



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Desarrollo de un sistema de adquisición y medición simultáneo de señales de máquinas rotativas empleando emisión acústica, vibraciones mecánicas y velocidad

Bernardo Andrés Cardona Noreña

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Departamento de Eléctrica, Electrónica y Computación
Manizales, Colombia
2013

Desarrollo de un sistema de adquisición y medición simultáneo de señales de máquinas rotativas empleando emisión acústica, vibraciones mecánicas y velocidad

Bernardo Andrés Cardona Noreña

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería - Automatización Industrial

Director:

Ph.D. César Germán Castellanos Domínguez

Grupo de Investigación:

Grupo de Procesamiento de Señales y Reconocimiento

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación
Manizales, Colombia

2013

System development to acquisition and measurement of simultaneous signals from rotary machines using acoustic emission, mechanical vibration and speed

Bernardo Andrés Cardona Noreña

Thesis submitted as partial requirement to apply for degree of:
Master in Engineering - Industrial Automation

Advisor:

Ph.D. César Germán Castellanos Domínguez

Research group:

Signal processing and recognition group

Universidad Nacional de Colombia
Faculty of Engineering and Architecture
Department of Electrical, Electronic y Computation Engineering
Manizales, Colombia

2013

Dedico este trabajo a mi familia y especialmente a Luisa María, eres la mujer que amé, que amo, que seguiré amando, dándole a mi corazón el calor que lo descongeló de la soledad. ¡TE AMO MUCHO!

Agradecimientos

Deseo expresar mi agradecimiento a cada una de las personas que me colaboraron y participaron en el desarrollo de este trabajo. Gracias al profesor Germán Castellanos, quien se encargó de dirigir, acompañar y apoyar éste trabajo durante su desarrollo. Además, agradecer a todos los compañeros del Grupo de Procesamiento de Señales y Reconocimiento (Control y Procesamiento Digital de Señales) por la ayuda y el apoyo durante toda la etapa de desarrollo. A mi familia que me dio incondicionalmente, en todo momento, los ánimos de seguir adelante y enfrentar cada obstáculo que se presentó en el camino. Agradezco al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación - COLCIENCIAS y la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales por el soporte financiero y administrativo prestado dentro del proyecto de investigación titulado "Sistema Autónomo de Monitoreo de Vibraciones para Diagnóstico de Fallas no Estacionarias", con el código: RC430-2011 del cual esta tesis de maestría forma parte de los resultados.

Resumen

La presente tesis esta enfocada en el desarrollo de un sistema de adquisición de diferentes tipos de señales como vibración mecánica, emisión acústica y velocidad para su utilización en el laboratorio de máquinas rotativas de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. El sistema permite el monitoreo de condición de una máquina rotativa con la posibilidad de generar un conjunto de bases de datos para el desarrollo de metodologías de análisis orientadas al diagnóstico del estado de la máquina. El sistema brinda la versatilidad suficiente para emplear diferentes tipos de sensores y debido a su carácter modular permite una escalabilidad según los requerimientos y procesos que se quieran medir en una máquina rotativa en general. Dentro de los módulos implementados se encuentran los siguientes: *i*) un módulo de vibraciones, el cual cuenta con 5 canales de adquisición simultáneos; *ii*) un módulo de emisión acústica con 3 canales para sensores que operan en 3 rangos diferentes de frecuencia; *iii*) un módulo de sonido de 1 canal para la conexión de micrófono de precisión y adquisición de señales de vibración a través de ondas sonoras; y por último, *iv*) un módulo de velocidad para la captura del patrón frecuencia de giro del eje de la máquina. El conjunto completo de señales adquiridas es transmitido a una plataforma de desarrollo (FPGA, DSP, Microcontrolador, entre otros), empleando un protocolo de transmisión SPI, de manera que el transporte y almacenamiento de los datos se pueda dar bajo un mismo proceso. El desarrollo de este sistema forma parte del proyecto de investigación titulado *Sistema autónomo de monitoreo de vibraciones para el diagnóstico de fallas no estacionarias en máquinas rotativas*.

Palabras clave: Vibraciones Mecánicas, Sistema de Adquisición, Emisión Acústica, Máquinas Rotativas, Módulos, Velocidad, Sonido.

Abstract

This thesis is focused in an acquisition system development for several signal types such as mechanical vibration, acoustic emission and speed. The system will be used in laboratory of rotating machines at Universidad Nacional de Colombia - Manizales and allows the condition monitoring of a rotating machine generating a database sets in order to develop different methodologies oriented to machine diagnostic. The system gives an enough versatility to employ several types of sensors and its modular style provides a scalability according with the process requirements that will be monitored. Implemented modules are as follows: *i*) a vibration module that has 5 simultaneous acquisition channels; *ii*) an acoustic emission module with 3 channels for different sensors that operate in distinct spectral ranges; *iii*) a sound module with 1 channel that connects a precision microphone and acquires a vibration signal from sound waves; and finally, *iv*) a speed module that captures the rotational shaft frequency from the machine. The overall set of measurements is transmitted to a development device (FPGA, DSP, Micro-controller, etc), employing a SPI transmission protocol

that allows, under a same frame, the data transport and storage. This development was carry out under a research project entitled *Sistema autónomo de monitoreo de vibraciones para el diagnóstico de fallas no estacionarias en máquinas rotativas*.

Keywords: Mechanical Vibration, Acquisition System, Acoustic Emission, Rotating Machines, Modules, Speed, Sound

Contenido

| | |
|--|------------|
| Agradecimientos | ix |
| Resumen | xi |
| Lista de símbolos | xix |
| 1. Preliminares | 1 |
| 1.1. Introducción | 1 |
| 1.2. Planteamiento del problema | 3 |
| 1.3. Objetivos | 4 |
| 1.3.1. Objetivo general | 4 |
| 1.3.2. Objetivos específicos | 5 |
| 1.4. Organización del trabajo | 5 |
| 2. Marco teórico | 6 |
| 2.1. Vibración mecánica | 6 |
| 2.1.1. Vibraciones mecánicas en máquinas rotativas | 6 |
| 2.1.2. Conceptos básicos y terminología en vibraciones | 7 |
| 2.2. Emisión acústica | 13 |
| 2.2.1. Propagación y atenuación de EA | 14 |
| 2.2.2. EA en máquinas rotativas | 15 |
| 2.3. Elementos y parámetros de diseño electrónico | 17 |
| 2.3.1. Sensores piezoeléctricos | 17 |
| 2.3.2. Estandar IEPE | 19 |
| 2.3.3. Acondicionamiento de señal | 20 |
| 2.3.4. Conversores ADC | 21 |
| 2.3.5. Protocolo SPI | 21 |
| 2.3.6. Diseño de PCB | 23 |
| 3. Marco experimental | 31 |
| 3.1. Requerimientos funcionales | 31 |
| 3.2. Diseño del sistema | 32 |
| 3.2.1. Módulo vibraciones mecánicas | 32 |
| 3.2.2. Módulo emisión acústica | 35 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 3.2.3. | Módulo sonido | 38 |
| 3.2.4. | Módulo velocidad | 41 |
| 3.2.5. | Módulo fuente de alimentación | 42 |
| 3.2.6. | Protocolo de pruebas | 43 |
| 4. | Resultados y discusión | 48 |
| 4.1. | Módulo vibraciones | 48 |
| 4.1.1. | Prueba 1: Señal del generador a 58 Hz | 50 |
| 4.1.2. | Prueba 2: Señal del generador a 12 kHz | 50 |
| 4.1.3. | Prueba 3: Señal del acelerómetro | 51 |
| 4.1.4. | Discusión | 51 |
| 4.2. | Módulo emisión acústica | 52 |
| 4.2.1. | Prueba 1: Señal del generador a 15 kHz en R3 α | 52 |
| 4.2.2. | Prueba 2: Señal del generador a 40 kHz en R3 α | 54 |
| 4.2.3. | Prueba 3: Señal del generador a 95 kHz en R3 α | 54 |
| 4.2.4. | Prueba 4: Señal del sensor R3 α | 54 |
| 4.2.5. | Prueba 5: Señal del generador a 20 kHz en R6a | 55 |
| 4.2.6. | Prueba 6: Señal del generador a 45 kHz en R6a | 56 |
| 4.2.7. | Prueba 7: Señal del generador a 120 kHz en R6a | 56 |
| 4.2.8. | Prueba 8: Señal del sensor R6a | 56 |
| 4.2.9. | Prueba 9: Señal del generador a 30 kHz en R15a | 58 |
| 4.2.10. | Prueba 10: Señal del generador a 150 kHz en R15a | 58 |
| 4.2.11. | Prueba 11: Señal del generador a 430 kHz en R15a | 58 |
| 4.2.12. | Prueba 12: Señal del sensor en R15a | 60 |
| 4.2.13. | Discusión | 60 |
| 4.3. | Módulo sonido | 61 |
| 4.3.1. | Prueba 1: Señal del generador a 5 Hz en micrófono | 61 |
| 4.3.2. | Prueba 2: Señal del generador a 100 Hz en el micrófono | 62 |
| 4.3.3. | Prueba 3: Señal del generador a 22 kHz en micrófono | 63 |
| 4.3.4. | Discusión | 63 |
| 4.4. | Módulo velocidad | 64 |
| 4.4.1. | Prueba 1: Señal de los sensores inductivos | 65 |
| 4.4.2. | Discusión | 65 |
| 4.5. | Salida digital SPI del ADC | 65 |
| 5. | Conclusiones | 69 |
| 6. | Perspectivas | 70 |
| | Bibliografía | 71 |

Lista de figuras

| | |
|--|----|
| 2-1. Composición de la señal de vibración de acuerdo a las contribuciones espectrales | 7 |
| 2-2. Respuesta en frecuencia según el tipo de medición: Desplazamiento, Velocidad y Aceleración de vibración | 9 |
| 2-3. Concepto de fase aplicado a máquinas rotativas | 9 |
| 2-4. Uso de la señal de fase en conjunto con la señal de vibración | 10 |
| 2-5. Comportamiento de una máquina rotativa de acuerdo a la velocidad de giro | 11 |
| 2-6. Niveles de vibración permisible - Tomado de la Norma ISO 10816 | 12 |
| 2-7. Morfología de una señal EA. | 13 |
| 2-8. Onda Rayleigh. | 14 |
| 2-9. Señal típica de EA [19]. | 16 |
| 2-10. Materiales acoplantes a diferentes frecuencias según la forma de propagación de las ondas. | 17 |
| 2-11. Configuración interna de un sensor piezoeléctrico. | 18 |
| 2-12. Modelos de carga y tensión para sensores piezoeléctricos. | 19 |
| 2-13. Principio IEPE | 19 |
| 2-14. Rango dinámico de transductores IEPE | 20 |
| 2-15. Conversor ADC Delta-Sigma | 21 |
| 2-16. BUS SPI | 22 |
| 2-17. Señal de los modos SPI | 23 |
| 2-18. Enumeración de las capas [IPC-D-350] | 25 |
| 2-19. Construcción de líneas de transmisión en circuito impreso [16] | 27 |
| 3-1. Diagrama de bloques del sistema completo | 32 |
| 3-2. Diagrama del módulo de vibraciones mecánicas | 32 |
| 3-3. Sensor triaxial | 33 |
| 3-4. Diagrama del módulo de emisión acústica | 35 |
| 3-5. Diagrama del módulo de emisión acústica completa | 36 |
| 3-6. Sensores acústicos $R3\alpha$, $R6\alpha$, $R15\alpha$ | 36 |
| 3-7. Amplificador acústico | 37 |
| 3-8. Caracterización Micrófono | 38 |
| 3-9. Diagrama del módulo de sonido | 39 |
| 3-10. Micrófono | 39 |
| 3-11. Amplificador micrófono | 40 |

| | |
|---|----|
| 3-12. Diagrama del módulo de velocidad | 41 |
| 3-13. Sensor de proximidad | 41 |
| 3-14. Acondicionamiento Transistor | 42 |
| 3-15. Fuente de alimentación | 42 |
| 4-1. Módulo vibraciones | 48 |
| 4-2. Filtro pasa bajas para la señal de vibración mecánica con una frecuencia de corte de 10 kHz | 49 |
| 4-3. Respuesta en cada etapa del módulo de vibraciones empleando una señal adquirida del generador de señales a 58 Hz. | 50 |
| 4-4. Respuesta en cada etapa del módulo de vibraciones empleando una señal adquirida del generador de señales a 12 kHz. | 50 |
| 4-5. Respuesta en cada etapa del módulo de vibraciones empleando una señal adquirida con un acelerómetro. | 51 |
| 4-6. Módulo emisión acústica. | 52 |
| 4-7. Filtros pasa banda en sensores de emisión acústica. | 53 |
| 4-8. Respuesta en cada etapa del sensor R3 α empleando una señal adquirida del generador de señales a 15 kHz. | 53 |
| 4-9. Respuesta en cada etapa del sensor R3 α empleando una señal adquirida del generador de señales a 40 kHz. | 54 |
| 4-10. Respuesta en cada etapa del sensor R3 α empleando una señal adquirida del generador de señales a 95 kHz. | 55 |
| 4-11. Respuesta en cada etapa del sensor R3 α empleando una señal adquirida en el banco de pruebas. | 55 |
| 4-12. Respuesta en cada etapa del sensor R6a empleando una señal adquirida del generador de señales a 20 kHz. | 56 |
| 4-13. Respuesta en cada etapa del sensor R6a empleando una señal adquirida del generador de señales a 45 kHz. | 57 |
| 4-14. Respuesta en cada etapa del sensor R6a empleando una señal adquirida del generador de señales a 120 kHz. | 57 |
| 4-15. Respuesta en cada etapa del sensor R6a empleando una señal de emisión acústica. | 58 |
| 4-16. Respuesta en cada etapa del sensor R15a empleando una señal adquirida del generador de señales a 30 kHz. | 59 |
| 4-17. Respuesta en cada etapa del sensor R15a empleando una señal adquirida del generador de señales a 150 kHz. | 59 |
| 4-18. Respuesta en cada etapa del sensor R15a empleando una señal adquirida del generador de señales a 430 kHz. | 60 |
| 4-19. Respuesta en cada etapa del sensor R6a empleando una señal de emisión acústica. | 60 |

| | |
|--|----|
| 4-20.Módulo sonido | 61 |
| 4-21.Filtro pasa banda empleado en el Micrófono con frecuencias de corte entre 20 Hz - 20 kHz. | 62 |
| 4-22.Respuesta en cada etapa del micrófono empleando una señal adquirida del generador de señales a 5 Hz. | 62 |
| 4-23.Respuesta en cada etapa del micrófono empleando una señal adquirida del generador de señales a 100 Hz. | 63 |
| 4-24.Respuesta en cada etapa del micrófono empleando una señal adquirida del generador de señales a 22 kHz. | 64 |
| 4-25.Módulo velocidad | 64 |
| 4-26.Señal de sensores en eje del motor | 65 |
| 4-27.Señal SPI del ADC | 65 |
| 4-28.Señal SPI del ADC con banderas de control para transmisión sincronizada de datos. | 66 |

Lista de tablas

| | |
|--|----|
| 2-1. Factores que afectan la amplitud de la respuesta del sensor | 14 |
| 2-2. Materiales acoplantes a diferentes rangos de temperatura. | 17 |
| 2-3. Modo del BUS SPI | 22 |
| 2-4. Tipos de laminado y operaciones máxima de temperatura [16] | 25 |
| 2-5. Definición física de las capas IPC-D-350 | 26 |
| 2-6. Constantes dieléctricos de materiales de circuitos impresos[16] | 30 |
| 3-1. Requerimientos funcionales | 31 |
| 3-2. Características eléctricas del sensor triaxial | 33 |
| 3-3. Características eléctricas del micrófono | 39 |
| 3-4. Características sensor de proximidad | 41 |
| 3-5. Frecuencias críticas para las pruebas de cada módulo de adquisición | 43 |
| 3-6. Imágenes tomadas para cada módulo de adquisición. | 46 |
| 3-7. Caracterización micrófono | 47 |
| 4-1. Respuesta del filtro pasa bajas para la señal de vibración. | 49 |
| 4-2. Respuesta filtro pasa banda en emisión acústica | 67 |
| 4-3. Respuesta filtro pasa banda para el micrófono | 68 |

Lista de símbolos

Símbolos con letras latinas

| Símbolo | Término | Unidad SI | Definición |
|---------|--------------------------------------|--------------|------------|
| A | Amplitud de aceleración de vibración | $m/seg^2(g)$ | Ec...2 – 2 |
| A | Amplitud de la señal de vibración | 1 | Ec...2 – 1 |
| F | Fuerza | 1 | Ec...2 – 3 |
| S | Factor de estabilidad | 1 | Ec...2 – 3 |
| V | Amplitud de velocidad de vibración | mm/seg | Ec...2 – 2 |
| f | Frecuencia de giro de la máquina | Hz | Ec...2 – 2 |
| f | Frecuencia | Hz | Ec...2 – 1 |
| q | Carga | 1 | Ec...2 – 3 |
| t | Tiempo continuo | seg | Ec...2 – 1 |
| x | Señal de vibración en el tiempo | 1 | Ec...2 – 1 |

Símbolos con letras griegas

| Símbolo | Término | Unidad SI | Definición |
|-----------|-------------------------------|-----------|------------|
| φ | Fase de la señal de vibración | 1 | Ec...2 – 1 |

Subíndices

| Subíndice | Término | Definición |
|-----------|---|------------|
| i | Cada componente o mecanismo de la máquina | Ec... 2-1 |

Abreviaturas

| Abreviatura | Término |
|-------------|--|
| FPGA | Arreglo de compuertas de campo programable |
| DSP | Procesamiento digital de señales |
| SPI | Periféricos de interfaz serial |
| RMS | Raíz media cuadrática |
| EA | Emisión acústica |
| IEPE | Electrónica integrada piezoeléctrica |
| AC | Corriente alterna |
| DC | Corriente directa |
| ADC | Convertor análogo digital |
| SCLK | Señal de reloj |
| MISO | Entrada maestro-salida esclavo |
| MOSI | Salida maestro-entrada esclavo |
| CS | Seleccionador de esclavo |
| MSB | Bit más significativo |
| LSB | Bit menos significativo |
| CPOL | Polaridad de señal de reloj |
| CPHA | Fase de señal de reloj |
| PCB | Tarjeta de circuito impreso |
| EMI | Interferencia Electromagnética |

1 Preliminares

1.1. Introducción

En el mundo real existen un sin número de señales físicas que nos rodean y que podemos percibir con nuestros sentidos, no obstante, con la ayuda de la electrónica se han generado soluciones con base en la implementación de sistemas que tengan la capacidad de obtener las señales y transducir el fenómeno natural, convirtiendo éstas en datos manipulables que pueden ser visualizados, almacenados y procesados. En el campo industrial, resulta de gran interés monitorear diferentes clases de procesos que permitan obtener mayor información útil acerca del comportamiento de las máquinas que allí operan, y adicionalmente, con esta información se pueda llegar a una inferencia de diagnóstico que contribuya con un adecuado diseño de los programas de mantenimiento.

En este sentido, el análisis de vibraciones mecánicas y emisión acústica son algunas de las técnicas de mantenimiento preventivo más utilizadas debido al menor costo en relación con las otras técnicas como termografía, tintas penetrantes o ensayos destructivos, y además, brindan la posibilidad de efectuar el análisis de máquina sin necesidad de hacer una parada en el proceso de producción, obteniendo resultados satisfactorios en el diagnóstico de fallas en máquinas rotativas. No obstante todas estas cualidades, este tipo de técnicas de monitoreo se encuentran aún en continuo desarrollo, de manera tal que sea posible proveer una mayor información al técnico encargado del mantenimiento de la planta industrial sin la necesidad de que éste posea una amplia experiencia en este campo. En la mayoría de los casos, un diagnóstico acertado de la falla está directamente relacionado con la experiencia del técnico que analiza las señales capturadas, y por ende, un error en la interpretación de dicha información generalmente conlleva el cambio inadecuado de piezas.

Los métodos tradicionales para el análisis de vibraciones y emisión acústica emplean la transformada de Fourier como principal herramienta, debido al alto contenido de información que ésta representa. Pero esta información no refleja los cambios producidos por fallas tempranas presentes en los estados transitorios (arranque, parada), los regímenes variables de carga y velocidad y el régimen permanente de carga. En los estados transitorios la señal de vibración de la máquina presenta un comportamiento aleatorio y en muchos casos no estacionario, debido a las características mismas de la máquina y el ruido introducido por el entorno de trabajo. Durante los cambios de velocidad de la máquina se generan puntos de resonancia

en las diferentes piezas de la máquina, que al combinarse con el cambio mismo de velocidad, hacen imposible el diagnóstico de fallas por medio del espectro obtenido a través de las transformaciones de Fourier. Los regímenes de carga variable, presentan la particularidad de introducir altos componentes de ruido y cambios fuertes en la velocidad, que enmascaran la información, desplazan el espectro en el tiempo y reducen las probabilidades de acierto de una falla. Mientras que, en el régimen permanente, el reto es identificar la falla en un estado temprano de formación, lo cual es difícil por la aleatoriedad de la componente de la falla en la señal proveniente de la máquina.

Un elemento adicional en el monitoreo de condición viene dado por el pronóstico de vida útil remanente de la máquina, el cual es el objetivo último de cualquier tipo de análisis de diagnóstico, pero en las industrias colombianas prefieren subcontratar a una persona que tenga una amplia experiencia en el campo, para tomar decisiones acerca las posibles paradas de mantenimiento que permitan minimizar el riesgo y costos totales de operación. Para mejorar la calidad del pronóstico, es necesario implementar estrategias apropiadas que fortalezcan las capacidades de diagnóstico de las herramientas disponibles para esta tarea, es así como la combinación de diferentes tipos de técnicas de análisis permitiría alcanzar un mayor grado de precisión en el diagnóstico y asimismo, en el pronóstico. Para ello, se plantea estrategias basadas en fusión de datos, pero una particularidad de este tipo de estrategias es que en el mercado solamente existen dispositivos comerciales dedicados a una tarea específica, es decir, equipos dedicados a análisis de vibraciones o emisión acústica, pero nunca ambos combinados, debido a la dificultad que conlleva agrupar este tipo de señales en un mismo sistema de adquisición. Adicionalmente, resulta de gran interés que otro tipo de medidas sean adheridas al sistema, una medida de velocidad que permite capturar la dinámica intrínseca de la máquina asociada a la velocidad de giro del eje y una medida de ruido que permita filtrar mediante técnicas de procesamiento posteriores las distintas interferencias que se presentan en un ambiente industrial.

De tal manera que, un equipo de monitoreo de condición que permita efectuar un análisis de máquina en estados transitorios o de regímenes variables, y que otorgue un decisión altamente confiable al operario, acerca de estado actual y venidero de la máquina, representa una gran evolución en el desarrollo de este campo debido a que los equipos que yacen actualmente en el mercado carecen de estas características y capacidad de interpretación de los datos registrados, con lo cual la relación costo-beneficio es bastante alta y por tal motivo, no es una oferta atractiva para la industria colombiana. Por tanto, con el desarrollo de un sistema de adquisición se permitirá en cualquier momento la obtención de bases de datos y programación de diversas técnicas de procesamiento de señales, temas en los cuales, el Grupo de Control y Procesamiento Digital de Señales de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales ha centrado sus esfuerzos, con el objetivo de instrumentar y monitorear de manera apropiada el conjunto de señales provenientes de máquinas rotativas.

1.2. Planteamiento del problema

Hoy en día, el monitoreo de condición de máquinas rotativas es uno de los temas más importantes en la industria debido a la necesidad de garantizar una correcta operación de los procesos de producción, en especial, la inspección de las máquinas que operan durante dicho proceso. Una de las técnicas más populares que ha sido desarrollada para la detección temprana de fallas en máquinas rotativas es el análisis de vibraciones, debido a su carácter no invasivo, no destructivo, a su bajo costo y su alta precisión en la detección de daños [15]. En general, la vibración de una máquina es debido al movimiento de las partes y la estructura, las cuales están interconectadas. Todas esas partes generan diferentes tipos de componentes de vibración los cuales pueden ser detectados en la estructura de máquina, de allí que el uso de análisis de vibraciones brinde información relevante [13]. Adicional al análisis de vibraciones, se encuentra el análisis de emisión acústica, el cual ha sido aplicado recientemente en monitoreo de máquinas rotativas debido a que mide el nivel de movimiento experimentado por un material, lo cual hace que sea aplicable al monitoreo no destructivo de estructuras, como es el caso de las máquinas rotativas [13, 26]. De forma general, ambas técnicas de monitoreo permiten obtener un conjunto de señales que aportan información relevante de la máquina, y cuyo análisis fue llevado a cabo empleando métodos de análisis espectral, motivo por el cual, a esta clase de dispositivos se les conoce comercialmente como *analizadores de espectro*. La palabra espectro significa que el análisis de este tipo de señales, ya sea vibración mecánica o emisión acústica, se realiza en el dominio de la frecuencia porque este provee información más detallada acerca del estado de la máquina que el análisis en el dominio del tiempo [14].

En el caso de monitoreo de vibraciones, el personal de mantenimiento usualmente emplea analizadores de espectro de propósito general de uno o dos canales para monitorear esta clase de señales; sin embargo, los analizadores de espectro de propósito general son costosos, económicamente hablando, y no son diseñados para este tipo de aplicaciones; y en caso de que fuesen diseñados para monitoreo de vibraciones, no es posible utilizarlos para procesos de monitoreo continuo [10]. Por esta razón, una instrumentación de bajo costo para medición multicanal en-línea que permita el monitoreo y análisis espectral de señales de vibración es necesaria. Para mejorar el rendimiento de los analizadores de espectro, varios trabajos han introducido nuevas características al diseño previo. En [2], un analizador de vibraciones donde la mayor contribución es el sistema de adquisición multicanal es presentado. No obstante, un computador para el análisis del espectro y visualización de los resultados es requerido. Un posible mejoramiento de este trabajo es presentado en [6], donde se propone un analizador de espectro usando una tarjeta de adquisición comercialmente disponible, la cual provee de una amplia cantidad de operaciones bajo un ambiente amigable empleando LabVIEW, pero aún es requerido un computador para trabajar. En [7], un mejoramiento de la técnica introducida en [6] es descrita, en la cual la principal contribución es la reducción del tiempo de procesamiento y el costo operacional. En este caso, dispositivos de alta velocidad fueron introducidos

para mejorar el rendimiento del sistema. En [4], es reportado un método que reduce considerablemente el tiempo de procesamiento empleando una unidad de procesamiento digital de señales (DSP) para computar el espectro de la señal de vibración. Este dispositivo, emplea la Transformada rápida de Fourier para calcular el espectro deseado, como se explica en [3, 5]. Para todos los esquemas planteados anteriormente, se puede decir que las necesidades más importantes en el análisis de vibraciones son el procesamiento en-línea, capacidad de análisis multicanal, y estimación de pos-procesamiento ajustable, para determinar de manera automática el estado de una máquina. Por cuanto, se requiere de arquitecturas en paralelo y dispositivos altamente reconfigurables, para lo cual las tarjetas de arreglo de compuertas de campo programable (FPGA) se distinguen por sus capacidades, permitiendo el desarrollo de arquitecturas paralelas escalables para análisis multicanal [9, 10]. Aunque los sistemas de monitoreo de vibraciones mecánicas muestran un gran avance en años recientes, las técnicas de procesamiento que allí se emplean son de carácter limitado porque solamente trabajan empleando un análisis espectral bajo condiciones estacionarias, lo cual no siempre es útil y factible, especialmente cuando las condiciones de operación de una máquina son variantes en el tiempo y la respuesta en frecuencia muestra un comportamiento no estacionario. Por otro lado, se encuentra el análisis de emisión acústica, sobre el cual no se encuentra reportado material bibliográfico abundante acerca de la implementación de sistemas orientados a este tipo de monitoreo. Por tanto, la mayoría de aportes en este ámbito como los reportados en [13, 26] y [11] muestran que los sistemas de adquisición para señales de emisión acústica son esencialmente comerciales, y presentan un alto costo, especialmente por la etapa de pre-amplificación que requieren los transductores. De aquí resulta como un área de interés la combinación de varios tipos de sensores, cada uno con su propia modalidad y rango de detección, para crear un sistema versátil y robusto [11]. Sin embargo, un aspecto que resulta fundamental en este tipo de sistemas, es la conexión y proceso de transmisión simultáneo de cada tipo de sensor, debido a que tanto vibración mecánica como emisión acústica trabajan en rangos espectrales distintos, lo cual implica velocidades de transmisión y capacidades de almacenamiento diferentes. Por ende, es necesaria una arquitectura y protocolo de transmisión que permita una adecuada adquisición y transmisión de todas las mediciones en forma simultánea y ordenada, lo cual es el alcance esperado por este trabajo.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Desarrollar un sistema de adquisición y medición simultáneo de señales en máquinas rotativas, generando bases de datos para el estudio de nuevas investigaciones empleando emisión acústica, vibraciones mecánicas y velocidad.

1.3.2. Objetivos específicos

- Diseñar módulos independientes para la adquisición de los diferentes tipos de señales en máquinas rotativas utilizando sensores de ultrasonido, proximidad y acelerómetros.
- Implementar en circuitos impresos los módulos independientes diseñados, permitiendo una cómoda conexión al sistema central de medición simultáneo.

1.4. Organización del trabajo

Este trabajo se encuentra organizado de la siguiente manera. En el capítulo 2 se describen los conceptos básicos y terminología de vibraciones mecánicas en la sección 2.1, al igual que los conceptos de emisión acústica en la sección 2.2. La sección 2.3 contiene la descripción de los elementos necesarios para realizar e implementar un sistema de monitoreo en máquinas rotativas empleando diferentes tipos de transductores y las normas necesarias durante el diseño y fabricación de los circuitos impresos. En el capítulo 3 se encuentran los requerimientos funcionales de cada módulo con canales independientes y configurados a frecuencias específicas como es el caso de emisión acústica y ruido. En la sección 3.2 se muestran los recursos empleados para el diseño de cada módulo por etapas y las normas de diseño empleadas en el desarrollo de los circuitos impresos. El capítulo 4 presenta los resultados y las discusiones de cada una de las pruebas realizadas a los módulos implementados, y finalmente, las conclusiones y perspectivas son mostradas en los capítulos 5 y 6 respectivamente.

2 Marco teórico

2.1. Vibración mecánica

Una vibración se puede considerar como la oscilación o el movimiento repetitivo de un objeto alrededor de una posición de equilibrio. Este tipo de vibración se llama vibración de cuerpo entero, lo que quiere decir que todas las partes del cuerpo se mueven juntas en la misma dirección en cualquier momento. El movimiento vibratorio de un cuerpo entero se puede describir completamente como una combinación de movimientos individuales de 6 tipos diferentes. Esos son traslaciones en las tres direcciones ortogonales x , y , y z , y rotaciones alrededor de los ejes x , y , y z . Cualquier movimiento complejo que el cuerpo pueda presentar se puede descomponer en una combinación de esos seis movimientos [25].

La vibración de un objeto es causada por una fuerza de excitación. Esta fuerza se puede aplicar externamente al objeto o puede tener su origen dentro del objeto. Bajo esta premisa, la proporción (frecuencia) y la magnitud de la vibración de un objeto dado, están completamente determinados por la fuerza de excitación, su dirección y frecuencia. Esa es la razón por la cual un análisis de vibración puede determinar las fuerzas de excitación actuando en una máquina. Esas fuerzas dependen del estado de la máquina, y el conocimiento de sus características e interacciones permite diagnosticar un problema [25].

2.1.1. Vibraciones mecánicas en máquinas rotativas

Las máquinas rotativas son un grupo de mecanismos diseñados para cumplir una función específica (e.g. reductores, bombas, agitadores, etc). Así, todas las máquinas se componen de una parte generadora de movimiento (motor, biela), y otra parte que se encarga de llevar la energía a todos los mecanismos que la conforman (eje). Principalmente este último, es quien rige el funcionamiento y es la pieza principal, ya que determina la velocidad de giro de la máquina y es el encargado de transmitir las vibraciones a todos los mecanismos presentes como elementos rodantes o rodamientos, ruedas dentadas, acoples y soportes.

La señal que es adquirida en una máquina rotativa se puede representar como una señal $x(t)$ en el dominio del tiempo, la cual involucra la naturaleza del funcionamiento de la máquina, y sin pérdida de generalidad, la señal de vibración puede ser representada como una suma de funciones senoidales con distintas frecuencias, f , amplitudes, A , y fases, φ , teniendo que cada senoide representa un mecanismo en particular. Por tanto, la señal de vibración se

puede presentar como:

$$x(t) = \sum_i A_i \sin(2\pi f_i t + \varphi_i) \quad (2-1)$$

donde el subíndice i denota cada componente o mecanismo presente en la máquina.

La velocidad del eje o giro de la máquina f_1 con $i = 1$, en términos de frecuencia, significa la frecuencia fundamental del sistema y cada mecanismo que forma parte de la máquina contribuye con una onda sinusoidal cuya frecuencia resulta ser un armónico de la frecuencia fundamental $\{f_i = \beta f_1; \beta > 1, \beta \in \mathbb{R}^+\}$. Por ejemplo, la frecuencia de giro de los rodamientos es igual al número de elementos rodantes que lo componen multiplicado por la velocidad de giro. Por tanto, es posible decir que la señal de vibración de una máquina es un conjunto de sinusoides superpuestas con diversas amplitudes y frecuencias que implican y determinan un estado general (ver Figura 2-1). La amplitud determina la severidad de la vibración y la frecuencia indica el mecanismo vibrante. A partir de estos dos parámetros, los expertos determinan como se encuentra la máquina y si ésta requiere algún tipo de reparación.

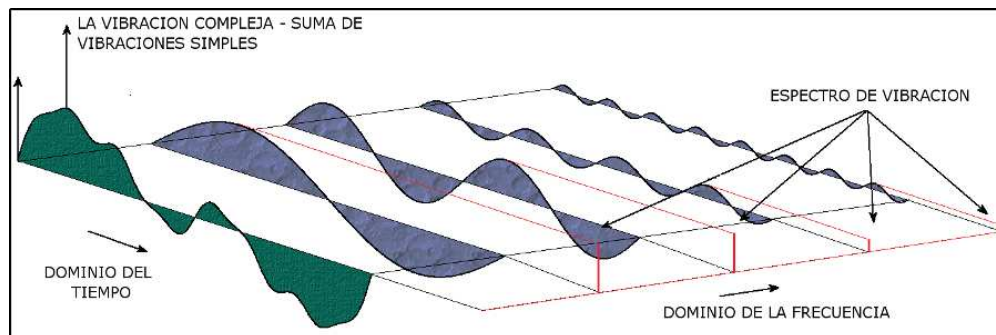


Figura 2-1: Composición de la señal de vibración de acuerdo a las contribuciones espectrales

2.1.2. Conceptos básicos y terminología en vibraciones

La señal de vibración, en su expresión básica, puede ser valorada desde varios puntos de vista como desplazamiento, velocidad y aceleración de la vibración, lo cual brinda diferentes elementos de juicio para realizar el diagnóstico de una máquina rotativa. Adicionalmente, en el análisis de vibraciones de máquinas rotativas existen una serie de fenómenos que se complementan para obtener un diagnóstico acertado del estado de falla de una máquina. De este modo, no solamente la vibración como respuesta del sistema es requerida, sino que también es indispensable tener un conocimiento de otros factores que influyen en el análisis de la vibración como la fase y la resonancia.

Desplazamiento, velocidad y aceleración de la vibración

El nivel de vibración puede estar dado en términos de la aceleración (g), velocidad (mm/s) o desplazamiento (μm), y la intensidad de vibración está determinada por el fabricante del sensor mediante cartas espectrales y en casos generales rigen las normas ISO-10816, en la que los niveles de vibración general se clasifican de acuerdo con la velocidad de vibración.

La señal de velocidad de vibración puede ser obtenida directamente con un sensor de velocidad de vibración o mediante la integración de la señal de aceleración de vibración. Otra forma de realizar el diagnóstico es sobre el espectro de la señal de aceleración de vibración, y al igual que en el caso anterior, el valor RMS es calculado para determinar la vibración global de la máquina. Para llevar este nivel de vibración, dado en gravedades, a un valor comparable con la norma se utiliza la siguiente conversión:

$$V = \frac{86,75A}{f} \quad (2-2)$$

Donde V y A denotan las amplitudes de velocidad y aceleración de vibración respectivamente, y f denota la frecuencia de giro de la máquina. Esta conversión tiene sentido si y solo si, la velocidad de giro de la máquina es constante durante la recolección de las señales [25].

Cada tipo de medición aporta una respuesta en frecuencia que resulta de utilidad dependiendo de la máquina o mecanismo que se quiera analizar. De esta manera, en la Figura 2-2 se observa la respuesta en frecuencia obtenida con cada tipo de medición. En orden de incremento de ancho de banda, se tiene que el desplazamiento brinda una medida apropiada para mecanismos que operan a baja frecuencia, mientras que la aceleración de vibración brinda información en alta frecuencia. En el caso de la velocidad de vibración, se establece que esta medida brinda una medida general del estado de la máquina, ya que mide la respuesta en frecuencia en igual proporción para cada mecanismo que se encuentre presente en la máquina.

A pesar que las medidas de desplazamiento y velocidad brindan mayor precisión en baja y media frecuencia, es la aceleración de vibración la más empleada porque resulta posible obtener las otras dos medidas aplicando procesos de integración, ya sea por hardware o por software, y de esta manera, con un solo dispositivo de medida (sensor) se puede obtener información en términos de desplazamiento y velocidad de vibración.

Concepto de fase

La fase es una medida de tiempo entre dos ondas sinusoidales. Aunque la fase es una diferencia verdadera de tiempo, siempre se mide en términos de ángulo, en grados o radianes. Eso es una normalización del tiempo que requiere un ciclo de la onda sin considerar su verdadero periodo de tiempo. La diferencia en fase entre dos formas de onda se llama a veces el desplazamiento de fase, el cual puede ser considerado positivo o negativo; eso quiere decir que una forma de onda puede ser retrasada relativa a otra o una forma de onda puede ser avanzada

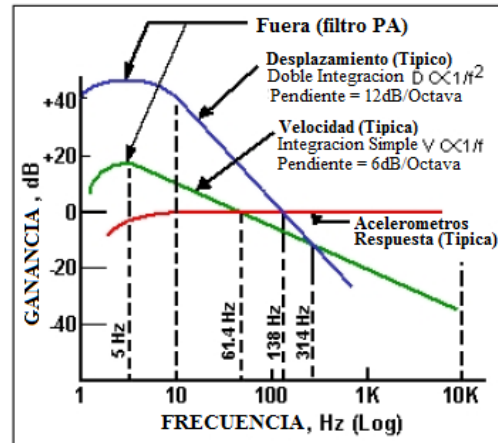


Figura 2-2: Respuesta en frecuencia según el tipo de medición: Desplazamiento, Velocidad y Aceleración de vibración

relativa a otra. Esos fenómenos se llaman atraso de fase y avance de fase respectivamente [25].

La fase también se puede medir con referencia a un tiempo particular (Figura 2-3). Un ejemplo de esto es la fase de un componente desbalanceado en un rotor, con referencia a un punto fijo en el rotor, como una conexión. Para medir la fase, un impulso disparador debe ser generado desde un cierto punto de referencia, en la flecha. Este disparador puede ser generado por un tacómetro o por una clase de sonda óptica o magnética, que sentirá una discontinuidad en el rotor y a veces está llamada un impulso "taco".

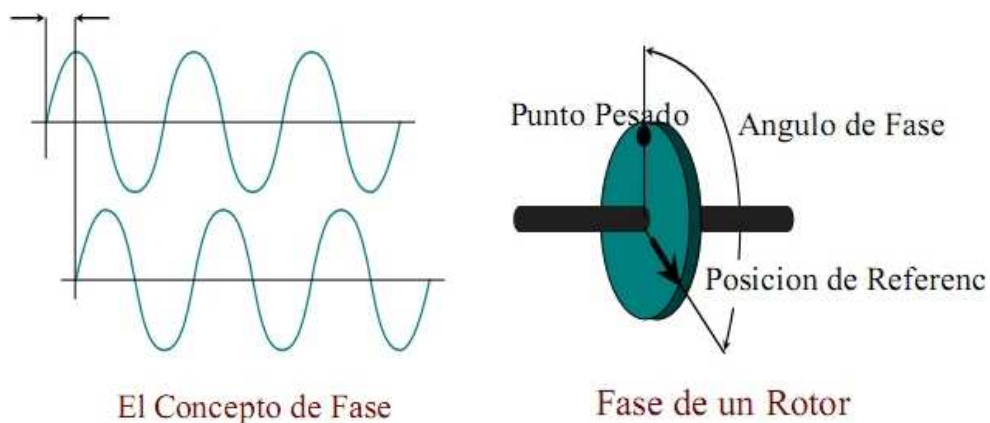


Figura 2-3: Concepto de fase aplicado a máquinas rotativas

En general, las señales de vibración del rotor en el dominio del tiempo son referenciadas con la fase a una señal taco (señal de pulsos rectangulares asociada con la fase del eje de referencia), la cual define una posición angular sobre el rotor (ver Figura 2-4). Un uso importante de la señal de fase está en describir los ángulos de fase de los componentes de la señal de vibración

en función de revoluciones por ciclo, principalmente para propósitos de balanceo del rotor [1]. No obstante, el ángulo de fase brinda una información adicional que permite diferenciar claramente tipos de fallas como desbalanceo y desalineación, entre otras.

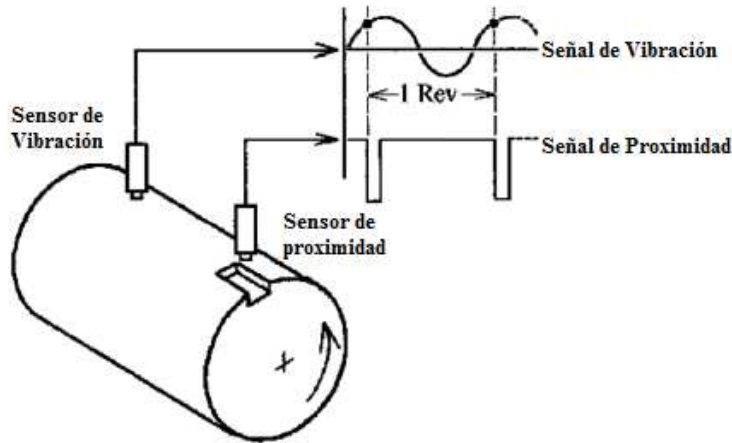


Figura 2-4: Uso de la señal de fase en conjunto con la señal de vibración

Resonancia

Un aspecto fundamental en el análisis de vibraciones es también la *Resonancia*, porque permite agrupar las máquinas rotativas dependiendo de las condiciones de operación y fabricación de las mismas. Por tanto, las máquinas rotativas se pueden categorizar en dos grandes grupos según su comportamiento, ya sea rotor flexible o rígido (ver Figura 2-5). Un rotor flexible implica que la frecuencia de giro máxima de la máquina está por encima de la frecuencia fundamental del sistema (e.g. turbinas, motores de combustión interna) ya sea la máquina como tal o la cimentación donde ésta se encuentra, lo cual implica que existen velocidades de funcionamiento para las cuales el sistema entra en resonancia, conocidas como velocidades críticas, y son de gran cuidado debido a que en el momento de pasar por ellas, la intensidad de vibración presenta un aumento considerable.

En el caso de sistemas donde su frecuencia natural siempre está por encima de la frecuencia de funcionamiento de la máquina se denomina rotor rígido, donde no se presenta el fenómeno de resonancia porque las frecuencias en mención no se cruzan en ningún momento. La resonancia no es catalogada como una falla de la máquina, pero sus implicaciones sobre el nivel de vibración de ésta pueden llegar a ser muy altas. Así, una máquina que opera en condiciones de resonancia presenta un alto nivel de vibración y puede causar daños muy rápidamente. En una máquina que produce un espectro ancho de energía de vibración, la resonancia se podrá ver en el espectro, como un pico constante aunque varíe la velocidad de la máquina. Durante pruebas de arranque, la forma de onda de tiempo indicará un máximo cuando las RPM igualan las frecuencias naturales. El comportamiento de rotor también implica un

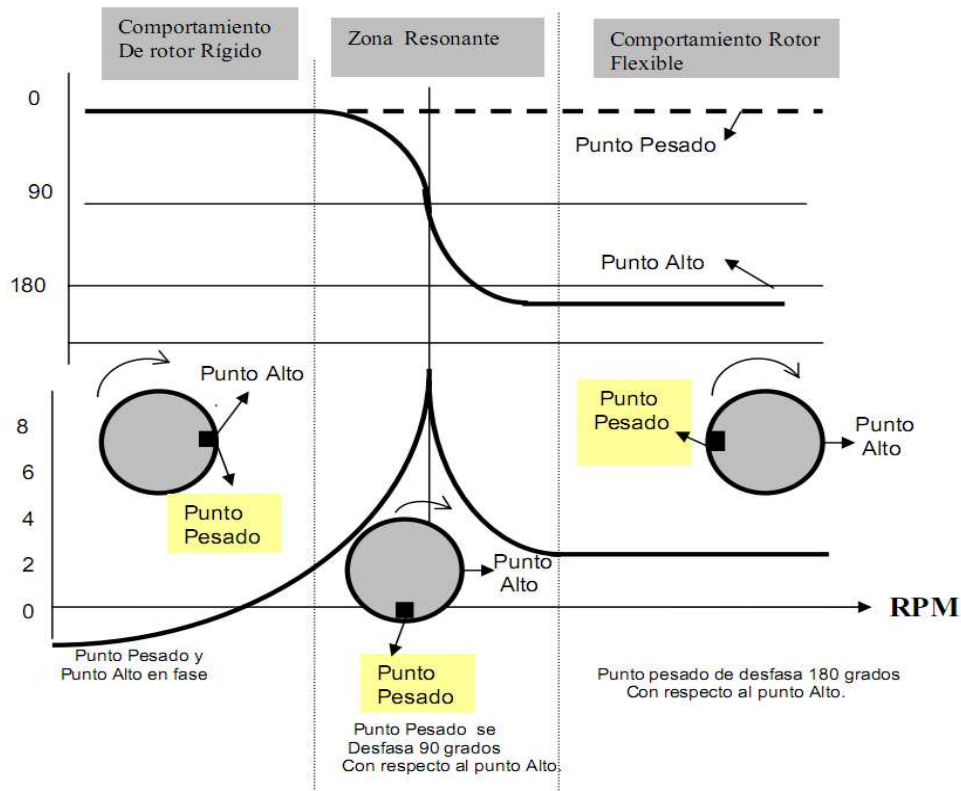


Figura 2-5: Comportamiento de una máquina rotativa de acuerdo a la velocidad de giro

cambio de fase de la señal de vibración de la máquina (parte superior de la Figura 2-5), el cual cambia la forma en que se debe analizar la máquina. La categorización de la máquina en los estados mencionados influye directamente en la forma como se debe realizar el análisis de ésta y en la interpretación de la señal de vibración.

Estándar de vibraciones mecánicas

Considerando ésta información, el especialista en vibraciones realiza el cálculo del espectro de la señal de velocidad de vibración y es en este dominio donde determina la intensidad de vibración global, a partir del valor RMS del espectro de vibración. Este valor se compara con los niveles que se encuentran en la norma (Figura 2-6) para dar un diagnóstico acerca de la máquina. La Figura 2-6, muestra las categorías de severidad de daño según el comportamiento del rotor o eje, sea flexible o rígido, y las categorías dependen de la potencia de la máquina. Según la norma, las máquinas se agrupan en 4 niveles:

- Grupo 1: Máquinas rotatorias grandes con potencia superior a 300 kW. Máquinas eléctricas con altura de eje $H \geq 315$ mm.
- Grupo 2: Máquinas rotatorias medianas con potencia entre 15 y 300 kW. Máquinas eléctricas con altura de eje $160 \leq H \leq 315$ mm.

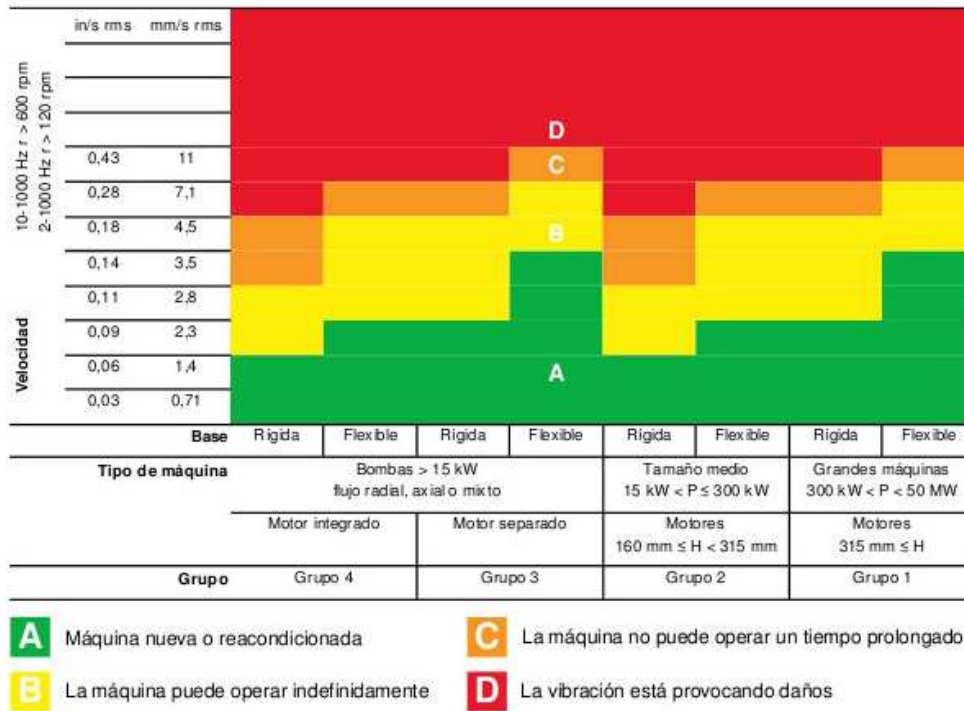


Figura 2-6: Niveles de vibración permisible - Tomado de la Norma ISO 10816

- Grupo 3: Bombas con impulsor de múltiples alabes y con motor separado (flujo centrífugo, axial o mixto) con potencia superior a 15 kW.
- Grupo 4: Bombas con impulsor de múltiples alabes y motor integrado (flujo centrífugo, axial o mixto) con potencia superior a 15 kW.

Para detectar un tipo de fallo en específico se evalúa cada uno de los armónicos presentes en el espectro y se estima su relación con la condición general de la máquina obtenida previamente. Los armónicos que se encuentran en el espectro de vibración son correspondientes a múltiplos de la frecuencia de giro de la máquina y de acuerdo a la amplitud de uno o varios armónicos de esta, se clasifican varios tipos de fallos. Los distintos armónicos que contiene la señal pueden ser conocidos también como órdenes, y se denotan en forma resumida mediante una “x” indicando que es un múltiplo de la frecuencia de giro fundamental. Un parámetro que resulta indispensable en el análisis de vibraciones es el punto de medida (ubicación del sensor), que puede ser radial (horizontal o vertical), donde el sensor se ubica perpendicular al eje, y axial, donde el sensor se ubica paralelo al eje. Cada punto de medida permite valorar el nivel de vibración bajo ciertas amplitudes, es decir, una medida axial permite observar un nivel de vibración diferente a una medida radial, y la clasificación de la severidad de vibración depende en gran parte de este parámetro. Con base en el punto de medida, es posible determinar la incidencia de un tipo de falla en particular, por ejemplo, un punto de

medición axial permite valorar con mayor precisión fallas como excentricidad mientras fallas como desbalanceo y desalineación se pueden notar mejor con un punto de medición radial.

2.2. Emisión acústica

La Emisión Acústica (EA) se define como la clase de fenómenos transitorios donde se generan ondas elásticas por la rápida liberación de energía procedente de fuentes localizadas dentro de un material, y el rango de frecuencia típico de una señal EA se encuentra entre 100 kHz a 1 MHz. De forma similar, EA también se puede definir como: La técnica de seguimiento que analiza las frecuencias de ondas elásticas generadas naturalmente por encima del umbral de audición humana, en el orden de 25 kHz a 1 MHz (Figura 2-7), lo cual se asocia con una serie de fenómenos que generan actividad de banda ancha a partir de la liberación transitoria de energía almacenada a partir de fuentes localizadas [12].

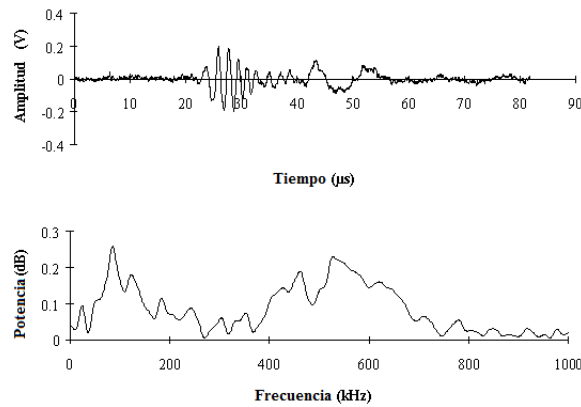


Figura 2-7: Morfología de una señal EA.

El análisis EA funciona para componentes de la máquina tales como rodamientos, engranajes, ejes, y los componentes estructurales, debido a que en altas frecuencias es donde se presentan los primeros indicios de falla de este tipo de mecanismos, los cuales generalmente se encuentran asociados a su frecuencia de resonancia. No obstante, una desventaja del análisis EA es la sensibilidad a otras fuentes de ultrasonidos, tales como la turbulencia, trituración, etc. Por tanto, este tipo de mediciones requiere sensores altamente especializados y procesamiento de señales que permitan aislar apropiadamente el comportamiento que se busca de la señal EA [12].

2.2.1. Propagación y atenuación de EA

Las EAs se propagan en la superficie del material en forma de ondas Rayleigh que son una combinación de ondas longitudinales y transversales (Figura 2-8). Cabe señalar que los defectos superficiales tales como grietas y arañazos pueden atenuar las ondas Rayleigh, y además, el acabado superficial de metales también pueden influir en la atenuación [24].

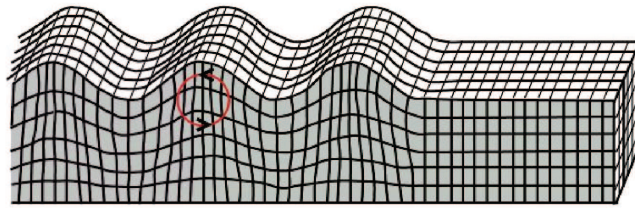


Figura 2-8: Onda Rayleigh.

El principal inconveniente con la aplicación de la técnica EA es la atenuación de la señal y, como tal, el sensor tiene que estar cerca de su fuente. Sin embargo, a menudo es práctico colocar el sensor en el miembro no giratorio de la máquina, tales como el rodamiento o carcasa del engranaje. Por lo tanto, la señal procedente del componente defectuoso sufrirá atenuación severa, y reflexiones, antes de llegar al sensor [22]. Los procesos de detección y conversión de estas ondas elásticas de altas frecuencias en señales eléctricas, se pueden implementar mediante el acoplamiento de sensores y la aplicación de un estímulo externo. Las salidas de los sensores se amplifican a través de un pre-amplificador de bajo ruido, el cual filtra para eliminar cualquier ruido no deseado y posteriormente se procesa por los sistemas electrónicos adecuados. Algunos factores que afectan a la amplitud relativa de la respuesta de EA se presentan en la Tabla 2-1:

Tabla 2-1: Factores que afectan la amplitud de la respuesta del sensor

| Factores que incrementan la amplitud de la respuesta EA | Factores que decrementan la amplitud de la respuesta EA |
|---|---|
| Esfuerzo alto | Esfuerzo bajo |
| Tasa de alta tensión | Tasa de baja tensión |
| Baja temperatura | Alta temperatura |
| Secciones gruesas | Secciones finas |
| Materiales con discontinuidades | Materiales continuos |
| Materiales forjados | Materiales fundidos |

2.2.2. EA en máquinas rotativas

Para el caso concreto de máquinas rotativas se define la generación del conjunto de ondas elásticas transitorias mediante la interacción de dos objetos en movimiento relativo [22]. Las fuentes más comunes de emisión acústica en máquinas rotativas incluyen: impacto, fatiga cíclica, fricción, turbulencia, pérdida de material, cavitaciones, fugas, etc. Por ejemplo en rodamientos, la interacción de asperezas superficiales y pinzamiento de los rodillos que llevan más de un defecto en una pista exterior se traducirá en la generación de emisión acústica. Otras fuentes de emisiones acústicas, según [12], pueden ser:

- Diferentes etapas de la propagación de la grieta (estática, corrosión, fatiga,).
- Los defectos de soldadura: la falta de penetración y la fusión, las grietas, inclusiones y la porosidad.
- Corrosión.
- Fricción.
- Impacto metálico.
- Fugas (líquido o gas).
- El ruido externo (mecánicos, eléctricos y ambientales).

El factor más importante en el éxito de realizar una aplicación EA es la fiabilidad de un sensor. A este hecho se asocian una gran cantidad de detalles en el acoplamiento del sensor y el tratado de la señal antes de ser analizada en el debido sistema de procesamiento. La elección del sensor apropiado depende específicamente de cada aplicación.

Existen dos tipos de sensores de emisión acústica: Los de tipo de resonancia y los de banda ancha. Los primeros maximizan la sensibilidad en un rango específico de frecuencia cerca a la frecuencia de resonancia, mientras que los segundos permiten cubrir un rango de frecuencia mayor, normalmente desde 100 kHz hasta 1 MHz. Algunos estudios realizados en [20], indican que el análisis de emisión acústica por encima de los 100 kHz implica una atenuación crítica de la señal adquirida debido al ruido de fondo. Los autores de este estudio recomiendan adquirir señales en un rango de frecuencia entre 50 kHz y 100 kHz. Por ello, recomiendan el uso de sensores de resonancia. Además del sensor, generalmente se utiliza un pre-amplificador pues la señal es muy débil y sensible al ruido de fondo, especialmente cuando la señal debe ser transmitida por cable a través de distancias considerablemente altas.

Una representación simplificada de una señal EA con parámetros comúnmente usados se puede observar en la Figura 2-9. Un cambio en la materia que da paso a una emisión acústica es llamada como *evento* (Physical Acoustic Corporation, 2007) y si el evento EA

capturado por el sensor excede el valor de umbral establecido, este valor es grabado por el sistema de adquisición de datos y es conocido como un *acierto* [19].

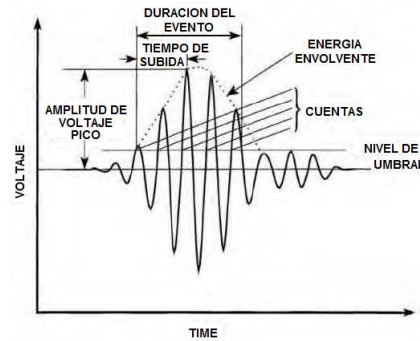


Figura 2-9: Señal típica de EA [19].

Otro aspecto que influye en gran medida en el apropiado funcionamiento del sensor, es el acople empleado, es decir, si el sensor es acoplado directamente a la máquina sin algún material de acople, la lectura tendrá una señal muy débil propensa a ruidos por vibraciones, golpes, u otras alteraciones. El acoplamiento del sensor a la máquina rotativa debe implementar el uso de un material acoplante entre las partes previamente nombradas. Si se utiliza como medio acoplante al aire, es decir, el sensor está separado de la máquina rotativa, la lectura tendrá un gran componente de ruido proveniente de otras fuentes. En cambio, si el material acoplante es una delgada capa de fluido, la lectura tendrá una señal EA mucho más fuerte y menos alterada por ruidos externos.

Esto se puede explicar viendo a la onda acústica como una onda de presión transmitida a través de dos superficies en contacto. Si las dos superficies están rígidamente unidas, en escala microscópica solo pocos puntos realmente hacen contacto. Con un fluido acoplante adecuado, se transmite mayor información entre las dos superficies de contacto, ya que las ondas se transmiten transversalmente entre ambas partes.

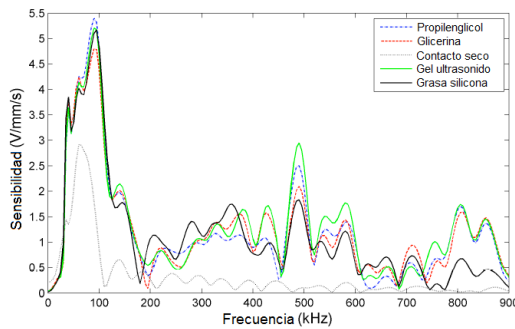
El fluido acoplante debe cumplir con ciertas características de rigidez y resistencia térmica dependiendo de la aplicación, pues una incorrecta elección podría ocasionar deterioro del material acoplante y error en la lectura. La Tabla 2-2 muestra distintos fluidos acoplantes recomendados de acuerdo a determinadas temperaturas.

Los fluidos acoplantes pueden ser también seleccionados de acuerdo al tipo de onda y la frecuencia que se desea medir, como se muestra en las Figuras 2.10(a) y 2.10(b):

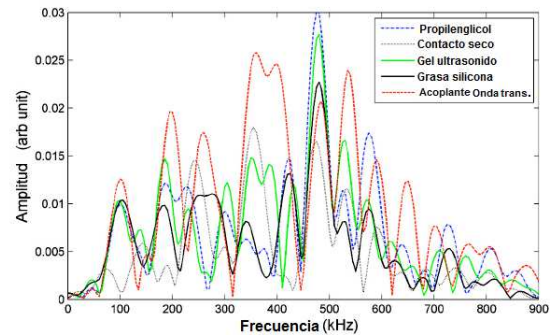
Las señales de emisión acústica en el dominio del tiempo pueden clasificarse en dos tipos: señal continua y señal explosiva (continuous, burst). El tipo continuo hace referencia a una forma de onda donde el transitorio explosivo no es discernible. Este tipo de onda puede ocurrir como resultado de un flujo turbulento mientras que la señal de tipo explosivo puede ser asociada con el transitorio de la acción de rodamientos y cajas de engranajes [22].

Tabla 2-2: Materiales acoplantes a diferentes rangos de temperatura.

| Algunos acoplantes de emisión acústica y los rangos de temperatura aproximados donde pueden ser usados | |
|--|----------------------|
| Acoplante ultrasónico | Temperatura ambiente |
| Grasa de petroleo | Temperatura ambiente |
| Agua | 1°C a 99°C |
| Salol | -40°C a 40°C |
| Cemento dental | 0°C a 50°C |
| 50 % indio - 50 % Galio mixto | 20° a 700°C |



(a) Ondas longitudinales



(b) Ondas transversales

Figura 2-10: Materiales acoplantes a diferentes frecuencias según la forma de propagación de las ondas.

2.3. Elementos y parámetros de diseño electrónico

En esta sección se describen todos los elementos necesarios para realizar el diseño e implementación de un sistema de monitoreo de máquinas rotativas empleando transductores de vibraciones mecánicas y emisiones acústicas, desde la concepción del transductor mismo, hasta la etapa de elaboración del circuito impreso que permite la adecuada adquisición de este tipo de señales.

2.3.1. Sensores piezoeléctricos

Los sensores piezoeléctricos son empleados, en la mayoría de casos, para la medición de señales de vibración, ruido y emisión acústica o ultrasonido. Este tipo de sensor básicamente consta de una masa comprimida que se encuentra en contacto relativamente rígido con una celda de carga que mide la fuerza (usualmente un cristal piezoeléctrico) mediante un resorte

suavemente precargado [25], como se puede observar en la Figura 2-11.

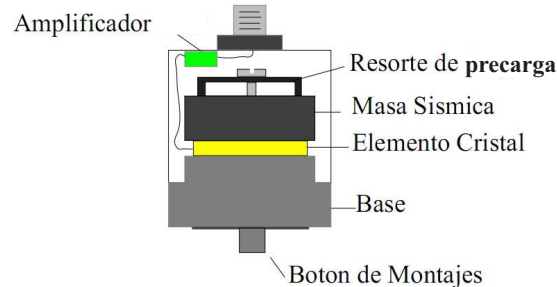


Figura 2-11: Configuración interna de un sensor piezoeléctrico.

Dada las distintas configuraciones que puede tener un sensor piezoeléctrico, existen dos tipos de sensores, pasivos y activos. Los sensores pasivos son aquellos que no requieren de alimentación externa debido a que internamente ya la contienen, como es el caso de los sensores empleados en emisión acústica. En contraste, están los sensores activos, los cuales requieren ser alimentados por una fuente de corriente constante externa y debe cumplir los parámetros basadas en el estándar IEPE “Integrated Electronics Piezo Electric”, lo cual aplica para sensores de vibraciones mecánicas y ruido (micrófonos de precisión).

Efecto piezoeléctrico

Para una mayor comprensión del funcionamiento de los sensores piezoeléctricos, es conveniente comprender el efecto piezoeléctrico que en estos se presenta, según [8]. El efecto piezoeléctrico es propio de los cristales de cuarzo, donde una carga, q , es producida a través del cristal cuando una fuerza es aplicada a este. La carga es proporcional a la fuerza, F , tal que

$$q = S \cdot F \quad (2-3)$$

donde S es llamado *factor de sensibilidad*. La dirección del efecto piezoeléctrico es usualmente explicada mediante la existencia de dipolos eléctricos en el material. Bajo ciertas circunstancias esos dipolos pueden ser forzados en una dirección común, lo cual da origen a la dirección del efecto piezoeléctrico del material.

Existen dos tipos de materiales que pueden ser usados en transductores piezoeléctricos. Tradicionalmente, materiales cerámicos artificialmente polarizados son utilizados para obtener características piezoeléctricas, como es el caso de acelerómetros del tipo modo de carga. Pero, hoy en día, el material piezoeléctrico más empleado es el cristal de cuarzo, logrando una sensibilidad piezoeléctrica (carga) baja.

Un modelo eléctrico de transductores piezoeléctricos puede ser formulado en dos formas. Primero, el transductor puede ser descrito como un modelo de carga, donde la señal transducida es vista como un generador de carga acoplado en paralelo con una resistencia y un

capacitor. En forma alternativa, el transductor puede ser descrito mediante una modelo de tensión, donde la señal transducida es una tensión eléctrica y un resistor y un capacitor son conectados en serie con el generador de la tensión, ver Figura 2-12. Ambos modelos son frecuentemente usados en la actualidad.

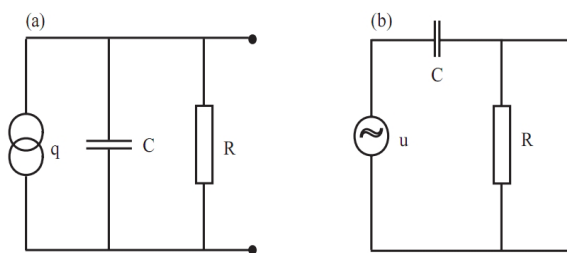


Figura 2-12: Modelos de carga y tensión para sensores piezoeléctricos.

2.3.2. Estandar IEPE

Los sensores del tipo piezoeléctricos para un correcto funcionamiento deben ser alimentados por una fuente de corriente constante (ver Figura 2-13). Esta fuente de corriente constante puede ser parte del instrumento o una unidad separada. La señal de vibración es transmitida de regreso a la alimentación como un voltaje de polarización (bias voltage) modulada. Tanto la corriente de alimentación y el voltaje de salida se transmiten a través del mismo cable coaxial que puede ser tan larga como varios cientos de metros. El condensador C_c elimina el voltaje de polarización del sensor a partir de la entrada de instrumento que proporciona una señal de AC de base cero. Puesto que la impedancia de salida de la señal IEPE es típicamente 100 .. 300 Ohms, cables coaxiales de estandar de bajo costo son suficientes [23].

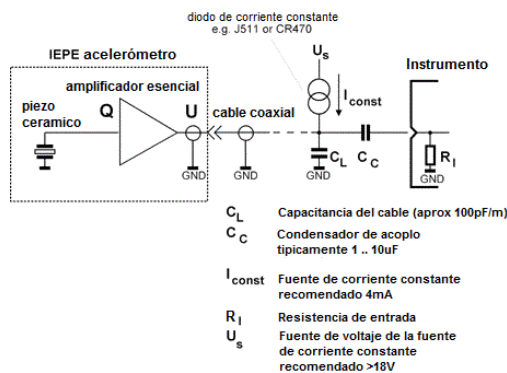


Figura 2-13: Principio IEPE

La corriente constante puede estar comprendida entre 2 a 20 mA (No confundir con el estandar de 4 a 20 mA). El voltaje de polarización (bias voltage), es decir, la tensión de salida de DC del

sensor sin excitación, es típicamente entre 12 y 14 V. Varía con la corriente de alimentación y la temperatura. La señal de salida del sensor oscila alrededor de este voltaje de polarización (bias voltage). Nunca puede llegar a ser negativo. El límite superior se establece por el voltaje de alimentación de la fuente de corriente constante. Esta tensión o voltaje debe estar entre 24 y 30 V. El límite inferior se determina por el amplificador incorporado. La Figura (ver Figura 2-14) ilustra el rango dinámico de un sensor compatible IEPE [23].

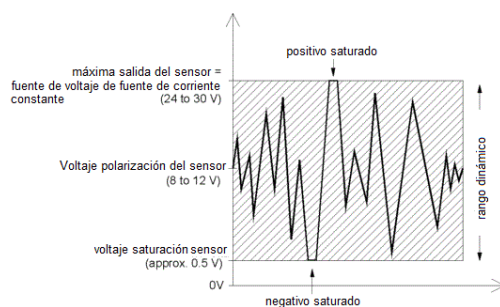


Figura 2-14: Rango dinámico de transductores IEPE

En la mayoría de sistemas de adquisición en vibraciones se usan fuentes de alimentación con salidas de voltajes alrededor de +30 V y de esta manera se pueda cumplir el estándar IEPE, pero al usar este tipo de alimentaciones se requieren hacer regulaciones de voltaje para las demás partes electrónicas.

En el mercado hay tipos de componentes electrónicos que permiten la elevación de voltajes de hasta 28 V con niveles de entrada comprendidas entre los 0.8 V y 5 V.

Al establecer la alimentación de los sensores se realizan preamplificación y filtrado en emisión acústica, acondicionamiento y filtrado en vibraciones mecánicas.

2.3.3. Acondicionamiento de señal

La electrónica digital abarca la mayor cantidad de operaciones y funciones de trabajo con respecto a la electrónica analógica, permitiendo el almacenamiento de los datos y la transmisión de los mismos por diferentes protocolos, su funcionamiento a altas velocidades dan lugar al procesamiento y obtención de la información en tiempo real minimizando los errores y a través de programación evitando cambios físicos en sus circuitos. Hoy en día muchos circuitos digitales dependen de los analógicos ya que ellos requieren interfaces para la obtención de información de las señales análogas y esto aún se conserva con los acondicionadores que adaptan la señal de los sensores en el rango permitido por los ADC [17].

En el acondicionamiento se pueden encontrar varios tipos de configuraciones realizadas con amplificadores operacionales, amplificadores diferenciales, amplificadores 4 - 20 mA, amplificadores de instrumentación y amplificadores de aislamiento [17].

2.3.4. Conversores ADC

Son componentes electrónicos que permiten la conversión de señales analógicas a digitales. Dentro de estos conversores, se encuentran los delta-sigma, (ver Figura 2-15) los cuales son de muy alta resolución en rangos de 12 a 24 bits, son ideales para las conversiones de muy amplia gama de frecuencias desde DC hasta varios megahercios. En un conversor delta-sigma la señal se sobremuestra por un modulador, luego pasa por un filtro y un decimador que conforma el filtro digital que se encarga de eliminar componentes que estén fuera de la banda de la señal [17].

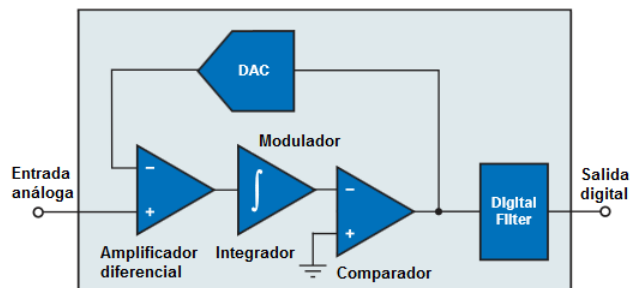


Figura 2-15: Conversor ADC Delta-Sigma

2.3.5. Protocolo SPI

Es usado principalmente para la comunicación de circuitos integrados digitales, su transmisión y recepción de datos es en modo full duplex, es decir, actúan al mismo tiempo y sus paquetes de datos tienen tamaños de 8 bits. El SPI puede trabajar en dos configuraciones de sus periféricos que son de modo 3 líneas o modo 4 líneas. Dos de las líneas son las encargadas de la transmisión y recepción, la tercera línea es el reloj y la cuarta línea es la selectora (CS o SS).

En la comunicación se debe especificar un maestro que puede conectarse a uno o múltiples esclavos, el maestro es el encargado de generar las señales de reloj y control y de iniciar la transferencia de los datos. Los esclavos son controlados a través de CS o SS, que son activados cuando se les solicita información [18]. (ver Figura 2-16).

Las líneas del bus SPI transmiten en una sola dirección y se definen de la siguiente manera:

- SCLK - Línea del reloj generada por el maestro para la sincronizar los datos.
- MOSI - transmite los datos desde el maestro hacia el esclavo.
- MISO - transmite los datos desde el esclavo hacia el maestro.

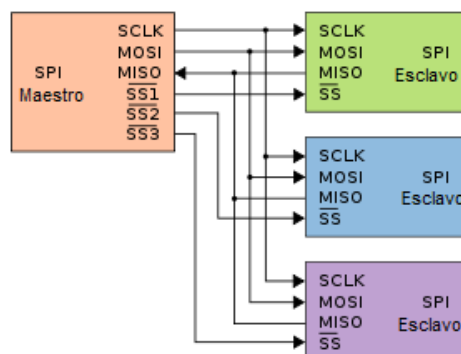


Figura 2-16: BUS SPI

- CS o SS - Cada esclavo trae consigo este pin y es activo en bajo "0 lógico" por el maestro para que la solicitud de información de los datos pueden ser transferidos como MSB o LSB según la configuración ejecutada.

En el estándar SPI existen 4 modos de compatibilidad que son determinadas por dos bit de configuración, en algunos circuitos integrados tienen definido uno de los modos en la Tabla 2-3 y en la Figura 2-17 se pueden observar los modos de compatibilidad.

Tabla 2-3: Modo del BUS SPI

| MODO SPI | Estado bits de control | |
|----------|------------------------|------|
| | CPOL | CPHA |
| 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 1 |
| 2 | 1 | 0 |
| 3 | 1 | 1 |

El CPOL es el que define el estado en reposo y el CPHA define los flancos en que se leerán los datos, estos bits definen el funcionamiento de la señal de reloj del maestro y los esclavos tienen que trabajar en el mismo modo.

- MODO 0 - El estado en reposo del reloj es bajo, la transmisión de los datos es en los flancos de bajada y la lectura de los datos es en los flancos de subida.

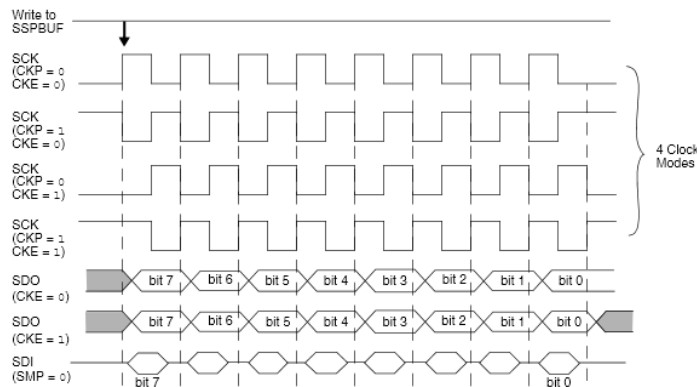


Figura 2-17: Señal de los modos SPI

- MODO 1 - El estado en reposo del reloj es alto, la transmisión de los datos es en los flancos de subida y la lectura de los datos es en los flancos de bajada.
- MODO 2 - El estado en reposo del reloj es bajo, la transmisión de los datos es en los flancos de subida y la lectura de los datos es en los flancos de bajada.
- MODO 3 - El estado en reposo del reloj es alto, la transmisión de los datos es en los flancos de bajada y la lectura de los datos es en los flancos de subida.

2.3.6. Diseño de PCB

Al realizar un diseño sobre un dispositivo se inicia con el diseño del circuito esquemático, donde se va colocando cada componente seleccionado, cuando se presentan algunos componentes desconocidos, es de gran ayuda realizar simulaciones que permitan comprender y visualizar un comportamiento cercano a la realidad, cabe aclarar que no es exacto, ya que se deben considerar otros factores como su temperatura de funcionamiento, temperatura ambiente en el lugar a operar, alimentación (voltaje y corriente), reacción entre componentes pasivos y activos, tolerancias de los componentes, ruidos, manejo de tierras y sugerencias de diseño entregada por los fabricantes en las hojas características de sus componentes. Al tener el diseño esquemático finalizado antes de realizar el diseño del PCB (Printed Circuit Board) o PWB (Printed Wired Board), en algunos países usan estas abreviaciones pero significan lo mismo, se deber hacer un chequeo del circuito esquemático revisando cada etapa de la siguiente manera:

1. Voltajes de alimentación conectadas correctamente en cada componente.
2. Polaridades de los condensadores y diodos.
3. Conexión correcta de los pines de cada circuito integrado.

4. Simbología y enumeración de cada componente para una rápida ubicación.
5. Referencia de cada componente para la lista de materiales a comprar.

Una vez realizado los chequeos del circuito esquemático se procede a realizar el circuito impreso. En esta etapa se empieza con el proceso de creación del prototipo de PCB donde se ubicarán cada uno de los componentes. Esta etapa es crítica puesto que la geometría de los componentes podría perjudicar el ensamble.

Al momento de estar elaborando el diseño del PCB, se pueden visualizar posibles cambios permitiendo optimizar el enrutado, teniendo en cuenta la actualización del circuito esquemático.

Laminado

Al diseñar un PCB se tienen varias opciones de materiales a considerar, que van desde estándar hasta muy sofisticados y especializados. Al seleccionar los materiales, el diseñador debe determinar que la placa de circuito impreso cumpla los requisitos, tales como la temperatura (soldadura y de funcionamiento), propiedades eléctricas, las interconexiones (componentes soldadas, conectores), resistencia estructural, y la densidad del circuito. Cabe señalar que el aumento de los niveles de complejidad puede conducir a un aumento de material y los costos de producción [16].

Los espesores más comunes para el laminado de material de base rígida son 0,75 mm, 1,5 mm y 2,4 mm. Sin embargo, el grosor mínimo de material de base rígida es 0,05 mm [16].

En la Tabla 2-4 se puede observar los diferentes tipos de laminado con diferentes espesores y máxima operación de temperatura.

Número de Capas

Una vez seleccionado el tipo de laminado, el diseñador escoge dependiendo de la complejidad de su PCB cuantas capas llevará. Antes de comenzar con el enrutado, se debe escoger cual será su capa primaria, puesto que en esta se ubicarán la mayor cantidad de componentes o el componente más complejo, La capa secundaria es el reverso de la capa primaria, donde van las soldaduras de los componentes de inserción y la ubicación de los datums (puntos o agujeros de referencia que ayudan al fabricante en el proceso manufactura del PCB), los PCB al ser de dos capas o más se deben enumerar en orden ascendente donde la capa primaria está denotada como 1 como se puede observar en la Figura 2-18. En la Tabla 2-5 se puede observar la enumeración que se dan a las capas y su definición.

Enrutado

Un factor predominante que debe ser considerado en el diseño de una placa de circuito impreso es la distribución de la energía. El esquema de conexión a tierra puede ser utilizado

Tabla 2-4: Tipos de laminado y operaciones máxima de temperatura [16]

| Designacion | | Espesor dielectrico (mm) | Temp(max °C) |
|-------------|-------------|--------------------------|--------------|
| NEMA | IPC-4101 | | |
| FR-4 | 21/24/25/27 | 0,1 | 120 |
| | | 0,4 | 130 |
| FR-5 | 23 | 0,6 | 140 |
| | | 1,4 | 170 |
| GPY | 40/41/42 | 0,1 | 140 |
| | | 1,6 | 170 |
| | 50/52 | 0,1 | 120 |
| | | 0,4 | 130 |
| | 51/53/60 | 0,1 | 140 |
| | | 1,6 | 170 |
| | 30/26 | 0,1 | 120 |
| | | 0,4 | 130 |
| | 70/71 | 0,1 | 140 |
| | | 0,4 | 170 |

**Figura 2-18:** Enumeración de las capas [IPC-D-350]

como una parte del sistema de distribución. Se ofrece no sólo un retorno de la corriente continua, sino también un plano de referencia de CA para señales de alta velocidad que se hace referencia. Los siguientes elementos deben ser tomados en consideración. [16]

- Mantener una radio-frecuencia (RF) de baja impedancia a lo largo de la distribución de alimentación de CC. Una conexión a tierra mal diseñada puede dar lugar a emisiones de radiofrecuencia. [16]
- Desacoplar la distribución de alimentación en el conector del circuito impreso con condensadores de desacople adecuados. [16]
- Distribuir adecuadamente los condensadores de desacople en todas las zonas donde

Tabla 2-5: Definición física de las capas IPC-D-350

| Número de Capa | Definicion |
|------------------|--|
| 00 | Agujeros(vías) que van en todo el camino de la placa atravesándola. |
| 01 | Primera capa conductiva. |
| 02 hasta N | segunda capa conductiva hasta N capas conductivas. |
| N + 1 | Primera capa no conductiva (mascara de soldadura, leyendas, cubrimientos) cerca de la capa conductiva 1(Vista desde la capa primaria). |
| N + 2 | Segunda capa no conductiva (vista desde el lado primario) |
| N+3, N+4,etc. | Todas las demás capas no conductivas |

hayan circuitos integrados. [16]

- Minimizar la impedancia y el bucle de radiación del condensador de acoplamiento, manteniendo el condensador lo más cerca posible, y ubicándolo adyacente al circuito crítico. [16]
- Una buena técnica para la distribución de la alimentación y las tierras en un PCB multicapas es el uso de planos. [16]

Algunas otras reglas que son útiles en el diseño de circuitos:

- Hacer conductores de tierra lo suficientemente grandes como para evitar problemas de ruido.
- Agrupar líneas de señales de familias lógicas similares.
- Evitar terminaciones de salidas lógicas directamente en base de los transistores.
- Terminar pines lógicos sin uso con una resistencia de pull-down.
- No atar señales de salida juntas.
- Siempre que sea posible, dividir la función lógica compleja en secciones lógicas combinatoriales menores.

En el diseño debe tenerse en cuenta el control de impedancias. Los circuitos impresos multicapa son idealmente adecuados proporcionando pistas de interconexión que están diseñadas específicamente para los niveles deseados de control de impedancia y capacitancia. Las técnicas comúnmente empleadas son referidas como “*stripline*” o “*microstrip* incrustado”, debido a que son particularmente apropiadas para los requerimientos de impedancia y capacitancia. La Figura 2-19 muestra los cuatro tipos básicos de construcciones de líneas de transmisión, los cuales son descritos a continuación [16]:

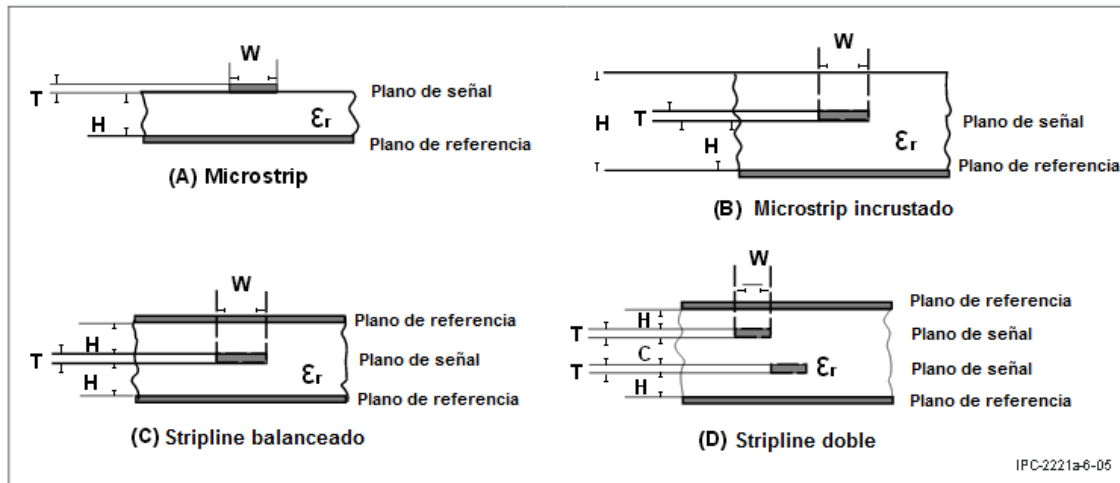


Figura 2-19: Construcción de líneas de transmisión en circuito impreso [16]

- Microstrip:** Son conductores de geometría plana normalmente encontrados sobre una placa de circuito impreso que es fabricada mediante recubrimiento de cobre y procesos de barrido (ver Figura 2-19-A). La capacitancia está influenciada más fuertemente por la región entre la línea de señal y los planos adyacentes de tierra (o potencia). La inductancia es una función del “lazo” formado por la frecuencia de operación (es decir, efecto piel) y la distancia al plano de referencia para *microstrips* y *stripline*, y la longitud del conductor.[16]

Las siguientes ecuaciones muestran como estimar la impedancia (Z_0), retardo de propagación (T_{pd}) y la capacitancia de línea intrínseca (C_0) para circuitos *microstrip*.[16]

$$Z_0 = \frac{87}{\sqrt{\epsilon_r} + 1,41} \ln \left[\frac{5,98h}{0,8w + t} \right] \text{ en Ohms} \quad (2-4)$$

$$T_{pd} = \frac{\sqrt{\epsilon_r}}{c} \text{ en psec/pul} \quad (2-5)$$

$$C_0 = \frac{T_{pd}}{Z_0} \text{ en pF/pul} \quad (2-6)$$

$$\text{Para } \frac{w}{h} < 1 \quad (2-7)$$

Donde:

c = Velocidad de la luz en vacío ($3.0 \times 10^8 \text{m/s}$)

h = Espesor del dieléctrico. pul

w = Ancho de línea, pul

t = Espesor de línea, pul

ε_r = constante dieléctrica de sustrato (ver Tabla 2-6)

- **Microstrip incrustado:** El *microstrip* incrustado tiene la misma geometría como el *microstrip* mencionado anteriormente. Sin embargo, la constante dieléctrica efectiva es diferente debido a que el conductor está totalmente encerrado por el material dieléctrico (ver Figura 2-19-B). Las ecuaciones para las líneas *microstrips* incrustadas son las mismas que para las líneas *microstrips*, con una constante dieléctrica efectiva modificada. Si el espesor del dieléctrico por encima del conductor es de 0,025 mm [0,0009843 pul] o más, entonces la constante dieléctrica efectiva se puede determinar utilizando los criterios de la IPC-2251. Para revestimientos dieléctricos muy delgado (menor a 0,025 mm [0,0009843 pul]), la constante dieléctrica efectiva será entre el aire y la constante dieléctrica mayor (ver Tabla 2-6). [16]
- **Stripline balanceado:** Un *stripline* balanceado es un conductor de estrecho y delgado incrustado entre dos planos de CA (ver Figura 2-19-C). Puesto que todas las líneas de campo eléctrico y magnético están contenidos entre los planos, la configuración *stripline* tiene la ventaja de que EMI será suprimida excepto para las líneas cercanas a los bordes de la PCB. [16]

Los parámetros de la línea *Stripline*, es decir, la impedancia (Z_0) y la capacitancia de línea intrínseca (C_0), se presentan a continuación para geometrías de conductor-plano. En las ecuaciones se asume que la capa de circuito esta ubicada en la mitad de los planos de referencia. [16]

$$Z_0 = \frac{60 \ln \left[\frac{1,9(2H + T)}{(0,8W + T)} \right]}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad \text{en Ohms} \quad (2-8)$$

$$C_0 = \frac{1,41(\varepsilon_r)}{\ln \left[\frac{3,81H}{(0,8W + T)} \right]} \quad \text{en pF/pul} \quad (2-9)$$

$$\text{Para } \frac{W}{H} < 2 \quad (2-10)$$

Donde:

H = Distancia entre la línea y un plano de tierra

pF = picofaradios

W = Ancho de línea, pul

T = Espesor de línea, pul

ε_r = Constante dieléctrica de sustrato

- **Stripline doble:** Cuando una capa de circuito es colocada entre dos planos de referencia, pero no está centrada entre ellos (ver Figura 2-19-D), las ecuaciones de *Stripline* deben ser modificadas. Esto es para tener en cuenta el incremento de acoplamiento entre el circuito y el plano más cercano, ya que esto es más importante que el acoplamiento debilitado al plano lejano.[16]

La impedancia (Z_0) del *Stripline* doble y la capacitancia de línea intrínseca (C_0) son:

$$Z_0 = \frac{80 \ln \left[\frac{1,9(2H + T)}{(0,8W + T)} \right] \cdot \left[1 - \frac{H}{4(H + C + T)} \right]}{\sqrt{\varepsilon_r}} \text{ en Ohms} \quad (2-11)$$

$$C_0 = \frac{2,82(\varepsilon_r)}{\left[\frac{2H - T}{(0,268W + 0,335T)} \right]} \text{ en pF/pul} \quad (2-12)$$

Donde:

H = Altura sobre el plano de potencia

C = Separación de planos de señal

W = Ancho de línea, pul

T = Espesor de línea, pul

ε_r = Constante dieléctrica de sustrato

pF = picofaradios

Tabla 2-6: Constantes dieléctricas de materiales de circuitos impresos[16]

| NEMA | DESIGNADOR | | | CODIGO REF. RESINA | Materiales Reforzamiento/ resina | Constante Dieléctrica | |
|------|--------------------|------|---------|--------------------------|--|-----------------------------|-------------|
| | ESPECIFICACION IPC | | MILITAR | | | | Valor Er |
| | 4202 | 4101 | 4103 | | | S-13949 | |
| G-10 | | /20 | | /3 | GEN | Woven E Glass/Epoxy | 4.6-5.4 |
| G-11 | | /22 | | /2 | GB | Woven E Glass/Epoxy | 4.5-5.4 |
| FR-4 | | /24 | | /4 | GF GFN GFK | Woven E Glass/Epoxy | 4.2-4.9 |
| FR-5 | | /23 | | /5 | GH | Woven E Glass/Epoxy | 4.2-4.9 |
| GPY | | /42 | | /10 | GI GIJ | Woven E Glass/Polyimide | 4.0-4.7 |
| | | /50 | | /15 | AF | Woven Aramid/Modified Epoxy | 3.8-4.5 |
| | | /55 | | /22 | BF | Nonwoven Aramid/Epoxy | 3.8-4.5 |
| | | /53 | | /31 | BI | Nonwoven Aramid/Polyimide | 3.6-4.4 |
| | | /60 | | /19 | QIL | Woven Quartz/Polyimide | 3.0-3.8 |
| | | /30 | | /24 | GM GFT | Woven E Glass/Triazine/BT | 4.0-4.7 |
| | | /71 | | /29 | GC | Woven E Glass/Cyanate Ester | 4.0-4.7 |
| | | | 4103/03 | /6 | GP | Nonwoven Glass/PTFE | 2.15-2.35 t |
| | | | 4103/04 | /7 | GR | Nonwoven Glass/PTFE | 2.15-2.35 |
| | | | 4103/01 | /8 | GT | Woven Glass/PTFE | 2.45-2.65 |
| | | | 4103/02 | /9 | GX | Woven Glass/PTFE | 2.4-2.6 |
| | | | 4103/05 | /14 | GY | Woven Glass/PTFE | 2.15-2.35 |
| | | /1 | | | | Nonsupported Polyimide | 3.2-3.6 |

3 Marco experimental

En el diseño de circuitos electrónicos complejos se deben tener en cuenta diferentes tipos de variables topológicas y una estructura modular para que el sistema se comporte lo más cercano a lo esperado, de ser necesario se realizaran cambios, siempre y cuando éstos no representen inconvenientes significativos en la dinámica del sistema.

En este capítulo se muestra el proceso de diseño, del sistema de adquisición de señales implementando diferentes sensores y elaborado por módulos permitiendo una fácil ubicación e independencia de funcionamiento.

3.1. Requerimientos funcionales

Dentro de la construcción de un laboratorio de vibraciones en la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales es preciso desarrollar un sistema de adquisición para la medición de diferentes tipos de señales como vibraciones mecánicas, emisión acústica, velocidad y sonido. A continuación en la Tabla 3-1 se presentan los requerimientos funcionales con mayor especificación del sistema a desarrollar.

Tabla 3-1: Requerimientos funcionales

| | |
|-----------------------|--|
| Vibraciones Mecánicas | Cinco canales de adquisición a 20000 muestras por segundo, filtros anti-alias, salida de datos bajo protocolo SPI. |
| Emisión Acústica | Tres canales configurados para tres tipos de frecuencias diferentes, capacidad de amplificación y filtrado de sonido y salida de datos bajo protocolo SPI. |
| Velocidad | Dos canales para la conexión de sensores de proximidad, con salida de datos para mediciones de fase |
| Sonido | Un canal para la conexión de un micrófono de precisión con amplificación, filtrado y salida de datos bajo protocolo SPI. |

3.2. Diseño del sistema

El diseño electrónico se dividió por secciones, ubicado en diagramas de bloques, y a cada uno de ellos se le dio una prioridad de menor a mayor complejidad. Los sensores son los que permiten el inicio del diseño, entregando la información de los requerimientos eléctricos y son estos los que generan las pautas iniciales para el desarrollo del dispositivo.

El sistema se desarrolló de forma modular (Ver Figura 3-1). Cada módulo trabaja de forma independiente y sus salidas digitales están configuradas bajo el protocolo SPI con el fin de conectarlos a cualquier unidad de procesamiento, además permitiendo un cambio fácil y rápido en caso de una falla no esperada.

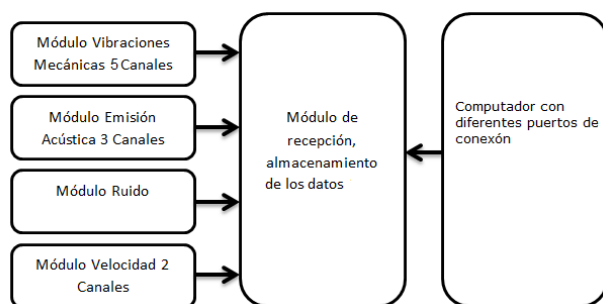


Figura 3-1: Diagrama de bloques del sistema completo

3.2.1. Módulo vibraciones mecánicas

Este módulo consta de 5 etapas diferenciadas: Sensado a través de acelerómetros, circuito IEPE, circuito de acondicionamientos, circuito de filtrado, y finalmente circuito ADC. (ver Figura 3-2).

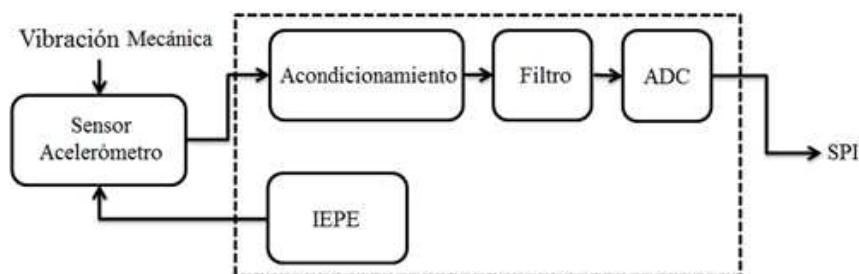


Figura 3-2: Diagrama del módulo de vibraciones mecánicas

Sensor: Acelerómetro



Figura 3-3: Sensor triaxial

Son dispositivos para la medición de vibraciones (ver Figura 3-3), que entregan una señal eléctrica de acuerdo al cambio en la aceleración del mismo. Debe ser ubicado en una superficie rígida y cercana a la máquina que se desea sensar. Su salida consta de tres señales provenientes de tres cambios de aceleración en los ejes x, y, z, lo que permite obtener una lectura tridimensional instantánea proveniente del mismo punto de sensado.

El sensor empleado es el 3333A1 triaxial de la empresa Dytran, Sus características eléctricas se detallan en el documento. (ver Tabla 3-2)

Tabla 3-2: Características eléctricas del sensor triaxial

| | | |
|------------------------------|---------------|------------|
| Sensibilidad | 10 | mV/g |
| Rango de Aceleración | ± 500 | G_{peak} |
| Rango de Frecuencia | 0.31 - 10.000 | Hz |
| Rango de Fuente de Corriente | 2 a 20 | mA |
| Rango de Voltaje Conforme | +18 a +30 | V |
| Impedancia de Salida | 100 | Ω |
| Salida de Voltaje Bias | 11 a 13 | V |

Circuito IEPE

El sensor implementado en el diseño requiere de una fuente de alimentación constante que se encuentra en los rangos de +18 a +30 V y una corriente constante que no debe superar los 20mA. Se establecieron los valores de voltaje de +25 V y una corriente de 2 mA.

Alimentar este tipo de sensor es complejo debido al voltaje elevado que requiere para su funcionamiento. Para evitar el manejo de varios tipos de reguladores se implementó un convertidor DC-DC con una entrada de voltaje que opera desde +2.4 V hasta +5.5 V y puede convertir tan bajo como +0.8 V y tan alto como +28 V y con la configuración realizada en base a su hoja de datos maneja una corriente máxima de 500 mA. La salida de voltaje se

ajusta por medio de las resistencias R1 y R3 a través de la siguiente ecuación que se puede encontrar en [hoja de datos MAX1606 pagina 8]:

$$R1 = R3\left[\left(\frac{V_{OUT}}{V_{FB}}\right) - 1\right] \quad (3-1)$$

Donde $V_{FB} = +1.25$ V y V_{OUT} es el rango de voltaje que se desea utilizar. Para el diseño se implementa +25 V. Dado que la corriente que entrega el conversor DC-DC es de 500 mA y que el sensor soporta solamente hasta los 20 mA, se realiza una conexión en serie con la salida de voltaje con un diodo de corriente constante de 2 mA (D2) Para efectos de pruebas se adiciona al circuito un optoacoplador, permitiendo la activación o desactivación del IEPE.

Circuito de acondicionamiento

Esta etapa se diseña dependiendo principalmente de la sensibilidad y la gravedad que maneja el sensor. Su respuesta se da entre los rangos de ± 5 V. Los conversores analógicos trabajan en rangos de voltajes positivos, por lo que se debe dividir entre 2 para luego aplicar un offset de +2.5 V. Para cumplir estos requerimientos se emplea un amplificador operacional OPA2227 de alta resolución y bajo sonido.

Circuito de filtrado

En esta etapa se eliminan las componentes de frecuencia que no coinciden con el rango espectral del sensor utilizado. Su utilidad es eliminar ruidos electromagnéticos dados por fuentes ajenas a la máquina. La frecuencia de corte pasa bajas del sensor es de 10 kHz, por lo que el filtro con el mismo comportamiento tendrá la misma frecuencia de corte. El filtro seleccionado es de tipo Sallen Key de segundo orden pasa bajas con la siguiente respuesta en frecuencia:

$$F_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (3-2)$$

Al tener los mismos valores de resistencia y capacitancia en el circuito, la frecuencia de corte del circuito se puede ajustar con la relación:

$$F_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3-3)$$

El componente implementado para el diseño del filtro fue un amplificador operacional de referencia OP262H.

Circuito de ADC

Es el encargado de realizar la conversión de la señal analógica que viene del sensor entregando la salida digital en protocolo SPI. El ADS1271 es un conversor de un solo canal con una resolución de 24 bits, que tiene la capacidad de adquirir 52734 muestras por segundo. A diferencia de otros conversores que funcionan en frecuencias superiores a 20 kHz y que se configuran por comando, el ADS1271 se configura directamente a través de sus terminales, haciendo su ajuste más sencillo y robusto.

El conversor en las entradas analógicas se configura en entrada simple y la salida de los datos digitales se envían a un puerto donde se pueden conectar a cualquier módulo de procesamiento.

3.2.2. Módulo emisión acústica

La Emisión Acústica (EA) se define como la clase de fenómenos transitorios donde se generan ondas elásticas por la rápida liberación de energía procedente de fuentes localizadas dentro de un material; el rango de frecuencia típica de EA está entre 25 kHz a 1 MHz.

El sistema cuenta con tres sensores de resonancia para emisiones acústicas. Estos sensores presentan mayor sensibilidad en determinado rango de frecuencia facilitando la detección de eventos EA en diferentes ventanas. Su respuesta en frecuencia cuenta con los siguientes rangos: $R3\alpha = [25 \text{ kHz} - 70 \text{ kHz}]$, $R6\alpha = [35 \text{ kHz} - 100 \text{ kHz}]$ y $R15\alpha = [50 \text{ kHz} - 400 \text{ kHz}]$, y sus frecuencias de resonancia son 29 kHz, 55 kHz y 75 kHz respectivamente.

La adquisición de las señales de emisión acústica requiere las siguientes etapas (ver Figura 3-4):

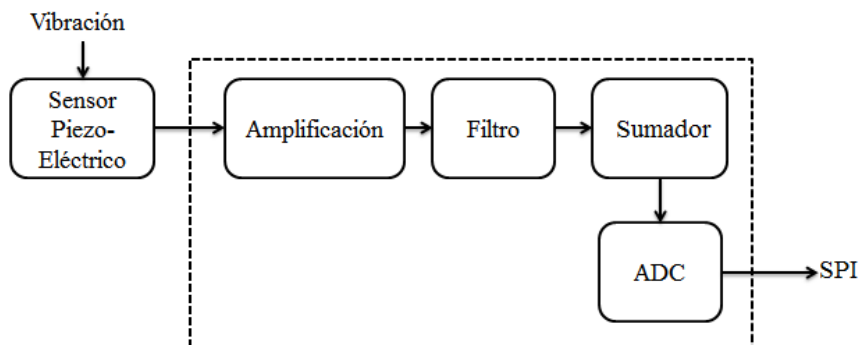


Figura 3-4: Diagrama del módulo de emisión acústica

Ahora se muestra el esquema completo para los tres sensores EA con sus pre-amplificadores y conversores ADC con comunicación SPI (ver Figura 3-5).

El análisis EA funciona para componentes de la máquina, tales como rodamientos, engranajes, ejes, y los componentes estructurales. Una desventaja del análisis EA es su sensibilidad a

otras fuentes de ultrasonidos, tales como la turbulencia, trituración, etc, por lo tanto requiere sensores altamente especializados y procesamiento de señales.

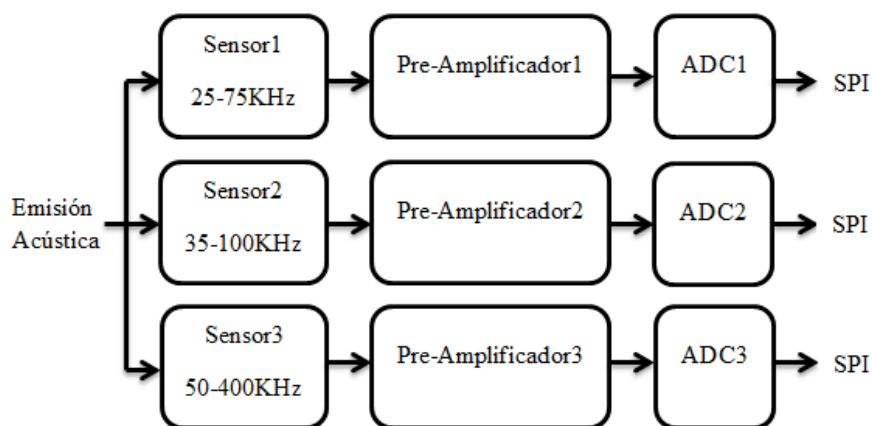


Figura 3-5: Diagrama del módulo de emisión acústica completa

Sensor acústico



Figura 3-6: Sensores acústicos R3 α , R6 α , R15 α

Se emplea un sensor pasivo Piezoeléctrico especial para emisiones acústicas (ver Figura 3-6), El cual es un dispositivo que entrega una variación de tensión según el cambio de presión en su membrana. Posee un rango espectral definido físicamente por su material, que puede comprender entre los kHz y los MHz.

Dado que los sensores implementados en el diseño no contienen una hoja de datos con información para el diseño; el fabricante ofrece un preamplificador que entrega la señal lista para ser llevada a un ADC, sin embargo y debido al alto costo de dicho preamplificador, se desarrolló uno propio basado en [21]

Circuito de pre-amplificación

Dispositivo que desacopla las impedancias entre el sensor y el resto del sistema electrónico con su alta impedancia de entrada. A la vez, es un amplificador no inversor cuya ganancia

está determinada por los resistores R_2 y R_1 de la Figura 3-11. La resistencia R_F y la capacitancia C_F se encargan de igualar la impedancia de salida del sensor de emisión acústica que fue medido, en este caso para el sensor $R3\alpha$, igualando las impedancias de cada lazo del amplificador AD745 basándose en el diseño de la tesis [21]. Las impedancias del sensor de emisión acústica se pueden encontrar en sus respectivas hojas de datos, o en su ausencia se puede medir con dispositivos especializados de impedancias [21].

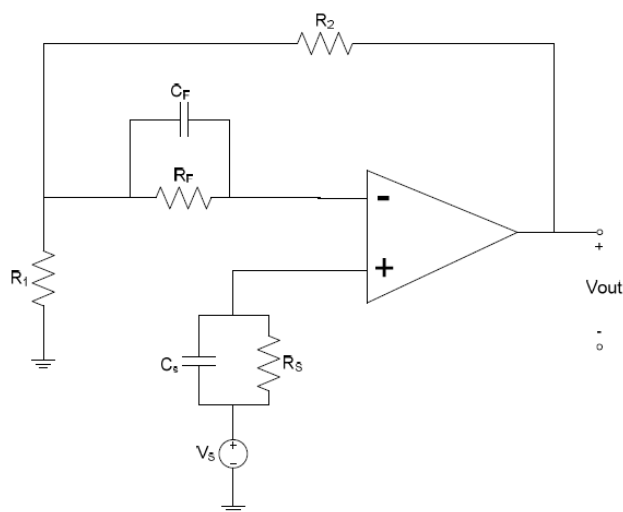


Figura 3-7: Amplificador acústico

Circuito de filtrado y sumador

La función del filtrado es eliminar las componentes de frecuencia que no coinciden con el rango espectral del sensor utilizado, elimina ruidos electromagnéticos dados por fuentes ajenas a la máquina rotativa. Los integrados utilizados para este fin pueden filtrar grandes amplitudes de tensión debido a su elevado *Slew Rate* (capacidad de cambiar la tensión de salida en pequeños intervalos de tiempo; comúnmente se mide $V/\mu s$), por lo que no presentan problema con la etapa de amplificación anterior. El filtro pasa-bandas cuenta con frecuencias de corte especificadas por el sensor, utilizando filtros Sallen Key de segundo orden para cada comportamiento.

Debido a que el ADC requiere tensiones de entrada positivas, la señal alterna filtrada debe subirse con un nivel DC. Para este fin se utiliza un amplificador sumador unitario con una tensión de referencia de $+2.5\text{ V}$, el amplificador operacional implementado es un OPA4228, donde se desarrollaron los filtros y el sumador.

Circuito ADC

Su función es transformar la señal analógicas de la etapa anterior en una señal binaria. Requiere que la señal de entrada sea netamente positiva y no sobrepase una tensión límite,

justificando el uso del amplificador y sumador anteriormente nombrados. La frecuencia de muestreo de este dispositivo debe ser mínimo dos veces la frecuencia de corte superior del rango de frecuencia del sensor. En el sensor R3 α , R6a y R15a la frecuencia de muestreo en los conversores analógicos digital se ajustaron a 156 kSPS, 250 kSPS y 1 MSPS respectivamente. El conversor implementado para el sensor R3 α es el ADS1672 mientras que para los sensores R6a y R15a se emplea el ADS1675, los cuales fueron diseñados en base al kit de desarrollo. ADS1672EVM y ADS1675EVM que ofrece la empresa Texas Instruments. Contiene pines configurables que permiten controlar el método de transmisión de datos, frecuencia de trabajo del conversor y selección de la frecuencia de muestreo.

3.2.3. Módulo sonido

La función principal de este módulo es medir señales de vibración audibles. Para ello se realizaron pruebas al micrófono de precisión con diferentes parlantes conectados a un generador de señales en diferentes tipos de frecuencias.

En la Tabla 3-7 y en la Figura 3-8 se visualiza la caracterización del micrófono, determinando la amplitud máxima, con la cual se pueda configurar la ganancia del amplificador teniendo una amplitud adecuada en la entrada del conversor.

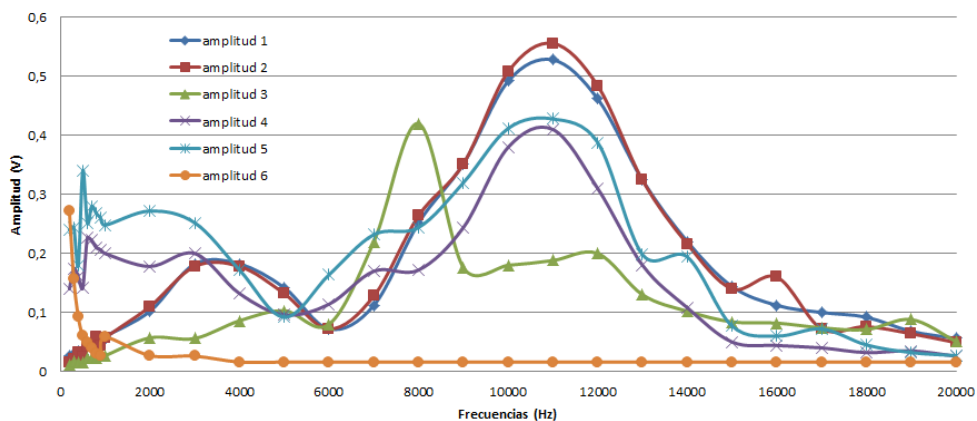


Figura 3-8: Caracterización Micrófono

El micrófono debe llevar una fuente alimentación constante IEPE. En la figura 3-9 se puede observar el diagrama del módulo de sonido diseñado para el micrófono.

Micrófono

Sensor activo Piezoeléctrico para mediciones de audio (ver Figura 3-10). Es un dispositivo que entrega una variación de tensión según el cambio de presión en su membrana. Posee un rango espectral definido físicamente por su material, que puede comprender entre los Hz y los kHz.

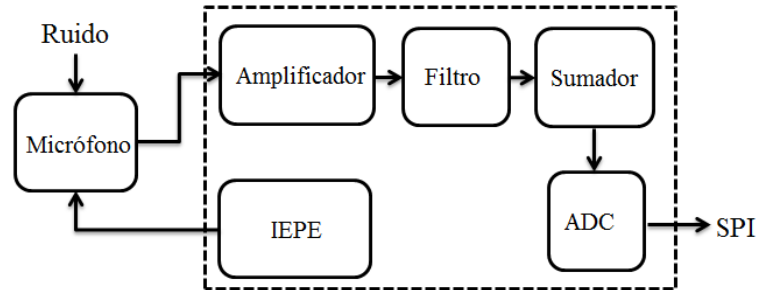


Figura 3-9: Diagrama del módulo de sonido



Figura 3-10: Micrófono

En la Tabla **3-3** se encuentra las características del sensor para el diseño del circuito.

Tabla 3-3: Características eléctricas del micrófono

| | |
|------------------------------|--|
| Frecuencia de respuesta | 20Hz - 4kHz:±1dB y 4kHz - 20kHz:±1.5dB |
| Rango de temperatura | -10 - +50 °C |
| Sensibilidad | ≈50mV/Pa |
| Rango de Fuente de Corriente | 2 - 6 mA |
| Rango de Voltaje | +4 - +30 V |
| Impedancia de Salida | 50 Ω |
| Salida de Voltaje Bias | 12.5 V |

Circuito de amplificación

El amplificador implementado es el AD745, similar al implementado en emisión acústica con ajustes en R1 y R2 para la ganancia. Los valores R_F y C_F usados para igualar la impedancia de salida del sensor no son necesarios debido a que el micrófono es activo, es decir, el sensor requiere IEPE y tiene la suficiente potencia para el funcionamiento del micrófono. (ver Figura **3-11**)

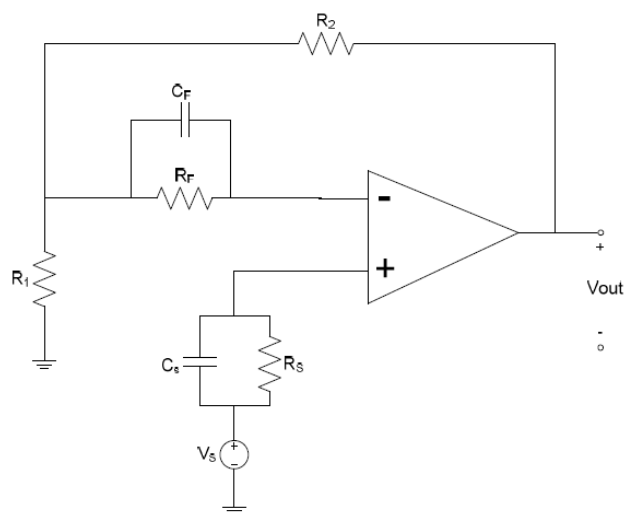


Figura 3-11: Amplificador micrófono

El diseño del IEPE se realiza con la alimentación del modulo sonido de +12V y con un diodo de corriente constante de 2mA. Para el ensamblaje físico, el micrófono es conectado en serie a la entrada positiva del amplificador, junto con un condensador de $0.01\mu\text{F}$ para eliminar las componentes DC.

Circuito de filtrado

Para el filtrado del micrófono se implementó el mismo tipo de filtro diseñado para emisión acústica cambiando las frecuencias de trabajo.

Dado a que el ADC requiere tensiones de entrada positivas, la señal alterna filtrada debe subirse con un nivel DC para ser convertida a señal digital. Para este fin se utiliza un amplificador sumador unitario con una tensión de referencia de +2.5V. El circuito integrado implementado para el filtro y sumador es el OPA4228.

Circuito ADC

Su función es transformar la señal analógica de la etapa anterior en una señal binaria. Requiere que la señal de entrada sea netamente positiva y no sobrepase una tensión límite. Así mismo, la frecuencia de muestreo de este dispositivo debe ser mínimo dos veces la frecuencia de corte superior del rango de frecuencia del sensor, es decir 40kHz. Para cumplir estos requerimientos se emplea el conversor ADS1252 cuyas características suplen las necesidades de diseño establecidas.

3.2.4. Módulo velocidad

El módulo de velocidad emplea una señal proveniente de un sensor de proximidad, la cual es acondicionada en amplitud dentro de un rango de 0 - +3.3V con el fin de cumplir con las restricciones de voltaje máximo permitido por el módulo de proceso. (ver Figura 3-12)

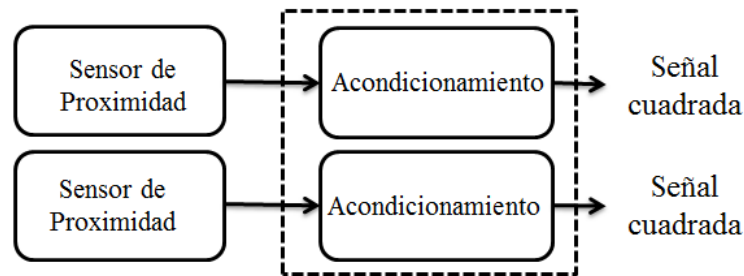


Figura 3-12: Diagrama del módulo de velocidad

Sensor de proximidad



Figura 3-13: Sensor de proximidad

Un sensor de proximidad (ver Figura 3-13) es un transductor que detecta objetos o señales que se encuentran cerca del elemento sensor.

Tabla 3-4: Características sensor de proximidad

| | |
|-------------------------|----------|
| Voltaje de alimentación | 10 - 30V |
| Frecuencia | 500Hz |
| Alcance | 4mm |
| Diámetro | 12mm |

Acondicionamiento

Según la Tabla 3-4 la salida de voltaje máxima que genera el sensor es de +12V El circuito acondiciona esta amplitud a un valor entre 0 - +3.3V empleando una configuración de transistores en corte y saturación (ver Figura 3-14), donde por cada pulso positivo que entrega

el sensor el transistor se satura permitiendo el paso del voltaje de +3.3V y por cada pulso negativo entra en corte.

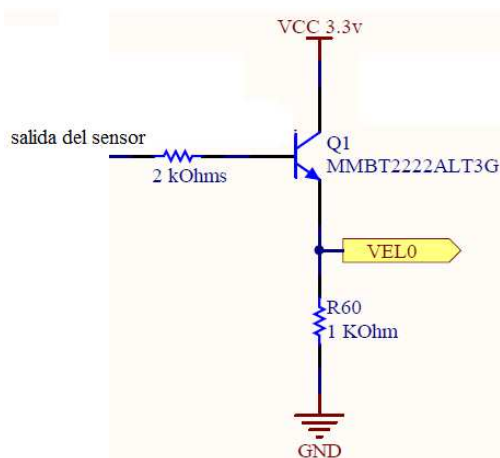


Figura 3-14: Acondicionamiento Transistor

3.2.5. Módulo fuente de alimentación

Cada módulo de adquisición tiene una entrada de alimentación a +12V, -12V y GND a 2A. Se debe mantener controlado el voltaje de alimentación, por lo cual se emplean reguladores de voltaje de +5V, +3.3V, y referencias de voltaje de +2.5V; en la Figura 3-15 se muestra un diagrama de como se distribuye la alimentación en cada uno de los módulos.

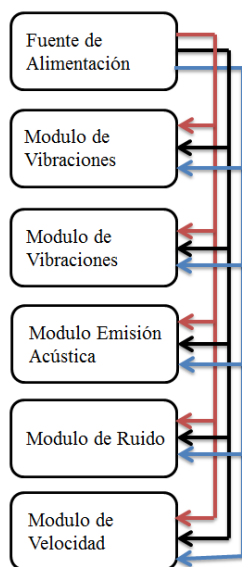


Figura 3-15: Fuente de alimentación

3.2.6. Protocolo de pruebas

Para probar el funcionamiento de la parte analógica de cada módulo se implementa un protocolo de pruebas orientado a la observación de señales tanto de generador como de cada sensor en las diferentes etapas del proceso. Estas etapas de tratamiento de la señal van desde el sensor (polarización y/o acople de impedancias) hasta la entrada del ADC. En forma general pueden resumir en: Sensor, Acondicionamiento y filtrado. El objetivo del protocolo de pruebas es verificar que los montajes presentan un comportamiento acorde a los cálculos y las simulaciones, teniendo en cuenta que el rango de tensiones soportado por el ADC es de 0 a 5 VDC.

Pruebas de generador

Las pruebas que se hacen con el generador se basan en alimentar al circuito con una señal alterna en frecuencias críticas para la etapa del filtrado como se muestra en la Tabla 3-5.

Tabla 3-5: Frecuencias críticas para las pruebas de cada módulo de adquisición

| Filtrado | Frecuencias críticas |
|------------|--|
| Pasa bajas | Frecuencia pasante y frecuencia rechazada. |
| Pasa banda | Frecuencia rechazada baja, frecuencia pasante y frecuencia rechazada baja. |

Para cada frecuencia crítica se toman imágenes de la salida de cada etapa como se ilustra en la Tabla 3-6

Además de las gráficas anteriores se extrae la respuesta en frecuencia de cada módulo haciendo un barrido de frecuencias desde el generador. El resultado es un diagrama de Bode que permite observar el ancho de banda de cada filtro y la amplitud de salida máxima para cada valor de frecuencia.

Pruebas de sensor

Para probar la respuesta del sensor y las etapas de tratamiento de la señal se acopla cada sensor a un sistema mecánico de pruebas. La respuesta obtenida de cada sensor es una mezcla de diferentes señales a diferentes frecuencias por lo que no se necesita tomar varias imágenes por cada etapa, asumiendo que la señal del sensor aplica en la banda pasante del filtro.

Formato de protocolo de pruebas para equipos de vibraciones

En el siguiente formato de protocolo de pruebas permitirá comprobar el funcionamiento de el/los módulos de adquisición en cada una de las etapas que tengan implementadas a su vez se debe calcular la media, la desviación estándar y el error estándar, graficando las

respuestas con cada frecuencias utilizadas de esta manera se pueda comprobar que el/los módulos funcionen correctamente.

PROTOCOLO DE PRUEBAS

Nota: Todas las Señales usadas en este protocolo son Señales Sinusoidales con frecuencias de 10 a 500kHz y sensores conectados a la máquina.

1. Energizar el/los módulos que tengan estándar IEPE y sin conectar el/los sensores, realizar mediciones verificando que cumpla el estándar.

- Voltaje en rangos de 18 - 30V.
- Corriente en rangos de 2 - 20mA.

Conectando el/los sensores:

- Voltaje de polarización 11 - 13V.

2. Desactivando el estándar IEPE en el/los módulos conectar el generador de señales ajustando la amplitud al mismo nivel que entregan los sensores y variando la frecuencia verificar la señal de salida en el/los conectores, acondicionamientos, filtrados.

- Amplitudes en rangos de 0 - 5V.
- Atenuaciones en las señales.
- Saturación de los amplificadores.
- Respuesta de los filtros.

3. Repitiendo el numeral anterior calcular la media, la desviación estándar y el error estándar de el/los módulos, realizando los siguientes pasos:

- Para cada frecuencia tomar 10 o mas valores de entrada de voltajes distintos y midiendo la salida, calcular la ganancia $G = \frac{V_{out}}{V_{in}}$.
- Calcular la media de las ganancias obtenidas para cada valor de frecuencia $\mu = \frac{\sum G_i}{N}$.
- Calcular la desviación estándar para cada frecuencia, con las ganancias obtenidas $\sigma = \sqrt{\frac{\sum (G_i - \mu)^2}{N}}$.
- Calcular el error estándar para cada frecuencia $E_s = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$.
- Graficar la media, la desviación estándar, cada uno de ellos vs frecuencia.

4. Verificar la comunicación SPI de los conversores de el/los módulos conectándolos a un módulo de proceso solicitando datos y con un analizador lógico verificar:

- Frecuencia de la señal de reloj.
 - Tiempo entre muestras
 - Tiempo de recolección de los datos.
 - Recolección de los datos y transferencia.
5. Conectando el/los módulos al generador de señales y adquiriendo las muestras comparar la frecuencia del generador con la frecuencia adquirida y llenar los datos en la siguiente tabla:

| Prueba | Frecuencia del generador | Frecuencias adquirida | Diferencia entre frecuencias |
|--------|--------------------------|-----------------------|------------------------------|
| 1 | | | |
| 2 | | | |
| 3 | | | |
| 4 | | | |
| 5 | | | |

6. Generando diferentes fallas en la máquina y conectando el/los sensores a la máquina y verificar que las señales obtenidas corresponden al daño generado y colocar los datos en la siguientes tablas.

| Pruebas | Daño | Punto 1 | Punto 2 | Punto 3 | Punto 4 | Punto 5 | Punto 6 |
|---------|------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1 | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | |

Tabla 3-6: Imágenes tomadas para cada módulo de adquisición.

| Tipo de señal | Etapa | Frecuencia típica |
|---------------|------------------|-----------------------|
| AE - Audio | Entrada OPA | Inferior al filtro HP |
| AE - Audio | Salida OPA | Inferior al filtro HP |
| AE - Audio | Salida filtro HP | Inferior al filtro HP |
| AE - Audio | Salida filtro LP | Inferior al filtro HP |
| AE - Audio | Entrada OPA | Frecuencia pasante |
| AE - Audio | Salida OPA | Frecuencia pasante |
| AE - Audio | Salida filtro HP | Frecuencia pasante |
| AE - Audio | Salida filtro LP | Frecuencia pasante |
| AE - Audio | Entrada OPA | Superior filtro LP |
| AE - Audio | Salida OPA | Superior filtro LP |
| AE - Audio | Salida filtro HP | Superior filtro LP |
| AE - Audio | Salida filtro LP | Superior filtro LP |
| Vibración | Entrada OPA | Frecuencia pasante |
| Vibración | Salida OPA | Frecuencia pasante |
| Vibración | Salida filtro LP | Frecuencia pasante |
| Vibración | Entrada OPA | Superior filtro LP |
| Vibración | Salida OPA | Superior filtro LP |
| Vibración | Salida filtro LP | Superior filtro LP |

Tabla 3-7: Caracterización micrófono

| Frecuencia | Amplitud 1 | Amplitud 2 | Amplitud 3 | Amplitud 4 | Amplitud 5 | Amplitud 6 |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 200 | 0,0272 | 0,0156 | 0,012 | 0,14 | 0,24 | 0,272 |
| 300 | 0,03 | 0,02 | 0,017 | 0,174 | 0,244 | 0,156 |
| 400 | 0,034 | 0,033 | 0,015 | 0,16 | 0,18 | 0,092 |
| 500 | 0,028 | 0,025 | 0,016 | 0,142 | 0,34 | 0,06 |
| 600 | 0,044 | 0,041 | 0,022 | 0,226 | 0,252 | 0,049 |
| 700 | 0,047 | 0,041 | 0,023 | 0,222 | 0,28 | 0,04 |
| 800 | 0,059 | 0,058 | 0,023 | 0,21 | 0,268 | 0,03 |
| 900 | 0,047 | 0,043 | 0,027 | 0,206 | 0,26 | 0,026 |
| 1000 | 0,059 | 0,057 | 0,027 | 0,2 | 0,248 | 0,058 |
| 2000 | 0,102 | 0,11 | 0,057 | 0,178 | 0,272 | 0,027 |
| 3000 | 0,182 | 0,178 | 0,056 | 0,2 | 0,252 | 0,026 |
| 4000 | 0,182 | 0,178 | 0,086 | 0,132 | 0,172 | 0,016 |
| 5000 | 0,142 | 0,132 | 0,103 | 0,096 | 0,092 | 0,016 |
| 6000 | 0,072 | 0,072 | 0,08 | 0,114 | 0,164 | 0,016 |
| 7000 | 0,112 | 0,128 | 0,22 | 0,17 | 0,232 | 0,016 |
| 8000 | 0,252 | 0,264 | 0,42 | 0,172 | 0,244 | 0,016 |
| 9000 | 0,352 | 0,352 | 0,176 | 0,244 | 0,32 | 0,016 |
| 10000 | 0,492 | 0,508 | 0,18 | 0,38 | 0,412 | 0,016 |
| 11000 | 0,528 | 0,556 | 0,188 | 0,41 | 0,428 | 0,016 |
| 12000 | 0,462 | 0,484 | 0,2 | 0,31 | 0,388 | 0,016 |
| 13000 | 0,324 | 0,324 | 0,13 | 0,18 | 0,198 | 0,016 |
| 14000 | 0,22 | 0,216 | 0,102 | 0,108 | 0,194 | 0,016 |
| 15000 | 0,144 | 0,14 | 0,084 | 0,05 | 0,077 | 0,016 |
| 16000 | 0,112 | 0,16 | 0,082 | 0,044 | 0,06 | 0,016 |
| 17000 | 0,1 | 0,072 | 0,074 | 0,04 | 0,072 | 0,016 |
| 18000 | 0,092 | 0,076 | 0,071 | 0,032 | 0,045 | 0,016 |
| 19000 | 0,068 | 0,064 | 0,088 | 0,035 | 0,032 | 0,016 |
| 20000 | 0,056 | 0,049 | 0,051 | 0,026 | 0,027 | 0,016 |

4 Resultados y discusión

En la Sección 3 se presentó el conjunto de requerimientos necesarios para implementar el sistema de monitoreo de condición de señales industriales, en particular, señales de vibraciones mecánicas y de emisión acústica. Así mismo, se describió la metodología empleada en este trabajo para cumplir con dichos requerimientos. En esta Sección se muestran los resultados obtenidos al aplicar la metodología empleada y cada uno de estos resultados es organizado de acuerdo a cada uno de los módulos diseñados e implementados, es decir, se sigue el mismo esquema empleado en la Sección anterior.

4.1. Módulo vibraciones

El módulo de vibraciones consta de tres canales para la conexión de tres sensores acelerómetros axiales o un sensor triaxial y es mostrado en la Figura 4-1. Este módulo incluye terminales BNC, los cuales brindan una conexión segura tanto para los sensores como para realizar las pruebas de calibración del sistema empleando un generador de señales. Para efectos de la realización de las pruebas de calibración es necesario desactivar los circuitos de acople IEPE (específicos para los sensores piezoeléctricos activos), para lo cual se utilizan JUMPERs. Es importante notar que la etapa de acondicionamiento solamente es empleada para elevar la tensión de entrada de los datos a valores que sean aceptables para el ADC, obteniendo un valor de +2,5 V para lograr una elevación apropiada.

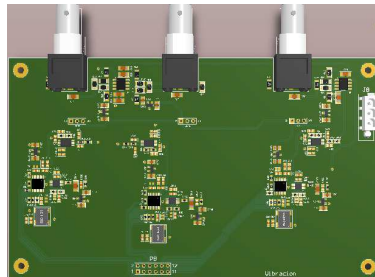


Figura 4-1: Módulo vibraciones

Luego se encuentran los filtros activos aplicados a cada uno de los canales de vibración, los cuales se establecieron con una frecuencia de corte de 10 kHz según la frecuencia máxima que se encuentra en la hoja de datos de los sensores. En la Tabla 4-1 y en la Figura 4-2 se puede observar la respuesta del filtro en amplitud pico a pico con diferentes frecuencias, la

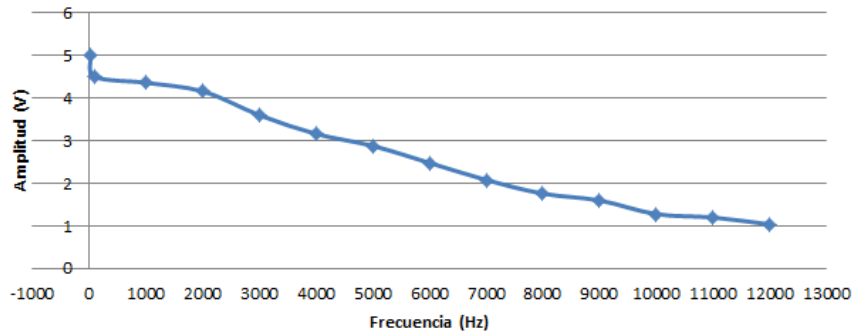


Figura 4-2: Filtro pasa bajas para la señal de vibración mecánica con una frecuencia de corte de 10 kHz

amplitud de la señal de prueba a la entrada de los canales se ajusto a la máxima amplitud que funciona el sensor que va en los rangos de $\pm 5 V_{pp}$.

Tabla 4-1: Respuesta del filtro pasa bajas para la señal de vibración.

| Frecuencia (Hz) | Amplitud V_{pp} |
|-----------------|-------------------|
| 10 | 5 |
| 100 | 4,5 |
| 1000 | 4,36 |
| 2000 | 4,16 |
| 3000 | 3,6 |
| 4000 | 3,16 |
| 5000 | 2,88 |
| 6000 | 2,48 |
| 7000 | 2,08 |
| 8000 | 1,76 |
| 9000 | 1,6 |
| 10000 | 1,28 |
| 11000 | 1,2 |
| 12000 | 1,04 |

Por último, el ADC es configurado para que la salida digital sea transmitida mediante el protocolo SPI, de manera tal, que la señal digital puede ser recibida y procesada bajo cualquier plataforma de procesamiento digital de señales (DSP, FPGA, Microcontroladores, entre otras).

A continuación se muestran los resultados obtenidos en cada una de las pruebas de calibración y la señal original adquirida por etapa implementada.

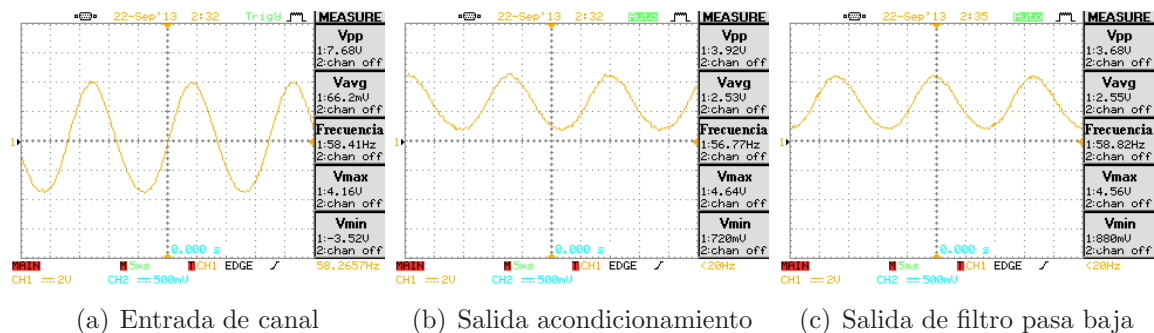


Figura 4-3: Respuesta en cada etapa del módulo de vibraciones empleando una señal adquirida del generador de señales a 58 Hz.

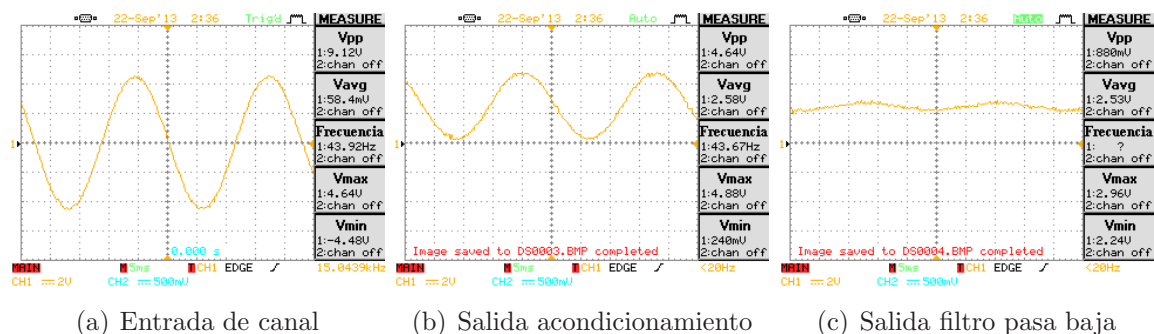


Figura 4-4: Respuesta en cada etapa del módulo de vibraciones empleando una señal adquirida del generador de señales a 12 kHz.

4.1.1. Prueba 1: Señal del generador a 58 Hz

Se realiza a una frecuencia baja para comprobar el comportamiento en cada etapa del módulo de la siguiente forma: En la Figura 4.3(a) se muestra la señal entregada por el generador, la cual debe ser elevada a una tensión de 2,5VDC y reducida 0,5 veces como se muestra en las Figuras 4.3(b) y 4.3(c), respectivamente. En estas Figuras se observa que la señal no tiene atenuación debido a que se opera con una frecuencia pasante.

4.1.2. Prueba 2: Señal del generador a 12 kHz

Se realiza a una frecuencia alta (superior a 10 kHz), la cual se espera sea rechazada por el filtro. Cada etapa es valorada se dispone en la siguiente forma: La Figura 4.4(a) muestra la señal entregada por el generador; Luego, la señal es amplificada a 2,5VDC (Figura 4.4(b)) y reducida 0,5 veces, dando así cumplimiento a los requerimientos demandados por el ADC; Por último, La Figura 4.4(c) muestra la señal rechazada por el filtro pasa bajas.

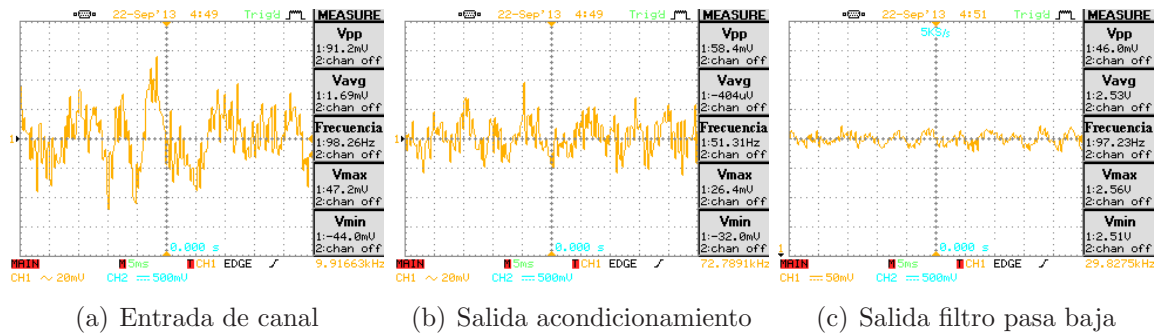


Figura 4-5: Respuesta en cada etapa del módulo de vibraciones empleando una señal adquirida con un acelerómetro.

4.1.3. Prueba 3: Señal del acelerómetro

Se realiza con un sensor axial ubicado en sentido perpendicular a la dirección horizontal del eje, en particular, en contacto con el soporte donde se encuentra un rodamiento. Lo anterior se hace con el de obtener lo más fielmente posible la señal que genera el rodamiento mientras la máquina se encuentra bajo una velocidad de operación constante. Al igual que en las pruebas anteriores, la Figura 4.5(a) muestra la señal analógica adquirida por la fuente, la cual es reducida 0,5 veces y elevada a 2,5 VDC y filtrada, como se muestra en las Figuras 4.5(b) y 4.5(c), respectivamente.

4.1.4. Discusión

- El funcionamiento del módulo de vibración se comportó adecuadamente para cada etapa en las tres pruebas realizadas según los diseños realizados. En el caso del IEPE, mientras estuvo activo, la polarización indicada por el fabricante del sensor entre +11 y +13 VDC se entregó correctamente, y cuando se puso inactivo, dejó pasar la señal del generador de señales sin provocar daños o interferencias. La etapa de acondicionamiento conservó su ganancia de 0,5 veces y la elevación a +2,5 VDC cumpliendo con los parámetros indicados por el fabricante del dispositivo ADC. Cuando la señal es tratada mediante el filtro, la respuesta en frecuencia es descendiente y con esto se eliminan componentes espectrales no congruentes a las frecuencias suministradas por el sensor. Por último, los conversores analógico-digitales entregaron señales binarias SPI aptas para cualquier dispositivo de tratamiento digital como FPGA, DSP, Microcontroladores, entre otros.
- La implementación del diseño en una tarjeta PCB cuenta con condensadores de desacople para polarización de los integrados, reduciendo el ruido y cumpliendo con las especificaciones de los fabricantes. La forma de las pistas se realizó dependiendo de su aplicación, notando gran diferencia que para el IEPE se utilizan secciones de un área

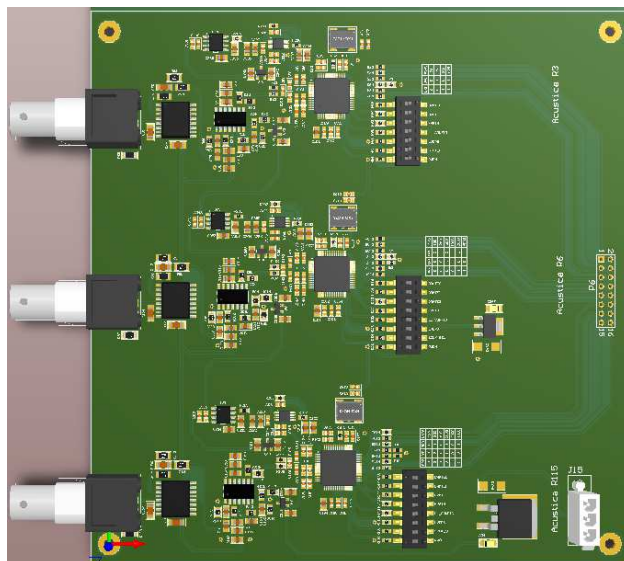


Figura 4-6: Módulo emisión acústica.

cuadrada considerable para evadir ruido de alta frecuencia.

4.2. Módulo emisión acústica

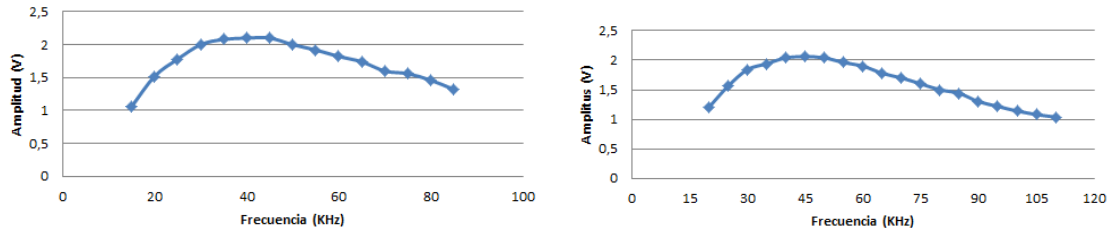
El módulo mostrado en la Figura 4-6 consta de tres canales de adquisición diseñados para tres sensores especificados a continuación: $R3\alpha = [25 - 70] \text{ kHz}$, $R6\alpha = [35 - 100] \text{ kHz}$ y $R15\alpha = [50 - 400] \text{ kHz}$. Cada canal implementa un ajuste de impedancias a la entrada del amplificador, filtros pasa-banda acordes a las frecuencias de corte indicadas por cada sensor y conversores análogo-digitales con diferentes frecuencias de muestreo y modos de trabajo configurables.

La respuesta en frecuencia de cada filtro pasa banda se muestra en la Figura 4-7 correspondientes a los valores que se tienen en la Tabla 4-2. La amplitud máxima de cada canal de adquisición no supera los $2,5 V_{pp}$ para proteger el ADC de una sobrecarga que pueda tener el sensor. Esta medida de precaución se hace debido a que el fabricante de los sensores no entrega información de tensión máxima de salida y los cálculos se hacen sobreestimando la amplitud máxima observada para cada sensor (400 mV_{pp}).

A continuación se muestran los resultados obtenidos para cada una de las pruebas definidas en la Sección 3.

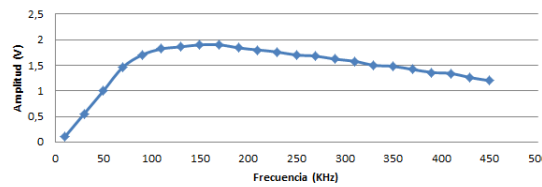
4.2.1. Prueba 1: Señal del generador a 15 kHz en $R3\alpha$

La prueba se realiza a una frecuencia baja, la cual es rechazada por el filtro pasa altas para analizar el funcionamiento del circuito en la siguiente forma: En la Figura 4.8(a) se muestra



(a) R3α entre 25 kHz - 75 kHz

(b) R6a entre 35 kHz - 100 kHz



(c) R15a entre 50 kHz - 400 kHz

Figura 4-7: Filtros pasa banda en sensores de emisión acústica.

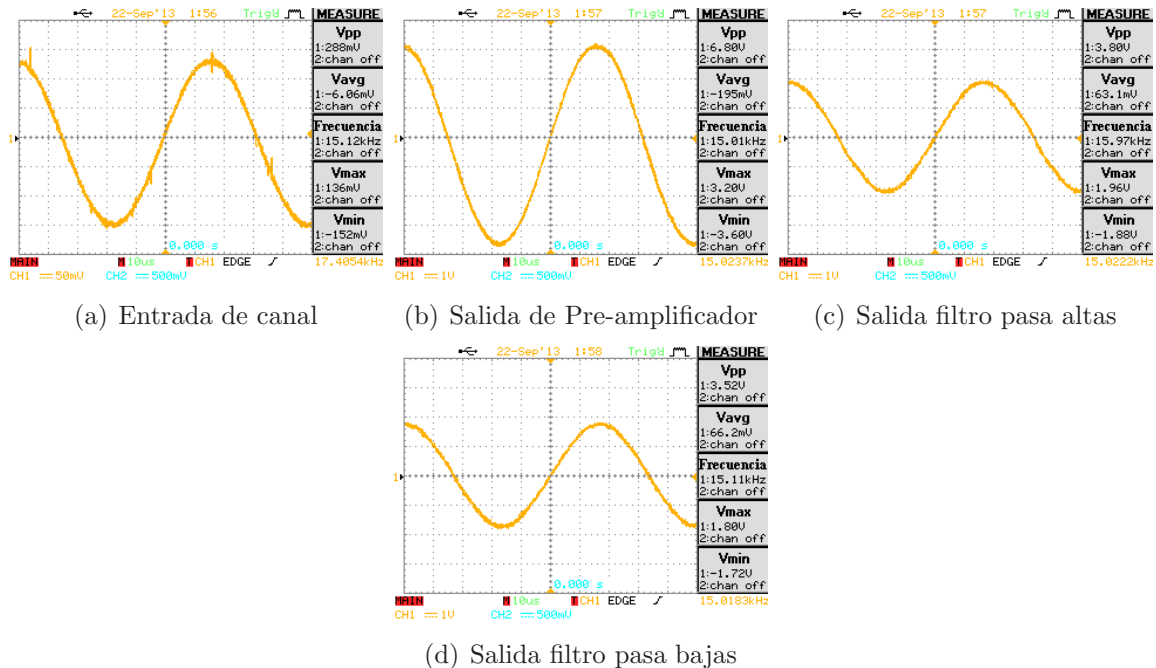


Figura 4-8: Respuesta en cada etapa del sensor R3α empleando una señal adquirida del generador de señales a 15 kHz.

la señal entregada por el generador de señales a una amplitud similar a la observada en el sensor; Luego, la señal es amplificada (Figura 4.8(b)) y filtrada por el filtro pasa altas que la atenúa por no superar su frecuencia de corte (ver Figura 4.8(c)); Por último, se muestra en la Figura 4.8(d) la salida del filtro pasa bajas que no rechaza la señal de entrada.

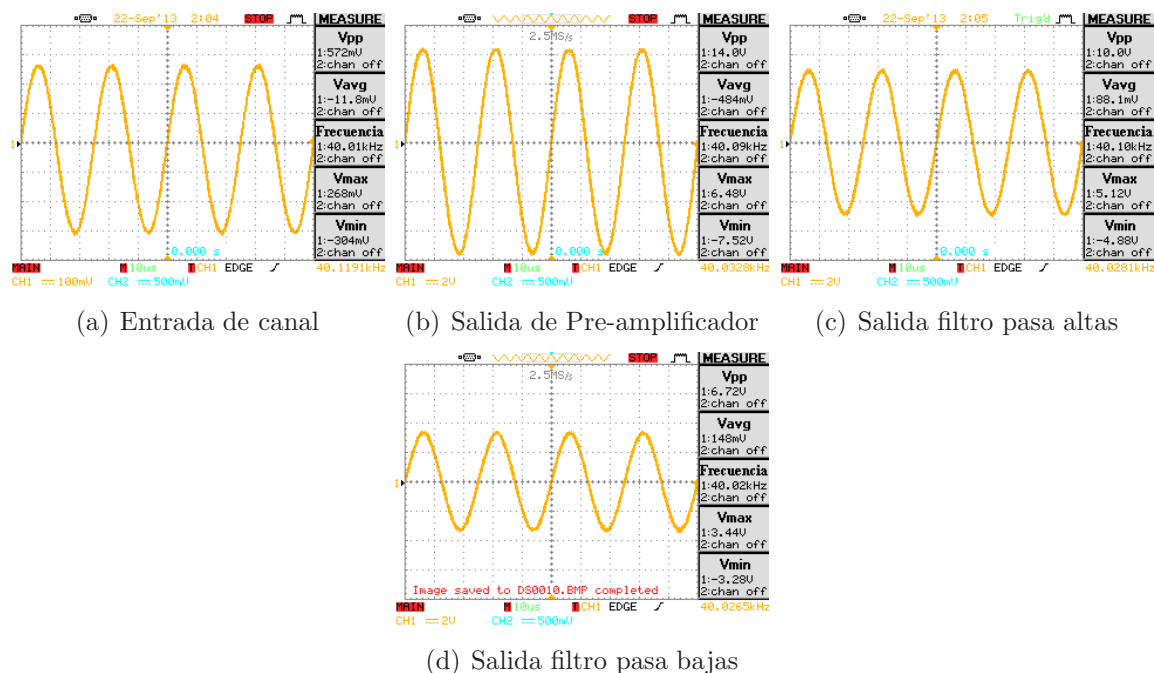


Figura 4-9: Respuesta en cada etapa del sensor $R3\alpha$ empleando una señal adquirida del generador de señales a 40 kHz.

4.2.2. Prueba 2: Señal del generador a 40 kHz en $R3\alpha$

Se realiza a una frecuencia media aceptada en el filtro pasa banda para el análisis del circuito de la siguiente forma: en la Figura 4.9(a) se muestra la señal entregada por el generador de señales a una amplitud mucho mayor que la observada en una prueba común del sensor, la cual es amplificada y filtrada en las siguientes etapas (Figuras 4.9(b), 4.9(c) y 4.9(d)) sin atenuación por alguno de los filtros. Se puede observar que en caso de sobrepasar la tensión máxima observada en el sensor, se puede inducir un fallo en el dispositivo ADC.

4.2.3. Prueba 3: Señal del generador a 95 kHz en $R3\alpha$

La prueba se realiza con una frecuencia alta rechazada por el filtro pasa banda para el análisis del circuito de la siguiente forma: en la Figura 4.10(a) se muestra la señal del generador a una tensión que sobrepasa el rango observado previamente, la cual se amplifica en la Figura 4.10(b) y se filtra, como se en las Figuras 4.10(c) y 4.10(d) con gran atenuación en la última etapa a cargo del filtro pasa bajas.

4.2.4. Prueba 4: Señal del sensor $R3\alpha$

Para la prueba se obtiene la salida del sensor mostrada en la Figura 4-11. Las etapas de amplificación y filtrado no se muestran en los resultados debido a la saturación en la etapa

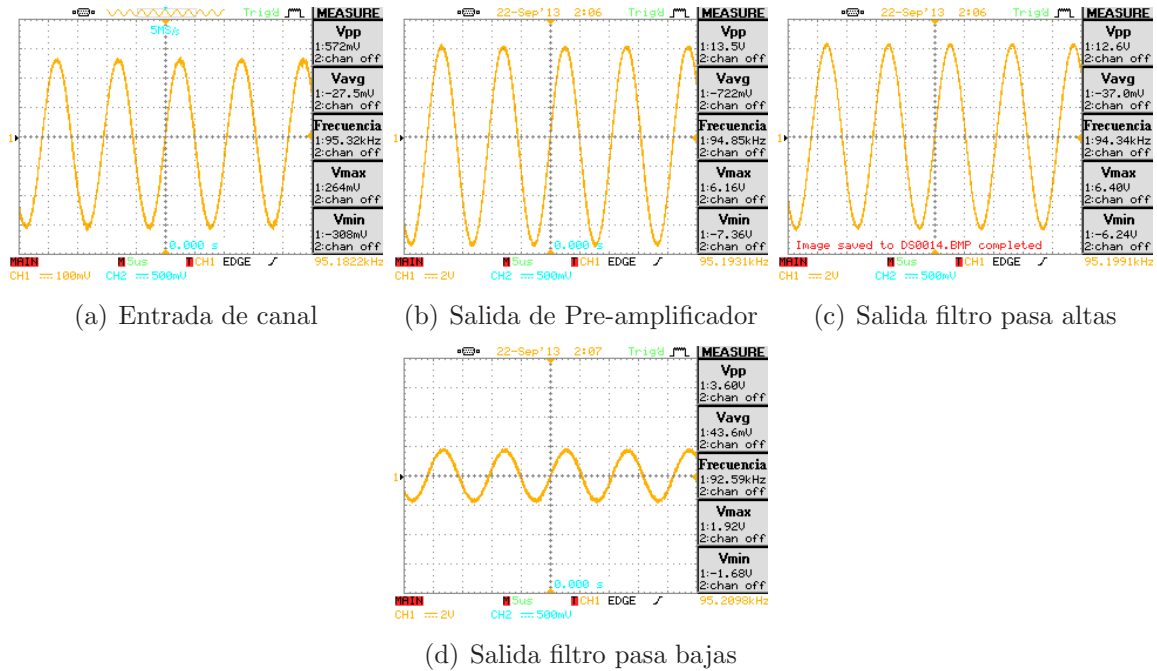


Figura 4-10: Respuesta en cada etapa del sensor R3 α empleando una señal adquirida del generador de señales a 95 kHz.

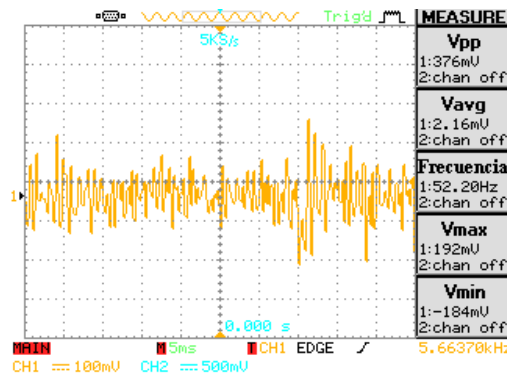


Figura 4-11: Respuesta en cada etapa del sensor R3 α empleando una señal adquirida en el banco de pruebas.

de amplificación provocada por la desigualdad de impedancias entre el sensor y el circuito.

4.2.5. Prueba 5: Señal del generador a 20 kHz en R6a

Se realiza la prueba con una frecuencia inferior a la banda pasante del filtro para en análisis del circuito en la siguiente forma: En la Figura 4.12(a) se muestra la señal del generador que se amplifica como se ve en la Figura 4.12(b). La señal amplificada es rechazada por el filtro pasa altas (Figura 4.12(c)), cuyo resultado pasa sin atenuarse en el filtro pasa bajas

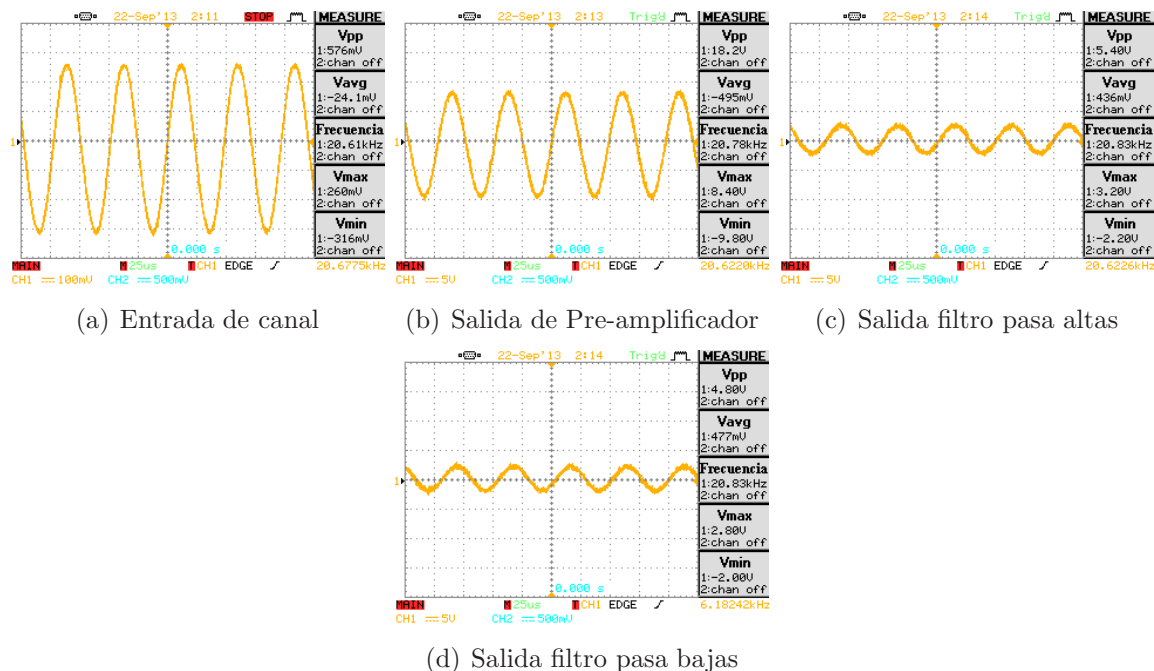


Figura 4-12: Respuesta en cada etapa del sensor R6a empleando una señal adquirida del generador de señales a 20 kHz.

ilustrado en Figura 4.12(d).

4.2.6. Prueba 6: Señal del generador a 45 kHz en R6a

Se usa una frecuencia media aceptada por el filtro pasa banda para el análisis del circuito de la siguiente forma: en las Figuras 4.13(a) y 4.13(b) se muestran las señales del generador y su respectiva amplificación, la cual es atenuada levemente por el filtro pasa banda en la Figura 4.13(c) y 4.13(d) respetando una amplitud considerable.

4.2.7. Prueba 7: Señal del generador a 120 kHz en R6a

Se usa una señal en alta frecuencia rechazada por el filtro pasa banda para el análisis del circuito de la siguiente forma: en las Figuras 4.14(a) y 4.14(b) se muestran las señales del generador y su respectiva amplificación.

4.2.8. Prueba 8: Señal del sensor R6a

La prueba emplea el sensor R6a para el análisis del circuito, en donde las Figuras 4.15(a) y 4.15(b) muestran la respuesta del sensor y su respectiva amplificación. Las Figuras 4.15(c) y 4.15(d) son la respuesta de cada filtro del canal sin atenuación severa a la señal resultante de la amplificación.

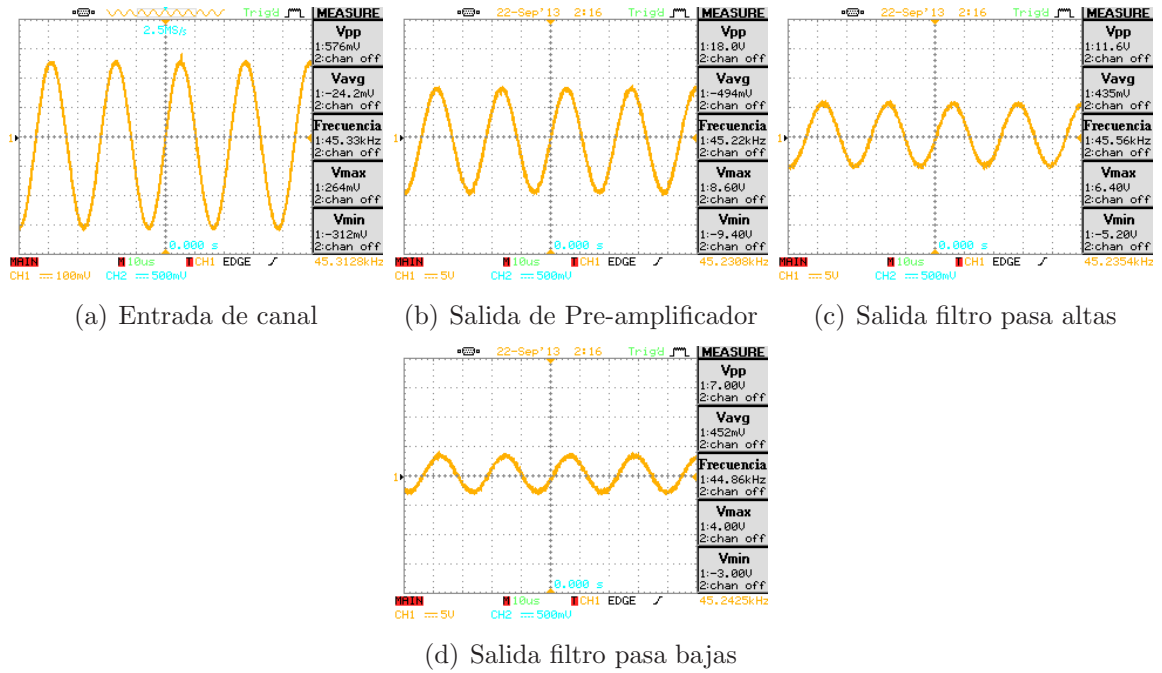


Figura 4-13: Respuesta en cada etapa del sensor R6a empleando una señal adquirida del generador de señales a 45 kHz.

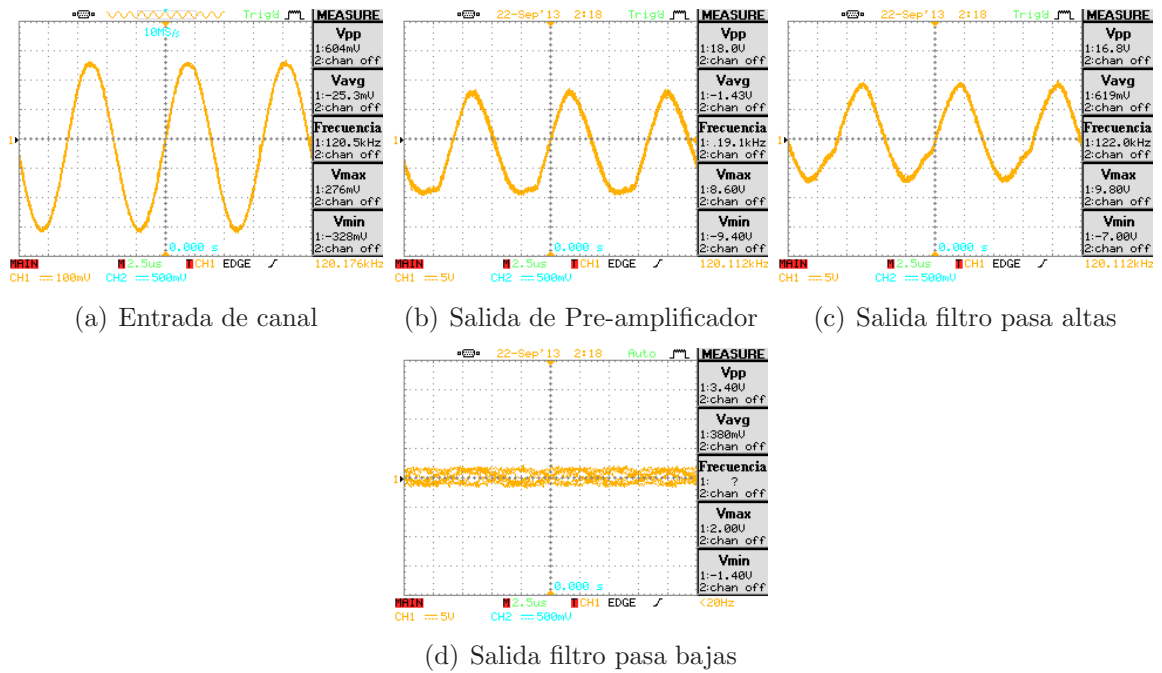


Figura 4-14: Respuesta en cada etapa del sensor R6a empleando una señal adquirida del generador de señales a 120 kHz.

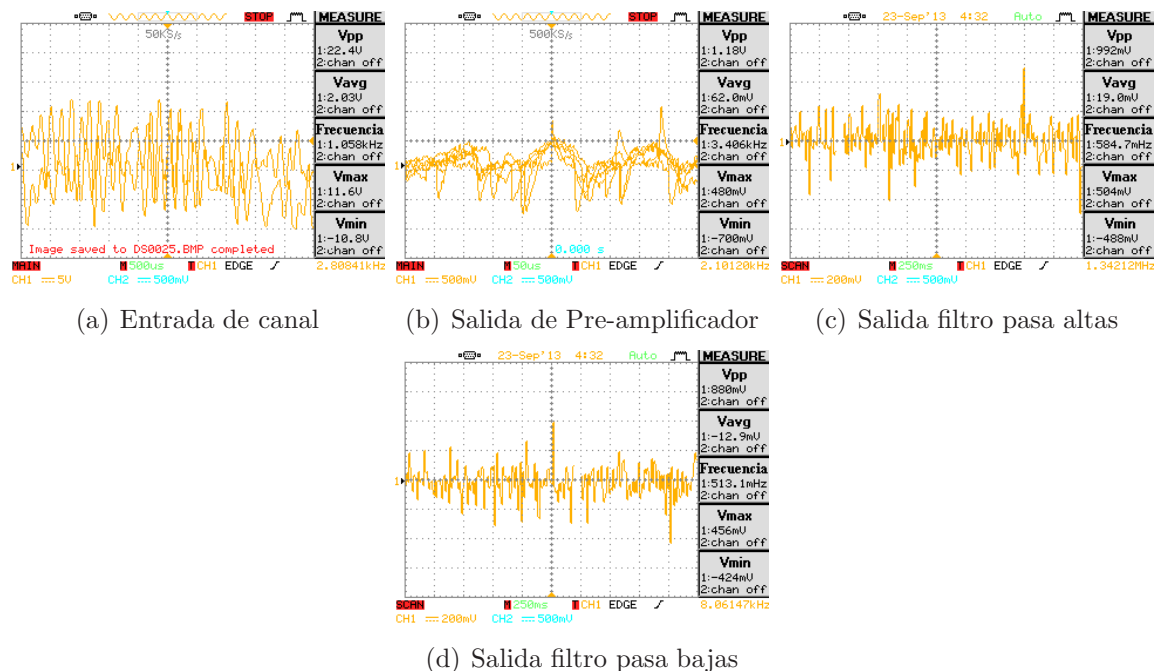


Figura 4-15: Respuesta en cada etapa del sensor R6a empleando una señal de emisión acústica.

4.2.9. Prueba 9: Señal del generador a 30 kHz en R15a

La prueba se hace con una frecuencia baja rechazada por el filtro pasa banda para el estudio del circuito de la siguiente forma: La Figura 4.16(a) muestra la señal del generador, en tanto que la Figura 4.16(b) muestra su amplificación respectiva. Mientras que las Figuras 4.16(c) y 4.16(d) reflejan el rechazo a la señal desde el filtro pasa altas del circuito.

4.2.10. Prueba 10: Señal del generador a 150 kHz en R15a

La prueba se hace con una frecuencia aceptada por el filtro pasa banda para el análisis del circuito, de esta forma, la señal suministrada por el generador es mostrada en la Figura 4.17(a) y su respectiva amplificación en la Figura 4.17(b). Asimismo, la señal es levemente atenuada por el filtro, como se puede observar en las Figuras 4.17(c) y 4.17(d).

4.2.11. Prueba 11: Señal del generador a 430 kHz en R15a

La prueba se realiza con una señal de alta frecuencia rechazada por el filtro pasa banda para el estudio del circuito de la siguiente forma: las Figuras 4.18(a) y 4.18(b) muestran la señal del generador y su amplificación respectivamente. La señal no presenta problemas en la salida del filtro pasa altas, como se muestra en la Figura 4.18(c), pero es atenuada bruscamente en el filtro pasa bajas (ver Figura 4.18(d)).

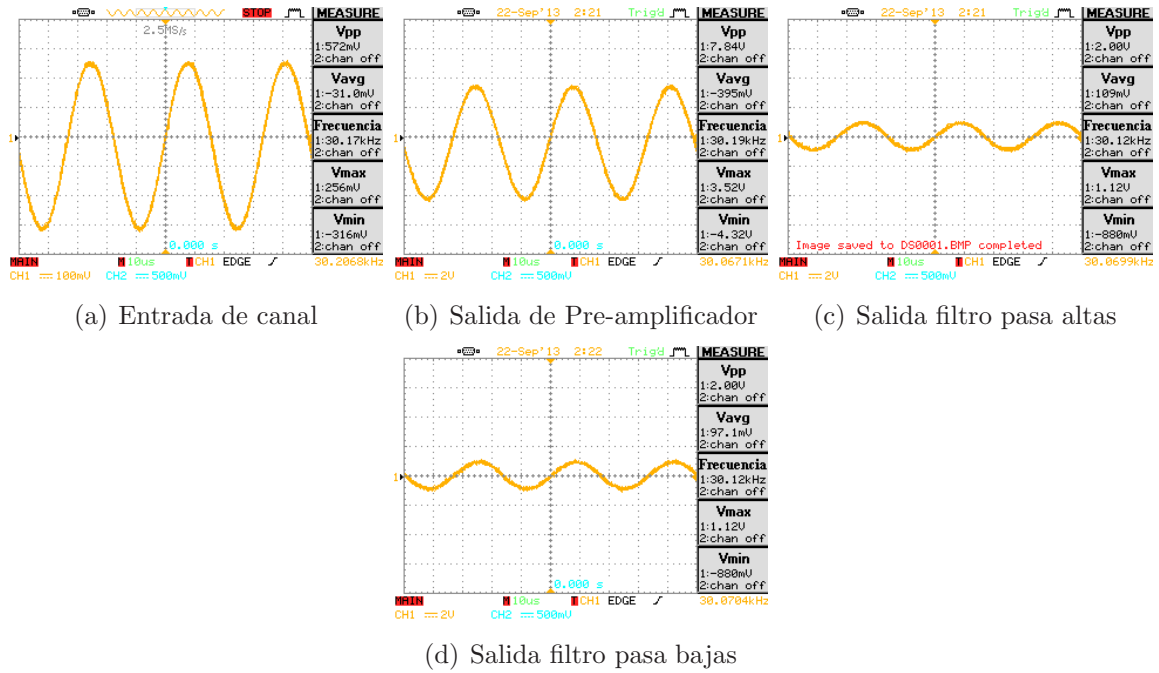


Figura 4-16: Respuesta en cada etapa del sensor R15a empleando una señal adquirida del generador de señales a 30 kHz.

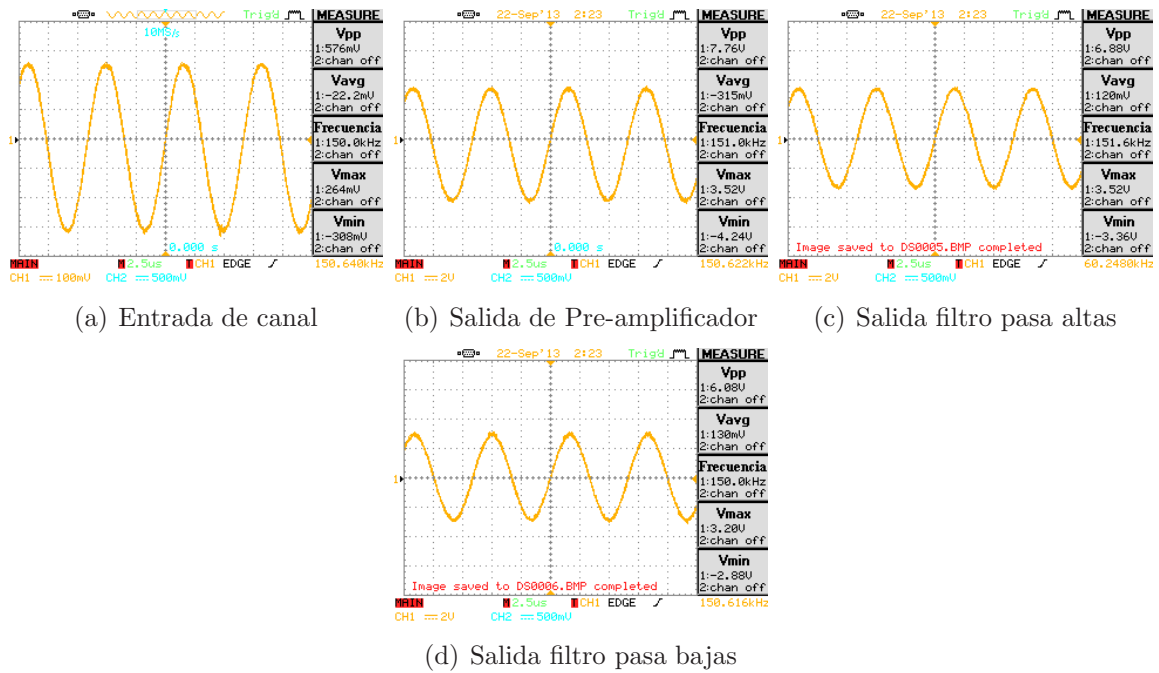


Figura 4-17: Respuesta en cada etapa del sensor R15a empleando una señal adquirida del generador de señales a 150 kHz.

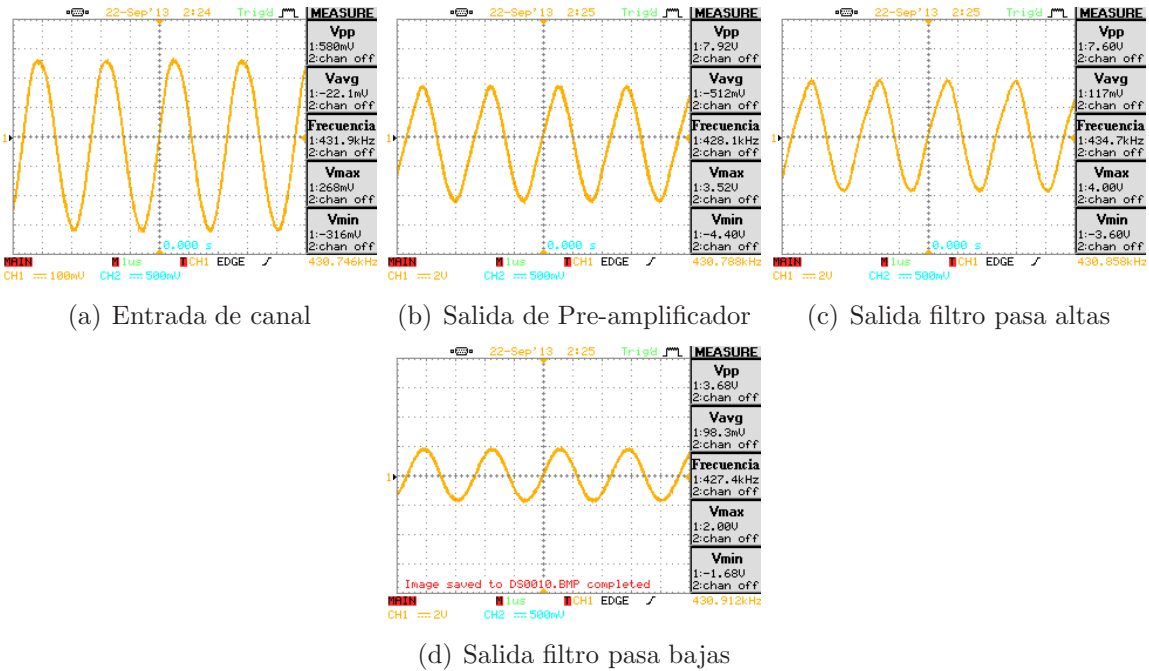


Figura 4-18: Respuesta en cada etapa del sensor R15a empleando una señal adquirida del generador de señales a 430 kHz.

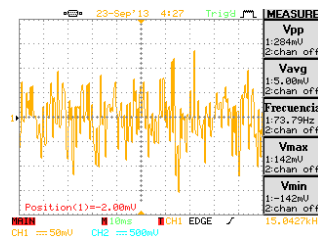


Figura 4-19: Respuesta en cada etapa del sensor R6a empleando una señal de emisión acústica.

4.2.12. Prueba 12: Señal del sensor en R15a

La prueba emplea el sensor R15a cuya respuesta se muestra en la Figura 4-19, notando una amplitud de 284 mV_{pp} . Las etapas de amplificación y filtrado no son presentadas debido a una saturación en la etapa de amplificación inducida por la desigualdad de impedancias entre el sensor y el circuito.

4.2.13. Discusión

- El prototipo de emisión acústica es el primer acercamiento práctico que se tiene al desarrollo de este tipo de sistemas de adquisición. Es notable que la inequidad de las impedancias entre los sensores R3a y R15a indujeron errores de saturación en el

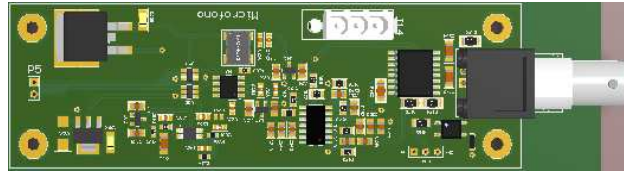


Figura 4-20: Módulo sonido

circuito que motivaron a una medición más exhaustiva de las características físicas de cada uno de los sensores. La amplificación y el filtrado de los tres canales cumple con las pruebas realizadas con el generador de señales. La etapa de elevación de la señal final de los filtros a 2,5 VDC no se muestra debido a la simplicidad del análisis de dicho circuito.

- La tarjeta PCB implementada para emisión acústica cumple con los desacoples de corrientes alternas para las fuentes de polarización de cada integrado. Por su gran tamaño requirió un mayor número de soportes para evitar curvaturas en la introducción y extracción de los sensores que pudieran provocar solturas de soldaduras o daño en los materiales.

4.3. Módulo sonido

El modulo contiene un solo canal para la conexión de un micrófono de precisión y su salida digital permite la conexión a cualquier modulo de procesamiento. El circuito de la Figura 4-20 se desarrolló para la adquisición de señales de audio transducidas por un micrófono IEPE RG50.

El micrófono utilizado presenta un rango espectral entre los 20 Hz y los 20 kHz que sugiere la implementación de un filtro pasa banda con las mismas frecuencias de corte. La respuesta en frecuencia del filtro pasa banda se muestra en la Figura 4-21, correspondiente a los valores de la Tabla 4-3.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en las pruebas de calibración para el micrófono.

4.3.1. Prueba 1: Señal del generador a 5 Hz en micrófono

La prueba se realiza con una frecuencia baja rechazada por el filtro pasa banda para el estudio del circuito de la siguiente forma: Las Figuras 4.22(a) y 4.22(b) muestran la señal suministrada por el generador y su respectiva amplificación. La señal es atenuada con fuerza en el filtro pasa altas (Figura 4.22(c)) y la señal resultante no presenta grandes modificaciones de amplitud en el filtro pasa bajas (Figura 4.22(d)).

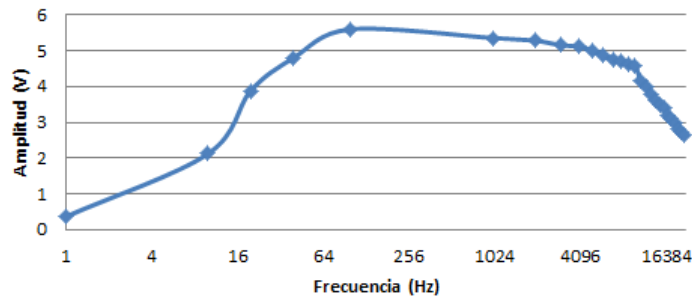


Figura 4-21: Filtro pasa banda empleado en el Micrófono con frecuencias de corte entre 20 Hz - 20 kHz.

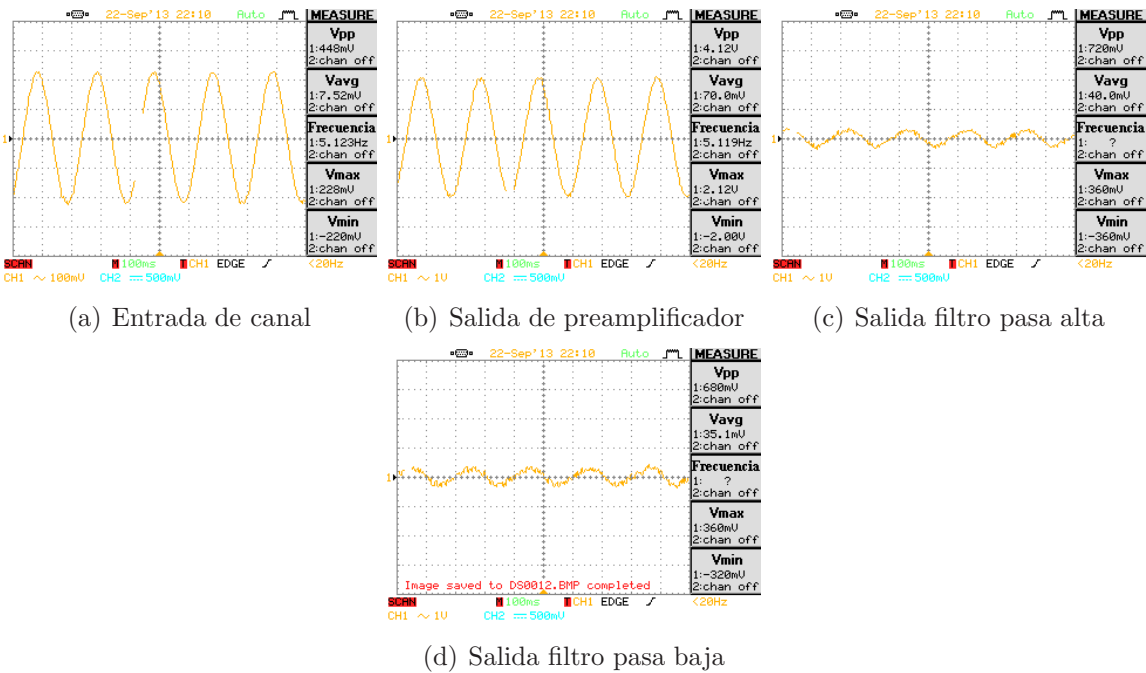


Figura 4-22: Respuesta en cada etapa del micrófono empleando una señal adquirida del generador de señales a 5 Hz.

4.3.2. Prueba 2: Señal del generador a 100 Hz en el micrófono

Se usa una frecuencia aceptada por el filtro pasa banda para el análisis del circuito de la siguiente forma: En la Figura 4.23(a) se muestra la señal entregada por el generador y la Figura 4.23(b) muestra su amplificación correspondiente. Al observar las Figuras 4.23(c) y 4.23(d) se puede ver que la señal amplificada no presenta grandes atenuaciones.

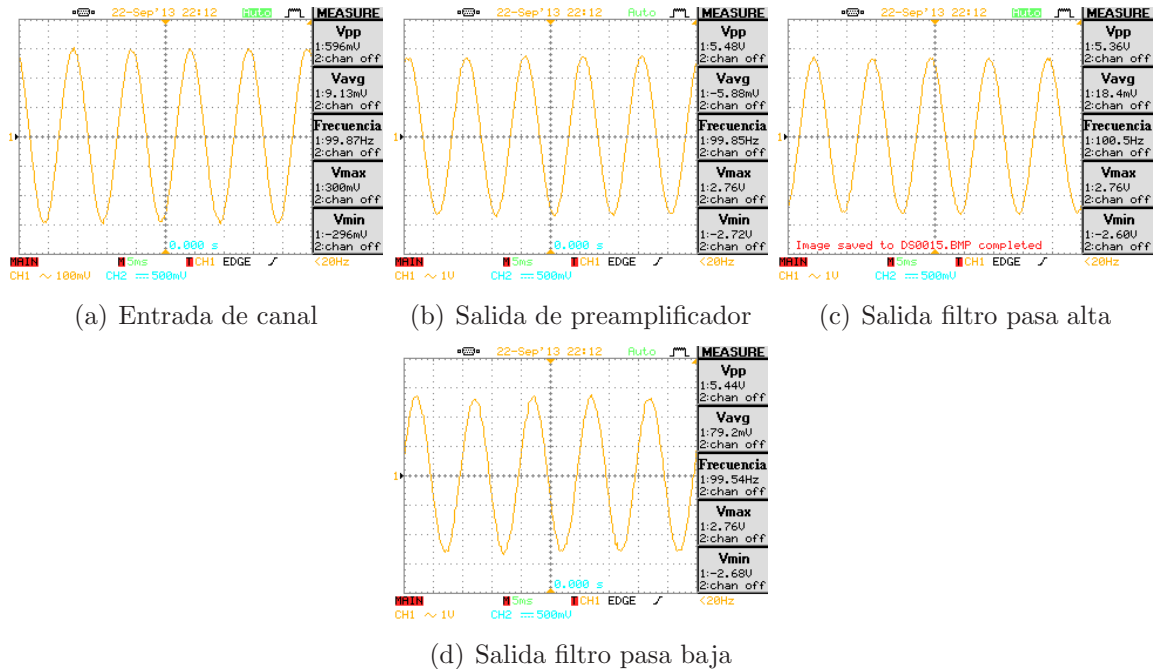


Figura 4-23: Respuesta en cada etapa del micrófono empleando una señal adquirida del generador de señales a 100 Hz.

4.3.3. Prueba 3: Señal del generador a 22 kHz en micrófono

La prueba se hace con una frecuencia alta rechazada por el filtro pasa banda para el estudio del circuito de la siguiente forma: La Figura 4.24(a) muestra la señal del generador la cual es amplificada como se observa en la Figura 4.24(b). La señal amplificada supera la frecuencia de corte del filtro pasa altas (Figura 4.24(c)) y pasa sin ser atenuada, mientras que en el filtro pasa bajas es rechazada con severidad (Figura 4.24(d)).

4.3.4. Discusión

- Al igual que en el módulo de emisión acústica, el módulo de sonido es también un primer prototipo. En consecuencia, durante las pruebas realizadas con señales del generador se obtuvo un correcto funcionamiento de cada una de las etapas de diseño. Tanto el módulo de vibraciones como el módulo de sonido cuentan con un interruptor electrónico que permite la activación o desactivación del IEPE. Sin embargo, el de sonido presenta inconvenientes al momento de activarlo, debido a que el voltaje de polarización (voltaje bias) cae hasta los +6,5 V y el micrófono requiere +12,3 V. Por tanto, no se obtuvieron las señales del micrófono, pero una posible solución es cambiar la resistencia que activa el IEPE o retirar el interruptor electrónico y conectarlo directo, lo cual dificultaría las pruebas de calibración con el generador de señales, ya que puede llegar a dañar el diodo regulador de corriente.

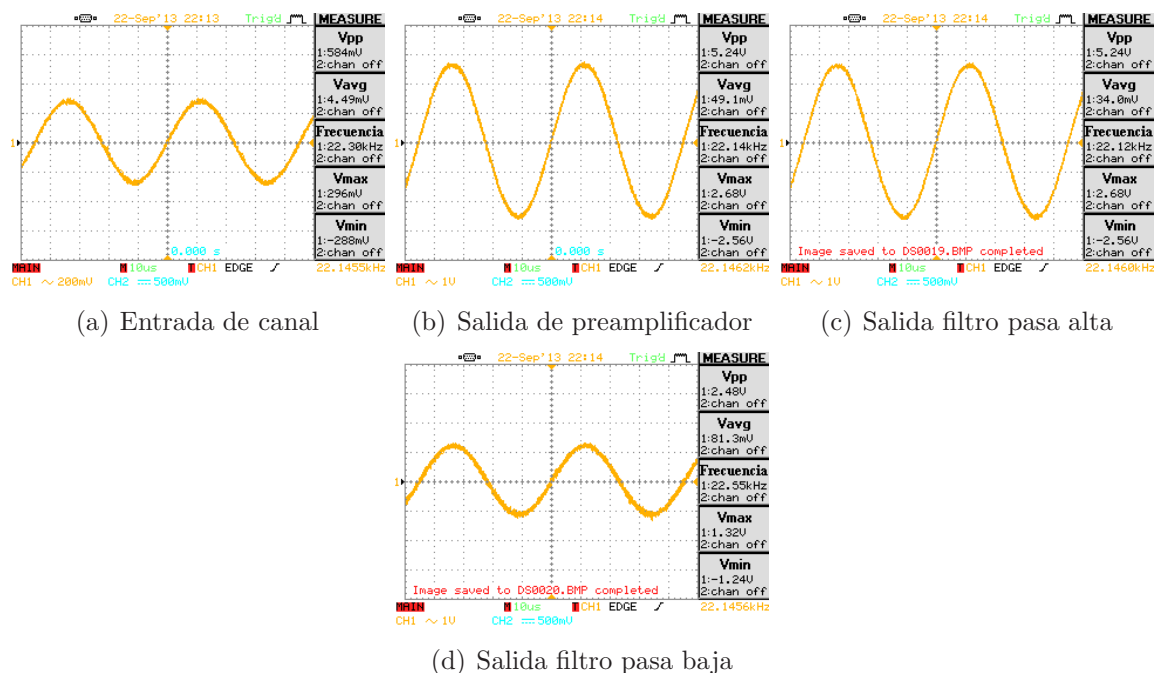


Figura 4-24: Respuesta en cada etapa del micrófono empleando una señal adquirida del generador de señales a 22 kHz.

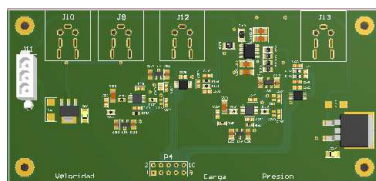
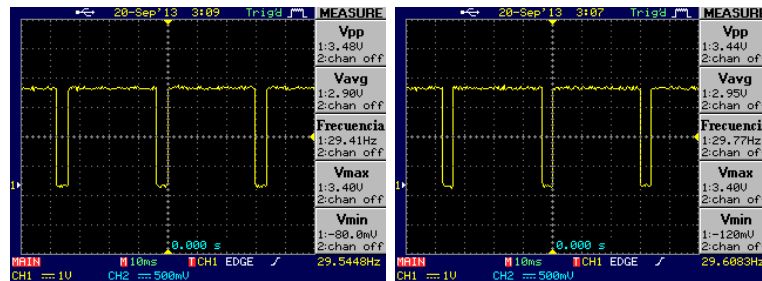


Figura 4-25: Módulo velocidad

- En el PCB del módulo se presentó el mismo problema de interferencia que se encontró en emisión acústica con respecto al amplificador que maneja la tensión de offset. Una solución aplicada a este inconveniente es aumentar las resistencias a valores de cercanos a los MegaOhmios, permitiendo con esto reducir la interferencia causada por la tensión de offset y la señal llega de modo correcto al convertor análogo-digital.

4.4. Módulo velocidad

El módulo contiene 2 canales par la conexión de 2 sensores inductivos que permiten la medición de la velocidad de salida del motor y la caja reductora. (ver Figura 4-25).



(a) Sensor 1

(b) Sensor 2

Figura 4-26: Señal de sensores en eje del motor



Figura 4-27: Señal SPI del ADC

4.4.1. Prueba 1: Señal de los sensores inductivos

La señal adquirida en el eje del motor con ambos sensores en el mismo punto de medición permite la verificación de funcionamiento de cada sensor (ver Figura 4-26).

4.4.2. Discusión

La respuesta generada por los sensores inductivos es una señal cuadrada con una frecuencia dependiente de la velocidad de giro del motor. Estos fueron conectados en la misma sección del eje para determinar que ambos sensores se encuentren funcionando correctamente y se observa en la Figura 4-26 que la amplitud de la señal de salida se mantiene cerca de los +3,3V, el cual es el voltaje más usual en el manejo de puertos digitales de cualquier tipo de procesador con interrupción externa. Dada la característica anterior de esta clase de sensores, es posible llevarlos a una interrupción externa a un módulo de procesamiento donde sea factible la captura de la señal.

4.5. Salida digital SPI del ADC

En los módulos de adquisición, a excepción de velocidad, se entregan los datos en formato SPI (ver Figura 4-27), el cual es un conocido protocolo estándar de comunicación que maneja cualquier tipo de procesador o microcontrolador. La salida de datos digitales de los convertidores en cada uno de los módulos funcionan de igual forma, es decir, bajo las mismas fases y polaridades.

Cada uno de los convertidores contiene un pin de salida que genera un pulso por cada muestra adquirida (DRDY), los flancos de bajada en DRDY indican al maestro que la muestra puede



Figura 4-28: Señal SPI del ADC con banderas de control para transmisión sincronizada de datos.

ser entregada e inmediatamente envía la señal de SCLK. Luego, el DRDY vuelve a alto hasta que la nueva muestra sea recibida completamente y DO envía los datos al maestro. (Ver Figura 4-28).

Tabla 4-2: Respuesta filtro pasa banda en emisión acústica

| Frecuencia kHz | Amplitud V_{pp} R3 α | Amplitud V_{pp} R6a | Amplitud V_{pp} R15a |
|----------------|-------------------------------|-----------------------|------------------------|
| 10 | | | 0,1 |
| 15 | 1,06 | | |
| 20 | 1,52 | 1,2 | |
| 25 | 1,78 | 1,56 | |
| 30 | 2 | 1,84 | 0,55 |
| 35 | 2,08 | 1,94 | |
| 40 | 2,1 | 2,04 | |
| 45 | 2,1 | 2,06 | |
| 50 | 2 | 2,04 | 1 |
| 55 | 1,92 | 1,96 | |
| 60 | 1,82 | 1,9 | |
| 65 | 1,74 | 1,78 | |
| 70 | 1,6 | 1,7 | 1,46 |
| 75 | 1,56 | 1,6 | |
| 80 | 1,46 | 1,5 | |
| 85 | 1,32 | 1,44 | |
| 90 | | 1,3 | 1,7 |
| 95 | | 1,22 | |
| 100 | | 1,14 | |
| 105 | | 1,08 | |
| 110 | | 1,04 | 1,82 |
| 130 | | | 1,86 |
| 150 | | | 1,9 |
| 170 | | | 1,9 |
| 190 | | | 1,84 |
| 210 | | | 1,8 |
| 230 | | | 1,76 |
| 250 | | | 1,7 |
| 270 | | | 1,68 |
| 290 | | | 1,62 |
| 310 | | | 1,58 |
| 330 | | | 1,5 |
| 350 | | | 1,48 |
| 370 | | | 1,42 |
| 390 | | | 1,36 |
| 410 | | | 1,34 |

Tabla 4-3: Respuesta filtro pasa banda para el micrófono

| Frecuencia (Hz) | Amplitud V_{pp} |
|-----------------|-------------------|
| 1 | 0,36 |
| 10 | 2,12 |
| 20 | 3,88 |
| 40 | 4,8 |
| 100 | 5,6 |
| 1000 | 5,36 |
| 2000 | 5,28 |
| 3000 | 5,16 |
| 4000 | 5,12 |
| 5000 | 5 |
| 6000 | 4,88 |
| 7000 | 4,76 |
| 8000 | 4,72 |
| 9000 | 4,64 |
| 10000 | 4,6 |
| 11000 | 4,16 |
| 12000 | 4 |
| 13000 | 3,8 |
| 14000 | 3,6 |
| 15000 | 3,48 |
| 16000 | 3,4 |
| 17000 | 3,2 |
| 18000 | 3,12 |
| 19000 | 3 |
| 20000 | 2,8 |
| 21000 | 2,72 |
| 22000 | 2,64 |

5 Conclusiones

En este trabajo se presentó una metodología de diseño e implementación de un sistema de adquisición y medición de señales de vibración mecánica, emisión acústica, ruido y velocidad para el monitoreo de condición de máquinas rotativas, el cual ofrece las siguientes soluciones:

- El sistema implementado consta de módulos de adquisición independientes, los cuales pueden ser conectados a cualquier dispositivo de proceso ya que la salida digital de cada módulo se encuentra bajo el protocolo SPI. Por tanto, todas las señales pueden ser capturadas de manera simultánea para brindar información mucho más concreta y completa, de las condiciones operativas y de salud en las que se encuentra una máquina.
- Cada uno de los módulos construidos y sus circuitos impresos correspondientes fueron desarrollados con base en normas internacionales de IPC, permitiendo disminuir el ruido inherente al proceso de adquisición mismo.
- Dada la complejidad de las señales a adquirir y las sugerencias que los fabricantes de los transductores ofrecen, se deben tener en cuenta consideraciones como: *i)* la impedancia de acople en emisión acústica debe ser medida para que la etapa de acondicionamiento funcione correctamente; *ii)* bajo la configuración de los circuitos IEPE para sensores piezoeléctricos con integrados step-up, se deben seguir las normas del fabricante con el fin de evitar problemas causados por la interferencia producida a altas frecuencias.

6 Perspectivas

Los resultados obtenidos en este trabajo y las distintas dificultades presentadas durante el diseño e implementación del sistema de monitoreo de condición para máquinas rotativas, permiten resaltar los siguientes aspectos importantes para la continuación de este trabajo:

- El sistema de adquisición propuesto presenta ventajas de modularidad de cada una de las técnicas de mantenimiento predictivo propuestas (vibraciones mecánicas, emisión acústica y velocidad), capacidad de conexión con cualquier tipo de unidad de procesamiento con protocolo de comunicación SPI. Por tanto, el reto que se plantea desde este punto de vista, es la adecuada sincronización y manejo de tiempos para el proceso concurrente de cada una de las señales digitalizadas.
- Teniendo en cuenta la alta cantidad e información que es recolectada por el sistema de monitoreo implementado, es necesaria la implementación de módulos de procesadores con altas capacidades de almacenamiento, que permitan pre-procesar las señales para extraer la información más importante de cada una sin necesidad de almacenar grandes volúmenes de información. Desde esta perspectiva, se puede pensar en técnicas de compresión mediante procesadores embebidos, los cuales se conectarían entre los ADC de cada sensor y el sistema de procesamiento central.
- Los desarrollos de los módulos PCB pueden ser implementados con mayor portabilidad, brindando una funcionalidad más alta para realizar pruebas en las industrias con diferentes tipos de máquinas rotativas, aumentando el número de capas, agrupando más los componentes para obtener diseños más compactos. No obstante, la forma como se agrupan los módulos debe tener las condiciones de espaciado mínimas permitidas para evitar problemas derivados del calentamiento de los materiales y la interferencia electromagnética presentada por altas frecuencias.

Bibliografía

- [1] ADAMS, M.L.: *Rotating Machinery Vibration: from analysis to troubleshooting*. Marcel Dekker, Inc. New York - Basel, 2000
- [2] ANSARI, S.A. ; BAIG, R.: A PC-based vibration analyzer for condition monitoring of process machinery. En: *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on* 47 (1998), Nr. 2, p. 378–383. – ISSN 0018–9456
- [3] BETTA, G. ; D'APUZZO, P. ; LIGUORI, C. ; PIETROSANTO, A.: An intelligent FFT-analyzer. En: *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on* 47 (1998), Nr. 5, p. 1173–1179. – ISSN 0018–9456
- [4] BETTA, G. ; LIGUORI, C. ; PAOLILLO, A. ; PIETROSANTO, A.: A DSP-based FFT-analyzer for the fault diagnosis of rotating machine based on vibration analysis. En: *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2001. IMTC 2001. Proceedings of the 18th IEEE* Vol. 1, 2001, p. 572 –577
- [5] BETTA, G. ; LIGUORI, C. ; PIETROSANTO, A.: A multi-application FFT analyzer based on a DSP architecture. En: *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on* 50 (2001), Nr. 3, p. 825–832. – ISSN 0018–9456
- [6] BILSKI, P. ; WINIECKI, W.: Virtual spectrum analyser based on data acquisition card. En: *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, International Workshop on, 2001.*, 2001, p. 143–147
- [7] BILSKI, P. ; WINIECKI, W.: A Low-Cost Real-Time Virtual Spectrum Analyzer. En: *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on* 56 (2007), Nr. 6, p. 2169–2174. – ISSN 0018–9456
- [8] BRANDT, A.: *Noise and Vibration Analysis: Signal analysis and experimental procedures*. John Wiley and Sons, Ltda., 2010
- [9] CONTRERAS-MEDINA, L. M. ; ROMERO-TRONCOSO, R.J. ; MILLAN-ALMARAZ, J. R. ; RODRIGUEZ-DONATE, C.: FPGA based multiple-channel vibration analyzer embedded system for industrial applications in automatic failure detection. En: *Industrial Embedded Systems, 2008. SIES 2008. International Symposium on*, 2008, p. 229–232

-
- [10] CONTRERAS-MEDINA, L.M. ; DE JESUS ROMERO-TRONCOSO, R. ; CABAL-YEPEZ, E. ; DE JESUS RANGEL-MAGDALENO, J. ; MILLAN-ALMARAZ, J.R.: FPGA-Based Multiple-Channel Vibration Analyzer for Industrial Applications in Induction Motor Failure Detection. En: *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on* 59 (2010), Nr. 1, p. 63–72. – ISSN 0018–9456
- [11] DIBAZAR, A.A. ; YOUSEFI, A. ; PARK, H.O. ; LU, Bing ; GEORGE, S. ; BERGER, T.W.: Intelligent acoustic and vibration recognition/alert systems for security breaching detection, close proximity danger identification, and perimeter protection. En: *Technologies for Homeland Security (HST), 2010 IEEE International Conference on*, 2010, p. 351–356
- [12] ELFORJANI, M. A.: *Condition Monitoring of Slow Speed Rotating Machinery Using Acoustic Emission Technology*, Cranfield University, Tesis de Grado, 2010
- [13] ELMALEEH, M.A.A. ; SAAD, N. ; AHMED, M.A.N.: On-line fault detection & diagnosis of rotating machines using acoustic emission monitoring techniques. En: *Intelligent and Advanced Systems, 2007. ICIAS 2007. International Conference on*, 2007, p. 897–900
- [14] FARRAR, C. R.: Damage prognosis: current status and future needs / Los Alamos National Laboratory. 2003 (LA-14051-MS). – Informe de Investigación
- [15] ILONEN, J. ; KAMARAINEN, J. K. ; LINDH, T. ; AHOLA, J. ; KAÄ“LVIAÄ“INEN, H. ; PARTANEN, J.: Diagnosis tool for motor condition monitoring. En: *Industry Applications, IEEE Transactions on* 41 (2005), Nr. 4, p. 963–971. – ISSN 0093–9994
- [16] INDUSTRIES, Association Connecting E.: *IPC-2221B Generic Standard on Printed Board Design*. 2012
- [17] INSTRUMENTS, Texas. *Amplifier and Data Converter Guide*. 2009
- [18] INSTRUMENTS, Texas. *MSP430x5xx and MSP430x6xx Family User’s Guide*. 2013
- [19] KAPHLE, M. R. ; TAN, A. ; THAMBIRATNAM, D. ; CHAN, T. H.: Review: acoustic emission technique - opportunities, challenges and current work at QUT. En: *The First International Postgraduate Conference on Engineering, Designing and Developing the Built Environment for Sustainable Wellbeing*, Queensland University of Technology, 2011
- [20] KIM, E. ; TAN, A. ; MATHEW, J. ; YANG., B.S.: Development of an online condition monitoring system for slow speed machinery. En: LTD, Springer-Verlag L. (Ed.): *Proceedings of the 4th World Congress of Engineering Assets Management (WCEAM 2009)*, 2010

-
- [21] LAW, Yiu K. *Design and Testing of Off-The-Shelf Electronic Components for an Acoustic Emission Structural Health Monitoring System Using Piezoelectric Sensors*. 2005
- [22] MBA, D. ; RAO, Raj B. K. N.: Development of Acoustic Emission Technology for Condition Monitoring and Diagnosis of Rotating Machines: Bearings, Pumps, Gearboxes, Engines, and Rotating Structures. En: *The Shock and Vibration Digest* 38 (2006), Nr. 1, p. 3–16
- [23] UND FREQUENZTECHNIK IN RADEBEUL, Metra M. *Application note AN4E. Piezoelectric accelerometers. IEPE Accelerometers*. 2008
- [24] VIKTOROV, I. A.: *Rayleigh and Lamb Waves; Physical theory and application*. Plenum press New York, USA, 1967
- [25] WHITE, G.: *Introducción al análisis de vibraciones*. Azima DLI, 2009
- [26] YANG, Yu ; PING, Yang: Research of Acoustic Emission Characteristics Based on the Signal Parameters. En: *Information Engineering and Computer Science, 2009. ICIECS 2009. International Conference on*, 2009, p. 1–4