento proporciona dos canales para la visualización, de las señales de entrada con un ancho de banda de 200 MHz. Como principal característica, se encuentra la captura de imagen y datos, de la señal que se tiene en pantalla haciendo uso de una memoria *USB*.

Figura 33. Generador de funciones TDS2024B



Fuente: http://www.linktronix.ch/product/image/662_TDS2024B---high.jpg

Características osciloscopio digital TDS2024B

Tabla 12. Características osciloscopio digital TDS2024B

Parámetro	Valor
Ancho de Banda	200 MHz
Velocidad de Muestreo	Hasta 2 GS/s en Tiempo Real
Número de canales	2 Canales
Pantalla	LCD a Color
Almacenamiento	Removible por medio de un puerto USB en el panel frontal

Conectividad	Transparente a la PC usando un puerto USB para dispositivos con el software incluido <i>OpenChoice</i> y NI <i>SignalExpress</i> PC Software
Funcionalidad	FFT estándar en todos los modelos
Interface de Usuario	Multi- Idioma con ayuda sensible al Contexto
Impresión	Directa a todas las impresoras compatibles con <i>PictBridge</i> vía Puerto USB para dispositivos

Fuente:

http://www.finaltest.com.mx/Tektronix_TDS2022B_Osciloscopio_200_MHz_2_CH_2_G_p/tds2022b.htm

6.1.4 Amplificador de audio Alesis RA150

La salida del generador de funciones se conectó al amplificador de audio Alesis RA300, para obtener una señal de audio con suficiente potencia, que permitiera hacer oscilar el subwoofer KFC-W1012 a la frecuencia seleccionada.

Figura 34. Amplificador de audio Alesis RA300



Fuente: <http://www.alesis.com/ra300>

Características amplificador de audio Alesis RA300

Tabla 13. Características amplificador de audio Alesis RA300

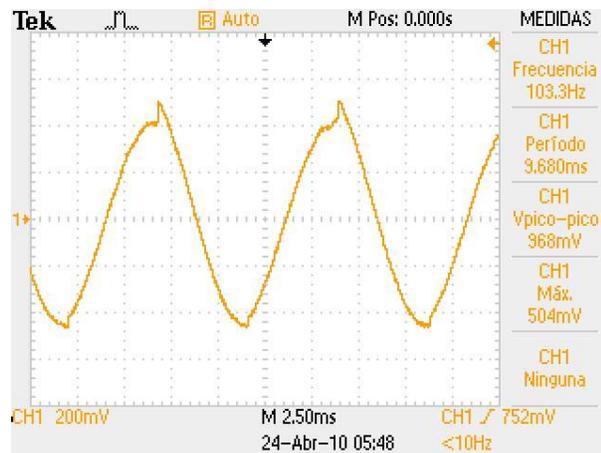
Parámetro	Valor
Salida por canal	4 ohms: 150 watts <i>RMS</i> por canal
	8 ohms: 90 watts <i>RMS</i> por canal
	8 ohms: 300 watts <i>RMS</i> , puente
Relación señal a ruido	>105dB
Repuesta en frecuencia	10Hz - 70kHz +0, -3dB
Distorsión	< 0.02% @ 4ohms, 20Hz - 20kHz
Sensibilidad de entrada	+4dB para la salida especificada

Fuente: <http://www.alesis.com/ra300>

6.2 Señal de calibración

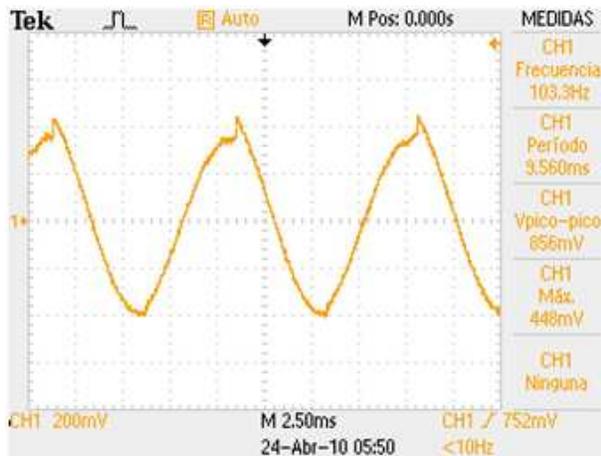
En la figura 35 se muestra la salida de la señal de calibración, dada por el XR2206, sin conexión a las tarjetas de audio. En esta se puede apreciar que se genera una señal sinusoidal de 103.3 Hz con un voltaje pico de 504 mV. Cuando se hizo la conexión, de la señal de calibración con la tarjeta de audio Creative, se presentó un voltaje pico de 448 mV, tal como se puede ver en la figura 36, presentándose una atenuación en la amplitud de 56 mV, equivalente al 11% de la señal de calibración sin conexión.

Figura 35. Señal de calibración sin conexión a tarjetas de audio



Fuente: Osciloscopio digital TDS2024B

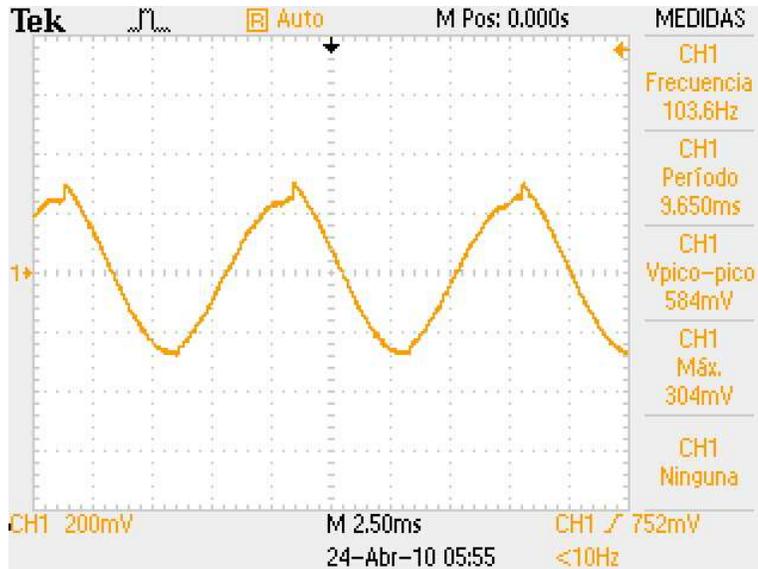
Figura 36: Señal de calibración conectada a tarjeta de audio Creative USB 5.1



Fuente: Osciloscopio digital TDS2024B

El comportamiento de la señal de calibración, cuando se conectó a la entrada de línea de la tarjeta de audio interna del *laptop HP Pavilion DV2135la*, se muestra en la figura 37. En este caso la caída en la amplitud es más significativa, en comparación con la tarjeta Creative. La diferencia en la amplitud es de 200 mV, lo cual equivale al 39.7 %.

Figura 37. Señal de calibración conectada a tarjeta de audio interna *HP Pavilion DV2135la*



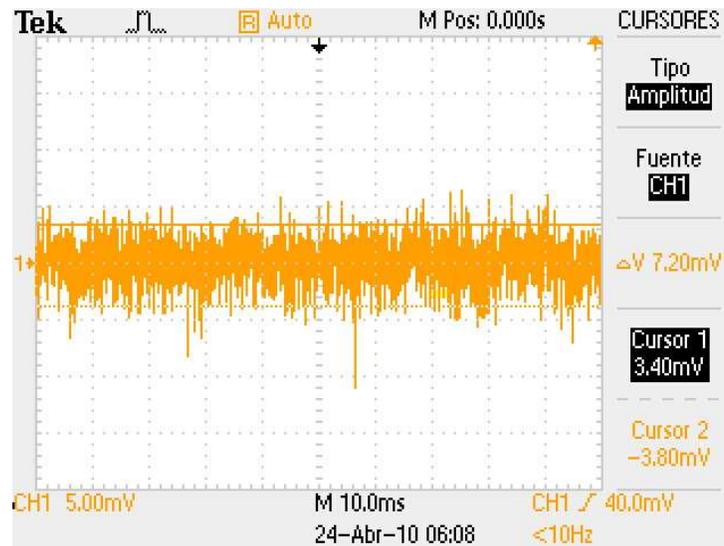
Fuente: Osciloscopio digital TDS2024B

De los resultados obtenidos en las figuras 35, 36 y 37, se concluye que, dependiendo de la tarjeta de audio que se use para realizar la adquisición de datos, se deberá conocer el valor de amplitud real presente a la entrada de la tarjeta, y en base a este realizar la calibración del vibrómetro, para obtener resultados acertados. Cuando se use la tarjeta de audio *Creative USB 5.1*, la calibración del software deberá hacerse con una amplitud 0.44 V, y con la tarjeta interna del *laptop DV2135la* con amplitud de 0.30 V.

6.3 Medición ruido propio del ADLX330

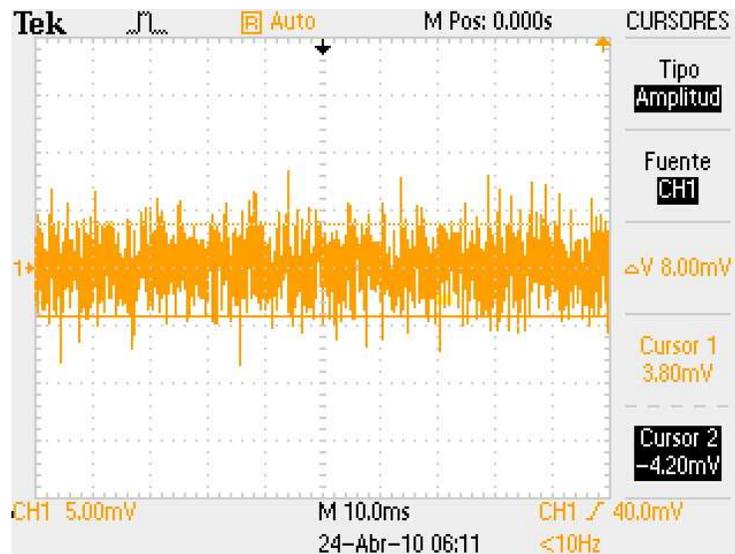
En la figura 38 se puede observar el ruido propio del acelerómetro ADX330, medido en el eje z. El nivel obtenido fue de 7.2 mV, al conectar la salida del sensor directamente al osciloscopio digital, con un voltaje de alimentación de 3.17 V y con el ancho de banda limitado a 500 Hz. Al comparar la amplitud del nivel de ruido, con la sensibilidad del transductor para 1 g, el aporte en amplitud dado por el ruido a la señal de aceleración es del 2 %. Esta constante se mantiene para los ejes X y Y.

Figura 38. Nivel de ruido en la salida Z del acelerómetro ADLX330



Fuente: Osciloscopio digital TDS2024B

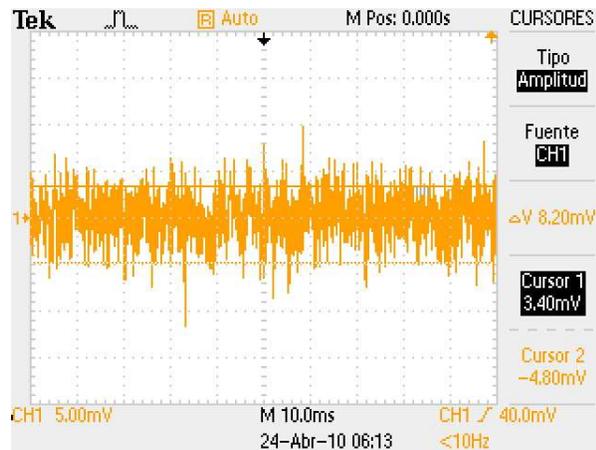
Figura 39. Nivel de ruido a la salida X del acelerómetro ADLX330



Fuente: Osciloscopio digital TDS2024B

El nivel de amplitud del ruido obtenido en las mediciones de los tres ejes, arrojó valores de voltaje similares, como se puede ver en las figuras 38, 39, 40. Por lo tanto, el aporte del ruido en amplitud a la señal de aceleración es constante para X, Y y Z.

Figura 40. Nivel de ruido a la salida Y del acelerómetro ADLX330



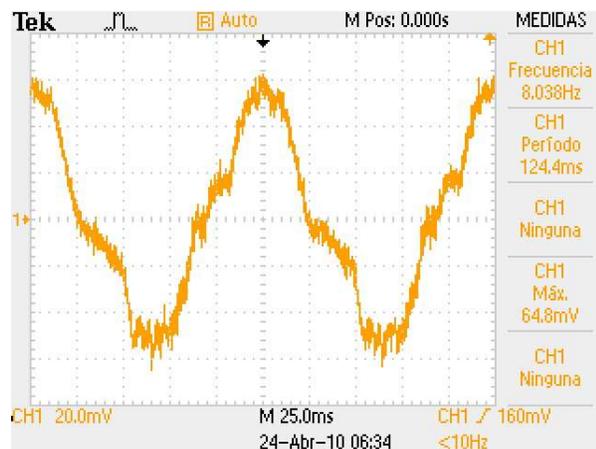
Fuente: Osciloscopio digital TDS2024B

6.4 Medición en octavas de señales sinusoidales

Para conocer el comportamiento en amplitud y frecuencia del vibrómetro, se realizaron mediciones aplicando una señal sinusoidal, cuya frecuencia se iba incrementando en bandas de octava. Posteriormente se compararon los datos obtenidos con el osciloscopio digital, con los del vibrómetro implementado.

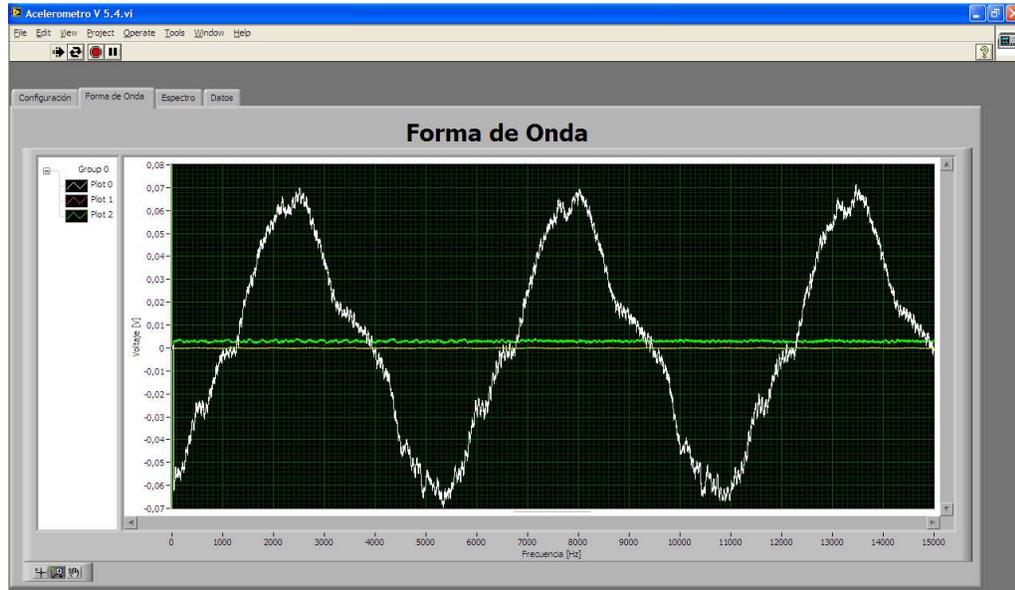
6.4.1 Señal sinusoidal de 8 Hz

Figura 41. Salida del ADLX330 aplicando una señal sinusoidal de 8 Hz



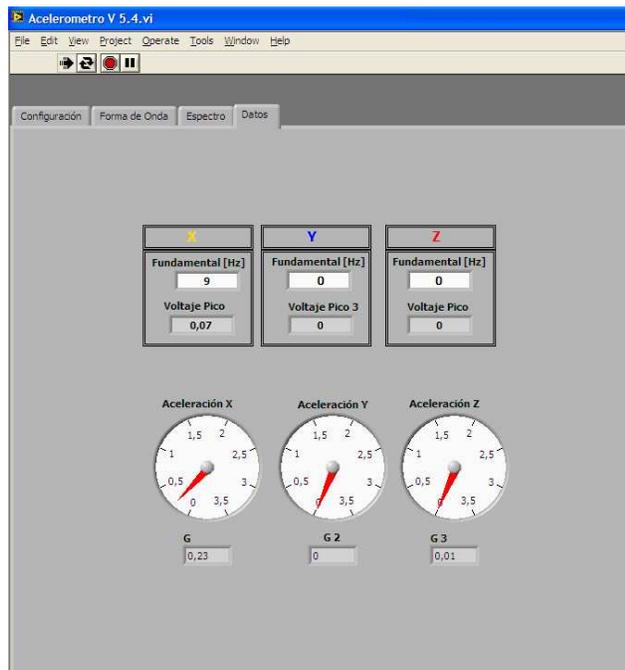
Fuente: Osciloscopio digital TDS2024B

Figura 42. Forma de onda obtenida mediante el software del vibrómetro para 8 Hz



Fuente: Software desarrollado en *LabVIEW*

Figura 43. Valores de amplitud en voltaje y aceleración, obtenidos mediante el *software* del vibrómetro para 8 Hz



Fuente: Software desarrollado en *LabVIEW*

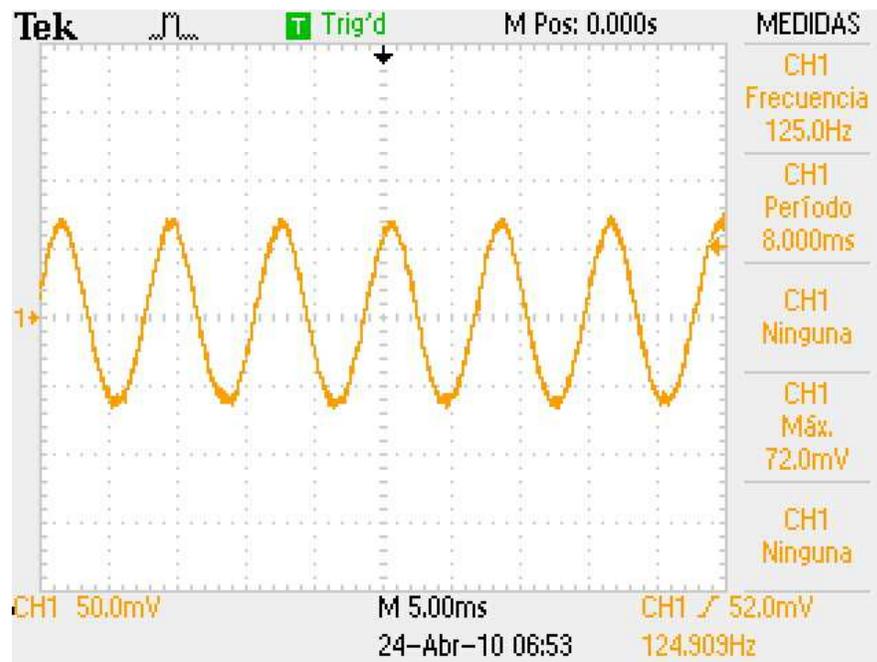
La medición obtenida con el osciloscopio digital, cuando se midió la aceleración producida por una señal sinusoidal de 8 Hz sobre el *subwoofer*, dio como resultado que la señal de salida del sensor, tenía una amplitud máxima de 64.8 mV y una frecuencia de 8 Hz, tal como se puede ver en la figura 41. Estos valores son muy parecidos a los datos obtenidos con el *software* del vibrómetro, el cual para la misma señal de entrada dio una amplitud de 70 mV con una frecuencia de 9 Hz, como se muestra en las graficas 42 y 43.

La variación en los valores de amplitud y frecuencia, obtenidos con el osciloscopio y el *software* del vibrómetro fueron de 5.2 mV y 1 Hz respectivamente. Estas diferencias se deben a que la resolución en amplitud del *software* es de 5 mV y de 1 Hz para la frecuencia, ya que este realiza aproximaciones por redondeo para facilitar la lectura de los datos por parte del usuario.

Adicionalmente en la figura 43, se puede ver el valor de la aceleración en unidades g, equivalentes a la amplitud en voltaje de la señal recibida desde el acelerómetro. Para este caso, 70 mV equivalen a 0,23 g.

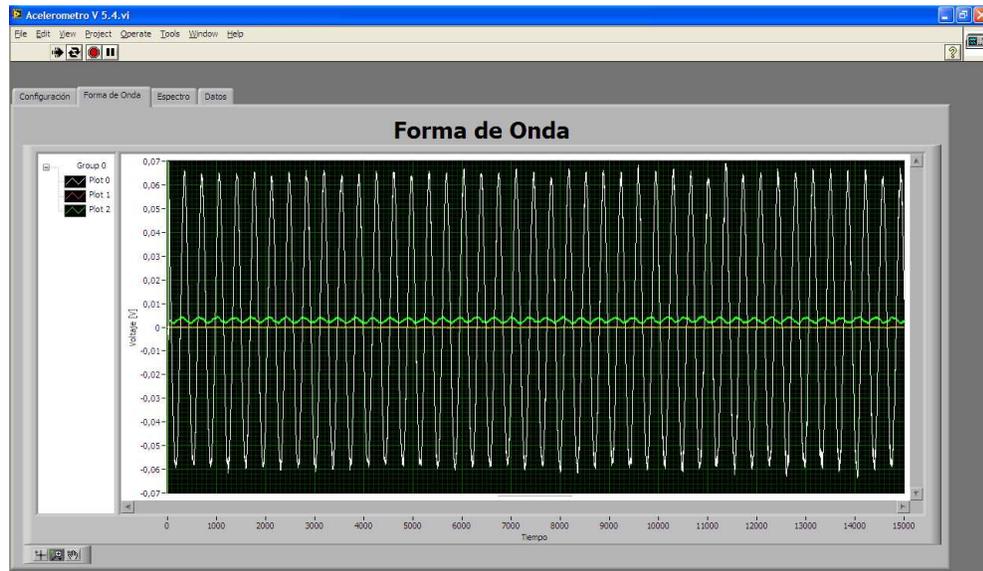
6.4.2 Señal sinusoidal de 125 Hz

Figura 44. Salida del ADXL330 aplicando una señal sinusoidal de 125 Hz



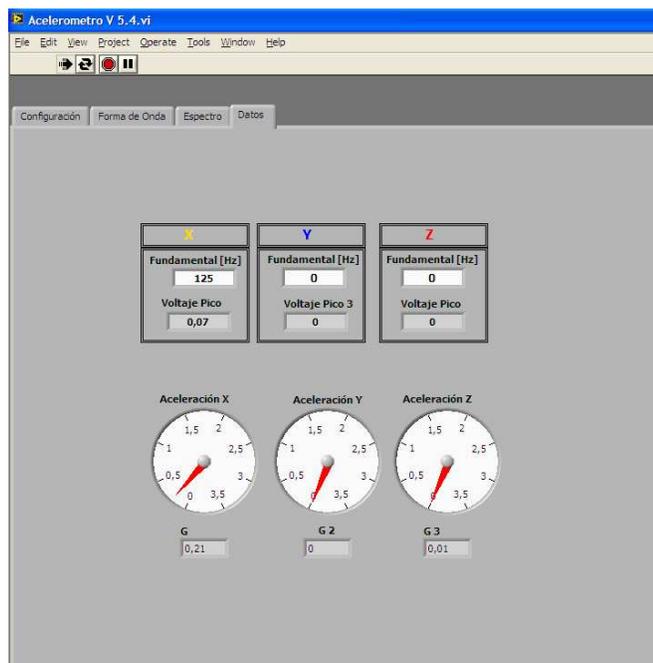
Fuente: Osciloscopio digital TDS2024B

Figura 45. Forma de onda obtenida mediante el software del vibrómetro para 125 Hz



Fuente: Software desarrollado en *LabVIEW*

Figura 46. Valores de amplitud en voltaje y aceleración, obtenidos mediante el software del vibrómetro para 125 Hz



Fuente: Software desarrollado en *LabVIEW*

La medición obtenida con el osciloscopio digital, cuando se midió la aceleración producida por una señal sinusoidal de 125 Hz sobre el *subwoofer*, dio como resultado que la señal de salida del sensor, tenía una amplitud máxima de 72 mV y una frecuencia de 125 Hz, tal como se puede ver en la figura 44. Los datos obtenidos con el *software* del vibrómetro, para la señal de entrada, dieron una amplitud de 70 mV con una frecuencia de 125 Hz, como se muestra en las figuras 45 y 46. En este caso el valor de amplitud marcado por el software del vibrómetro luego de realizar la aproximación fue 70 mV, presentándose una diferencia de 2 mV frente al valor de amplitud marcado por el osciloscopio digital.

6.4.3 Resumen de los datos obtenidos en las mediciones

Tabla 14. Mediciones de frecuencia sobre el eje X

Frecuencia Generador de funciones [Hz]	Frecuencia Osciloscopio [Hz]	Frecuencia Vibrómetro [Hz]	Error absoluto Osciloscopio Vibrómetro [Hz]	Error relativo Osciloscopio Vibrómetro %
4	-	6	-	-
8	8	9	1.00	12.50
16	15.94	16	0.06	0.38
32	31.75	32	0.25	0.79
64	64.27	64	-0.27	-0.42
125	125	126	1.00	0.80
250	251.5	250	-1.50	-0.60
500	500	499	-1.00	-0.20

Tabla 15. Mediciones de voltaje sobre el eje Y

Frecuencia Generador de funciones [Hz]	Voltaje Pico Osciloscopio [mV]	Voltaje Pico Vibrómetro [mV]	Error absoluto Osciloscopio Vibrómetro [mV]	Error relativo Osciloscopio Vibrómetro %
4	72	75	3.00	4.17
8	64.8	70	5.20	8.02
16	75.2	80	4.80	6.38
32	112	110	-2.00	-1.79
64	112	100	-12.00	-10.71
125	72	75	3.00	4.17
250	52	50	-2.00	-3.85
500	40.8	40	-0.80	-1.96

Tabla 16. Mediciones de frecuencia sobre el eje Z

Frecuencia Generador de funciones [Hz]	Frecuencia Osciloscopio [Hz]	Frecuencia Vibrómetro [Hz]	Error absoluto Osciloscopio Vibrómetro [Hz]	Error relativo Osciloscopio Vibrómetro %
4	-	6		
8	8	9	1.00	12.50
16	15.94	16	0.06	0.38
32	31.75	32	0.25	0.79
64	64.27	64	-0.27	-0.42
125	125	125	0.00	0.00
250	251.5	251	-0.50	-0.20
500	500	498	-2.00	-0.40

Tabla 17. Mediciones de voltaje sobre el eje X

Frecuencia Generador de funciones [Hz]	Voltaje Pico Osciloscopio [mV]	Voltaje Pico Vibrómetro [mV]	Error absoluto Osciloscopio Vibrómetro [mV]	Error relativo Osciloscopio Vibrómetro %
4	72	75	3.00	4.17
8	64.8	70	5.20	8.02
16	75.2	80	4.80	6.38
32	112	110	-2.00	-1.79
64	112	110	-2.00	-1.79
125	72	70	-2.00	-2.78
250	52	55	3.00	5.77
500	40.8	40	-0.80	-1.96

Tabla 18. Mediciones de frecuencia sobre el eje Y

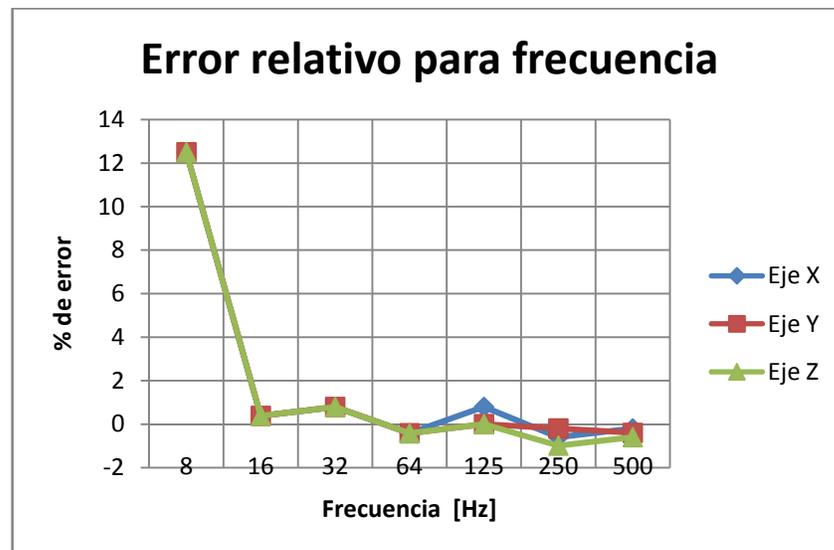
Frecuencia Generador de funciones [Hz]	Frecuencia Osciloscopio [Hz]	Frecuencia Vibrómetro [Hz]	Error absoluto Osciloscopio Vibrómetro [Hz]	Error relativo Osciloscopio Vibrómetro %
4	-	6	-	-
8	8	9	1.00	12.50
16	15.94	16	0.06	0.38
32	31.75	32	0.25	0.79
64	64.27	64	-0.27	-0.42
125	125	125	0.00	0.00
250	251.5	249	-2.50	-0.99
500	500	497	-3.00	-0.60

Tabla 19. Mediciones de voltaje sobre el eje Z

Frecuencia Generador de funciones [Hz]	Voltaje Pico Osciloscopio [mV]	Voltaje Pico Vibrómetro [mV]	Error absoluto Osciloscopio Vibrómetro [mV]	Error relativo Osciloscopio Vibrómetro %
4	72	75	3.00	4.17
8	64.8	70	5.20	8.02
16	75.2	80	4.80	6.38
32	112	100	-12.00	-10.71
64	112	100	-12.00	-10.71
125	72	70	-2.00	-2.78
250	52	50	-2.00	-3.85
500	40.8	40	-0.80	-1.96

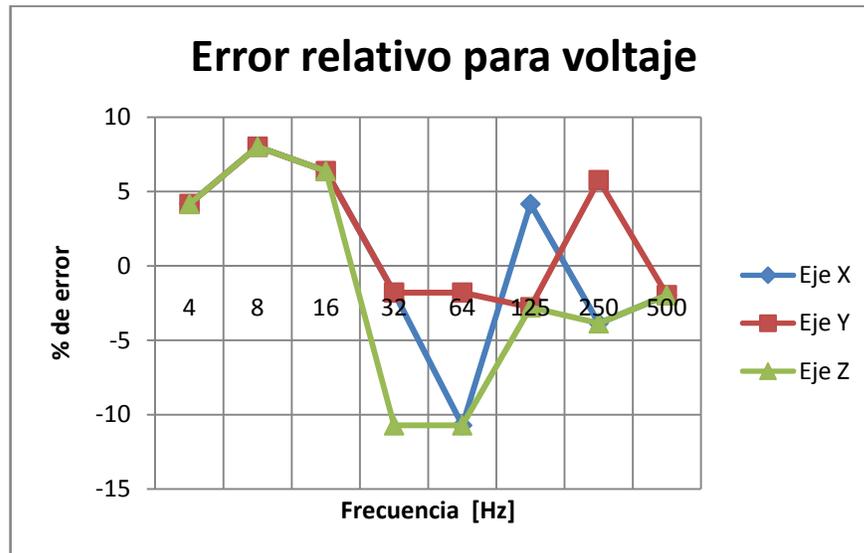
El valor de frecuencia de la señal dada por acelerómetro, cuando se aplicó una señal de 4 Hz al *subwoofer*, no fue mostrada por el osciloscopio, mientras el software del vibrómetro registró valores de 6 Hz. Cuando se observó la señal captada por el osciloscopio, se detectaron señales de alta frecuencia que posiblemente impidieron la detección por parte del osciloscopio. En el caso del software, éste cuenta con un filtro pasa bajos con frecuencia de corte igual a 500 Hz y orden 10, lo cual le permitió registrar este valor de baja frecuencia.

Figura 47. Error relativo en frecuencia



Fuente: Cálculo de error en Excel

Figura 48. Error relativo en voltaje



Fuente: Cálculo de error en Excel

El vibrómetro presenta un error relativo de 12.5 % en la medición de 8 Hz, pero a medida que aumenta la frecuencia el porcentaje de error disminuye, presentando variaciones que no superan el 1 %.

El error relativo en voltaje es mayor comparado con el error relativo en frecuencia. Entre 4 Hz y 16 Hz el comportamiento para los tres ejes es igual, presentando variaciones de hasta un 8.02 %. Entre 32 Hz y 64 Hz, el eje Z el que tiene mayor porcentaje de error, mientras el eje Y tiene un menor error en este rango. Finalmente entre 125 Hz y 500 Hz, el eje Z tiene menor margen de error comparado con los ejes X y Y.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

Con base en el análisis de resultados se pudo concluir que:

Con el desarrollo de este proyecto, se logró implementar en la universidad un vibrómetro de muy bajo costo y fácil uso, sin embargo el sensor no cumple totalmente con los requerimientos establecidos en la norma ISO 8041, lo que no permitiría hacer mediciones oficiales de vibraciones en seres humanos. Para lograr que el vibrómetro cumpla con estos requerimientos, el acelerómetro ADXL330 debe cambiarse por uno que se ajuste a las exigencias internacionales.

Con el vibrómetro desarrollado no es posible medir vibraciones más bajas a 3 Hz, debido a que los condensadores usados a la entrada de las tarjetas de audio, para suprimir el contenido *DC*, tienden a recortar, suprimir y alterar la forma de onda de señales de muy baja frecuencia.

Con base en la figura 47, se puede concluir que el funcionamiento del dispositivo es óptimo en el rango de, 16 Hz a 500 Hz, debido a que el error relativo en frecuencia no supera el 1 %, contrario al funcionamiento entre 8 Hz y 16 Hz, en donde se presenta un error del 12.5 %.

Con base en el análisis de resultados, se determinó que el vibrómetro tiene mayor precisión detectando los valores de frecuencia, en comparación con los valores de voltaje. En estos últimos el error relativo tiene una variación más considerable, llegando en algunos casos al 10.71 %.

Las características técnicas de las tarjetas que se usen como dispositivos de entrada, para el análisis de señal del vibrómetro, pueden alterar el nivel de voltaje procedente del sensor y el calibrador, debido al acople de impedancias entre el hardware del vibrómetro y la entrada de las tarjetas usadas, generando un margen de error en la medición. Así mismo se debe tener en cuenta que tarjetas de audio de baja calidad, presentarán mayores márgenes de error en las mediciones.

7.2 RECOMENDACIONES

Como futuro complemento el software de análisis del vibrómetro, puede incluir una herramienta que permita la exportación de los datos a una hoja de cálculo, para hacer un seguimiento gráfico y cuantitativo, más detallado de las mediciones realizadas en el tiempo.

Para mejorar la precisión del vibrómetro, se puede suprimir el uso de las tarjetas de audio y cambiarlas por tarjetas especializadas en adquisición de datos compatibles con LabVIEW, como la PCI 6014 de la empresa *National Instruments*.

El acelerómetro ADXL330 debe ser sustituido por uno que se ajuste a la normativa internacional, como el acelerómetro triaxial 5313a de Dytran, para poder realizar mediciones en seres humanos más precisas y de carácter oficial.

Implementar las curvas de ponderación W_h , W_z y W_r en el software, establecidas por la norma 2631-1 para la medición de vibraciones en seres humanos.

8. BIBLIOGRAFÍA

AMBARDAR, Ashok, Procesamiento de Señales analógicas y digitales. Segunda edición. México: Thomson, 2002.

BOYLESTAD, Robert L, Electrónica: Teoría de circuitos y dispositivos electrónicos. Octava edición. México: Pearson, 2003.

DORF, Richard C, Circuitos eléctricos. Quinta edición. México: Alfaomega, 2003.

HARRIS, Cyril M, Shock and vibration handbook. Quinta edición. McGraw Hill. 2002.

HSU, Hwei P, Análisis de Fourier. Primera edición. México: Pearson, 1998.

KREYSZIG, Erwin, Matemáticas avanzadas para ingeniería. Tercera edición. México: Limusa S.A., 2004.

LABVIEW, National Instruments. Manual de usuario y ejemplos.

MAGGIOLO, Gustavo Daniel, Detector Sísmico con acelerómetro XYZ MMA7260Q. UTN. Argentina, 2007. 3P.

PALLÁS ARENY, Ramón. Sensores y acondicionamiento de señal. Barcelona: Marcombo, 2007.

SERWAY, Raimond A. Física para ciencias e ingenierías. Sexta edición. México: Thomson, 2005.

GLOSARIO

ACELERACIÓN: Es el cambio de velocidad de una partícula en un intervalo de tiempo, durante el cual ocurre ese cambio. Es una magnitud física vectorial y su unidad en el sistema internacional es el m/s^2 .²²

ACELERÓMETRO: Es un dispositivo que mide la aceleración. Según su construcción pueden ser capacitivos, efecto Hall, piezoeléctricos, entre otros.

AMPLITUD: Máxima posición que presenta una señal a partir del punto de equilibrio.

DSP: (Digital Signal Processing), Procesamiento Digital de Señales.

EJE: Es una línea recta con respecto a la cual una figura geométrica puede rotar.

FRECUENCIA: Representación del número de oscilaciones que una partícula experimenta por intervalo unitario.²³

GRAVEDAD: La gravedad es la aceleración que experimenta un objeto en las cercanías de un planeta o satélite.

IMPEDANCIA: Oposición que presenta un material al paso de cargas eléctricas.

MASA: Es una propiedad de un cuerpo que especifica cuanta resistencia presenta un cuerpo a cambios en su velocidad. Su unidad en el Sistema Internacional es el kilogramo [Kg].²⁴

²² SERWAY, Raimond A. Física para ciencias e ingenierías. Sexta edición. México: Thomson, 2005. 31 p.

²³ SERWAY, Raimond A. Física para ciencias e ingenierías. Sexta edición. México: Thomson, 2005. 457 p.

²⁴ SERWAY, Raimond A. Física para ciencias e ingenierías. Sexta edición. México: Thomson, 2005. 116 p.

PONDERACIÓN: Ajuste realizado a una señal o conjunto de datos, para obtener un resultado normalizado.

RESONANCIA: Es el aumento en la amplitud de un movimiento mecánico, o una señal, debido a la coincidencia de la frecuencia natural con una frecuencia de excitación externa.

RMS: (Root Mean Square), Valor Cuadrático Medio, hace referencia al valor eficaz de una señal.

RUIDO: Cualquier señal no deseada que altera una señal original.

SENSOR: Un sensor es un dispositivo que, a partir de la energía del medio donde se mide, da una señal de salida transducible que es función de la variable medida.²⁵

SI: Sistema Internacional de Unidades.

TRANSDUCTOR: Dispositivo que convierte una señal de una forma física, en una señal correspondiente pero de otra forma física distinta. Es, por tanto, un dispositivo que convierte un tipo de energía en otro.²⁶

VELOCIDAD: Es el desplazamiento de una partícula en un intervalo de tiempo. Es una magnitud física vectorial y su unidad en el sistema internacional es el m/s.²⁷

VIBRACIÓN: Es un término que describe las oscilaciones en un sistema mecánico. Es definido por la frecuencia (o frecuencias) y amplitud.²⁸

²⁵ Pallás Areny, Ramón. Sensores y acondicionadores de señal. Barcelona: Marcombo, 2007. 3 p.

²⁶ Pallás Areny, Ramón. Sensores y acondicionadores de señal. Barcelona: Marcombo, 2007. 3 p.

²⁷ SERWAY, Raimond A. Física para ciencias e ingenierías. Sexta edición. México: Thomson, 2005. 27 p.

²⁸ HARRIS, Cyril M, Shock and vibration handbook. Quinta edición. McGraw Hill. 2002. 1.1 c.

VIBRÓMETRO: Instrumento de medida para determinar las frecuencias de vibración sobre un objeto.

ANEXO 1

MANUAL DEL USUARIO

El siguiente procedimiento es realizado con el fin de ilustrarle a los usuarios, el funcionamiento del sistema de medición de vibraciones (Vibrómetro), haciendo una explicación de la conexión, configuración e integración del hardware y el software.

Elementos requeridos para el correcto funcionamiento del dispositivo:

Tabla 1

<p>-Cable Mini DIN (6 pines)</p> 	<p>-Cable USB</p> 
<p>-Cable TRS</p> 	<p>-Tarjeta externa de audio Creative</p> 

-Acelerómetro ADXL 330 (sensor)



-Computador Portátil



-Caja de acondicionamiento y acople de señal



Fuente: Fotografías en laboratorio

ETAPA 1

LabVIEW detallando la manera de configuración del programa para el procesamiento correcto de las tres señales de entrada.

Botones importantes



: Correr



: Correr Continuamente



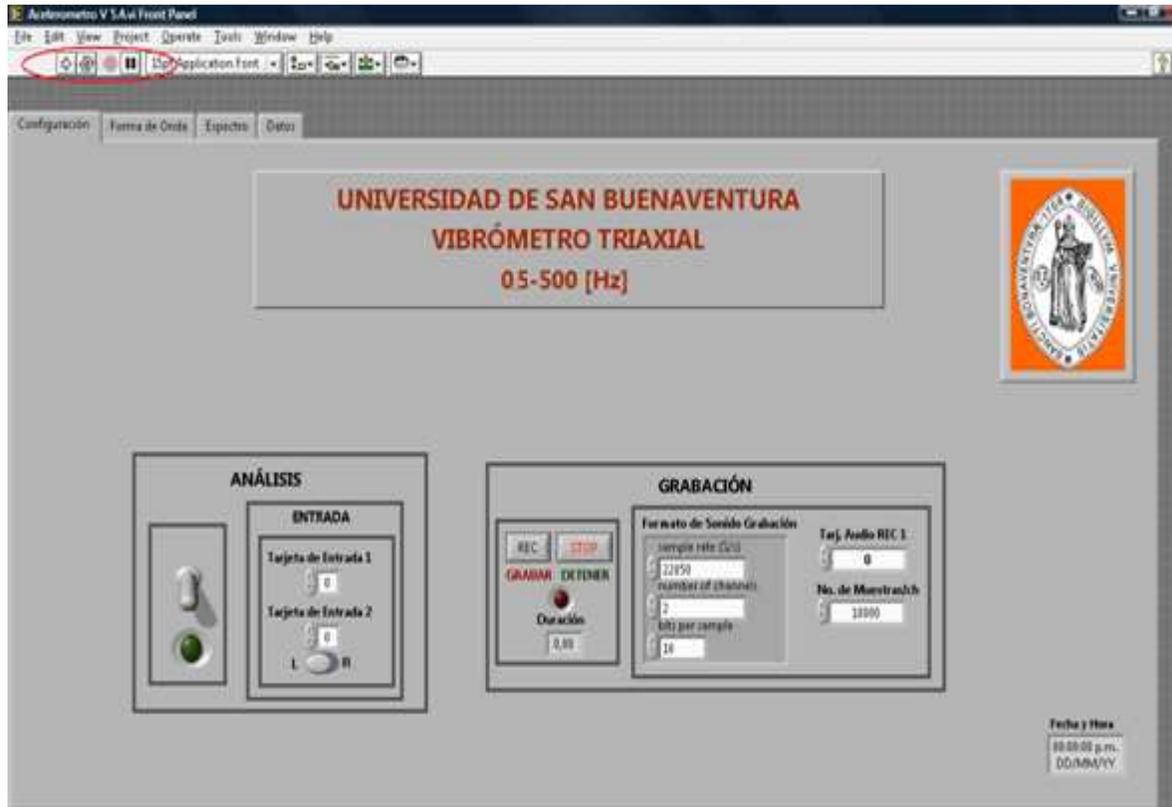
: Abortar ejecución



: Pausar

1. Abrir el programa en LabVIEW

Figura 1: Panel frontal *LabVIEW*



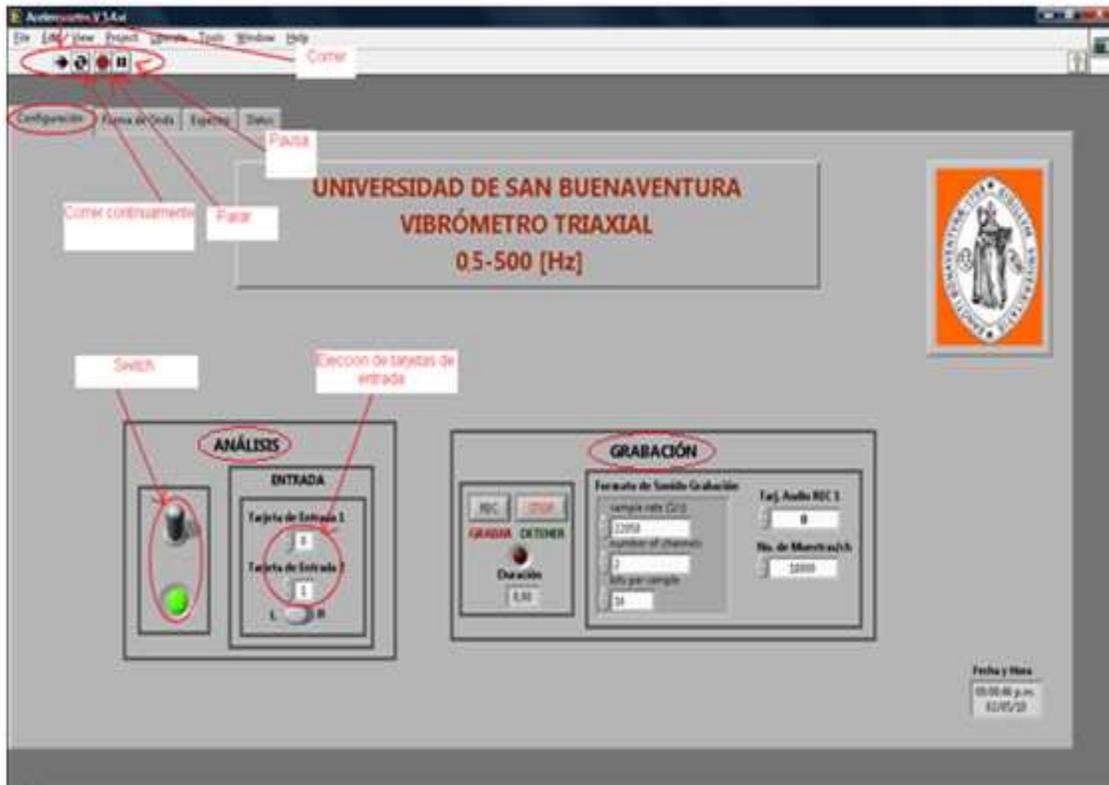
Fuente: Software desarrollado en *LabVIEW*

Para que el programa se ejecute, presione el botón correr continuamente  que está ubicado en la barra de herramientas, luego, presione el Interruptor y podrá ver que el *LED* verde se enciende, comenzando así la ejecución completa del programa.

En la pestaña configuración dentro del recuadro *ANÁLISIS*, para hacer la elección de las tarjetas de ingreso de datos, es conveniente decir que al tener tres salidas análogas provenientes del acelerómetro, se necesita adquirir la información de dos tarjetas diferentes, una externa (Creative) por vía USB equivalente a dos canales de entrada, y otra que es la tarjeta interna del computador, teniendo así los tres canales de entrada necesarios para el procesado de los tres ejes de medición.

En el recuadro *ANÁLISIS* al seleccionar el numero 0 se está haciendo referencia al uso de la tarjeta externa (creative) y la selección del numero 1 implica el uso de la tarjeta interna del computador portátil.

Figura 2: Panel frontal pestaña configuración



Fuente: Software desarrollado en *LabVIEW*

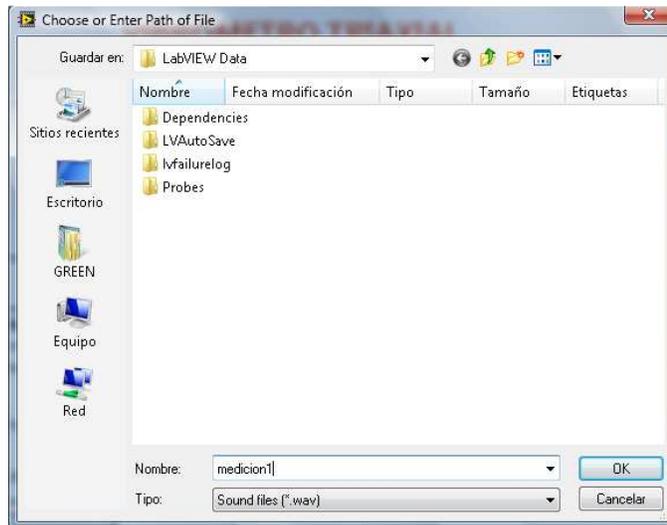
En la figura 2, continuando en la pestaña configuración, dentro del recuadro a la derecha de la pantalla llamado GRABACIÓN, se puede hacer la configuración de los parámetros de captura digital, tales como la tasa de muestreo y los bits de resolución, además de la elección de la tarjeta de captura y procesamiento de datos que se va a utilizar, para generar una grabación en formato de audio.

Para realizar la grabación se oprime el botón **REC** el cual abre una ventana que permite al usuario elegir las opciones de guardado de la grabación con la extensión .WAV, en donde se puede seleccionar libremente el destino del archivo.

Al presionar OK se enciende el LED rojo que indica que está grabando, al presionar **STOP** termina la grabación y queda guardada automáticamente conforme al tiempo que muestra el indicador.

(Cuando el sistema está realizando la grabación, no se pueden observar los datos de las pantallas en tiempo real.)

Figura 3: Ventana de exploración



Fuente: Software desarrollado en *LabVIEW*

ETAPA 2

Forma de realizar la correcta conexión del Hardware para integrarlo al software.

Figura 4: salidas y puerto de alimentación *USB*



Fuente: Fotografías en laboratorio

Conecte con el cable *USB* la caja de acondicionamiento de señal a un puerto de entrada del computador portátil, con el fin de proveer la alimentación de 5 Voltios al circuito interno de acople como se muestra en la figura 4.

Figura 5: Alimentación del circuito de acople



Fuente: Fotografía en laboratorio

Ahora con el cable TRS se conecta la salida de la señal de calibración en la caja de acople, a la entrada de la tarjeta de sonido externa (Creative) la cual está comunicada por conexión USB al computador como se ve en la figura 5.

(Se debe hacer la previa instalación del driver controlador para el reconocimiento de la tarjeta en el computador portátil)

Figura 6: Conexión señal de calibración a tarjeta CREATIVE



Fuente: Fotografía en laboratorio

Al realizar el anterior procedimiento, el usuario debe remitirse nuevamente a LabVIEW para realizar el proceso completo de calibración de los niveles de entrada.

ETAPA 3

Figura 7: Ajuste del nivel de entrada de la señal de calibración.



Fuente: Software desarrollado en *LabVIEW*

Con las anteriores etapas realizadas correctamente y el programa ejecutándose, ubíquese en la pestaña configuración, en el recuadro ANÁLISIS dentro de la opción Tarjeta de entrada 1 coloque el número 0, para usar la tarjeta externa (CREATIVE).

Luego pase a la pestaña Datos y observe que indique en los ejes X y Y una frecuencia de 103 Hz, donde posteriormente debe abrir el controlador de los dispositivos de grabación de la siguiente manera.

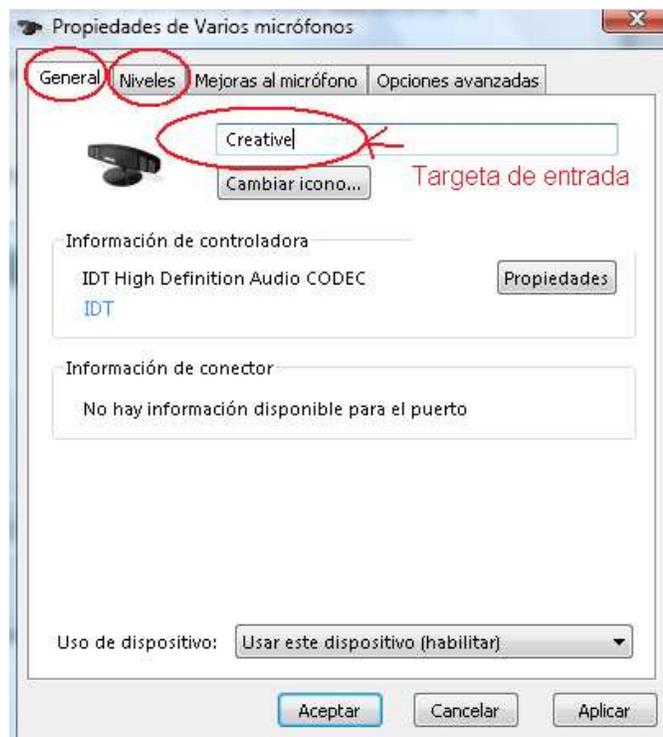
Figura 8: Ajuste de niveles de entrada



Fuente: Imagen de controles de nivel de PC

Escoja la tarjeta (*CREATIVE*) y proceda a aumentar o disminuir el nivel de entrada, ajustándolo hasta que logre obtener un voltaje pico de 0.44 V o 440 mV como se muestra en la figura 8.

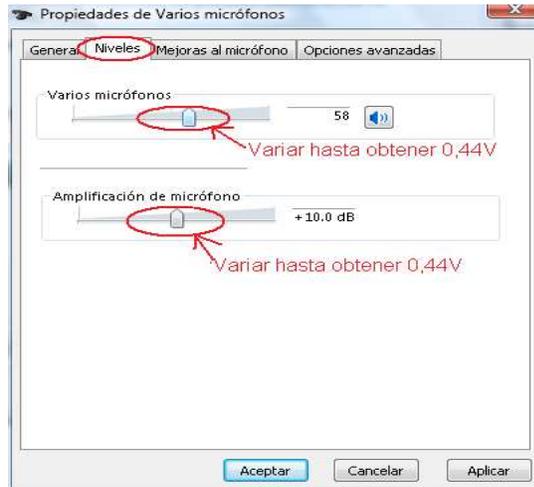
Figura 9: Ajuste de niveles de señal de entrada



Fuente: Imagen de controles de nivel de PC

Se realiza la variación de los niveles en esta ventana hasta obtener 440mV con la tarjeta CREATIVE, y 300 mV con la tarjeta interna del computador.

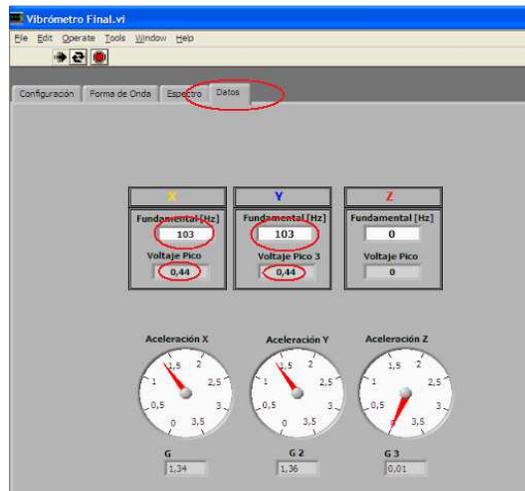
Figura 10: Ajuste de niveles de señal de entrada



Fuente: Imagen de controles de nivel de PC

En la figura 11 se puede observar la manera como se calibran los 440 mV de nivel de señal de entrada con la tarjeta CREATIVE.

Figura 10: Ajuste de niveles de señal de entrada voltaje pico



Fuente: Software desarrollado en LabVIEW

Después de realizar el mismo proceso de calibrando de la señal con la tarjeta del computador, (con 300mv de voltaje pico en el eje Z), es el momento de conectar el sensor y adaptar las salidas de las señales acondicionadas como se ve en la figura 12, a las entradas de las tarjetas de audio, para comenzar a recibir las señales del acelerómetro en los ejes Z, Y, Z.

Figura 12: Conexión sensor, circuito acople de señal



Fuente: Fotografía en laboratorio

Figura 13: Conexión sensor, circuito acople de señal ejes X y Y.



Fuente: Fotografía en laboratorio

Ahora el mismo procedimiento para la conexión de la señal análoga Z.

Figura 14: Acople de la tercera señal de medición



Fuente: Fotografía en laboratorio

Conecte las salidas correctamente como se muestra en las figuras 13 y 14, y realice la correcta ejecución de las anteriores etapas de ejecución del programa, luego coloque el sensor en la superficie vibratoria y comience a realizar las mediciones.

ANEXO 2

PRESUPUESTO

COSTO GLOBAL DEL PROYECTO POR FUENTES DE FINANCIACIÓN (En miles de \$)			
RUBROS	FUENTES		TOTAL
	Universidad de San Buenaventura	Contrapartida	
EQUIPOS	7000	3410	10410
MATERIALES	0	365	365
SERVICIOS TÉCNICOS	0	156	156
GASTOS DE PERSONAL	0	5000	5000
DOCUMENTACIÓN	0	220	220
SOFTWARE	0	9420	9420
<i>TOTAL</i>	3200	3615	25571

DESCRIPCIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE LOS EQUIPOS DE USO PROPIO (En miles de \$)	
EQUIPO	VALOR (CONTRAPARTIDA)
Multímetro Digital TCM-170	80
Fuente Lineal Regulada	130
Computador 1	1500
Computador 2	1700
<i>TOTAL</i>	<i>3410</i>

DESCRIPCIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE LOS EQUIPOS DE LA UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA (En miles de \$)	
EQUIPO	VALOR (CONTRAPARTIDA)
Osciloscopio	5000
Computador	1200
Generador de funciones	800
<i>TOTAL</i>	<i>7000</i>

MATERIALES Y SUMINISTROS (En miles de \$)	
<i>Materiales</i>	<i>Valor</i>
Acelerómetro	75
Cables	25
Elementos electrónicos activos	40
Elementos electrónicos pasivos	15
Tarjeta de audio <i>Creative</i> USB	210
TOTAL	365

SERVICIOS TÉCNICOS (En miles de \$)	
Tipo de servicio	Valor
Carcasa	80
Circuitos Impresos	76
TOTAL	156

DESCRIPCIÓN DE LOS GASTOS DE PERSONAL (En miles de \$)				
INVESTIGADOR /AUXILIAR	FORMACIÓN	FUNCIÓN DENTRO DEL PROYECTO	DEDICACIÓN	TOTAL
				En miles de \$
Juan Martín Aponte	Ingeniero	Proponente	1 Hora semanal	2500
Oscar Esneider Acosta	Ingeniero	Proponente	1 Hora semanal	2500
TOTAL				5000

DOCUMENTACIÓN (En miles de \$)	
<i>Tipo</i>	<i>Valor</i>
Papelería	220
Total	220

SOFTWARE (En miles de \$)	
<i>Nombre</i>	Valor Licencia
LabVIEW	5720
Aplication builder	2200
CADSOFT Eagle	1500
<i>TOTAL</i>	<i>9420</i>