



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

Facultad de Ingeniería

” Diseño de un sistema de
emisión acústica para
medición de vibraciones en
una cadena cinemática”

TESIS PROFESIONAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE

MAESTRO EN CIENCIAS MECATRÓNICA

PRESENTA:

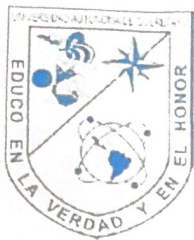
Ing. Luis Alejandro Romero Ramírez

ASESOR:

Dr. Luis Morales Velázquez

SAN JUAN DEL RÍO, QRO.

Noviembre 2017



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias Mecatrónica

Diseño de un sistema de emisión acústica para medición de vibraciones en una cadena cinemática

Tesis
Que como parte de los requisitos para obtener el grado de Maestro en Ciencias Mecatrónica.

Presenta:
Luis Alejandro Romero Ramírez

Dirigido por:
Dr. Luis Morales Velázquez

Dr. Luis Morales Velázquez

Presidente

Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos

Secretario

Dr. Arturo Yosimar Jaen Cuellar

Vocal

Dr. René de Jesús Romero Troncoso

Suplente

Dr. Daniel Moríñigo Sotelo

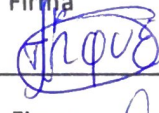
Suplente



Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad



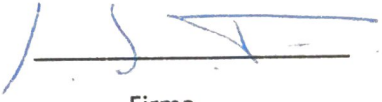
Firma



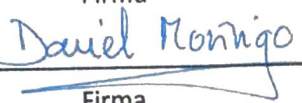
Firma



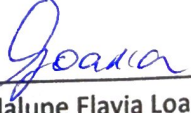
Firma



Firma



Firma



Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
Directora de Investigación y Posgrado

Centro universitario
Querétaro, Qro.
11 de Enero de 2018

Resumen

Las cadenas cinemáticas en la actualidad son componentes esenciales en la mayoría de las industrias compuestas principalmente por motores de inducción, cajas de engranes, etc., éstas son los principales elementos de los procesos y líneas de producción en las industrias, por lo cual, presentar fallas en su funcionamiento presenta una gran pérdida monetaria las cuales aumentan con el respecto al tiempo que continúen averiadas. Para evitar estos desperfectos se utilizan sistemas de monitorización. Existen diferentes técnicas de monitoreo con diferentes metodologías de análisis, la emisión acústica (EA) es uno de los métodos de monitoreo no invasivo para la detección de fallas de estos sistemas. La emisión acústica es una técnica en auge para el monitoreo de sistemas, además de no existir sistemas especializados para su aplicación. En este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema de adquisición de señales de emisión acústica y metodologías basada en FFT (*Fast Fourier Transformer*, Transformada Rápida de Fourier) para el análisis de señales y detección de fallas mecánicas en elementos de la cadena cinemática, así como también la detección de la influencia de los sistemas de control utilizados en elementos de la cadena cinemática. Se propuso diferentes metodologías para diferentes bancos de pruebas en la Universidad Autónoma de Querétaro y bancos de prueba en la Universidad de Valladolid. Se identificaron parámetros con las metodologías donde se presentan la presencia de fallas e influencias de los sistemas de control utilizados, comparándolos con señales de sistemas sanos y sin sistemas de control.

Palabras Claves: Emisión Acústica, Cadenas Cinemáticas, FFT, Sistema de adquisición

Abstract

Kinematic chains are essential components in the most industries, composed mainly by induction motors, gearbox, etc., this are main elements of process and productions lines in the industries, therefore, if they present failures in performance cause a large monetary loss to the industry which increases respect to the time they continue damaged. To avoid this, monitoring systems are used. There are different monitoring techniques with different analysis methodologies, acoustic emission (AE) is one of the methods non-invasive monitoring to detection of failures of these systems. Acoustic emission is a boom technique for system monitoring, and there are not specialized systems for its application. This work presents the development of a system for the acquisition of acoustic emission signals and methodologies based on FFT (Fast Fourier Transform) for the analysis of signals and detection of mechanical faults in elements of the kinematic chain, as well as the detection of the influence of the control systems used in elements of the kinematic chain. Different methodologies were proposed for different test banks at the Universidad Autónoma de Querétaro and test banks at the Universidad de Valladolid. Parameters are identified with the methodologies where the presence of faults and influences of the control systems used are presented, comparing them with signals from healthy systems and without control systems.

Keywords: Acoustic Emission, Kinematic chain, FFT, acquisition system.

Esta tesis es dedicada ...

A mis padres José Luis y Margarita que a lo largo de mi vida me han motivado y apoyado incondicionalmente.

A mis hermanas Nancy y Arely que son y siempre serán mi más grande motivación y fortaleza para nunca perder mi fe.

A mi familia que siempre me han dado palabras de aliento para poder superar y cumplir mis metas.

A todas las personas que a lo largo de mi vida me han enseñado a siempre ser mejor y nunca darme por vencido.

Agradecimientos

A la Universidad Autónoma de Querétaro por darme la oportunidad de desarrollar mis habilidades y conocimientos, así como también pertenecer a esta gran casa de estudios.

A mi director de tesis el Dr. Luis Morales Velázquez que ha sido un gran mentor desde mis estudios de licenciatura, por sus consejos y su apoyo durante el desarrollo del proyecto.

Al Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos por todo el apoyo brindado durante el programa de posgrado, por los consejos y las retroalimentaciones para el desarrollo de este proyecto. Además del apoyo para poder realizar mi estancia en España.

Al Dr. René de Jesús Romero Troncoso por darme la oportunidad de pertenecer a su grupo de investigación HSPDigital y brindarme las oportunidades para poder crecer en todos los ámbitos.

Al Dr. Daniel Morínigo Sotelo por todo el apoyo brindado durante mi estancia en Valladolid, España y por toda su dedicación en sus tutorías durante toda la estancia.

A mis compañeros de posgrado M.C. Juan Ángel Ramírez, M.C. Emmanuel Guillen, M.C. Omar Muñoz, Ing. Walid Vega. Por sus consejos y todos los momentos de convivencia durante los 2 años de Maestría.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el convenio de beca, gracias al cual pude realizar mis estudios de posgrado en esta universidad.

A todos Gracias.

Índice general

| | |
|---|-----|
| Resumen..... | i |
| Abstract | ii |
| Dedicatorias..... | iii |
| Agradecimientos..... | iv |
| Índice de figuras | vii |
| Índice de tablas | ix |
| I. Introducción..... | 1 |
| 1.1 Hipótesis..... | 4 |
| 1.2 Antecedentes..... | 4 |
| 1.3 Descripción del problema | 7 |
| 1.4 Justificación | 8 |
| 1.5 Objetivos..... | 9 |
| 1.5.1 Objetivo General | 9 |
| 1.5.2 Objetivos Particulares..... | 9 |
| II. Revisión de la literatura | 11 |
| 2.1. Cadenas cinemáticas y máquinas | 11 |
| 2.1.1. Elementos de una cadena cinemática..... | 13 |
| 2.2. Motores de inducción. | 15 |
| 2.2.1 Falla en rodamiento..... | 17 |
| 2.3. Variadores de frecuencia | 18 |
| 2.4. Emisión Acústica (EA)..... | 21 |
| 2.4.1. Propagación de Emisiones Acústicas | 23 |
| 2.4.2. Parámetros de las señales de emisión acústica..... | 24 |
| 2.4.3. Características significativas de la señal de emisión acústica | 26 |
| 2.4.4. Sistemas para monitoreo de EA | 28 |
| III. Metodología..... | 30 |
| 3.1. Sistema de adquisición de EA. | 31 |
| 3.1.1. Sensor de emisión acústica. | 31 |

| | | |
|--------|---|----|
| 3.1.2. | Preamplificador y Amplificador..... | 32 |
| 3.1.3. | Convertidor Analógico-Digital | 34 |
| 3.1.4. | Función de transferencia ADC..... | 37 |
| 3.1.5. | Modo de Operación..... | 37 |
| 3.1.6. | Interfaz de Alta Velocidad (FPGA) | 38 |
| 3.2. | Diseño y Descripción de Hardware..... | 40 |
| 3.2.1. | Descripción de bloques funcionales | 40 |
| 3.3. | Diseño de tarjeta PCB | 42 |
| 3.4. | Tarjeta de adquisición de datos de EA..... | 44 |
| 3.5. | Procesamiento de señales de EA..... | 45 |
| 3.5.1 | Procesamiento 1..... | 45 |
| 3.5.2 | Procesamiento 2..... | 46 |
| 3.6. | Análisis y comparación de señales | 48 |
| 3.7. | Parámetros de presencia de falla y perturbaciones | 49 |
| IV. | Experimentación..... | 51 |
| 4.1. | Verificación de Funcionamiento | 51 |
| 4.2. | Pruebas Estáticas. | 52 |
| 4.3. | Pruebas Dinámicas | 53 |
| 4.3.1 | Banco de Pruebas UAQ..... | 54 |
| 4.3.2 | Banco de Pruebas UVa | 56 |
| V. | Resultados y Discusión..... | 59 |
| VI. | Conclusiones..... | 71 |
| VII. | Prospectivas | 73 |
| | Referencias..... | 74 |
| | Apéndice | 75 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 Cadena cinemática cerrada a) y abierta b) | 11 |
| Figura 2.2 Diagrama a bloques de variador de frecuencia | 21 |
| Figura 2.3 Señal transitoria..... | 24 |
| Figura 2.4 Señal continua..... | 24 |
| Figura 2.5 Señal acústica típica | 25 |
| Figura 2.6 Efectos Kaiser y Felicity | 27 |
| Figura 2.7 Diagrama a bloques de sistema de adquisición de datos..... | 28 |
| Figura 3.1 Diagrama a bloques de metodología | 30 |
| Figura 3.2 Sensor de emisión acústica fabricante Soundwel..... | 32 |
| Figura 3.3 Preamplificadores Soudwel..... | 33 |
| Figura 3.4 Circuito de conexión amplificador-convertidor | 35 |
| Figura 3.5 Diagrama funcional de AD7352..... | 36 |
| Figura 3.6 Transferencia ideal del AD7352 | 37 |
| Figura 3.7 Modo de operación normal del AD7352..... | 38 |
| Figura 3.8 Tarjeta UPDSH | 39 |
| Figura 3.9 Diagrama general de interfaz de alta velocidad FPGA..... | 40 |
| Figura 3.10 Bloques internos | 41 |
| Figura 3.11 Diseño de PCB en Altium | 43 |
| Figura 3.12 Tarjeta de adquisición | 44 |
| Figura 3.13 Tarjeta de adquisición con tarjeta UPDSH | 44 |
| Figura 3.14 Diagrama a bloques de Procesamiento 1..... | 45 |
| Figura 3.15 Diagrama a bloques de procesamiento 2..... | 46 |
| Figura 4.1 Señales sintéticas, diferentes frecuencias..... | 51 |
| Figura 4.2 Prueba estática..... | 53 |
| Figura 4.3 Señal de prueba estática | 53 |
| Figura 4.4 Banco de pruebas UAQ..... | 54 |
| Figura 4.5 Rodamiento con perforación..... | 55 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.6 Variadores de frecuencia..... | 57 |
| Figura 4.7 Banco de pruebas UVa | 58 |
| Figura 5.1 Señal cruda de EA..... | 59 |
| Figura 5.2 Señal aplicando el procesamiento 1..... | 60 |
| Figura 5.3 Señal sin falla de rodamiento, armónicos de interés..... | 61 |
| Figura 5.4 Señal con falla en rodamiento, armónicos de interés..... | 62 |
| Figura 5.5 Señal cruda UVa..... | 63 |
| Figura 5.6 Motor 1 AEG espectro sin filtro mediana..... | 63 |
| Figura 5.7 Motor 2 Siemens (con fallo) espectro sin filtro mediana..... | 64 |
| Figura 5.8 Motor 3 Siemens (sano) sin filtro mediana..... | 64 |
| Figura 5.9 Motor 1 AEG armónicos de variador de frecuencia ABB | 65 |
| Figura 5.10 Motor 1 AEG, armónicos de variador de frecuencia WEG..... | 66 |
| Figura 5.11 Motor 1 AEG, armónicos de variador de frecuencia Allen-Brandley ... | 66 |
| Figura 5.12 Motor 3 Siemens, armónicos de variador de frecuencia ABB | 67 |
| Figura 5.13 Contorno Motor 1 AEG en las diferentes configuraciones | 68 |
| Figura 5.14 Contorno Motor 2 Siemens en las diferentes configuraciones | 68 |
| Figura 5.15 Contorno Motor 3 Siemens en las diferentes configuraciones | 69 |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 4.1 Motores de inducción..... | 56 |
| Tabla 4.2 Variadores de frecuencia | 57 |
| Tabla 5.1 Parámetros comparados | 61 |

I. Introducción

En las industrias existen una gran cantidad de procesos y sistemas los cuales son constituidos por cadenas cinemáticas. Una cadena cinemática es la conexión de varios eslabones, de tal forma que permiten que se efectúe un movimiento en combinación entre los eslabones que la constituyen. Además, un mecanismo es una cadena cinemática la cual tiene al menos un eslabón que ha sido fijado y usado como marco de referencia y a su vez, la definición de máquina es el conjunto de mecanismos, los cuales son usados para transmitir fuerza y realizar un trabajo específico. Con lo anteriormente mencionado se infiere que, las máquinas utilizadas en las industrias están compuestas por cadenas cinemáticas.

Las máquinas son componentes esenciales en la mayoría de las industrias de manufactura y producción, por lo cual, tener fallas dentro de éstas provocan pérdidas monetarias muy grandes las cuales van aumentando con respecto al tiempo en que sigan averiadas por algún desperfecto, ya sea mecánico o eléctrico. Para evitar estos desperfectos se utilizan sistemas automatizados de monitorización. Los sistemas utilizados para la monitorización aprovechan parámetros medibles durante el funcionamiento de las máquinas, con los cuales se detecte eventos para caracterizar el sistema, de esta manera detectar y prevenir fallas que puedan causar un daño aún mayor a las máquinas y a los elementos que la componen. El monitoreo de las condiciones de una planta de ingeniería ha aumentado en importancia a medida que más procesos se automatizan y reducen la mano de obra necesaria para operar y supervisar está. Tradicionalmente se ha considerado que la maquinaria eléctrica es fiable y requiere poca atención, sin embargo, las máquinas eléctricas giratorias son el corazón de la mayoría de los procesos de ingeniería, existe una creciente necesidad, por razones de fiabilidad, de supervisar su comportamiento y rendimiento en línea (Tavner et al, 2008).

Existen diferentes parámetros medibles en las máquinas tales como vibración de la máquina, corriente que consume, temperatura, sonido que genera, etc. que son utilizadas como señales de monitorización, de los cuales vibraciones y análisis de corrientes son los métodos más populares. La vibración de una máquina surge debido a las fuerzas de acción-reacción que actúan sobre los contactos de las superficies de las partes de la máquina en movimiento (Elmaleeh et al, 2012). Una máquina sana presenta un bajo nivel de vibraciones, por lo cual, la presencia de un defecto en algún elemento o un desequilibrio en su funcionamiento genera la disipación de energía por diferentes medios como vibraciones mecánicas, sonido de alta y baja frecuencia, temperatura etc. Una forma de aprovechar estos fenómenos causados por fallas es el uso de sistemas de monitorización que adquieran estas señales para la detección y caracterización de fallas. La mayoría de los métodos para monitorizar máquinas eléctricas están basados en análisis de vibración o análisis de corrientes. Estos sistemas proporcionan información vital para la realización de mantenimiento preventivo, en algunos casos reportan el elemento donde se encuentra la falla.

Las señales adquiridas por los sistemas de monitorización son analizadas por diferentes métodos, con los cuales se pueden detectar los diferentes tipos de fallas que pueden tener una máquina. El procesamiento requerido para estas señales requiere una suficiente resolución, además de la identificación de parámetros de la señal que ayude a seleccionar el procesamiento adecuado. La herramienta que da un primer análisis de la señal es la tradicional Transformada Rápida de Fourier FFT (*Fast Fourier Transform, Transformada Rápida de Fourier*), con la cual muestra el espectro de la señal, aunque puede que esta técnica no sea capaz de mostrar en el espectro la presencia de la falla, requiriendo otras técnicas, tal como wavelet (Cusidó et al, 2008) y técnicas de alta resolución (Djeddi et al, 2007).

La emisión acústica (EA) es una técnica de múltiples aplicaciones en pleno proceso de expansión hacia rubros muy variados y que están firmemente establecidas a nivel de normas de numerosos casos. Es una técnica de detección pasiva en cierta forma parecida a lo denominado “sonar pasivo” o “escucha pasiva” utilizada en la detección de submarinos, por su puesto en otro medio y en otra gama de frecuencias. La disponibilidad de los recolectores de datos y sensores como acelerómetros o sensores de corriente basan en esa tecnología muchos de los sistemas de monitorización, por lo cual el análisis acústico basada en humanos ya no era aceptado en el entorno industrial. Sin embargo, hay una necesidad de investigación para la localización de objetos que provoquen un sonido anormal con lo cual lleva un análisis más detallado (Orman y Pinto, 2013). El análisis por medio de EA ha atraído cada vez más la atención y se ha aplicado en varios campos, sin embargo, no es tan común encontrar aplicaciones en entornos industriales para monitorización. El número de trabajos con el análisis acústico en comparación con el número de trabajos basado en vibración y análisis de corriente es aun despreciable, esto se debe a varios factores como falta de investigación, experimentación y costos de equipo.

En este trabajo se propone el desarrollo de un sistema de adquisición de datos específico para señales de emisiones acústicas, así como, una metodología para un primer procesamiento de las señales, para obtener información sobre los elementos que componen una cadena cinemática, fallas mecánicas e identificación de efectos causados por el control.

En el capítulo 1 se presenta una introducción al tema de sistemas de monitorización y emisión acústica, además de objetivos generales y particulares del proyecto, planteamiento del problema, justificación del trabajo y una breve revisión de los antecedentes a los sistemas de monitorización y las aplicaciones de la EA.

En el capítulo 2 se presenta la revisión de la literatura del proyecto, donde se introducen conceptos básicos para una mejor comprensión de los conceptos abordados durante el desarrollo de este trabajo.

En el capítulo 3 se presenta la metodología llevada a cabo para el desarrollo del sistema, ensayos del sistema y procesamiento realizado a los datos adquiridos, abordándolo de forma general y después explicada de manera particular cada etapa del proyecto.

En el capítulo 4 se presenta las etapas de experimentación realizadas, así como los diferentes ensayos en los bancos de pruebas propuestos para el sistema desarrollado.

En el capítulo 5 se presentan los resultados del diseño y desarrollo final del sistema, así como, las pruebas realizadas con el sistema, análisis de las señales adquiridas y comparaciones de éstas de los diferentes bancos de pruebas.

En el capítulo 6 se presentan las conclusiones y perspectivas del proyecto. Y como parte final se muestran las referencias bibliográficas consultadas para la realización de este trabajo.

1.1 Hipótesis

A partir de una metodología basada en emisión acústica, se podrán detectar componentes de fallas mecánicas, eventos de control eléctrico-electrónico y características de la cadena cinemática, con lo cual, se podrá identificar parámetros que con otras metodologías ya existentes no es posible.

1.2 Antecedentes

El monitoreo y diagnóstico de fallas en maquinaria con elementos como máquinas rotativas son unos de los más importantes temas en aplicaciones industriales. Los motores de inducción son las máquinas rotativas más comunes y

son asociadas directamente con cadenas cinemáticas las cuales incluyen más elementos como caja de engranes y son muy extendidos en diferentes aplicaciones. A continuación, se presentan trabajos relacionados con los métodos y sistemas de monitorización, así como, las aplicaciones de la emisión acústica.

G. Niu et al (2010) desarrollaron un sistema de mantenimiento basado en condiciones optimizado, mediante fusión de datos y mantenimiento centrado en la fiabilidad, este trabajo enfatiza la importancia del mantenimiento por su aumento como función de soporte para garantizar la disponibilidad de equipos, productos de calidad, entregas a tiempo y seguridad de la planta.

Bellini et al (2008) reportaron en su trabajo técnicas de diagnóstico para máquinas eléctricas con especial referencia a máquinas de inducción, de los últimos diez años, clasificándolos en cuatro temas importantes: fallas eléctricas, fallas mecánicas, procesamiento de señales para el análisis y monitoreo; e inteligencia artificial y técnicas de toma de decisiones.

Saucedo-Dorantes et al (2016) presentaron una metodología basada en análisis de vibración y corrientes para el diagnóstico de desgaste en la caja de engranes y la detección de defecto en rodamiento en un motor de inducción, ambos vinculados en la misma cadena cinemática, además, la localización relacionado con la falla para el análisis lo respalda con modelos teóricos. La influencia de las vibraciones sobre el sistema es observada mediante la realización del análisis de la corriente del motor para detectar la presencia de las fallas.

Suwatthikul et al (2011) presentaron un trabajo de un sistema, una red adaptiva basada en inferencia difusa para el diagnóstico de fallas en la cubierta del rodamiento en un motor de inducción. La detección de la falla y el diagnóstico en una etapa muy temprana se ha convertido en una de las preocupaciones más importantes.

Gowid et al (2015) desarrollaron un algoritmo de selección de características robusto, de respuesta rápida y automatizado basado en FFT para el desarrollo de aplicaciones de monitoreo vía emisión acústica, los datos son recolectados con una tarjeta MSeries- PCI 6250 *National Instruments*. Con esto, investiga la idoneidad de la emisión acústica para el diagnóstico de fallas de equipos centrífugos de alta velocidad utilizando un solo sensor EA.

Roberts et al (2003) mostraron en su trabajo que los resultados de pruebas de las tasas de recuento de emisión acústica, para pequeños porcentajes de la gama de carga aplicada cerca de la carga pico, muestra una correlación razonable con tasas de propagación de grietas. Basándose en estas correlaciones, pueden ser posible predecir la vida útil restante de las estructuras dañadas por fatiga a partir de los resultados del monitoreo de emisiones acústicas a corto plazo.

Zhang et al (2015) utilizaron la emisión acústica para detectar daños en madera, por el tipo de señales débiles y de alta frecuencia que producen, el método de la EA y sus ventajas son aprovechadas para esta aplicación. Realizan un diseño de un sistema de adquisición de datos específico para la señal a tratar, además de agregar aplicación de transmisión a distancia mediante un módulo *wireless*.

Kang et al (2015) presentaron un desarrollo en FPGA de un sistema de diagnóstico de fallas en tiempo real para rodamientos con un ultra muestreo de emisión acústica, propone un algoritmo de diagnóstico de fallas de rodamientos, extrayendo indicadores de falla a través de análisis tiempo-frecuencia, para tomar decisiones confiables.

Cockerill et al (2016) presentaron en su trabajo una investigación de los efectos del incremento de velocidad y carga en rodamiento de rodillos cilíndricos con la relación de generación de emisión acústica. Con esto, mediante la consideración de las tendencias en la amplitud de la energía de frecuencia, se determinó que las excitaciones de las frecuencias resonantes de los rodamientos

eran responsables de un aumento de la energía en el intervalo de 20-60 kHz. Realizando una caracterización del rodamiento en condiciones normales de funcionamiento, para después, realizar un ensayo de vida acelerada con el fin de inducir fallo por fatiga.

Al-Ghamd et al (2006) presentaron y se centraron en la aplicación de la técnica de emisión acústica para identificar la presencia y tamaño de un defecto en un rodamiento radial. Además de presentar una comparación entre EA y análisis de vibración en el rango de condiciones de velocidad y carga que presentan. Investigan la fuente primaria de actividad de EA de los defectos inducidos. Concluyendo que la EA ofrece una detección más temprana en la falla que el análisis de vibraciones.

Los antecedentes presentados anteriormente, muestran sistemas de detección de fallas realizados con diferentes tecnologías y métodos de análisis de máquinas rotativas, estos trabajos se enfocan en una de las partes más importante de la cadena cinemática que es el motor de inducción. La aplicación de la técnica de EA está ganando terreno en diferentes aplicaciones de ingeniería, siendo uno de los sistemas de monitoreo no invasivos más populares. Aunque, la limitación de la aplicación de la técnica de EA es debido en parte a la dificultad de procesar, interpretar y clasificar los datos adquiridos. Con lo cual, es un tema de investigación muy amplio para la identificación y caracterización de sistemas para su monitoreo con EA y aun no aplicado en sistemas de cadenas cinemáticas complejas.

1.3 Descripción del problema

Los sistemas de monitorización que se encuentran hasta ahora para la detección de fallas de cadenas cinemáticas están basados en sensores de vibraciones o análisis de corrientes, con los cuales, se detectan solo algunos tipos

de fallas ya sean eléctricas o mecánicas (Romero, 2011). La mayoría de los sistemas utilizados para la adquisición de datos son de arquitectura cerrada, es decir, cada uno es diseñado de una forma inmodificable y esto lo hace no escalable o adaptable. De lo cual, se deslindan problemáticas de tipo económico, ya que los sistemas conllevan mantenimiento, capacitación de personal y presentan incompatibilidad con dispositivos o tecnología que complementen la aplicación deseada. Las limitaciones de una aplicación como la EA son debido a la dificultad de procesamiento, interpretación y clasificación de datos, debido a los pocos trabajos que existen de estas y tecnología para la adquisición de señales.

Para el monitoreo de las cadenas cinemáticas se requiere un sistema de adquisición de datos con características basadas en el sensor que realizará la lectura de las señales. Un sensor de emisión acústica que opera en rangos de alta frecuencia necesita un sistema de adquisición con una frecuencia de muestreo aún más alta que el ancho de banda de trabajo del sensor, por lo cual, el diseño del sistema y los componentes que lo compongan deben tener concordancia en velocidad y frecuencia de funcionamiento, suficiente para satisfacer la aplicación.

1.4 Justificación

El desarrollo de un sistema de adquisición para monitorización, con sensores de emisión acústica presenta ventajas frente a los métodos tradicionales usados para cadenas cinemáticas. Al ser un sistema de alta frecuencia, su ancho de banda de trabajo es más grande que otras tecnologías, con lo cual se pueden visualizar perturbaciones o parámetros que con otros métodos no. El sistema de EA se propone como un método complementario, con esto se obtendrá un sistema de monitorización que podría detectar más eventos en los sistemas a monitorizar.

El método de EA para la monitorización de sistemas es cada vez más aplicado en procesos de detección de fallas y localización de fuentes de perturbación que

afecten en el funcionamiento de la cadena cinemática. En la industria el análisis de estructuras con métodos no invasivos es de gran ayuda para optimizar procesos en series de producción, está es el área de objetivo para la aplicación del sistema desarrollado.

El uso de la tecnología FPGA (*Field Programmable Gate Array, Arreglos de Compuertas Programables en Campo*) permite realizar diseños de estos sistemas de arquitectura abierta, con lo cual, los sistemas son escalables y adaptables a otros módulos que se utilicen para una complementación de los sistemas de monitorización en cadenas cinemáticas.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Desarrollar un sistema de adquisición para señales de emisión acústica mediante FPGA, para el monitoreo, caracterización y detección de fallas mediante técnicas de análisis en cadenas cinemáticas.

1.5.2 Objetivos Particulares

- Seleccionar e identificar, los circuitos de cada etapa del sistema de adquisición de datos para altas frecuencias.
- Diseñar hardware basándose en un sistema de adquisición de alta frecuencia para la aplicación requerida y describir en VHDL el diseño para implementación en FPGA.
- Identificar y establecer banco de pruebas, revisando parámetros de aplicación del sistema para el análisis en cadenas cinemáticas.
- Probar sistema adquiriendo señales de EA en el banco de pruebas seleccionado.

- Identificar señales adquiridas de las diferentes configuraciones del banco de pruebas y definir método de análisis para las señales, y posteriormente la realización de comparaciones e identificación de parámetros.
- Definir particularidades de las señales para su clasificación, comparar los resultados con otros métodos de monitorización de cadenas cinemáticas.

II. Revisión de la literatura

2.1. Cadenas cinemáticas y máquinas

Las cadenas cinemáticas son usadas cotidianamente en un gran número de aplicaciones, su relación es directa con conceptos más generales como son las máquinas. Las máquinas son compuestas por mecanismos que a su vez están formados por cadenas cinemáticas. El concepto de máquina es un tema de discusión por su gran complejidad y los diferentes enfoques que se le puede dar a la propia máquina.

Cadena cinemática es un conjunto o subconjunto de miembros de un mecanismo enlazados entre sí. Por ejemplo, la cadena de transmisión de un vehículo, el mecanismo pistón-biela-manivela, etc. Los miembros de una cadena cinemática se denominan eslabones. Estas se clasifican en dos y se muestran en la figura 2.1:

- Cadena cerrada. Cadena cinemática tal que cada uno de sus miembros está enlazado nada más con dos miembros de la misma cadena.
- Cadena abierta. Cadena cinemática que no tiene ningún anillo.

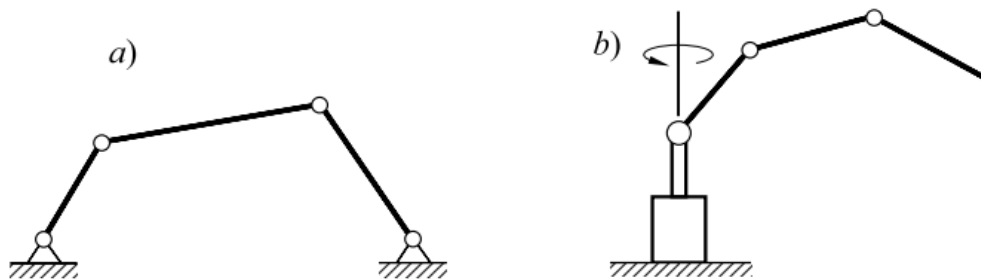


Figura 2.1 Cadena cinemática cerrada a) y abierta b) (Foix & Costa, 2001)

El diccionario de la Real Academia Española de la Lengua define máquina de esta manera, “*Máquina es cualquier artificio que sirve para aprovechar, dirigir o regular la acción de una fuerza*”. Según Reuleaux¹ define una máquina “*como una combinación de cuerpos resistentes de tal manera que, por medio de ellos, las fuerzas mecánicas de la naturaleza se pueden encausar para realizar un trabajo acompañado de movimiento determinado*”. A su vez también define mecanismo como “*una combinación de cuerpos resistentes conectados por medio de articulaciones móviles para formar una cadena cinemática cerrada con un eslabón fijo, cuyo propósito es transformar el movimiento*”. Además de los anteriores conceptos se puede agregar el término estructura, que es una combinación de cuerpos rígidos conectados por medio de articulaciones, pero cuyo propósito no es efectuar algún trabajo ni transformar el movimiento. Una estructura tiene por objeto ser rígida, no tiene movimientos relativos entre sus miembros, mientras que las máquinas y los mecanismos lo tienen. Los conceptos utilizados tienen una analogía directa entre ellas por ser parte de las ramas de la mecánica. El término estructura es relacionado a la estática, el término mecanismo es relacionado a la cinemática y máquina a la cinética.

En la modernidad las máquinas son consideradas el resultado de un diseño en el que intervienen varios factores, la parte mecánica como lo es las piezas y los mecanismos que las componen, por otra parte, el impacto social, mercado, estética etc. Estas consideraciones hacen que las máquinas adquieran diversas configuraciones y características.

Una cadena cinemática se compone por un número de elementos, que pueden ser fijos o móviles, agrupados para formar mecanismos y ejecutar tareas en una máquina.

¹ F. Reuleux (1828-1905), especialista alemán en cinemática cuyo trabajo marcó el principio de un estudio sistemático de la cinemática.

2.1.1. Elementos de una cadena cinemática

Los elementos o mecanismos que componen una cadena cinemática pueden variar según la aplicación que tiene dentro de la industria, los mecanismos se pueden clasificar de una forma general de la siguiente manera:

- **Sistema motriz o sistema de entrada:** recibe la energía, la cual es transformada o transmitida al sistema. En las cadenas cinemáticas comúnmente son utilizados los motores de inducción como fuente motriz.
- **Sistema transmisor:** medio que permite modificar la energía o el movimiento proporcionado por el sistema motriz. En cadenas cinemáticas son utilizados acopladores a caja de engranes u otro elemento mecánico que depende directamente de la aplicación.
- **Sistema receptor o sistema de salida.** Realiza el trabajo con la salida que le proporciona el sistema transmisor, y es el objetivo del sistema mecánico.

Los sistemas mencionados están así mismos compuestos por elementos mecánicos y eléctricos. Los mecánicos son las piezas de metal o de otros materiales que constituyen los elementos de la máquina. De los cuales se pueden diferenciar de la siguiente manera:

- **Elementos constitutivos.** son elementos que forman la estructura y forma de la máquina como bancada, bastidor, soportes y carros móviles.
- **Elementos de unión.** Son los que unen los diferentes componentes de la máquina, de los cuales pueden ser uniones fijas como remaches o soldaduras o uniones desmontables como tornillos, grapas y pasadores.

- **Elementos de transmisión.** Son los elementos que transmiten el movimiento y lo regulan o modifican según el caso o la aplicación, como son los árboles de transmisión, engranajes, husillo, cadenas y correas de transmisión.
- **Elementos de pivotar y rodadura.** Son los elementos que permiten el giro, deslizamiento o pivotaje de los elementos móviles, evitando el desgaste o la producción de calor como cojinetes, rodamientos y resbaladeras.
- **Neumáticos.** Son elementos de neumática que forman parte de la cadena cinemática que funcionan o se regulan con aire comprimido como válvulas, cilindros neumáticos y turbinas neumáticas.
- **Hidráulicos.** Son elementos que hacen funcionar o regulan la circulación de un líquido, normalmente aceite hidráulico como las válvulas hidráulicas y cilindros hidráulicos.
- **Eléctricos.** Son los elementos que se basan en tecnología eléctrica y se dividen en generadores de movimiento los cuales son alimentados con corriente eléctrica y dan lugar a un movimiento mecánico como motores y solenoides; y en elementos de control y maniobra que permiten la regulación de otros elementos eléctricos como pulsadores, interruptores, conmutadores, etc.
- **Electrónicos.** Estos elementos dependen de la potencia de la máquina, los controles pueden ser PLC (*Programmable Logic Controller, Controlador lógico programable*), DCL (*Data Control Language,, Lenguaje de control de datos*), PIC (*Peripheral Interface Controller, Controlador de interfaz periférico*) u otros microcontroladores, todos estos sistemas programables en los que con una configuración SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition, Supervisión, control y adquisición de datos*)

es posible observar y controlar el rendimiento de dicha máquina a través de una PC.

2.2. Motores de inducción.

Uno de los elementos principales de la cadena cinemática son los motores de inducción, el cual es un elemento eléctrico y da una entrada motriz al sistema.

Una máquina que sólo tiene los devanados de amortiguación es llamada máquina de inducción, porque el voltaje del rotor que produce la corriente y el campo magnético del rotor es inducido en los devanados del rotor en lugar de estar físicamente conectado a través de alambres. La característica distintiva de un motor de inducción es que no requiere corriente de campo DC para operar la máquina. Aunque se puede utilizar una máquina de inducción como motor o como generador, tiene desventajas como generador y, por lo tanto, pocas veces se utiliza como tal. Por esta razón las máquinas de inducción se refieren a los motores de inducción (Chapman, 2012).

La gran parte de energía eléctrica es convertida en energía mecánica en los motores eléctricos. Dentro de los motores eléctricos, los motores de inducción son los más usados tanto para aplicaciones en el hogar como en aplicaciones industriales. En países desarrollados, 10% de todos los motores de inducción son convertidos en aplicaciones con controladores de velocidad, esta combinación de variadores de frecuencia y motor de inducción se utilizan en diferentes aplicaciones como: transporte, bombas, compresores, ventiladores, robótica, vehículos híbridos o eléctricos, lavadoras, etc. (Boldea, 2009).

Para la selección de un motor en la industria y para diversas aplicaciones la NEMA (*National Manufacturers Association, Asociación nacional de fabricantes eléctricos*)

-en los Estados Unidos y la International Electrotechnical Commission (IEC)- en Europa, han definido una serie de diseños estándar. Estos diseños se relacionan con las clases de diseño, de modo que un motor individual puede pertenecer a una de las siguientes clases (Chapman, 2012).

- **Clase A:** Los motores de diseño clase A son de diseño estándar; con un par de arranque normal, corriente de arranque normal y bajo deslizamiento. El problema principal de esta clase de diseño es la extremadamente alta corriente de irrupción en el arranque. Estos motores se utilizan en ventiladores, sopladores, bombas, tornos y otras máquinas herramientas.
- **Clase B:** Los motores de diseño clase B tienen un par normal, baja corriente de arranque y bajo deslizamiento. Esto produce casi el mismo par de arranque que el motor de clase A con cerca de 25% menos corriente. Las aplicaciones son similares a las de los motores de diseño de clase A, pero los de diseño clase B son preferidos debido a que requieren poca corriente de arranque. Los motores de diseño B han reemplazado ampliamente a los motores de diseño A.
- **Clase C:** Los motores de diseño clase C tienen alto par de arranque con bajas corrientes de arranque y bajo deslizamiento. Estos motores son constituidos con rotores de doble jaula, por lo tanto, son más costosos que los motores de las anteriores clases. Se utilizan para cargas con alto par de arranque como bombas, compresores y transportadores.
- **Clase D:** Los motores de diseño clase D tienen alto par de arranque y una baja corriente de arranque, pero también tienen alto desplazamiento a plena carga. En esencia son motores de inducción de clase A comunes, pero la barra del rotor desplaza el par máximo hacia una velocidad muy baja. Estos motores se utilizan en aplicaciones que

requieren acelerar cargas de inercias muy altas, en especial grandes volantes utilizados en troqueladoras o en cortadoras.

2.2.1 Fallas en rodamientos

Los rodamientos de los motores de inducción actúan como una fuente de ruido y vibración debida tanto a la variación de compliancia que es el cambio en el volumen de la estructura producida por un cambio en la presión a través de la estructura, o como a la presencia de defectos en ellos (Tandon y Nakra, 1992). Los defectos en los rodamientos se pueden clasificar como distribuidos y localizados.

El hecho de que la distribución de carga varíe sobre los elementos rodantes a medida que éstos giran sobre las pistas de rodadura hace que los rodamientos se comporten por sí mismos en un generador de vibraciones. Este comportamiento puede provenir tanto de rodamientos geoméricamente perfectos como de rodamientos con imperfecciones de manufactura, problemas de instalación, lubricación y condiciones ambientales inadecuadas o de algún otro factor que ayude a producir desgaste o fatiga (Aktürk y Gohar, 1998).

La variación de las fuerzas de contacto entre los elementos rodantes y las pistas causa un incremento en el nivel de vibración. Puesto que resulta difícil discernir cuando la vibración es causada por defectos localizados o distribuidos es recomendable analizar tanto la frecuencia como la amplitud de las componentes espectrales relacionadas con la vibración (Tandon y Choudhury, 1999).

Las frecuencias características de las fallas en rodamientos son teóricamente bien conocidas; estas frecuencias son calculadas por la frecuencia de rotación y la geometría del rodamiento. Estas son características de los elementos de contacto interno y externo (f_{BPIF} , f_{BPOF}), la frecuencia de rotación de la caja (f_{FTF}), y la frecuencia de giro de elementos rodantes (f_{BSF}), se expresan las ecuaciones como:

$$f_{BPIF} = \frac{f_r}{2} N_b \left(1 + \frac{D_B}{D_C} \cos \theta \right), \quad (1)$$

$$f_{BPOF} = \frac{f_r}{2} N_b \left(1 - \frac{D_B}{D_C} \cos \theta \right), \quad (2)$$

$$f_{FTF} = \frac{f_r}{2} \left(1 - \frac{D_B}{D_C} \cos \theta \right), \quad (3)$$

$$f_{BSF} = \frac{D_C}{2D_B} f_r \left(1 - \left(\frac{D_B}{D_C} \right)^2 (\cos \theta)^2 \right), \quad (4)$$

Donde f_r es la frecuencia de rotación de la parte interior del balero, D_C es el diámetro exterior, D_B es el diámetro de los balines, N_b es el número de balines, y θ es el ángulo de contacto entre la superficie de rodamiento. Estas frecuencias pueden ser usadas en la detección de fallas en rodamientos, ya que se pueden visualizar en el espectro de frecuencias.

2.3. Variadores de frecuencia

Uno de los elementos para controlar los motores de inducción son los variadores de frecuencia. Por lo cual, los incluye como un sistema de control para elementos de cadenas cinemáticas.

Para la variación de la velocidad de un motor de inducción se puede realizar de dos maneras, modificando el número de polos de motor o modificando la frecuencia. Modificar el número de polos del motor es un procedimiento complicado y limitado, con esto, el motor adquiere revoluciones concretas y no de manera continua como sería de desear, en función al número de polos; además estas revoluciones predeterminadas no suelen ser más de tres revoluciones distintas ya que, de otro modo, el motor sería excesivamente grande en relación de potencia. Son los llamados motores de dos y tres velocidades. Modificar la frecuencia, por el procedimiento que sea, es lo ideal, y el más adecuado y económico es el electrónico (Pulido, 2000).

Un convertidor de frecuencia es un aparato destinado a modificar la frecuencia y, por tanto, la velocidad, de un motor de inducción asíncrono; es decir, que genera una corriente alterna con la frecuencia y la tensión necesarias para accionar dicho motor de corriente alterna. El convertidor de frecuencia permite modificar el valor de la frecuencia para hacer que el motor gire a más o menos velocidad, independientemente de la frecuencia de que disponga la red de alimentación. Actualmente esto se consigue con sistemas electrónicos.

Algunas ventajas de los variadores de frecuencia sería los siguientes:

- Ahorro energético.
- Se puede instalar en máquinas sin modificarlas.
- Puede ser controlado a distancia y con cualquier sistema automático.
- Los motores que se pueden utilizar son los de tipo estándar.
- No necesita relé térmico, ya que protege el motor por control de la intensidad, sobrecarga y sobreintensidad instantánea.
- Se puede conseguir una velocidad constante cualquiera que sea la carga.
- Se puede programar el arranque, parada y varias velocidades distintas con rampas de arranque.

El funcionamiento de estos sistemas es el siguiente, la red suministra una corriente alterna de 50-60 Hz dependiendo del país. En una primera etapa, pasa a un rectificador donde se convierte en corriente continua. Estos rectificadores pueden ser controlados o no por tiristores, pasando posteriormente a un filtro, de tal manera que la salida sea lineal. Esta tensión continua, rectificada y filtrada, pasa a la etapa de conmutación desde donde se convierte en corriente alterna, pero esta vez controlada por el circuito de disparo de los transistores PWM o de los tiristores, es decir, no a la frecuencia de 50-60 Hz sino a la que previamente se determine dentro de un rango, se muestra en la figura 2.2 un diagrama a bloques del funcionamiento (Pulido, 2000).

El sistema de control realiza varias funciones, las cuales son:

- Variación de frecuencia
- Regulación de la tensión o de la corriente.
- Conmutación de la corriente en los devanados del motor.
- Protección del convertidor, limitando la intensidad a un valor permitido por los semiconductores del convertidor.
- Protección de los devanados del motor, limitando la intensidad que circula.

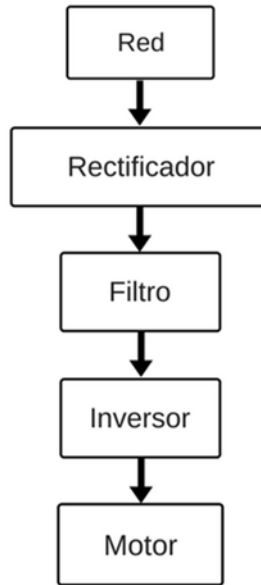


Figura 2.2 Diagrama a bloques de variador de frecuencia.

2.4. Emisión Acústica (EA)

Los primeros estudios básicos sobre los fenómenos de emisión acústica se atribuyen a Káiser, en Alemania (1950), Káiser fue el primero quien utilizó una instrumentación electrónica para registrar los sonidos audibles producidos por los metales durante su deformación. En todos ellos detectó una emisión acústica (entre ellos el cinc, los aceros, el aluminio, el cobre y el plomo). A partir de 1964 se han realizado muchas investigaciones sobre todas las clases de materiales mediante la técnica de emisión acústica. Muchos trabajos tratan del estudio de la mecánica de las fracturas en material con y sin grietas, la deformación plástica que da lugar a una EA se inicia precisamente en los extremos de la grieta y en puntos de concentración de grietas. También se ha aplicado el método para investigar el crecimiento de las grietas, tal como ocurre durante un proceso de fragilidad por hidrógeno, de agrietamiento por corrosión bajo tensiones o de fatiga a bajos ciclos (Ohtsu, 1996).

La EA es la clase de fenómeno que genera ondas elásticas transitorias por la liberación rápida de energía a partir de fuentes localizadas, o las ondas transitorias generadas de este modo. Las fuentes clásicas de EA son los procesos de deformación relacionados con defectos tales como la generación y propagación de fisuras, deformaciones del material, desprendimientos del agregado de la matriz, contracciones o dilataciones por fraguado o variaciones de temperatura, etc. El origen de la EA es en el campo de tensiones creado dentro del material, de manera que, de no existir en el campo de tensiones, no se produciría la EA (Pollok, 1993).

Cuando una pieza sólida se somete a un proceso de carga hasta su ruptura, ocurren en su interior una serie de dislocaciones de micro estructura que puede detectarse acústicamente, estas dislocaciones van acompañadas de una liberación de energía potencial que, en parte, se transforma en calor, quedando una pequeña fracción que, al radiarse en forma de energía vibratoria, puede ser recogida en la superficie del sólido.

Todos los materiales producen EA durante la creación, propagación de fisuras y durante la deformación. Las ondas elásticas se mueven a través del sólido hacia la superficie donde son detectadas por sensores. Estos sensores son transductores que convierten las ondas mecánicas en ondas eléctricas. De este modo se obtiene la información acerca de la existencia y ubicación de posibles fuentes. Esto es similar a la sismología, donde las ondas sísmicas alcanzan las estaciones situadas en la superficie de la tierra. Luego del procesamiento de señales, se obtiene la ubicación de los centros sísmicos (Scruby, 1987).

La técnica de EA ha sido estudiada durante 60 años (ASNT, 2006), durante el cual se ha observado diversas ventajas. Las ventajas de la técnica pueden ser resumidas de la siguiente forma:

- Es el único método no destructivo capaz de un monitoreo pasivo y global de defectos activos.

- Las mediciones pueden hechas en tiempo real.
- El uso de múltiples sensores puede ayudar a la localización de la fuente de la emisión acústica.
- Un detallado análisis de las señales permite la diferenciación de emisiones acústicas asociadas a una falla y las producidas por el ruido.

2.4.1. Propagación de Emisiones Acústicas

En un material de deformación lleva a la liberación de la energía elástica absorbida dentro del mismo. Las ondas mecánicas se irradian de una fuente de defecto y son descubiertas por los sensores que están localizados en la superficie de un material. La amplitud del impulso de tensión generado en una fuente de defecto puede variar según la naturaleza del defecto y de dinámica del proceso.

En superficies planas, la onda se distribuye como círculos concéntricos alrededor de la fuente y puede ser descubierta por uno o varios sensores. Durante la propagación, la onda es atenuada. La distancia máxima, donde una emisión acústica todavía puede ser descubierta depende de varios parámetros, como propiedades de materiales, la geometría del objeto de prueba, su contenido y ambiente, etc. En superficies metálicas planas o cilíndricas, los eventos pueden ser captados a una distancia de varios metros, que es una de las grandes ventajas de esta técnica. Las pruebas de la emisión acústica pueden captar unas áreas de fuentes que no son accesibles por otros métodos.

Normalmente las señales de emisión acústica se pueden clasificar por señal transitoria y señal continua.

1. **Señal transitoria:** Estas señales tienen puntos definidos claramente de principio y final del ruido que provoca un defecto como se ve en la figura 2.3. son características de aparición y crecimiento de fisuras de un material.

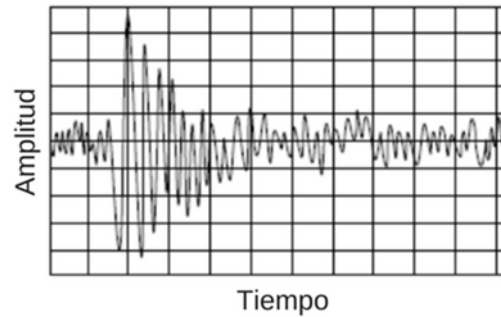


Figura 2.3 Señal transitoria (Kaphle, 2012).

2. **Señal continua:** son ondas continuas que tienen amplitudes variadas y frecuencias, pero nunca se terminan. La figura 2.4 representa un modelo de señal continua típica. Estas señales están caracterizadas de movimientos o dislocaciones.

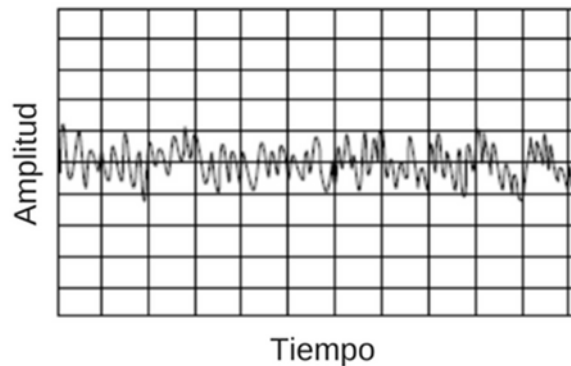


Figura 2.4 Señal continua (Kaphle, 2012).

2.4.2. Parámetros de las señales de emisión acústica

Los datos sobre la forma de onda pueden ser usados para sacar la información sobre la fuente, tal como su actividad e intensidad. Una señal típica de señal sería como la figura 2.5.

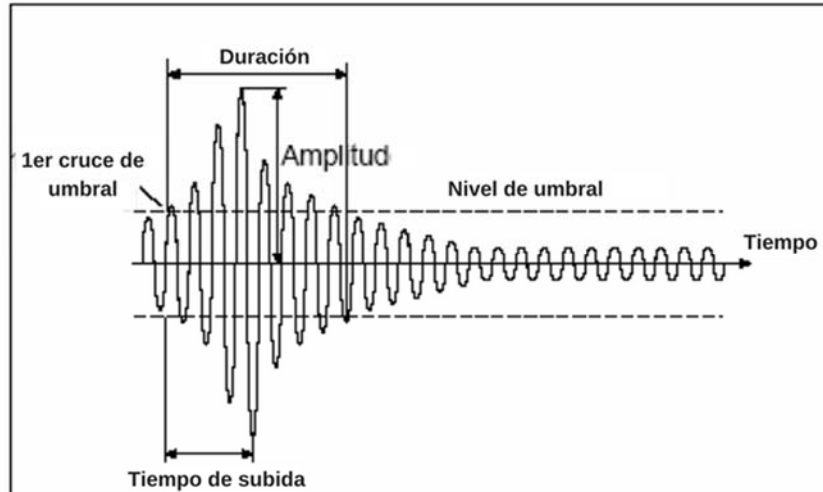


Figura 2.5 Señal acústica típica.

Los parámetros de una señal acústica son.

1. **Tiempo de llegada.** Es un tiempo absoluto en el cual aparece la primera señal de descubrimiento de un efecto y que puede ser captado por los sensores establecidos.
2. **Amplitud máxima.** Es una amplitud máxima dentro de la duración de la señal, es decir, el voltaje más alto a cualquier punto en la forma de onda del tiempo de voltaje. Existe amplia variedad de amplitudes de señal encontradas en la práctica, es conveniente describirlos en escala de decibelio (dB). La amplitud de una señal en dB es:

$$A(dB) = 20 \log \frac{V_p}{V_{ref}} \quad (5)$$

Donde:

V_p : Voltaje máximo en la salida del elemento transformador.

V_{ref} : Voltaje de referencia.

3. **Tiempo de subida:** Es el intervalo de tiempo entre el momento de aparición de señal y la amplitud máxima de señal. A menudo, este parámetro se utiliza para problemas que dependen del tiempo, como vibración y dinámica.

4. **Duración de señal:** Es un intervalo entre el primer y el último impulso de la señal. Es en particular útil para la filtración del ruido y otras clases de la clasificación de la señal.
5. **Cuentas/eventos:** La forma de onda mostrada en la figura 2.5 se le conoce como un golpe ya que es el resultado de señales acústicas que golpean un sensor. Se cuentan estos fenómenos que capta el sensor. El inconveniente es que las cuentas dependen de la resonancia del elemento transformador.

Existen varios aspectos que influyen en la señal. La atenuación, definida como la pérdida de amplitud de señal y la geometría del material pueden considerarse como las influencias principales (Arrington, 1987). La velocidad de onda, la geometría y las propiedades materiales son todos los factores que varían la cantidad de la actividad acústica generada (Sarfarazi, 1992).

2.4.3. Características significativas de la señal de emisión acústica

- **Efecto Káiser**

Este efecto fue investigado por Wilhelm Káiser en 1950. Él observó que la emisión acústica era irreversible, es decir que está no se vuelve producir aun cuando se vuelve a cargar un material, si no, hasta que el nivel de carga no exceda el nivel máximo alcanzado en la prueba anterior. Este fenómeno irreversible se conoce como “efecto Káiser”.

El efecto Káiser puede ser una desventaja para pruebas de emisión acústicas en comparación con otros métodos, porque cada señal acústica sólo puede aparecer una vez. Así que, puede ser necesario hacer pruebas de emisión acústica en tiempos bien definidos, bien planificados y ejecutados.

- **Efecto Felicity**

Este efecto se define como el aspecto de la emisión acústica significativa a un nivel de carga por debajo de la carga máxima anterior que se observe en el efecto Káiser. En la figura 2.5 se pueden ver niveles más altos de la tensión el material está débil y por eso aparecen las ondas acústicas antes de que la carga máxima anterior es alcanzada (camino 4, 5, 6).

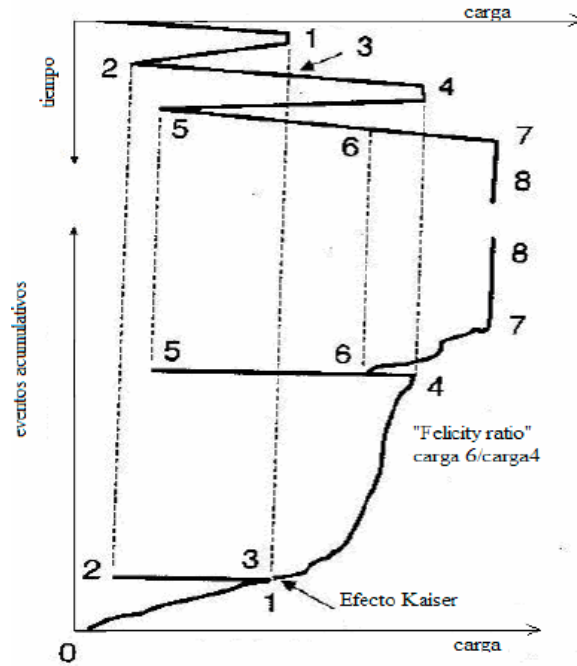


Figura 2.6 Efectos Kaiser y Felicity (Grandt, 2004)

2.4.4. Sistemas para monitoreo de EA

El proceso de monitoreo de EA es posible al uso de un conjunto de instrumentos que conjuntamente conforman un sistema de adquisición. Cada instrumento y componente tiene un único y esencial propósito para el monitoreo de este tipo de señales. Se presenta en la figura 2.6 un diagrama a bloques de un sistema de adquisición y una breve descripción.

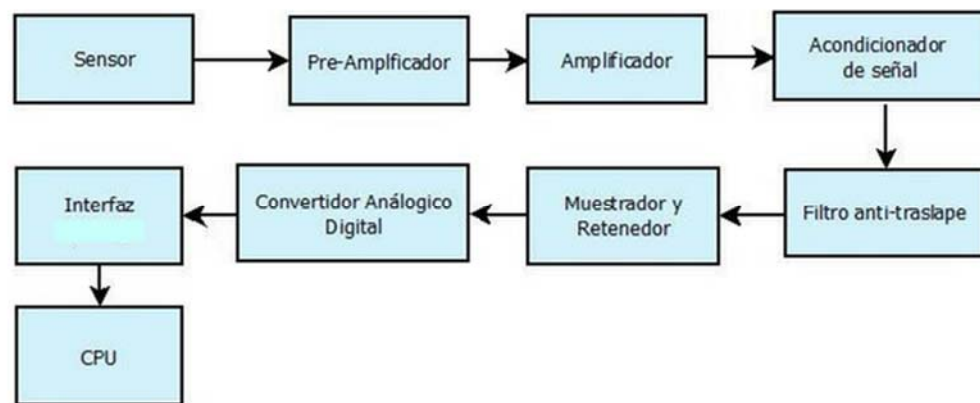


Figura 2.7 Diagrama a bloques de sistema de adquisición de datos.

- **Sensor:** Es un dispositivo capaz de detectar magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación, y transformarlas en variables eléctricas.
- **Pre-amplificador:** Esta etapa se utiliza principalmente para tener un acople de impedancias de la señal del sensor a la etapa de amplificación de la señal.
- **Amplificador:** Estos circuitos amplifican la diferencia entre dos señales de entrada y rechazan cualquier señal que sea común a ambas señales. Estos circuitos se utilizan principalmente para amplificar señales diferenciales muy pequeñas en muchos procesos industriales, medición, adquisición de datos y aplicaciones médicas.

- **Acondicionador de señal:** Consiste en la manipulación electrónica de dicha señal, para obtener rangos de voltajes o corrientes adecuados a las características del diseño. El acondicionamiento de señales resulta conveniente al momento de realizar una instrumentación ya que, al tener una señal con rangos de voltajes más amplios, se puede obtener mayor resolución en la medición, además de presentar mayor inmunidad al ruido en el ambiente de la medición.
- **Muestreador y retenedor (sample-and-hold):** Es un circuito que recibe una señal analógica y la mantiene en un valor constante durante un tiempo específico.
- **Convertidor analógico-digital:** Por sus siglas en inglés ADC (*Analog-Digital Converter*), es un dispositivo electrónico capaz de convertir una entrada analógica de voltaje en un valor binario. La señal analógica, que varía de forma continua en el tiempo, se conecta a la entrada del dispositivo y se somete a un muestreo a una velocidad fija. La digitalización consiste básicamente en realizar de forma periódica medidas de la amplitud (tensión) de una señal, redondear sus valores a un conjunto finito de niveles preestablecidos de tensión (niveles de cuantificación) y registrarlos como números enteros en cualquier tipo de memoria o soporte.
- **Interfaz:** Esta etapa es utilizada para capturar los datos después de la conversión y poder enviarlos en un formato ordenado y por medio de una interfaz de comunicación hacia el CPU.
- **CPU:** En esta última etapa, se recopilan los datos para su procesamiento y análisis digital.

III. Metodología

En este capítulo se explica la metodología aplicada para el desarrollo del trabajo de tesis. La cual abarca desde la selección de los componentes para el sistema, desarrollo del sistema, pruebas del sistema de adquisición, métodos de procesamiento e identificación de parámetros de las señales.

En la figura 3.1 se muestra la metodología a bloques seguida para el desarrollo del trabajo, se detalla cada bloque y funcionamiento dentro de este capítulo, se describen las configuraciones de los bancos de pruebas utilizados, sin especificar parámetros utilizados en cada ensayo realizado en éstos. Los bancos de pruebas utilizados se referencian a la institución en donde se realizaron los ensayos, las cuales son, Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) campus San Juan del Río y la Universidad de Valladolid (UVa), España.

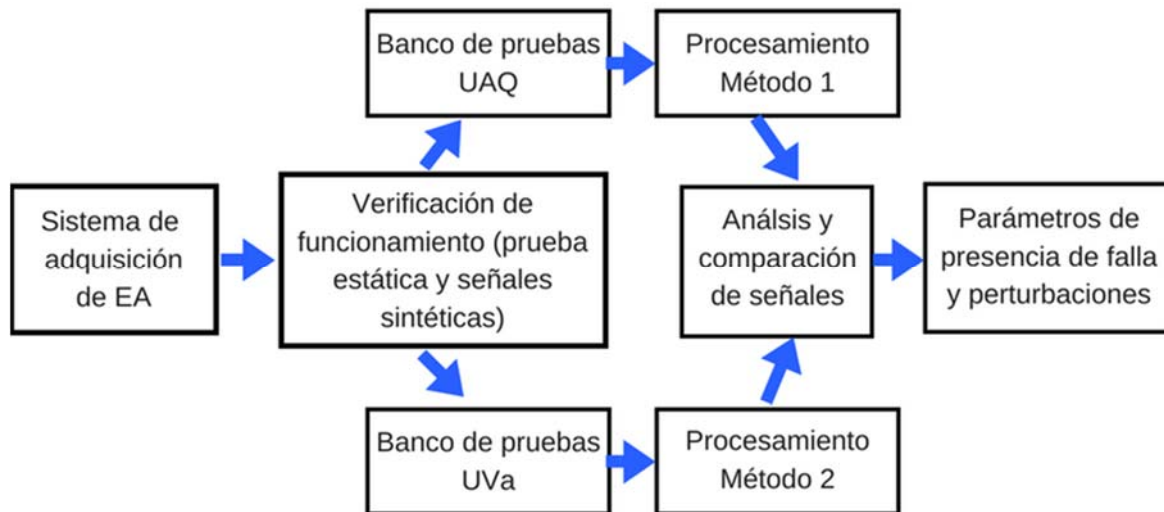


Figura 3.1 Diagrama a bloques de metodología.

3.1. Sistema de adquisición de EA.

Para el diseño del sistema de adquisición se requiere primeramente la selección de todos los componentes correspondientes para la aplicación deseada. Posteriormente, la realización de diseños tanto como de la descripción de hardware para el control del sistema y para la tarjeta PCB (*Printed Circuit Board, Placa de Circuito Impreso*) que conformará todo el sistema en conjunto con la tarjeta de control.

Los componentes del sistema deben tener características específicas para mantener la concordancia de la aplicación deseada. Al ser un sistema de alta velocidad, requiere que el sistema desde la lectura de la señal de EA, preamplificador, convertidor analógico-digital y la captura de datos funcionen sincronizados y controlados a una frecuencia específica, con el objetivo de cumplir con el principio de Nyquist-Shannon (Candès et al, 2008).

3.1.1. Sensor de emisión acústica.

El término emisión acústica se refiere a ondas elásticas que se propagan en un rango de frecuencias ultrasónicas, este rango está entre ~20-2000 kHz. El ancho de banda para la selección del sensor debe de ser grande para poder detectar más cambios en la señal a monitorear y además de ser de sensibilidad alta.

Con las especificaciones anteriores se propuso el siguiente sensor:

- **Sensor WG50**, Fabricante: *Soundwel technology*, es un sensor de banda ancha y de alta frecuencia, es un sensor muy utilizado para monitorear estructuras e ideal para aplicaciones que requieren análisis de un alto ancho de banda y frecuencia. Su rango de funcionamiento es de 100-1000 kHz, temperatura operativa -20~120°C, sensibilidad >70 dB, ver figura 3.2.



Figura 3.2 Sensor de emisión acústica fabricante: *Soundwel* (Fuente: <https://www.soundwelshop.com/>)

Se optó por este modelo del fabricante *Soundwel*, por su rango de frecuencia con las que puede trabajar y por el análisis que se desea hacer de la señal el cual requiere una respuesta de emisión acústica de alta fidelidad.

3.1.2. Preamplificador y Amplificador

El voltaje de salida de un sensor de emisión acústica es generalmente muy pequeño (rango de mili volts o menor), por lo cual se necesita un preamplificador para aumentar la señal antes de entrar a un sistema de procesamiento de señales. También esta etapa es usada para acoplamiento de impedancias entre la señal del sensor y los demás elementos del sistema.

El distribuidor de los sensores *Soundwel* distribuye los preamplificadores para toda la gama de sus sensores. Por lo cual, para tener concordancia se adquirió junto con el sensor figura 3.3.



Figura 3.3 Preamplificadores *Soundwel*. (Fuente: <https://www.soundwelshop.com/>)

Características de preamplificador:

- Preamplificador de tipo banda ancha normal, adecuado para la mayoría de las tarjetas de adquisición y sensores *Soundwel*.
- Fuente de alimentación IPhantom.
- Proporciona al sensor la capacidad de caracterizar su propia condición.
- Protección LMetal, escudo contra interferencias electromagnéticas e impacto.

Especificaciones de preamplificador:

- Ganancia: 40 dB
- Ancho de Banda: 10 kHz~2 Mhz.
- Ruido: <26dB.
- Voltaje de salida: $\pm 10V$ (Vpp).
- Alimentación requerida: 28 V.
- Resistencia nominal: 50 Ω .
- Temperatura de funcionamiento: $-20^{\circ}C \sim +65^{\circ}C$.
- Conector: BNC.

- Nivel de precisión: IP65.

El preamplificador de *Soundwel* como se ve en sus especificaciones proporciona una salida de ± 10 V pico a pico lo cual es una amplitud aun mayor que la señal que nos puede entregar el sensor por sí solo, con esto se tiene ya la amplitud de la señal y el acoplamiento de impedancias requerido para un sistema de adquisición de datos. Se puede concluir que se tiene las etapas de preamplificador y amplificador en una misma.

3.1.3. Convertidor Analógico-Digital

En esta parte del sistema de adquisición de datos se ocupan varias etapas antes del convertidor analógico-digital, que son las etapas de acondicionador de señal, el filtro anti-traslape, el muestreador y retenedor. Las cuales, son esenciales para que funcione el sistema, todos estos elementos se integran en la tarjeta de adquisición. En la parte del acondicionador de señal se utiliza un arreglo de resistencias para la adaptación del nivel de voltaje de la señal de salida del amplificador, el cual entrega ± 10 V (Vpp). Los circuitos utilizados para las etapas antes mencionadas se describen a continuación, así como su funcionamiento.

El convertidor analógico-digital debe contar con características específicas, ya que se trabajan con señales de alta frecuencia y además con un ancho de banda amplio. La frecuencia que está dada por el sensor de emisión acústica, la cual es de 100~1000 kHz por lo tanto por teorema de Nyquist-Shannon, la frecuencia de muestreo debe ser superior a dos veces la frecuencia de la señal a muestrear. Por lo cual, la especificación del convertidor debe ser de 2 MSPS (*Mega Samples Per Second*, Mega muestras por segundo) o mayor, con esto se asegura la adquisición de señales de todo el ancho de banda donde trabaja el sensor.

El convertidor que se escogió fue el AD7352 del fabricante *Analog Devices* es dual, 12 bits de resolución, alta velocidad, baja potencia, aproximación sucesiva del ADC que opera desde una única fuente de alimentación de 2.5 V y la velocidad de muestreo de hasta 3 MSPS. El dispositivo contiene dos ADC, cada uno precedido por un bajo nivel de ruido, ancho de banda amplio en el circuito muestreador y retenedor el cual puede manejar frecuencias de entrada por encima de 110 Mhz. Con estas características cubre las especificaciones para la aplicación del sistema de adquisición para EA.

Para el funcionamiento diferencial del convertidor requiere simultáneamente dos señales iguales que estén a 180° de fase entre ellas. La aplicación requiere un pre-acondicionamiento de la señal, para esto se utiliza un amplificador diferencial y específicamente para la aplicación se utiliza el AD8138 de *Analog Devices*, el cual, puede ser usado como amplificador *single-ended-to-differential* o *differential-to-differential* en la figura 3.4 se muestra un ejemplo esquemático de la conexión del amplificador al convertidor. El convertidor permite tener un voltaje de referencia interna o externa. La referencia interna es de 2.048 V la cual permite un excelente rendimiento en casi todas las aplicaciones. Aunque, una elección común como se realiza en este desarrollo es la utilización de una referencia externa de 2.5 V con el circuito ADR421, de *Analog Devices*.

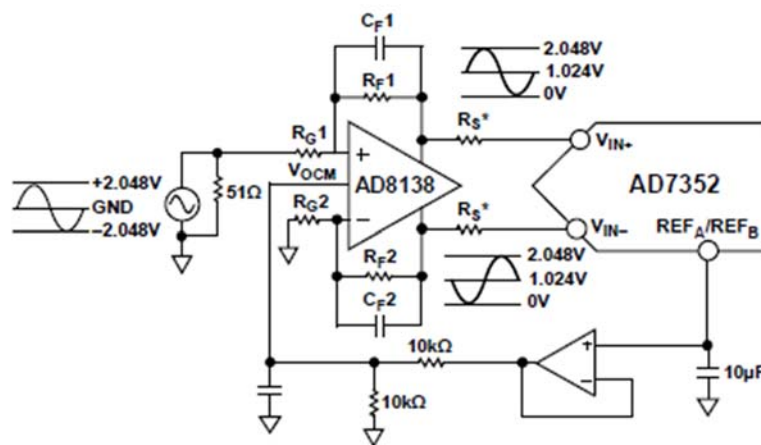


Figura 3.4 Circuito de conexión amplificador-convertidor. (Fuente: Analog Devices, AD7352)

El proceso de conversión y la adquisición de datos usan entradas de control estándar que permiten una fácil interconexión con microprocesadores o DSP (*Digital Signal Processor, procesador digital de señales*). La señal de entrada es muestreada en el flanco de bajada de CS; y una conversión se inicia también en este punto. El tiempo de conversión se determina por la frecuencia SCLK el cual es una señal de reloj para la sincronización del sistema, se muestra el bloque funcional del dispositivo en la figura 3.5.

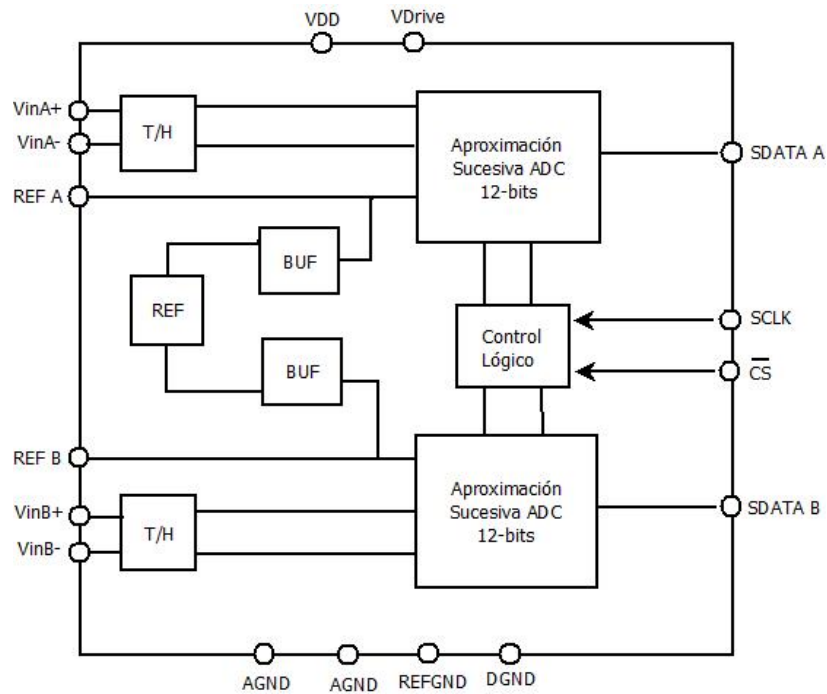


Figura 3.5 Diagrama funcional de AD7352 (Fuente: Analog Devices , AD7352)

El rango de entrada analógica para la parte modo común diferencial es $\pm VREF/2$. El diseño del sistema tiene un voltaje de 2.5 V de referencia en el chip que puede ser saturado cuando se prefiere una referencia externa. El sistema incluye los siguientes componentes, dos referencias ADR421, 2.5 V; dos convertidores *single-ended-to-differential* AD8138 y un amplificador operacional AD8022.

3.1.4. Función de transferencia ADC

La codificación de salida para el AD7352 es binario directo. Los diseños de la transición del código ocurren en valores sucesivos de LSB (*Least Significant bit*, Bit menos significativo). El tamaño de LSB es $(2 \times V_{REF}) / 4096$. La característica de transferencia ideal se muestra en la figura 3.6.

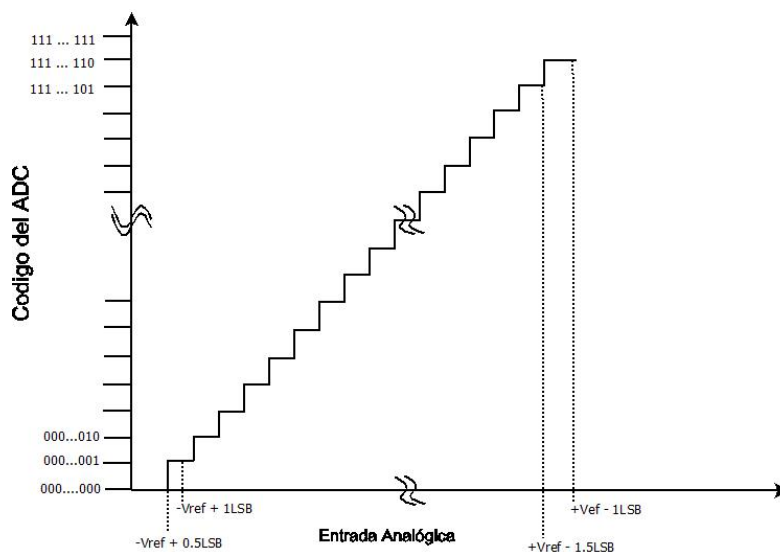


Figura 3.6 Transferencia ideal del AD7352. (Fuente: Analog Devices, AD7352)

3.1.5. Modo de Operación

El modo de funcionamiento del AD7352 se selecciona mediante el control del estado lógico de la señal CS durante la conversión. El dispositivo tiene tres posibles modos de funcionamiento. Estos modos de operación están diseñados para proporcionar opciones de administración de energía flexibles. Estas opciones se pueden elegir para optimizar la proporción de la tasa de disipación de potencia/rendimiento para los diferentes requisitos de las aplicaciones.

El modo elegido fue el modo normal de operación, ya que es el modo que está destinado a las aplicaciones que necesitan las tasas de rendimiento más rápido ya que el AD7352 permanece totalmente encendido en todo momento. La figura 3.7 muestra el diagrama general de operación en modo normal.



Figura 3.7 Modo de operación normal del AD7352. (Fuente: Analog Devices AD7352)

3.1.6. Interfaz de Alta Velocidad (FPGA)

Para controlar la conversión del ADC es necesario una interfaz de alta velocidad que por medio de las señales de CS y SCLK controla la conversión y además sincroniza con el control del sistema. Posteriormente, la interfaz se dedica a guardar los datos en una memoria RAM dinámica para después enviarlos a una PC y poder hacer su análisis, para esto se requiere una unidad de procesamiento que trabaje a alta velocidad, por lo cual, se escogió utilizar la tecnología FPGA que permite tener el control de la conversión, control del almacenamiento y posteriormente él envió de datos a una computadora.

La tarjeta usada es la Unidad de procesamiento digital de señales en hardware (UPDSH) que se muestra en la figura 3.8 y sus características son las siguientes:

- Contiene una FPGA de la familia Spartan-3E
- Contiene una RAM estática IS61LV5128AL de 4Mb
- Contiene una RAM dinámica MT48LC16M16A2 de 256Mb
- Requiere alimentación de 5V
- Incluye interfaz de programación JTAG
- Incluye la memoria flash de programación para el FPGA

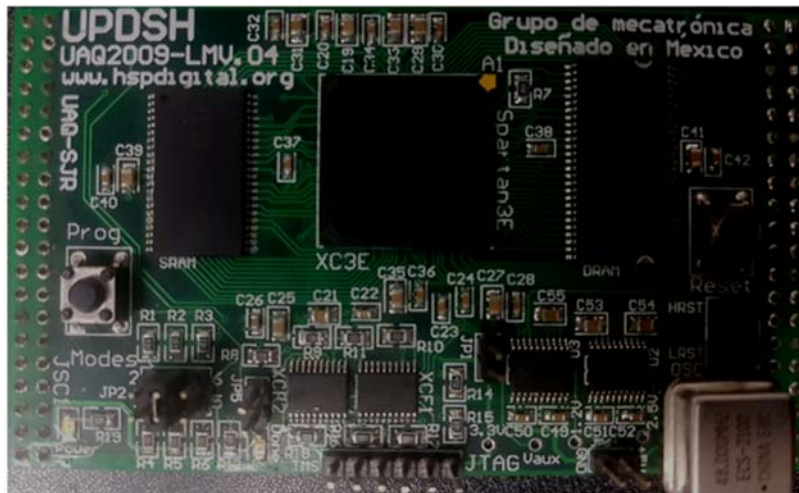


Figura 3.8 Tarjeta UPDSH

3.2. Diseño y Descripción de Hardware.

3.2.1. Descripción de bloques funcionales

Los bloques utilizados para el control de la aplicación del sistema de adquisición de datos son los siguientes:

- Control ADC
- Interfaz RAM dinámica
- Interfaz USB
- Control General
- Contador de muestras
- Base de tiempo (Tiempo entre muestras)

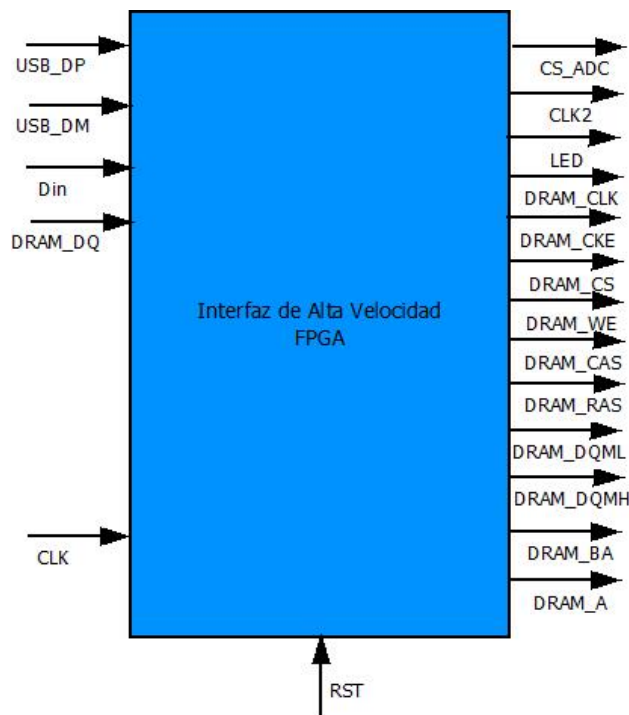


Figura 3.9 Diagrama general de interfaz de alta velocidad FPGA.

En la figura 3.9 se muestra el bloque general del sistema descrito en la tarjeta FPGA, los bloques internos se muestran en la figura 3.10.

El funcionamiento general del interfaz es guardar los datos de la conversión y enviarlos por medio de USB al PC, además de tener un control síncrono del sistema. A continuación, se explica más a detalle el funcionamiento de cada bloque. Los bloques son descritos en lenguaje HDL (*Hardware Description Language*, Lenguaje de descripción de Hardware), para su programación en la tarjeta UPDSH.

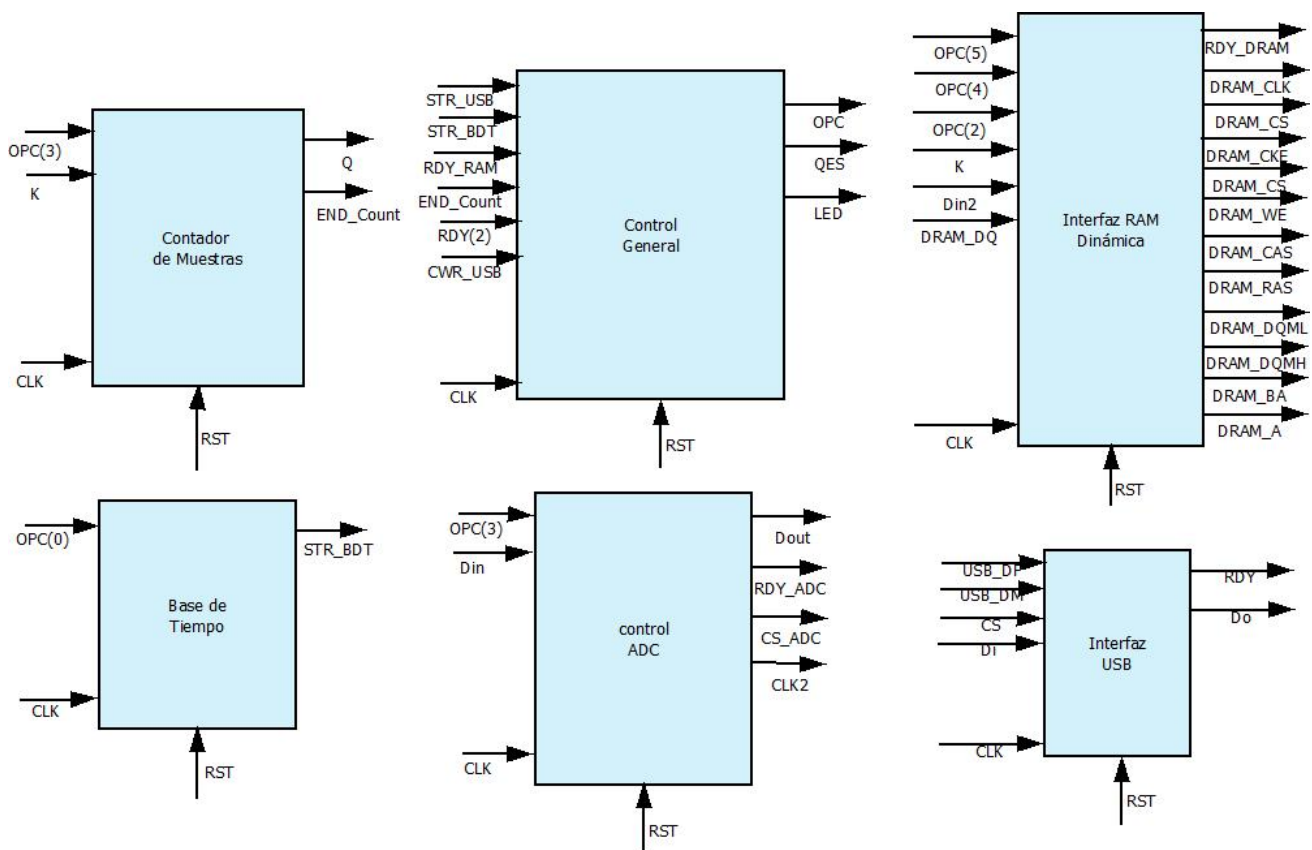


Figura 3.10 Bloques internos del diseño del interfaz.

- **Contador de muestras:** El número de muestras las cuales capturan es una cantidad finita, limitada por la capacidad de almacenamiento de la memoria dinámica. Con este se tiene el control del número de muestras que se quieren obtener de cada ensayo.

- **Base de tiempo:** El espacio de tiempo entre cada muestra es muy importante ya que es el espacio de tiempo para la conversión y para almacenar los datos en la RAM, para posteriormente el sistema esté listo para aceptar la muestra siguiente.
- **Control ADC:** En este bloque se controla las señales que se envían al convertidor analógico-digital, señales como CS (señal de control de conversión) y CLK (Señal de reloj para la conversión), además de la captura de datos.
- **Control General:** El control general es una FSM (*Finite-State Machine*, Maquina de estados finitos) la cual controla el proceso completo de la adquisición de datos.
- **Interfaz RAM e Interfaz USB:** Los bloques de las interfaces se ocupan para el control de la RAM y del USB. Estas guardan y envían respectivamente la información de la señal adquirida por el sistema.

3.3. Diseño de tarjeta PCB

La realización de una tarjeta PCB que incluya todo el sistema es uno de los objetivos del presente trabajo. El diseño de la tarjeta es realizado con todos los parámetros establecidos con todas las partes que lo conforman probados. La tarjeta de adquisición es diseñada conforme a que puedan trabajar con las tarjetas PQUAQ (Morales-Velazquez et al, 2010) propietarias de la Universidad Autónoma de Querétaro. Con esto, la tarjeta puede ser usada con sistemas ya desarrollados.

Para el diseño de la tarjeta se utiliza *Altium Designer*, el resultado del diseño se muestra en la figura 3.11. La tarjeta es de doble capa, además de aplicar conceptos de diseño para eliminación de ruido. El sistema contenido en una tarjeta muestra ventajas muy notables como:

- Menos ruido e interferencia en señales de control del sistema.

- Etapa de potencia incluida en la tarjeta para la alimentación.
- Eliminación de errores de comunicación por cableados.
- Sistema compacto y simple de manipular.

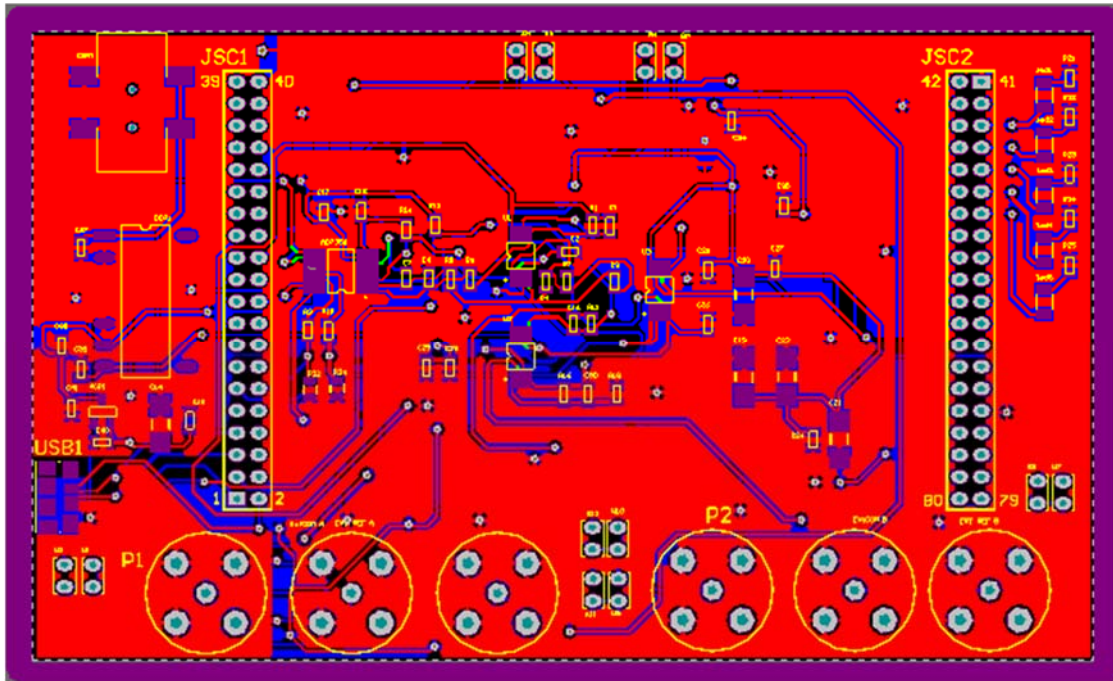


Figura 3.11 Diseño de PCB en Altium

3.4. Tarjeta de adquisición de datos de EA.

La tarjeta de adquisición final se muestra en la figura 3.12 y en la figura 3.13 el sistema de adquisición conectado a la tarjeta UPDSH. Los ensayos realizados con la tarjeta se muestran en el siguiente capítulo.

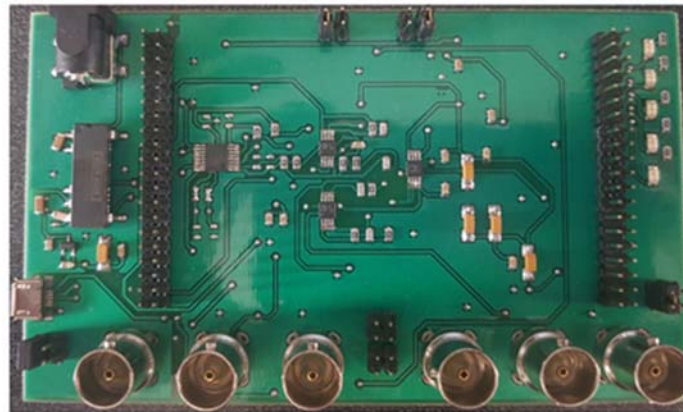


Figura 3.12 Tarjeta de adquisición



Figura 3.13 Tarjeta de adquisición con tarjeta UPDSH

3.5. Procesamiento de señales de EA

Para el análisis de las señales de EA adquiridas con la tarjeta de adquisición se realizaron diferentes procesamientos, esto se debe por los diferentes bancos de pruebas propuestos para los ensayos. Los procesamientos utilizados se basan en el uso de la FFT, con la cual se observa el espectro de la señal de EA realizándose un análisis en el dominio de la frecuencia. Los procesamientos se diseñaron para analizar, visualizar y comparar las diferentes señales adquiridas de cada una de las configuraciones de los bancos de pruebas, basándose en las fallas mecánicas inducidas a los bancos de pruebas y en elementos de control (variadores de frecuencia) utilizados en los ensayos. A continuación, se presentan los diagramas a bloques de cada procesamiento realizado y la descripción.

3.5.1 Procesamiento 1

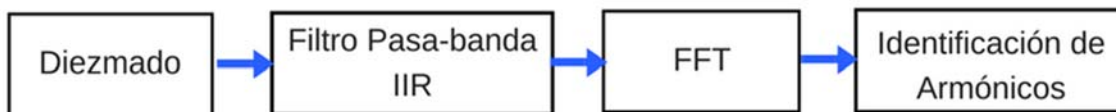


Figura 3.14 Diagrama a bloques de Procesamiento 1

El diagrama a bloques del procesamiento 1 se muestra en la figura 3.14, este se diseñó con el objetivo de identificar armónicos de interés de la falla inducida en la cadena cinemática utilizada como banco de pruebas. Los armónicos de interés son calculados de manera teórica con la fórmula 2 presentada en el capítulo II de la frecuencia de rodamiento externo. La fórmula es utilizada con los datos del banco de pruebas, así calculando la frecuencia donde se presenta la falla inducida en la cadena cinemática. Para la identificación de los armónicos de la frecuencia calculada se concentra solo en los armónicos dentro del ancho de banda de trabajo del sensor de EA. A continuación, se describe cada bloque del procesamiento 1.

- **Diezmado:** Las señales adquiridas de EA contienen una gran cantidad de muestras, esto se debe a la frecuencia de muestreo utilizada. Un diezmado de segundo grado es aplicado a la señal en dominio del tiempo, con esto reduciendo las muestras y la frecuencia de muestreo.
- **Filtro pasa-banda IIR:** Se utiliza un filtro pasa-banda IIR (*Infinite Impulse Response, Respuesta infinital al impulso*), es utilizado este tipo ya que no se requiere información de la fase de la señal además de requerir menos carga computacional para aplicarse y siendo una señal con una gran cantidad de datos esto afecta directamente al tiempo de procesamiento. Las frecuencias de corte son establecidas por el ancho de banda del sensor de EA y la frecuencia de muestreo (limitado al cumplir el teorema de Nyquist-Shannon).
- **FFT:** Se aplica la transformada rápida de Fourier posterior al procesamiento ya anteriormente explicado, con esto se obtiene la señal en dominio de la frecuencia para el análisis y comparación de los armónicos de la falla inducida.
- **Identificación de armónicos:** Para la identificación de los armónicos de la falla inducida, se acoto el espectro de la señal en las bandas de interés y se comparan los armónicos de las señales adquiridas de un estado sano del banco de pruebas y un estado con falla inducida.

3.5.2 Procesamiento 2

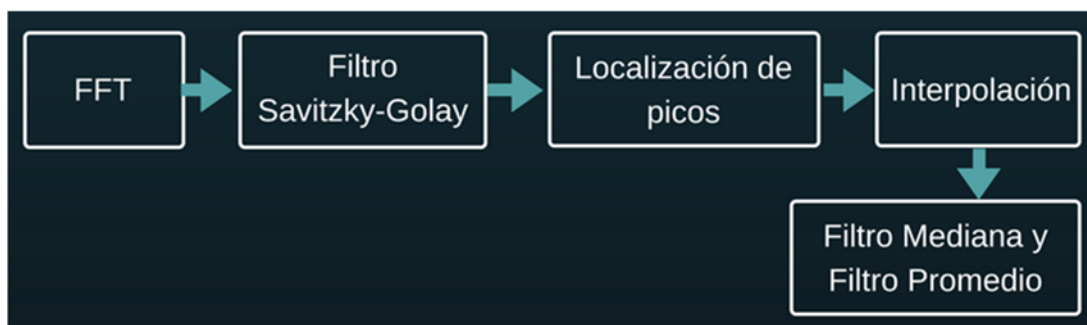


Figura 3.15 Diagrama a bloques de procesamiento 2

El diagrama a bloques del procesamiento 2 se presenta en la figura 3.15, este se diseñó con el objetivo de identificar la presencia de un elemento de control (variador de frecuencia) en un elemento de la cadena cinemática y la presencia de una falla mecánica en las señales de EA adquiridas. A comparación del procesamiento anterior presentado donde se aplica el mayor procesamiento antes de aplicar la transformada de Fourier, en este se concentra más en procesamiento posterior a la transformada, esto se realiza de esta manera para realizar comparaciones de los espectros de las señales de EA; primeramente, identificando la presencia del sistema de control en el espectro de las señales y después la comparación de los diferentes estados monitoreados del banco de pruebas. Ahora se describen los bloques más a detalle.

- **FFT:** La transformada de Fourier es aplicada a la señal sin hacerle ningún procesamiento en el dominio del tiempo ya que el procesamiento se aplica en el dominio de la frecuencia.
- **Filtro Savitzky-Golay:** Es un filtro digital que se puede aplicar a un conjunto de datos digitales con el fin de suavizar los datos, es decir, aumentar la relación señal/ruido sin distorsionar en gran medida la señal. Esto se logra, en un proceso conocido como convolución, mediante un ajuste de sucesivos subconjuntos de puntos de datos adyacentes con un polinomio de bajo grado por el método de mínimos cuadrados lineales (Bakkali, 2007).
- **Localización de picos:** En esta parte del procesamiento se trabaja con una señal en el dominio de la frecuencia. La localización de picos se realiza para identificar las frecuencias con más presencia en la señal, y con esto eliminar las frecuencias presentes en la señal con baja energía. Con este paso se pretende tener un contorno del espectro con la información que se presente con más energía en la señal.

- **Interpolación:** Al identificar los picos de la señal se interpolan para formar una señal que conserva la información destacada de la señal original, eliminando el ruido y elementos de baja energía.
- **Filtro Mediana y Filtro Promedio:** En esta parte del procesamiento se analizan las señales antes y después de estos filtros. Estos filtros realizan un promedio o mediana de muestras para poder visualizar el comportamiento del contorno del espectro de la señal de EA.

Los procesamientos antes explicados son descritos en MATLAB y aplicados a los datos recaudados de cada ensayo realizado con la tarjeta de adquisición de EA.

3.6. Análisis y comparación de señales

Una vez concluido el procesamiento de todos los datos adquiridos de cada ensayo, se realiza un análisis de las señales basado en las configuraciones y fallas inducidas en cada banco de pruebas. Como se explicó anteriormente, se realizaron dos métodos de procesamiento basados en las diferentes configuraciones de los bancos de prueba, a su vez cada análisis y comparaciones son particulares a los resultados de los métodos de procesamiento aplicados.

En los ensayos realizados en la UAQ, se trabaja con una cadena cinemática en condición sana y con falla de rodamiento inducida, por lo cual, se concentra en las comparaciones entre las dos condiciones de la cadena cinemática. El análisis y la comparación se concentra en los armónicos de la frecuencia de rodamiento externo calculada utilizando las características geométricas del rodamiento.

En los ensayos en la UVa se indujo una falla mecánica diferente a la utilizada en los ensayos de la UAQ, además de esto, se utilizaron elementos de control electrónico (variadores de frecuencia), con el objetivo de identificar y caracterizar la presencia de estos en las señales de EA cuando se utilizan en un elemento de la

cadena cinemática. Para el análisis de estas señales, se comparan los contornos del espectro de las diferentes configuraciones, con esto se resalta el comportamiento de la señal de EA adquirida del banco de pruebas con y sin elemento de control.

3.7. Parámetros de presencia de falla y perturbaciones

En esta parte de la metodología se establecen parámetros para identificar la presencia de perturbaciones en el banco de pruebas a comparación a cuando trabaja en un estado sano, las perturbaciones se presentan por las fallas mecánicas inducidas y los sistemas de control utilizados en el banco de pruebas. Los parámetros tal como el procesamiento y el análisis dependen del estado del banco de pruebas utilizado para realizar los ensayos, con el objetivo de detectar su presencia en las señales de EA.

Los primeros parámetros utilizados para la identificación y comparación de las señales son armónicos identificados en los espectros de las señales, con estos se pueden observar el aumento de energía en frecuencias de armónicos propios de la falla o del sistema de control. Para realizar la comparación, los armónicos se pasan a una escala logarítmica y para tener una medida de amplitud de decibeles de las frecuencias de interés. Además, se realizan cálculos estadísticos de la señal en dominio del tiempo y en dominio de la frecuencia, con el fin de tener comparaciones cuantitativas de las señales de EA.

Se realiza comparación de los contornos del espectro que da como resultado del procesamiento, con esto se puede visualizar el comportamiento de las frecuencias contenidas en las señales de EA y las principales diferencias en todo el ancho de banda de la señal. Al realizar esta comparación se pueden asociar eventos visualizados en las diferentes configuraciones del banco de pruebas. Con esto se parte a identificar las características de las señales de EA para las configuraciones

del banco de pruebas y tener un indicador de falla o de perturbaciones que afectan al sistema monitoreado.

IV. Experimentación

En esta sección se explican los experimentos que se realizaron con la tarjeta de adquisición de EA siguiendo la metodología propuesta en el capítulo anterior. Los experimentos que se realizaron fueron para comprobar el funcionamiento correcto del sistema y para la adquisición de datos de bancos de pruebas para el análisis de este y caracterización de las señales de EA para las diferentes configuraciones del mismo.

4.1. Verificación de Funcionamiento

El primero ensayo del sistema de adquisición se realiza con señales sintéticas usando un generador de señales, con el cual, se inyectan señales senoidales a diferentes frecuencias para probar el sistema. Esta es importante para verificar el correcto funcionamiento del sistema al adquirir señales y enviarlas a la PC. Se presentan en la figura 4.1 algunos de los datos adquiridos con la tarjeta y visualizados en MATLAB para verificar su funcionamiento.

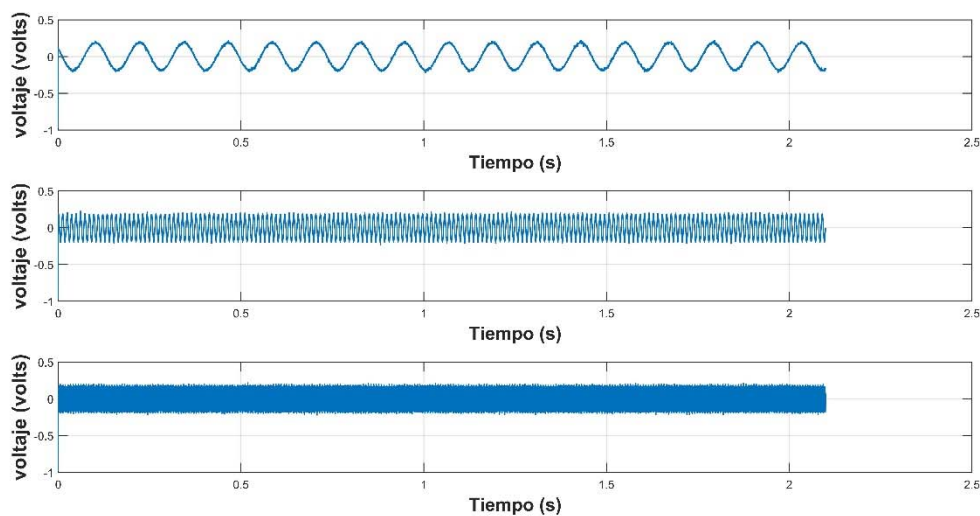


Figura 4.1 Señales sintéticas, diferentes frecuencias

Las pruebas para el sistema de adquisición de datos que se realizaron se pueden dividir en estáticas y dinámicas. Esto se realiza para poder probarlo en diferentes condiciones operativas y además de poder analizar las diferentes señales que se capturan. A continuación, se explican los bancos de pruebas de los diferentes experimentos realizados, además de los detalles y configuraciones utilizadas para cada ensayo.

El sistema de adquisición se configura de la misma forma para todos los ensayos exceptuando por la frecuencia de muestro utilizada, la cual es seleccionada de acuerdo con la aplicación, ya que, de ella depende la relación de tiempo de monitoreo y el número de muestras en ese tiempo de monitoreo.

4.2. Pruebas Estáticas.

En la prueba estática se basa en capturar una emisión acústica producida por el choque de metales, la frecuencia de muestreo se fija en 550 kHz y se adquieren 500 k muestras, lo que da aproximadamente 1 segundo de monitoreo. El choque de los metales emite una onda acústica que se propaga por todo el material, está es una de las mayores ventajas ya que el sensor puede estar retirado del fenómeno y aun así percibirlo, el sensor solo debe estar en contacto con la pieza donde se propaga para poder detectar la señal. En la figura 4.2 se muestra la pieza donde se hicieron las pruebas estáticas y en la figura 4.3 se muestra la señal adquirida; se observa en la figura una señal transitoria producida por el choque de los metales. Este ensayo prueba el funcionamiento de todo el sistema de adquisición de señales de EA; reportando el fenómeno de la prueba estática.

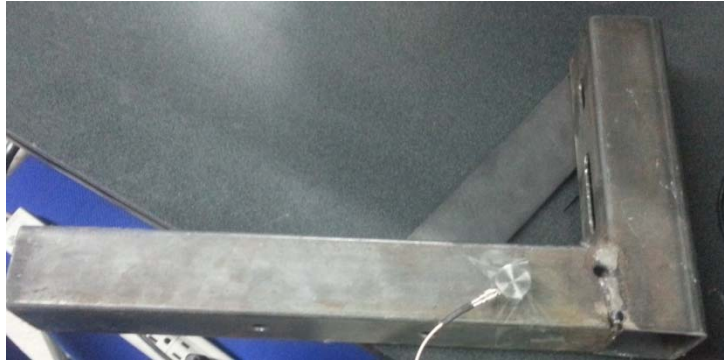


Figura 4.2 Prueba estática.

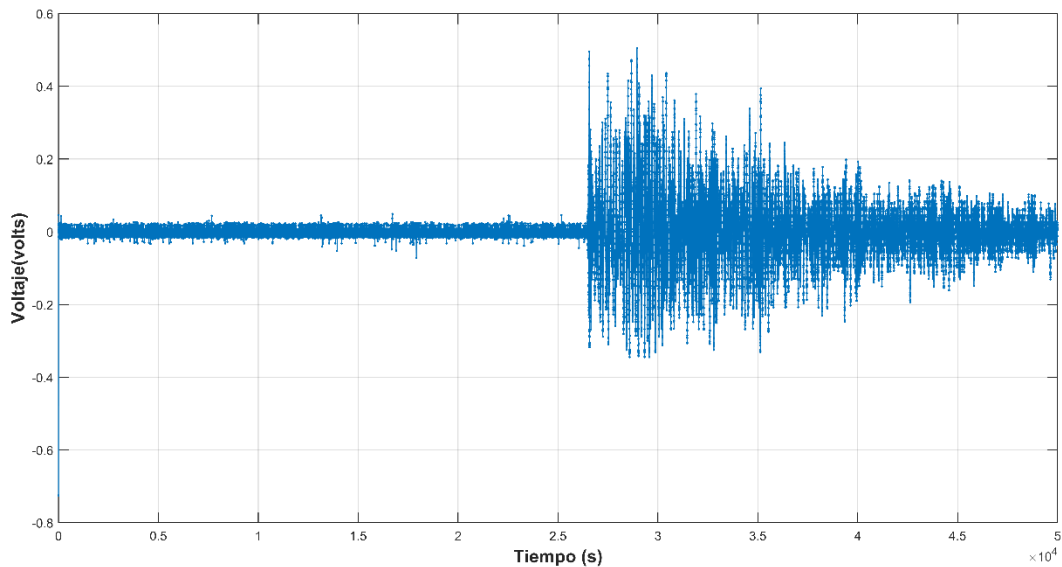


Figura 4.3 Señal de prueba estática

4.3. Pruebas Dinámicas

Las pruebas dinámicas del sistema consisten en monitorear bancos de pruebas durante su funcionamiento, adquiriendo señales de EA de una forma pasiva y sin alterarlo o afectarlo; aprovechando las ventajas de monitoreo de la EA. Como se mencionó anteriormente, se realizan ensayos en dos diferentes bancos de pruebas, con lo cual, las configuraciones del sistema de adquisición, las características de

fallas y modos de operación cambian en cada uno. Las fallas son inducidas en los motores de inducción, siendo estos un elemento principal de las cadenas cinemáticas. A continuación, se describen cada banco de pruebas y los parámetros de los ensayos.

4.3.1 Banco de Pruebas UAQ

El banco de pruebas utilizado para estos ensayos se muestra en la figura 4.4. Éste consiste en una cadena cinemática que esta compuesta por un motor de inducción trifásico (WEG0026ET3ET3E145T-W22), usa como carga mecánica un generador de DC (BALDOR CDP3604) alrededor del 20% de su carga nominal y una caja de engranes con una relación 4:1 (BALDOR GCF4X01AA). El número de datos a adquirir es controlado desde el PC por un programa desarrollado en C++ y el cual comunica con la FPGA.

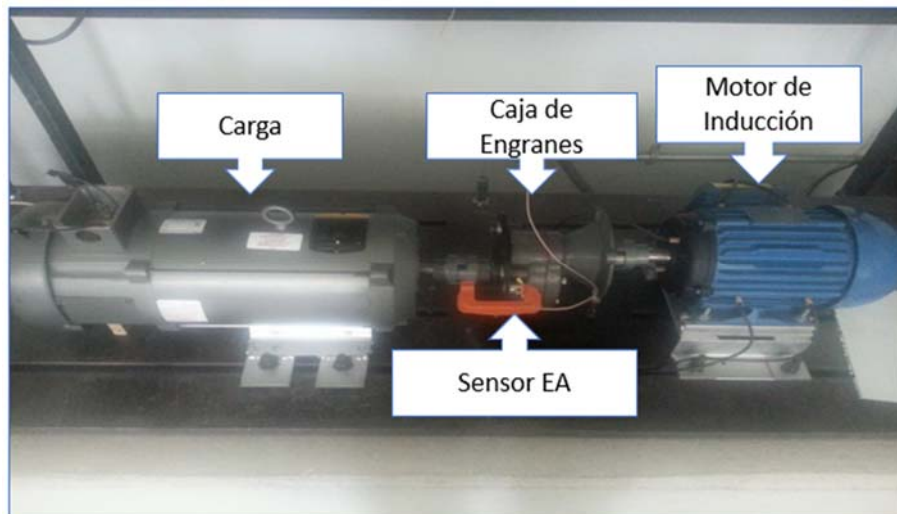


Figura 4.4 Banco de pruebas UAQ

Para realizar los experimentos con rodamiento dañado, se realizó un daño artificial al rodamiento, perforando un agujero de un diámetro de 1.191mm, en la pista exterior del rodamiento, usando una broca de tungsteno. Este fallo ha sido usado y reportado en diferentes estudios de fallas en rodamientos (Saucedo et al,

2016, Frosini et al, 2015), el rodamiento usado es el modelo 6205-2ZNR y se muestra en la figura 4.5. Las características geométricas del rodamiento son las siguientes: contiene 9 balines de 7.9mm de diámetro y el diámetro externo es de 39mm con un ángulo de contacto de 0°.

Para este experimento se realizaron 10 ensayos de cada estado del sistema, estado sano y estado con falla. El motor de inducción es alimentado directo de la línea trifásica de 60 Hz. La frecuencia de muestreo para estos ensayos se fijó en 550kHz y se adquirieron en cada ensayo 500 k muestras. El sensor de emisión acústica es fijado con una prensa en contacto con la cadena cinemática, las señales de EA producidas por el sistema viajan por toda la estructura del banco de pruebas, por lo cual el sensor solo debe estar en contacto con este para poder leer las emisiones acústicas producidas.



Figura 4.5 Rodamiento con perforación

4.3.2 Banco de Pruebas UVa

El banco de pruebas utilizado en la UVa es enfocado solamente a uno de los elementos más importantes de la cadena cinemática, el cual es el motor de inducción; la entrada de energía motora es proporcionada por éste para cumplir la aplicación requerida de la cadena cinemática. Los ensayos se realizaron en tres motores de inducción trabajando al vacío, los cuales se muestran en la tabla 4.1.

| Fabricante | Modelo | Estado |
|-------------------|---------------|--------------------|
| Siemens | 1la7083-4aa11 | Sano |
| Siemens | 1la7083-4aa11 | Falla (Barra rota) |
| AEG | AM 80 NY4 | Sano |

Tabla 4.1 Motores de inducción.

Se consideran 3 motores para estos ensayos; para poder tener comparaciones del funcionamiento con sistemas de control, alimentación en línea, sistema de control con falla y alimentación de línea con falla.

Diferentes variadores de frecuencia son usados como sistemas de control de velocidad en los motores de inducción; se usaron 3 variadores de frecuencia de distintos fabricantes, estableciendo una frecuencia de 50 Hz para los ensayos. Al trabajar con la misma frecuencia y con el mismo banco de pruebas; se podrá realizar comparaciones y resaltar las diferencias de utilizar variadores de diferentes fabricantes, además de observar la influencia que tiene las emisiones acústicas que emite el sistema al utilizarse con elementos de control. En la tabla 4.2 se presenta los variadores utilizados y en la figura 4.6 se muestran estos mismos.

| Fabricante | Modelo | Frecuencia utilizada |
|---------------|-------------------|----------------------|
| ABB | ACS355-03E-15A6-4 | 50 Hz |
| WEG | EUCFW110003T40FAZ | 50 Hz |
| Allen-Bradley | 22B-D6P0N104 | 50 Hz |

Tabla 4.2 Variadores de Frecuencia.



Figura 4.6 Variadores de Frecuencia

El sistema de adquisición se fijó con una frecuencia de muestreo basando en una potencia de 2, siendo esta $2^{19} = 524\ 288$ kHz; se considera de esta manera por consistencia con sistemas digitales binarios basados en potencias de 2, además de elegir esa potencia por la aplicación a monitorear. Se realizaron 5 ensayos de cada estado del banco de pruebas, realizando combinaciones de alimentación de red, variadores y diferentes motores de inducción. Se adquirieron 1.1 M muestras en cada ensayo, con estos parámetros se monitorea aproximadamente dos segundos. En la figura 4.7 se muestra el banco de pruebas.

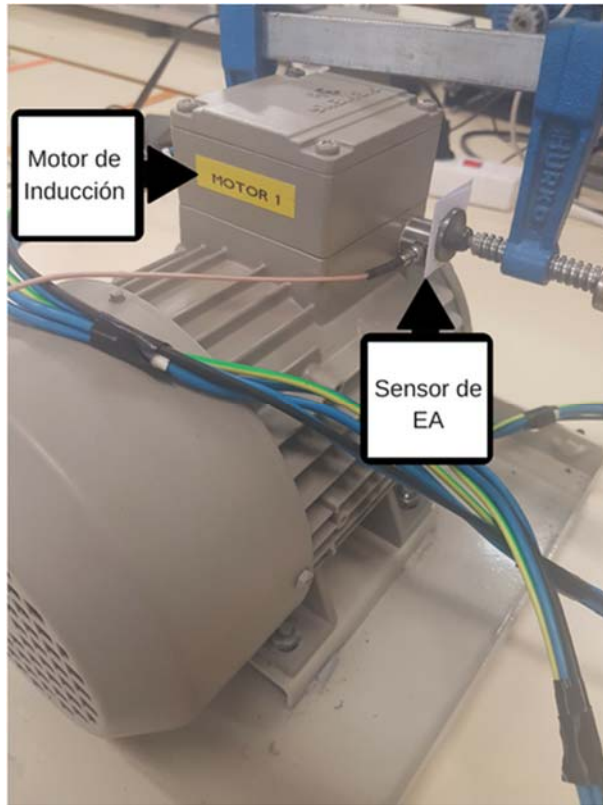


Figura 4.7 Banco de pruebas UVa

La falla inducida en el banco de pruebas es la perforación de una barra del rotor traspasada totalmente. Como se indicó anteriormente, el banco de pruebas forma parte del departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Valladolid, España.

V. Resultados y Discusión.

En este capítulo se mostrarán los resultados obtenidos con los experimentos realizados y explicados en el capítulo anterior. En cada experimento se adquirieron datos en diferentes configuraciones del banco de pruebas para poder compararlos, identificar el comportamiento y las fallas inducidas en el sistema monitorizado.

5.1. Resultados ensayos UAQ

Los ensayos con la realizados en la cadena cinemática descrita en el capítulo anterior, se tiene como objetivo la identificación de falla de rodamiento en el motor de inducción que es uno de los elementos principales de la cadena cinemática. La señal cruda de EA adquirida de este banco de pruebas se muestra en la figura 5.1. Como se puede observar, el procesamiento es necesario para poder obtener información acerca del comportamiento y la falla del sistema.

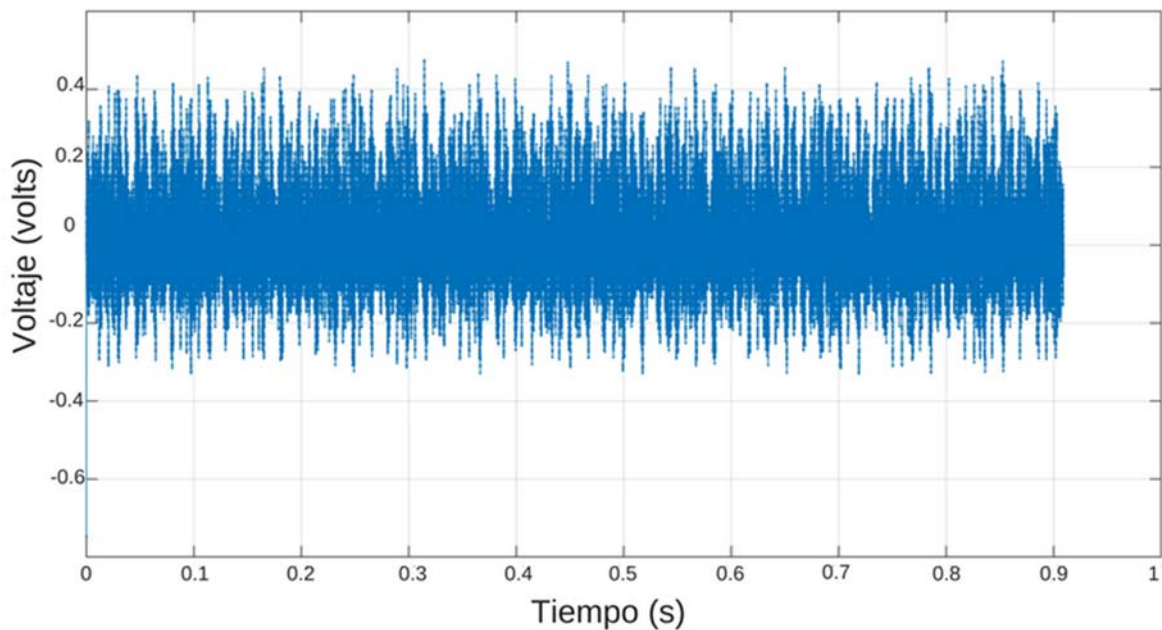


Figura 5.1. Señal Cruda de EA

A esta señal se le aplica el procesamiento 1, diseñado específicamente para encontrar información de los armónicos de la frecuencia del rodamiento. En la figura 5.2 se muestra la señal en dominio de la frecuencia y después de la aplicación del procesamiento 1. Como se observa la señal en la figura 5.2 el análisis no es evidente, por lo que se realizan acercamientos en la banda de interés para identificar los armónicos y poder compararlos de los diferentes ensayos y configuraciones del banco de pruebas. En las figuras 5.3 y 5.4 se muestran comparaciones de acercamientos de armónicos en la señal; como se puede observar, la señal con falla presenta más energía.

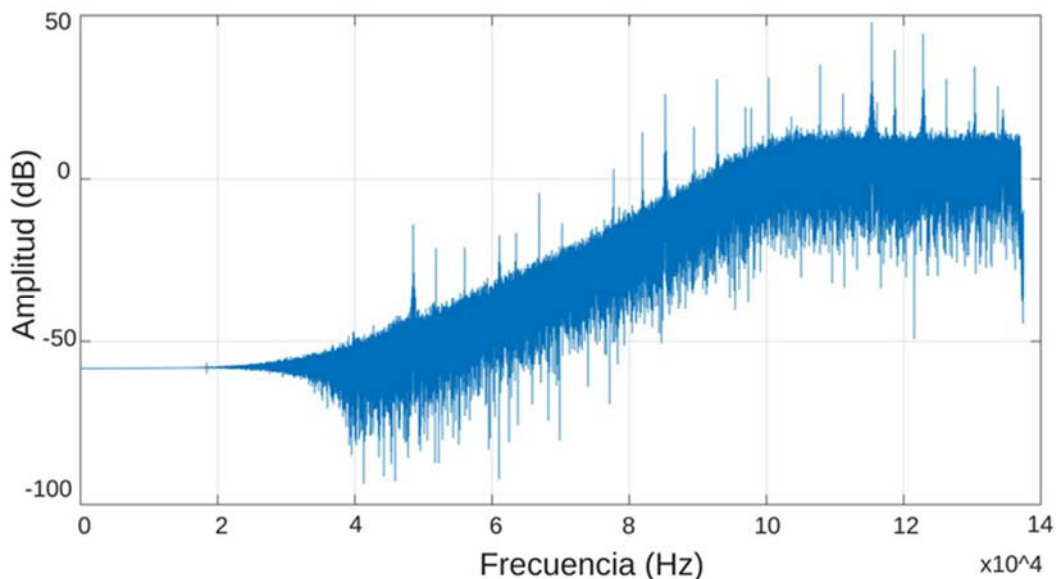


Figura 5.2. Señal aplicando el procesamiento 1

Al realizar un análisis de la señal y comparaciones entre las señales se presentan amplitudes en el espectro de la señal que coinciden entre las dos, aunque el espectro de la señal con falla contiene un nivel más alto de ruido. Además, se compararon promedios y desviación lo cual indica la presencia de más contenido armónico en la señal del sistema con falla; se presentan en la tabla 5.1 los promedios

de estos. Las comparaciones se realizaron entre ensayos y entre promedios de los ensayos de los dos estados del banco de pruebas.

Los indicadores antes mencionados son las principales referencias para realizar la comparación entre las señales de los dos estados del banco de pruebas analizado. Los armónicos calculados con la ecuación 2 son también tomados como referencia para la comparación, tomando armónicos mayores de 100 kHz de la frecuencia de contacto externo del rodamiento.

| Parámetros | Sistema con falla | Sistema Sano |
|--------------------------------|-------------------|--------------|
| Promedio de amplitud de FFT | 9.59411 dB | 7.2671 dB |
| Desviación estándar promedio | 0.0887 volts | 0.0615 volts |
| Amplitud de armónicos promedio | 11.61 dB | 9.559 dB |

Tabla 5.1 Parámetros comparados.

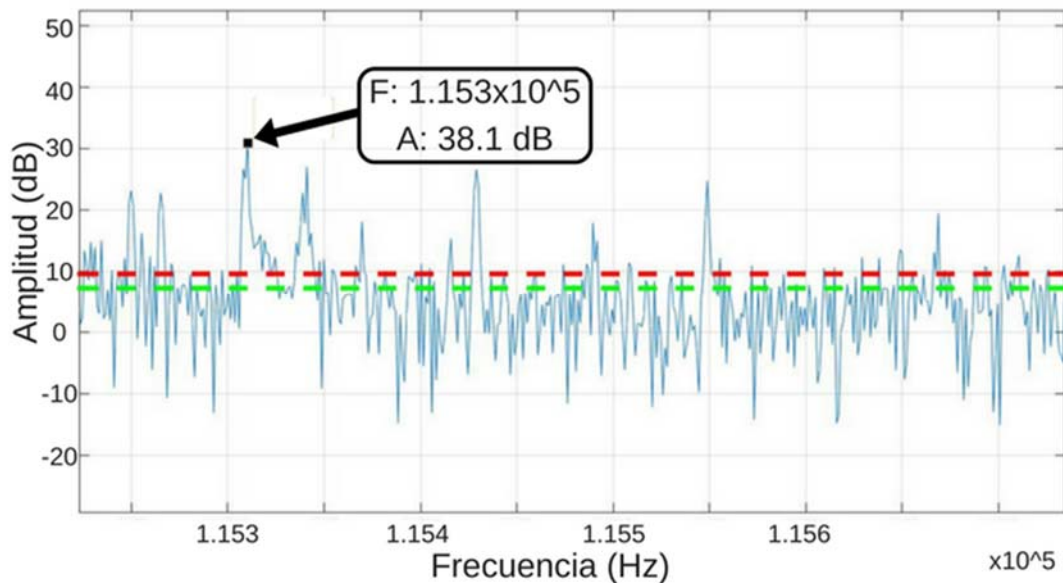


Figura 5.3. Señal sin falla de rodamiento, armónicos de interés.

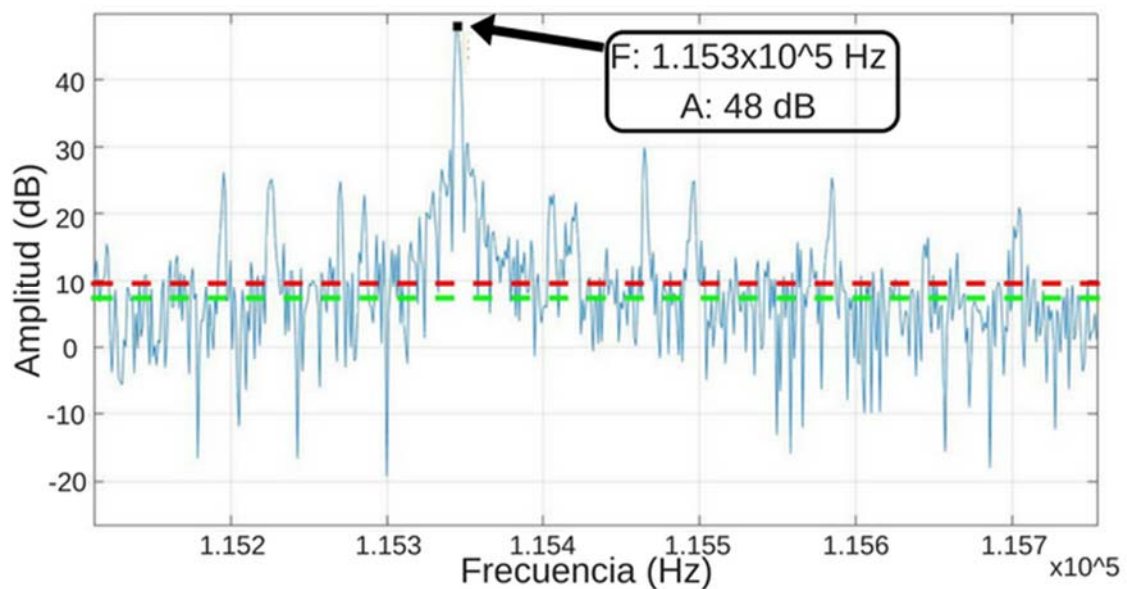


Figura 5.4. Señal con falla en rodamiento, armónicos de interés.

Se realizó la comparación de los armónicos en el ancho de banda de trabajo del sensor, en la tabla 5.1 se muestra un promedio de las diferencias de la comparación de los armónicos. Así teniendo como parámetro de falla sobrepasar de 2 a 3 dB la amplitud promedio del sistema sin falla.

5.2. Resultados ensayos UVa

Los ensayos realizados en la Universidad de Valladolid se concentran en el análisis de un elemento principal de la cadena cinemática, el cual es el motor de inducción. Los resultados se dividen en dos partes, primeramente, se analizan las señales para la detectar los efectos de los variadores de frecuencias, esto se realiza con el procesamiento 2 antes del filtro mediana y promedio. Los resultados que se analizan son los promedios de los ensayos en cada configuración. La señal cruda de estos ensayos se muestra en la figura 5.5.

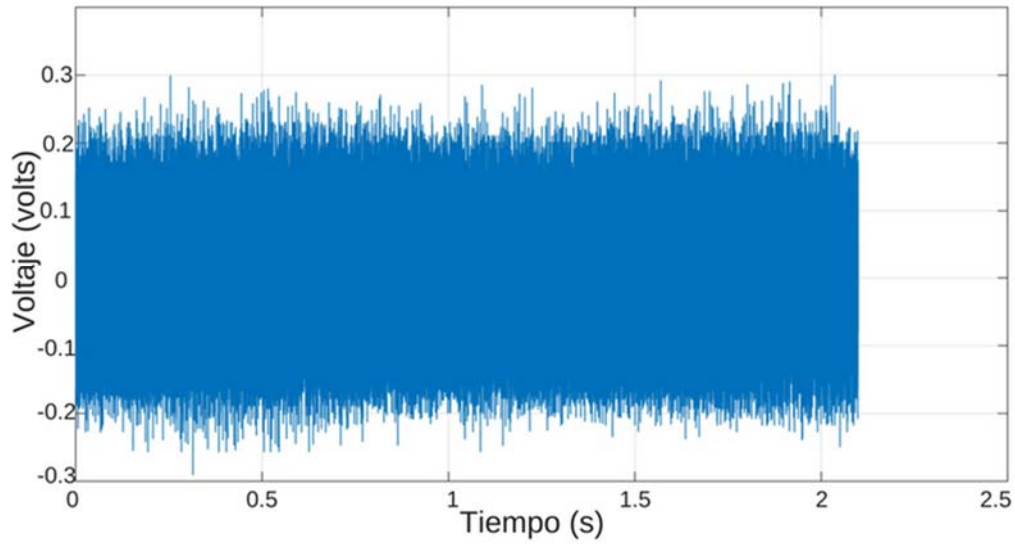


Figura 5.5. Señal cruda UVa

La primera parte del procesamiento tiene como objetivo el detectar la frecuencia de conmutación de los variadores de frecuencia, por lo cual se analizan las señales como se muestran en las figuras 5.6, 5.7 y 5.8; en cada una de las gráficas se muestra los promedios de los ensayos aplicando el procesamiento antes de los filtros mediana y promedio. Se muestran en la misma los ensayos con los tres diferentes variadores y con los ensayos alimentados con la línea.

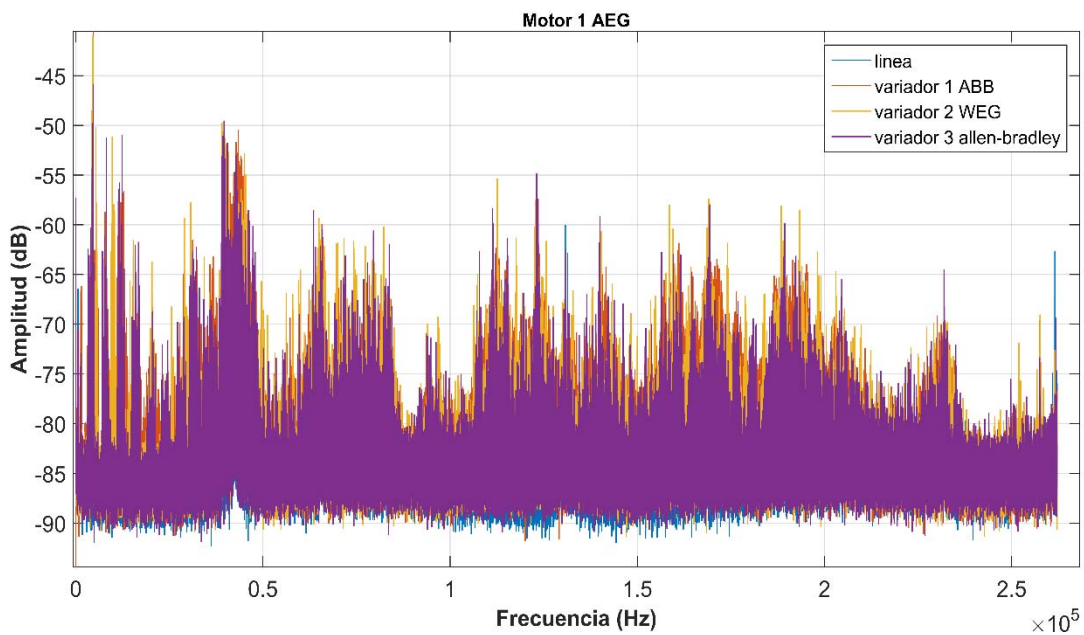


Figura 5.6. Motor 1 AEG espectro sin filtro mediana

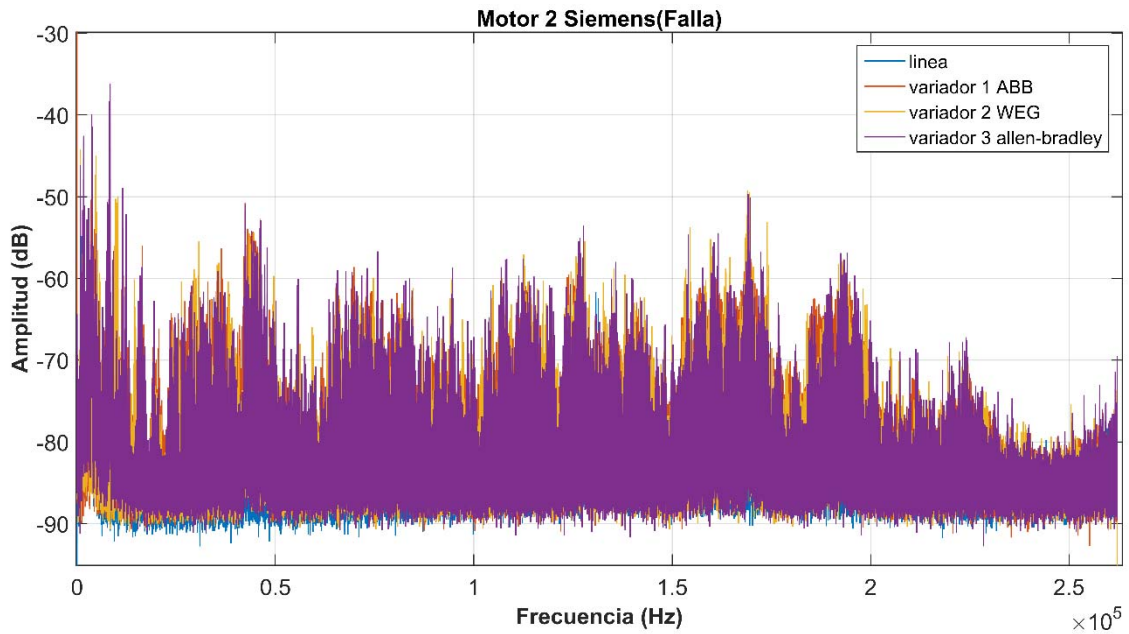


Figura 5.7. Motor 2 Siemens (con fallo) espectro sin filtro mediana

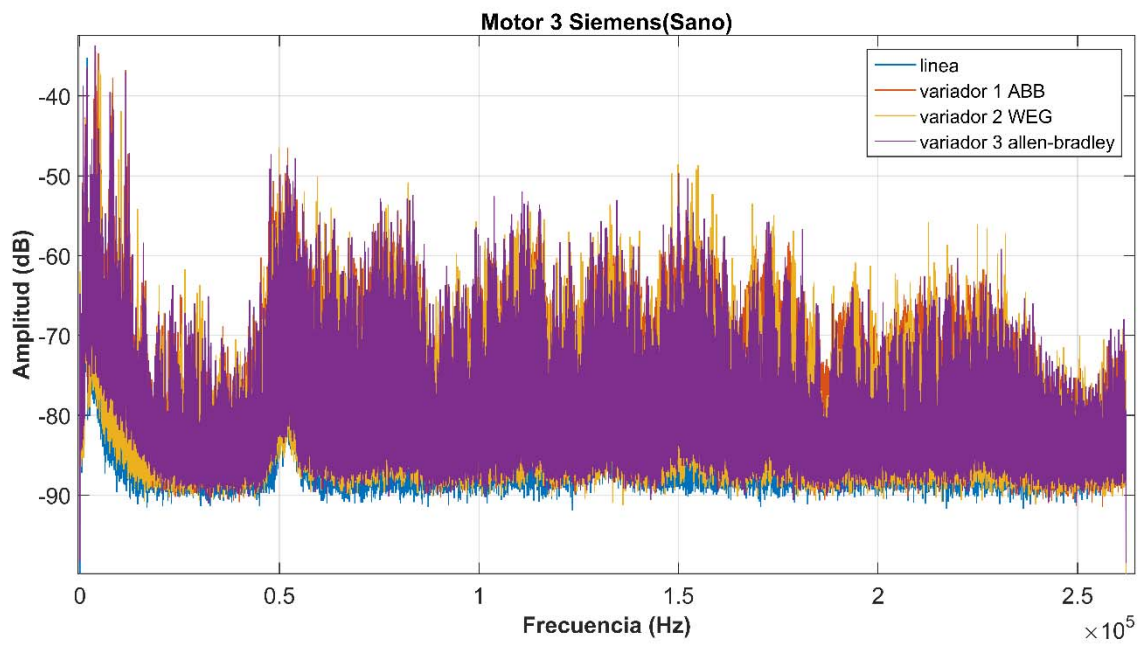


Figura 5.8. Motor 3 Siemens (sano) sin filtro mediana

En las figuras anteriores se aprecian el comportamiento de cada estado del banco de pruebas, para hacer un análisis aún mejor se realiza acercamientos a las señales, posteriormente se completa el procesamiento al aplicar el último filtro usado en el procesamiento 2. En las figuras 5.9, 5.10 y 5.11 se marcan los armónicos de cada variador utilizado en las pruebas; la separación entre cada armónico es de 50 Hz. Esto comprueba la influencia del variador de frecuencia en las señales de EA.

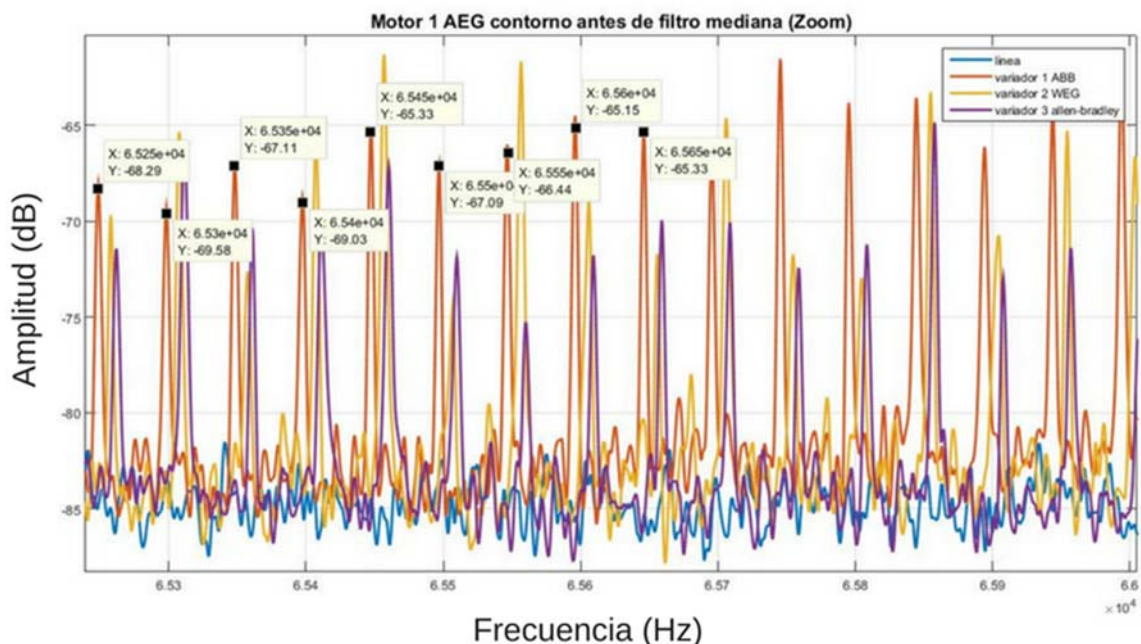


Figura 5.9. Motor 1 AEG armónicos de variador de frecuencia ABB.

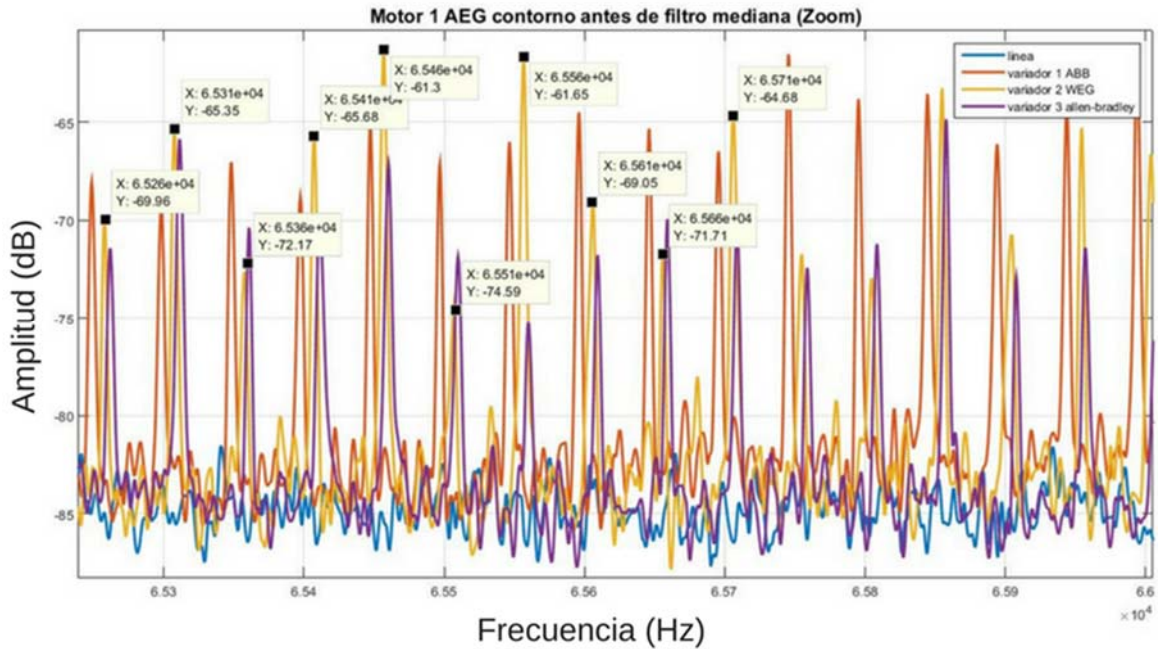


Figura 5.10. Motor 1 AEG, armónicos de variador de frecuencia WEG

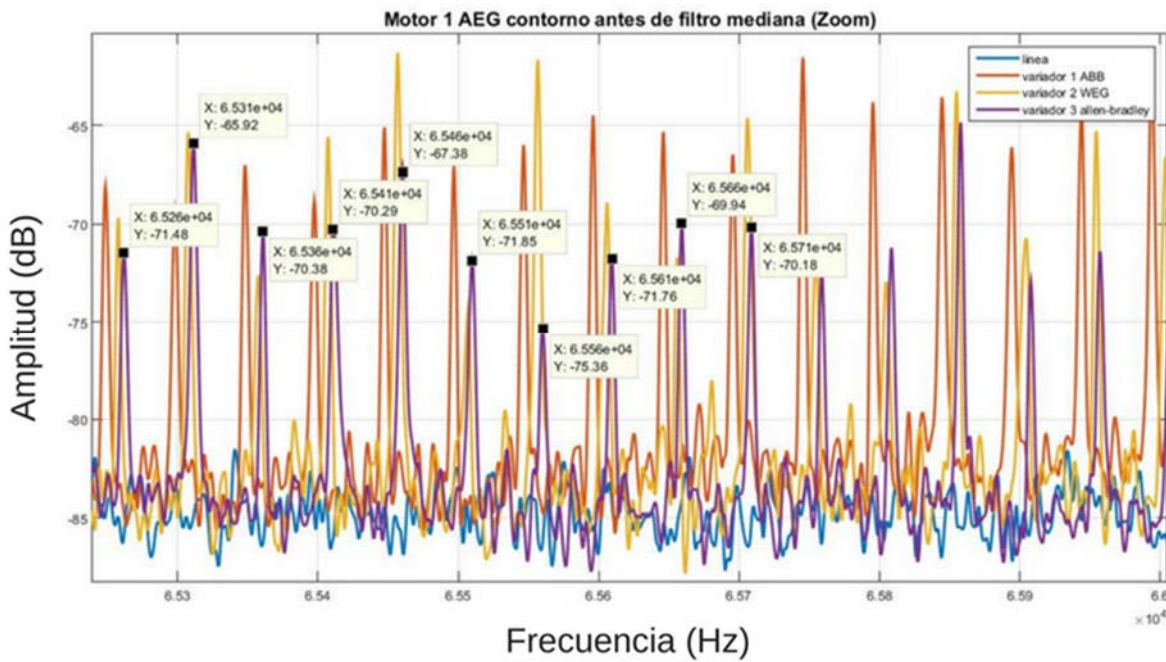


Figura 5.11. Motor 1 AEG, armónicos de variador de frecuencia Allen-Bradley

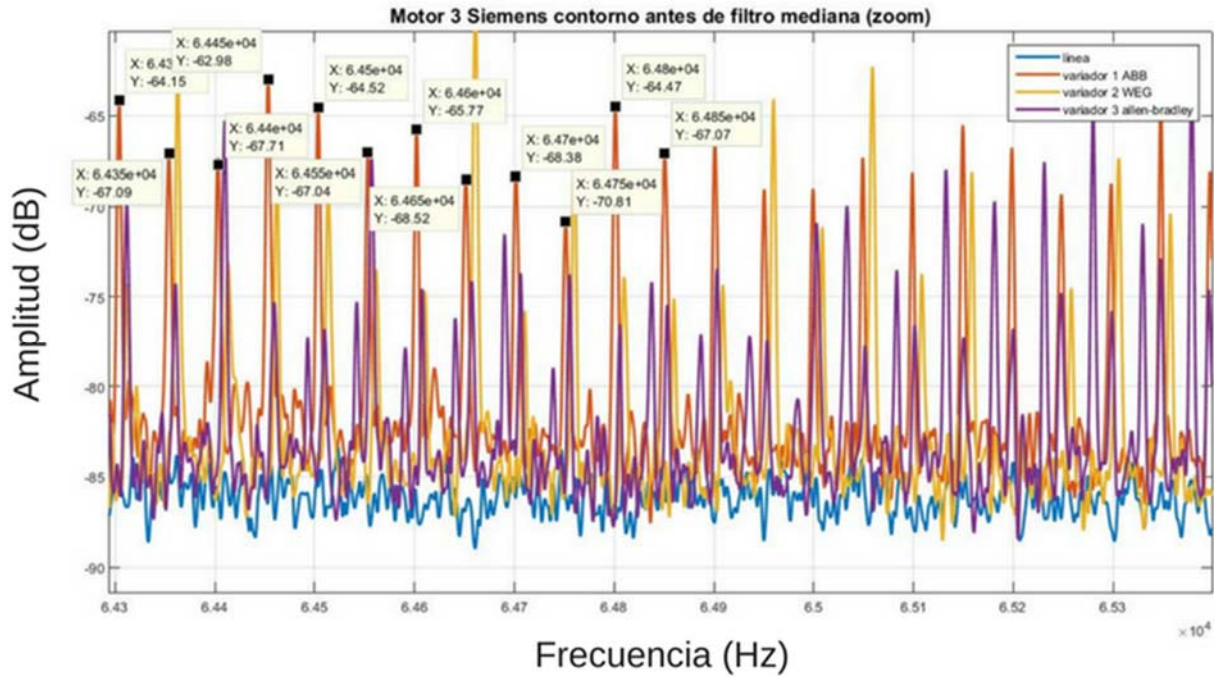


Figura 5.12. Motor 3 Siemens, armónicos de variador de frecuencia ABB

Los armónicos presentados son resultados importantes para el análisis, ya que se comprueba una influencia directa en las señales de EA, aunque sea un evento de la alimentación del banco de pruebas y no un fenómeno mecánico; aunque para realizar un análisis del comportamiento del espectro de la señal los armónicos evitan que se pueda visualizar y comparar entre las diferentes configuraciones. Por lo cual, se aplican los filtros mediana y promedio, con esto se eliminan los armónicos inducidos por la conmutación realizada por los variadores de frecuencia. Aplicando el filtro da como resultado los contornos más definidos de comportamiento del espectro de las diferentes configuraciones del banco de pruebas. En las figuras 5.13, 5.14 y 5.15 se muestran las señales aplicando por completo el procesamiento 2.

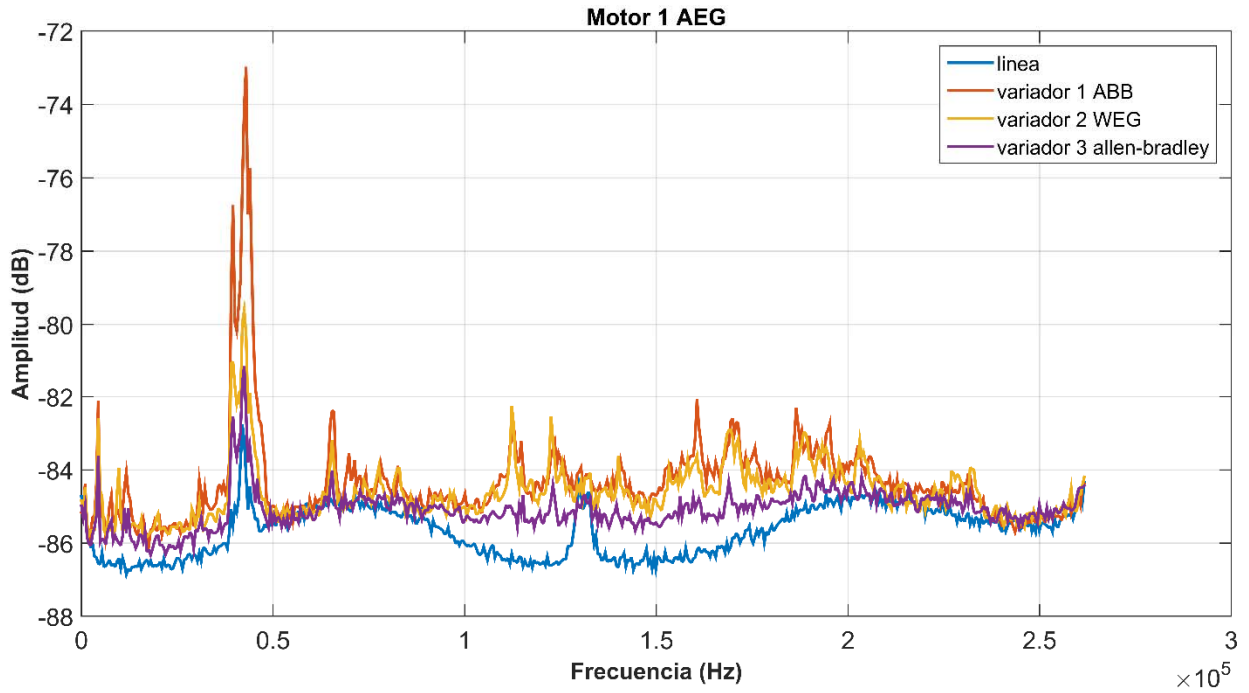


Figura 5.13. Contorno Motor 1 AEG en las diferentes configuraciones.

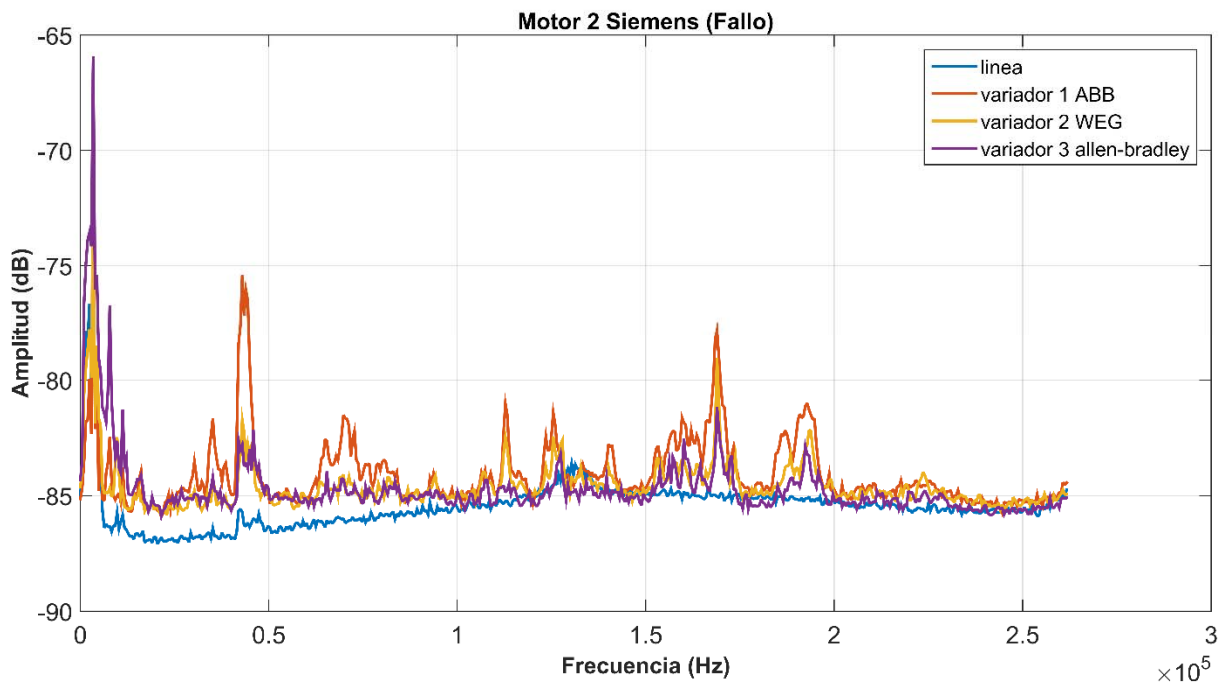


Figura 5.14. Contorno Motor 2 Siemens en las diferentes configuraciones.

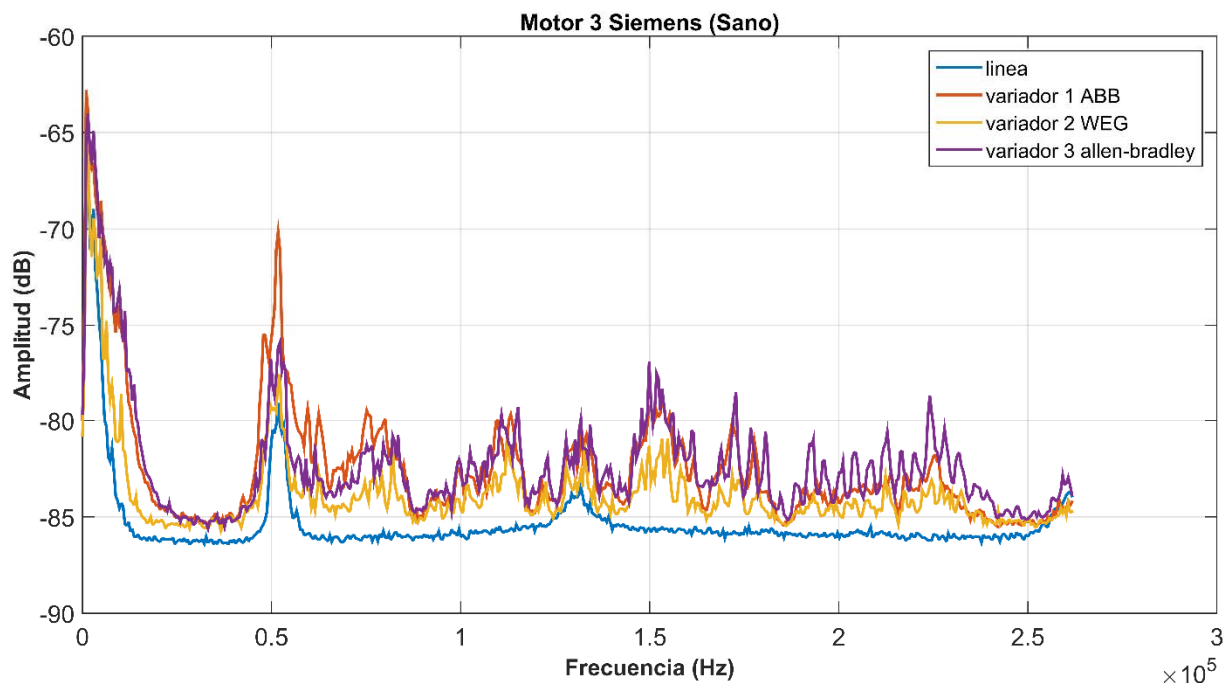


Figura 5.15. Contorno Motor 3 Siemens en las diferentes configuraciones.

Para las comparaciones se referencia a la señal de EA adquirida con el banco de pruebas alimentado con la línea, con esto se visualiza el comportamiento del banco de pruebas en un funcionamiento en condiciones normales, con lo cual se puede clasificar como la señal de EA que tiene un comportamiento propio del motor de inducción. Con esto, la comparación de las señales con falla mecánica inducida y la influencia del sistema de control con las señales en condiciones normales es más evidente las diferencias y las influencias de los elementos a analizar. En estas señales se concentra primeramente en el comportamiento de armónicos similares, pero con más energía en las señales con variadores, esto explica el uso del mismo banco de pruebas para todos los ensayos, aunque con incremento en la amplitud. Posteriormente se analiza la diferencia de los contornos del espectro con falla mecánica, en donde se visualiza en la variación de las amplitudes de todo el espectro. Esta diferencia se nota más al analizar el sistema sin variador de frecuencia; en donde la señal sin falla presenta un comportamiento sin variaciones y visualizando solo los armónicos propios del banco de pruebas. Estos armónicos son

presentes también cerca de 50 kHz donde se presentan en todos los ensayos siendo estos un armónico que identifica al banco de pruebas.

Las similitudes y diferencias entre los contornos demuestran el reflejo de los elementos utilizados para estos ensayos en las señales de EA adquiridas. La caracterización de señales de EA para un elemento de la cadena cinemática da como resultado conocer el comportamiento aislado de todo el sistema y de esta manera identificar con más facilidad la señal analizada en un banco de pruebas compuesto con más elementos que introduzcan ruido u otras frecuencias en las señales de EA.

VI. Conclusiones.

Se diseñó y manufacturó una tarjeta para el sistema de adquisición de señales de EA, el diseño se enfocó en un sistema de alta velocidad el cual adquiere y envía los datos por medio de una interfaz USB a la PC. Se utilizó una tarjeta propietaria de la UAQ para el control e interfaz de comunicación del sistema de adquisición utilizando la tecnología FPGA. Se uso un programa en C++ para comunicar el sistema con la PC y enviar los datos adquiridos para su análisis.

Se desarrolló una metodología para el análisis de dos diferentes bancos de pruebas en donde se probó y se adquirieron señales de EA para su análisis. En esta metodología se aplicaron dos procesamientos diferentes y diseñados para el análisis de cada banco de pruebas. Los procesamientos son basados en la aplicación de FFT en las señales y el análisis aplicado en el dominio de la frecuencia.

Se analizaron las diferentes condiciones del banco de pruebas reflejadas en las señales de EA. Los bancos de pruebas se referenciaron en la universidad donde se realizaron; ensayos UAQ y UVa. En cada banco de pruebas se indujeron fallas mecánicas, uno de falla en rodamiento y otro de falla de flecha rota en un elemento principal de la cadena cinemática (motor de inducción) para detectarlas mediante EA, además de utilizar un sistema de control eléctrico-electrónico para el control de velocidad del banco de pruebas para detectar la influencia de este en las señales de EA.

Se realizó el análisis de las diferentes señales de EA adquiridas, aplicando la metodología propuesta y analizando los anchos de banda de interés. Se identificaron y compararon armónicos de interés, detectando la influencia de la falla mecánica en los espectros de la señal de EA. Con lo cual, se identifican parámetros y armónicos para la detección de falla con señales de EA. Se identifica la influencia de los

variadores de frecuencia en el banco de prueba y como se ve reflejado en las señales de EA.

VII. Prospectivas

El sistema desarrollado en este trabajo de tesis fue probado en algunas configuraciones particulares de una cadena cinemática, aunque una prospectiva interesante para el desarrollo de las señales de EA como sistema de monitorización sería la caracterización de señales de EA para cada elemento de una cadena cinemática, con lo cual se tendría un conocimiento del comportamiento de cada elemento y como se refleja en la emisión acústica. Con esto se tendría una base de datos del comportamiento de cada elemento y se tendría una forma más directa de detectar fallas o comportamiento anormales en el sistema que se monitorice.

Se desarrolló un análisis fuera de línea para indicar la presencia de fallas, aunque un sistema que trabaje en línea con el sistema que este monitoreando para detectar fallas en tiempo real sería un sistema deseado para aplicaciones en las industrias. La metodología es posible aplicarla en línea ya que al utilizar tecnología como FPGA y el desarrollo de un procesamiento basado en FFT son aplicaciones sencillas de integrar en esta tecnología de bajo costo y alto rendimiento.

Referencias

- Al-Ghamd, A. M., & Mba, D. (2006). A comparative experimental study on the use of acoustic emission and vibration analysis for bearing defect identification and estimation of defect size. *Mechanical systems and signal processing*, 20(7), 1537-1571.
- Analog Devices, Inc. (1995-2017), “, Datasheet AD7352.” Web: www.analog.com.
- Bakkali, S. (2007). Using Savitzky-Golay filtering method to optimize surface phosphate deposit “disturbances”. *Ingenierías*, 10(35), 63.
- Boldea, I. (2009). *The induction machines design handbook*. CRC press.
- Burman, M., (1999), “Fatigue Crack Initiation and Propagation in Sandwich Structures”, Doctoral Thesis.
- Candès, E. J., & Wakin, M. B. (2008). An introduction to compressive sampling. *IEEE signal processing magazine*, 25(2), 21-30.
- Closa González, P. (2014). *Las emisiones acústicas y su aplicación al mantenimiento predictivo*.
- Chapman, S. J. (2012). *Máquinas eléctricas (5a. McGraw Hill México)*.
- Chen, W. Y., Xu, J. X., & Panda, S. K. (2011, June). A study on automatic machine condition monitoring and fault diagnosis for bearing and unbalanced rotor faults. In *2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics* (pp. 2105-2110). IEEE.
- Cockerill, A., Clarke, A., Pullin, R., Bradshaw, T., Cole, P., & Holford, K. M. (2016). Determination of rolling element bearing condition via acoustic emission. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 230(11), 1377-1388.
- Cusidó, J., Romeral, L., Ortega, J. A., Rosero, J. A., & Espinosa, A. G. (2008). Fault detection in induction machines using power spectral density in wavelet decomposition. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(2), 633-643.
- Djeddi, M., Granjon, P., & Leprettre, B. (2007, September). Bearing fault diagnosis in induction machine based on current analysis using high-resolution technique. In *Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, 2007. SDEMPED 2007. IEEE International Symposium on* (pp. 23-28). IEEE.
- Elfurjani, S., Bayesteh, A., Park, S. S., & Jun, M. B. G. (2015). Dimensional measurement based on rotating wire probe and acoustic emission. *Measurement*, 59, 329-336.
- Elmaleeh, M. A., Saad, N., & Awan, M. (2012, April). Incipient fault detection of industrial pilot plant machinery via acoustic emission. In *Mechatronics and its Applications (ISMA), 2012 8th International Symposium on* (pp. 1-6). IEEE.
- Frosini, L., Harlişca, C., & Szabó, L. (2015). Induction machine bearing fault detection by means of statistical processing of the stray flux measurement. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(3), 1846-1854.
- G. Niu, B.-S. Yang, and M. Pecht, “Development of an optimized condition-based maintenance system by data fusion and reliability-centered maintenance,” *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 95, no. 7, pp. 786–796, 2010.

- Gaylard, A., Meyer, A., Landy, C., A. "Acoustic evaluation of faults in electrical machines ", Seventh International Conference on (Conf. Publ. No. 412), Durham, p. 147 -150, 2005
- Gohar, R., & Akturk, N. (1998). Vibrations associated with ball bearings. In Conference on Multi body Dynamics, Proc. I. Mech. Engrs (pp. 43-63).
- Gowid, S., Dixon, R., & Ghani, S. (2015). A novel robust automated FFT-based segmentation and features selection algorithm for acoustic emission condition based monitoring systems. *Applied Acoustics*, 88, 66-74.
- Grandt Jr, A. F. (2003). *Fundamentals of structural integrity: damage tolerant design and nondestructive evaluation*. John Wiley & Sons.
- i Foix, S. C., & Costa, D. C. (2001). *Teoría de máquinas (Vol. 95)*. Univ. Politèc. de Catalunya.
- Kang, M., Kim, J., & Kim, J. M. (2015). An FPGA-based multicore system for real-time bearing fault diagnosis using ultrasampling rate AE signals. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(4), 2319-2329.
- Kaphle, M. R. (2012). *Analysis of acoustic emission data for accurate damage assessment for structural health monitoring applications (Doctoral dissertation, Queensland University of Technology)*.
- Korkua, S., Jain, H., Lee, W. J., & Kwan, C. (2010, May). Wireless health monitoring system for vibration detection of induction motors. In *2010 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference-Conference Record* (pp. 1-6). IEEE.
- Lee, D. E., Hwang, I., Valente, C. M., Oliveira, J. F. G., & Dornfeld, D. A. (2006). Precision manufacturing process monitoring with acoustic emission. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(2), 176-188.
- Min, S., Lidde, J., Raue, N., & Dornfeld, D. (2011). Acoustic emission based tool contact detection for ultra-precision machining. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 60(1), 141-144.
- Morales-Velazquez, L., de Jesus Romero-Troncoso, R., Osornio-Rios, R. A., Herrera-Ruiz, G., & Cabal-Yeppez, E. (2010). Open-architecture system based on a reconfigurable hardware–software multi-agent platform for CNC machines. *Journal of Systems Architecture*, 56(9), 407-418.
- Ohtsu, M. (1996). The history and development of acoustic emission in concrete engineering. *Magazine of concrete research*, 48(177), 321-330.
- Orman, M., & Pinto, C. T. (2013, October). Usage of acoustic camera for condition monitoring of electric motors. In *TENCON 2013-2013 IEEE Region 10 Conference (31194)* (pp. 1-4). IEEE.
- Pollock, A. A. (1973). Acoustic emission-2: acoustic emission amplitudes. *Non-destructive testing*, 6(5), 264-269.
- Pulido, M. Á. (2000). *Convertidores de frecuencia, controladores de motores y SSR*. Marcombo.
- Roberts, T. M., & Talebzadeh, M. (2003). Acoustic emission monitoring of fatigue crack propagation. *Journal of Constructional Steel Research*, 59(6), 695-712.
- Romero Troncoso René de Jesús, *Tecnología FPGA para el monitoreo y diagnóstico de fallas en maquinaria industrial*, ai México 26 de marzo 2015.

- Romero-Troncoso, R. J., Saucedo-Gallaga, R., Cabal-Yepez, E., Garcia-Perez, A., Osornio-Rios, R. A., Alvarez-Salas, R., ... & Huber, N. (2011). FPGA-based online detection of multiple combined faults in induction motors through information entropy and fuzzy inference. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(11), 5263-5270.
- Saucedo-Dorantes, J. J., Delgado-Prieto, M., Ortega-Redondo, J. A., Osornio-Rios, R. A., & Romero-Troncoso, R. D. J. (2016). Multiple-fault detection methodology based on vibration and current analysis applied to bearings in induction motors and gearboxes on the kinematic chain. *Shock and Vibration*, 2016.
- Scruby, C. B. (1987). An introduction to acoustic emission. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 20(8), 946.
- Suwatthikul, J., & Sornmuang, S. (2011, September). Fault detection and diagnosis of a motor bearing shield. In *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS), 2011 IEEE 6th International Conference on* (Vol. 1, pp. 332-335). IEEE.
- Tavner, P. (2008). *Condition monitoring of rotating electrical machines* (Vol. 56). IET.
- Tandon, N., & Nakra, B. C. (1992). Vibration and acoustic monitoring techniques for the detection of defects in rolling element bearings—a review. *The shock and vibration digest*, 24(3), 3-11.
- Tandon, N., & Choudhury, A. (1999). A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings. *Tribology international*, 32(8), 469-480.
- Vallen, D.I.H., (2002), "AE Testing Fundamentals, Equipment, Applications", NDT.net - September 2002, Vol. 7 No.09.
- Verma S. P., W. Li: "Measurement of vibrations and radiated acoustic noise of electrical machines ", Sixth International Conference on Electrical Machines and Systems ICEMS, Vol. 2, pp. 861, 2003
- Werninck, E. H. (1978). *Electric motor handbook*. McGraw-Hill.
- Zhang, J., Wang, Y., Cheng, B., & Wang, S. (2015). Design of Acoustic Emission Data Acquisition System of Wood Damage. *International Journal of Control and Automation*, 8(9), 291-302.

Apéndice



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
METROPOLITANA
Unidad Azcapotzalco



La Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco a través de la
División de Ciencias Básicas e Ingeniería y la Universidad De La Salle Bajío

Otorgan la presente

CONSTANCIA A:

Luis Alejandro Romero Ramírez

Por haber participado como expositor del artículo titulado:

Detección de falla de rodamiento en una cadena cinemática vía emisión acústica

Presentado en la XIII Semana Nacional de Ingeniería Electrónica

León, Guanajuato a 4 de Octubre 2017

Dra. María de Lourdes Delgado Núñez

Directora de la División de CBI

Universidad Autónoma Metropolitana-Unidad Azcapotzalco

Dr. Miguel Magos Rivera

Presidente del Comité Organizador

Senie 2017

Mtro. Enrique Aguilar Vargas

Director de la Facultad de Tecnologías de Información

Universidad De La Salle Bajío

Detección de Falla de Rodamiento en una Cadena Cinemática vía Emisión Acústica.

Luis Alejandro Romero Ramírez

Facultad de Ingeniería, Campus San Juan del Río, Universidad Autónoma de Querétaro.

lromero@hspdigital.org

Luis Morales Velázquez

Facultad de Ingeniería, Campus San Juan del Río, Universidad Autónoma de Querétaro.

lmorales@hspdigital.org

Roque A. Osornio Ríos

Facultad de Ingeniería, Campus San Juan del Río, Universidad Autónoma de Querétaro.

raosornio@hspdigital.org

René de Jesús Romero-Troncoso

División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato, GTO, México.

troncoso@hspdigital.org

Daniel Morínigo Sotelo

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Valladolid, Valladolid, España.

dmorinigo@hspdigital.org

Resumen

Las cadenas cinemáticas son componentes esenciales en la mayoría industrias, compuestas principalmente por motores de inducción, cajas de engranes, etc., las fallas de éstas provocan grandes pérdidas monetarias. Para evitarlos se utilizan sistemas automatizados de monitorización. Existen diferentes técnicas de monitoreo con diferentes metodologías, la emisión acústica (EA) es uno de los

métodos de monitoreo no invasivo para la detección de fallas en estos sistemas. En este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema de adquisición de señales de EA y una metodología basada en el análisis de estas señales para la detección de falla de rodamiento en un banco de pruebas de una cadena cinemática, la identificación de los componentes relacionados con la falla para el análisis es respaldado por su modelo teórico. Los resultados obtenidos muestran la detección de falla en rodamiento en altas frecuencias y la metodología para el análisis de la EA.

Palabra(s) Clave(s): Detección de Fallas, Emisión Acústica, FFT, Rodamientos.

Abstract

Kinematics Chains are essential components in most industries, composed mainly of induction motors, gearboxes, etc., failures within them cause great monetary losses. To avoid this, automated monitoring systems are used. There are different monitoring techniques with different methodologies, the acoustic emission (AE) is one of the methods of noninvasive monitoring for the detection of failures in these systems. This work presents the development of an AE signal acquisition system and a methodology based on the analysis of these signals for the detection of bearing failure in a test bench of a kinematic chain. The identification of the components related to the fault for the analysis is supported by its theoretical model. The obtained results show the detection of failure in rolling in high frequencies and the methodology for the analysis of the AE.

Keywords: *Acoustic emission, Bearings, Faults detection, FFT.*

1. Introducción

En la industria existen muchos procesos y sistemas constituidos por cadenas cinemáticas. Una cadena cinemática es la interconexión de varios eslabones, tales que permiten un movimiento en combinación entre los eslabones que lo componen.

Por lo tanto, se puede inferir que todas las máquinas usadas en la industria son compuestas por cadenas cinemáticas, las cuales son vitales en las industrias. Un fallo inesperado puede resultar en un devastador accidente y pérdidas financieras para las industrias. La mayoría de los sistemas de monitoreo en la industria suelen ser invasivos, lo que indica una interacción directa con el sistema; los sistemas de monitoreo no invasivo tienen un gran auge con diferentes métodos como lo son la termografía, la acústica, la emisión acústica, que son usados para detectar los primeros signos de falla en una cadena cinemática conectada a alguna máquina rotativa como lo son los motores de inducción.

Estudios muestran que cerca del 41% de fallas de motores de inducción son causados por defectos de rodamientos [Henriquez et al, 2014]. Por lo cual, los rodamientos en los motores de inducción son elementos importantes en las cadenas cinemáticas, una falla en estos elementos puede causar interrupciones en procesos y operaciones en la industria [Vilela et al, 2004]. Diferentes métodos son usados para la detección y diagnósticos de defectos de rodamientos; estos pueden clasificar de una manera general como análisis de vibraciones, acústica, termografía, temperatura y corriente [Kral & Habetler, 2010]. Entre los mencionados, el análisis de vibraciones es el más usado. Se han aplicado varias técnicas para la medición de vibraciones y respuestas acústicas para detección de fallas en rodamientos, tales como medición de vibración en dominio de tiempo y frecuencia, técnicas de presión de sonido, intensidad de sonido y método de emisión acústica [Henriquez et al, 2014]. Las últimas dos décadas han tenido un gran interés en la detección de fallos en rodamientos y diagnóstico usando diferentes métodos [Hao et al, 2008; Caesarendra et al, 2016]. Algunos de estas investigaciones han sido recompiladas por los investigadores Tandon y Choudhury [Tandon & Choudhury, 1999], quienes presentan a detalle diferentes trabajos de vibración y acústica para la detección de fallas en rodamientos. Algunos investigadores como Saucedo et al [Saucedo et al, 2016] han desarrollado, además de un análisis de vibraciones la utilización de la corriente para la detección de falla en rodamiento aplicado a un motor de inducción. En el mismo trabajo se realiza la detección de fallas en caja de engranes en una cadena cinemática.

La emisión acústica (EA) es ampliamente reconocida por ser un método no invasivo para el monitoreo de cadenas cinemáticas [Niknam et al, 2013]. Conforme a investigaciones [Yoshioka & Fujiwara, 1982; James Li & Li, 1995; Mba, 2003], el monitoreo con EA tiene ciertas ventajas por sobre el monitoreo de vibraciones, ya que el primero puede detectar de fallas superficiales, mientras que el último puede, en el mejor de los casos, detectar un fallo cuando emerge sobre la superficie del elemento de la cadena cinemática. La Transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform, FFT*) es la técnica más usada para el análisis de las señales en el dominio de la frecuencia. La FFT proporciona información útil de los componentes rotativos, que tienen componentes en frecuencia bien definidos [Saxena et al, 2006], la FFT es la herramienta principal utilizada en el presente trabajo para la identificación de armónicos en el ancho de banda de interés para la detección de la falla.

Los sistemas de monitoreo utilizados son limitados por la frecuencia de trabajo de los sensores, por lo cual estos sistemas fallan al detectar armónicos que se encuentren fuera su ancho de banda.

Los rodamientos son una fuente de ruido y vibración debido a la variación de compliancia la cual es el cambio de volumen en la estructura producido por el cambio de presión a través de la estructura o la presencia de un defecto [Tandon & Nakra, 1992]. Los defectos en rodamientos pueden ser clasificados como distribuidos o locales. Los defectos distribuidos como una superficie rugosa, ondulaciones y la variación de la fuerza de contacto entre los elementos de rodamiento pueden aumentar la amplitud de la vibración y las señales de EA [Vahaviolos & S.J., 1999]. Un error de manufactura, una instalación inapropiada o desgaste causa estos defectos. Un elemento rotativo con carga genera vibraciones, aunque su geometría sea perfecta [Amini et al, 2016]. Por lo cual, la presencia de un defecto causa un significativo incremento del nivel de vibración, que puede ser detectado por emisión acústica. El estudio de vibración debido a esta categoría de defectos es, por lo tanto, importante para la inspección de calidad, así como el control de la condición del sistema [Tandon & Choudhury, 1999].

La emisión acústica es un fenómeno de generación de ondas elásticas transitorias debido a una liberación rápida de la energía de deformación causada por el movimiento relativo de partículas pequeñas bajo tensiones mecánicas [Gohar et al, 1998]. La frecuencia contenida en EA es típicamente en los rangos de 100kHz a 1MHz, por lo cual, EA no es influenciada o distorsionada por el desequilibrio y desalineación que se encuentran en rangos de baja frecuencia. Generación y propagación de grietas y defectos asociados con deformación plástica, son las principales fuentes de emisión acústica. La EA es una forma de detección pasiva, las ondas de alta frecuencia excitan al sensor que contiene un cristal piezoeléctrico el cual produce un voltaje. Este método es principalmente usado para registrar la evolución durante la aplicación de un nivel de esfuerzo para la generación de deformaciones, incremento de defectos, fricción, etc. además es posible detectar alguna fase de transformación en el material por emisión acústica [Amini et al, 2016]. La EA tiene varias ventajas por encima del análisis de vibraciones, como la detección incipiente de la avería, es sensible a la localización de las fallas y pueden captar información en frecuencias más altas que las señales de vibración [Pao et al, 1979].

En este trabajo se presenta la detección de falla en rodamientos en una cadena cinemática propuesta, por medio de análisis de señales de emisión acústica, adquiridas por un sistema de adquisición de alta velocidad, desarrollado con tecnología FPGA (*Field Programmable Gate Array*, Arreglo de compuertas programables en campo) y convertidor analógico-digital de alta velocidad que permite adquirir frecuencias mayores de 100kHz, este sistema da como ventaja una frecuencia de muestreo óptima para la adquisición de señales de alta frecuencia tale como las de EA y obtener más información al monitorizar cadenas cinemáticas. Se propone EA como un método complementario para los sistemas de monitoreo. El trabajo se concentra en adquirir señales del sistema con falla y un sistema sano, realizar el análisis de las señales con FFT aislando la banda de interés con un filtro pasa bandas, y comparar armónicos de vibración, producidas por su frecuencia de rotación y geometría, obteniendo indicadores de fallo como: nivel de ruido, promedio, desviación estándar y comparación de amplitud de armónicos. Con esto

se concluye la identificación y presencia de la falla en alta frecuencia en las señales de EA adquiridas del sistema, abriendo posibilidades de futuras investigaciones con el método de EA.

2. Métodos

Esta sección muestra la metodología propuesta y la descripción de la configuración experimental para la detección de falla de rodamiento en una cadena cinemática propuesta. La primera parte de la metodología parte de las frecuencias características relativas al defecto de carga en rodamientos, las cuales son teóricamente bien conocidas, estas frecuencias se calculan a partir de la frecuencia de rotación y la geometría del balero. Estas son características de los elementos de contacto interno y externo (f_{BPIF} , f_{BPOF}), la frecuencia de rotación de la caja (f_{FTF}), y la frecuencia de giro de elementos rodantes (f_{BSF}), se expresan las ecuaciones como:

$$f_{BPIF} = \frac{f_r}{2} N_b \left(1 + \frac{D_B}{D_C} \cos \theta \right), \quad (1)$$

$$f_{BPOF} = \frac{f_r}{2} N_b \left(1 - \frac{D_B}{D_C} \cos \theta \right), \quad (2)$$

$$f_{FTF} = \frac{f_r}{2} \left(1 - \frac{D_B}{D_C} \cos \theta \right), \quad (3)$$

$$f_{BSF} = \frac{D_C}{2D_B} f_r \left(1 - \left(\frac{D_B}{D_C} \right)^2 (\cos \theta)^2 \right), \quad (4)$$

Donde f_r es la frecuencia de rotación de la parte interior del balero, D_C es el diámetro exterior, D_B es el diámetro de los balines, N_b es el número de balines, y θ es el ángulo de contacto entre la superficie de rodamiento. Estas frecuencias pueden ser usadas en la detección de fallas en rodamientos, ya que se pueden visualizar en el espectro de frecuencias. La frecuencia de interés en este trabajo, son los armónicos de la frecuencia característica de elementos de contacto externo, por el tipo de falla en el rodamiento del banco de pruebas que se explicará más adelante.

En la figura 1 se muestra la metodología llevada a cabo para este estudio. Para la detección de falla de rodamiento, se define el sistema en dos condiciones, condición sana y condición con falla de rodamiento. El elemento dañado fue remplazado en la cadena cinemática para poder realizar los diferentes experimentos. Para la adquisición de datos, se utilizó un sensor de emisión acústica, el cual está en contacto con la cadena cinemática, como se puede visualizar en la figura 2, los datos fueron adquiridos durante el funcionamiento del sistema con alimentación de línea para cada condición del banco de pruebas. Las características del sistema de adquisición son específicas para adquirir señales dentro del ancho de banda de trabajo del sensor de EA, para este trabajo se propuso una frecuencia de muestreo de 550kHz. El análisis espectral consiste en la aplicación de un diezmado de segundo orden y un filtro pasa-banda IIR (*Infinite Impulse Response*, respuesta infinita al impulso) en el ancho de banda de interés seleccionado entre 100kHz a 137kHz, esto es debido a que el diezmado baja la frecuencia de muestreo a 275kHz, el filtro es utilizado para observar las frecuencias de interés en el análisis realizado. Los armónicos por identificar y comparar son calculados usando la formula (2), prediciendo el fallo por las características geométricas y la velocidad con la que trabaja el sistema, la cual es medida durante el experimento con un encoder.

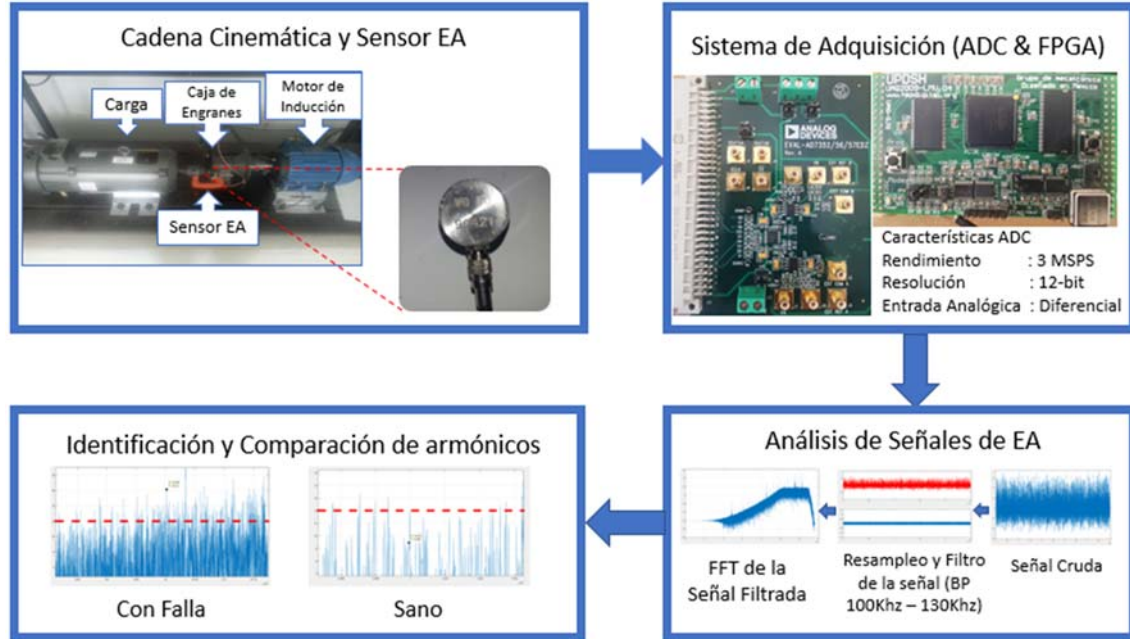


Figura 1 Metodología Propuesta.

Es importante mencionar que son aproximaciones y pueden variar debido a las condiciones de funcionamiento del banco de pruebas. Los datos adquiridos son almacenados en una computadora personal para posteriormente ser analizados con la herramienta computacional MATLAB, aplicando a cada experimento el diezmado, el filtro pasa-banda y FFT, además de calcular su promedio y desviación estándar. El experimento se realizó diez veces para cada estado del sistema, en cada uso se adquirió 500k muestras, lo cual proporciona aproximadamente 1 segundo.

El banco de pruebas utilizado para las pruebas en la cadena cinemática se muestra en la figura 2. El banco de pruebas consiste en un motor de inducción trifásico (WEG0026ET3ET3E145T-W22). La cadena cinemática usa como carga mecánica un generador de DC (BALDOR CDP3604) alrededor del 20% de su carga nominal. El sensor de emisión acústica (WG50) del fabricante *Soundwel Technology*, con un ancho de banda de 100kHz-1MHz. Tiene una etapa de pre-amplificación y amplificador de la señal, proporcionado por el mismo fabricante con una ganancia de 40dB, un ancho de banda de 10kHz~2MHz y un voltaje de salida

de 10V(Vpp). Para la etapa de adquisición se utilizó un convertidor analógico-digital (ADC, *Analog-Digital Converter*) de 12bits ,2 canales, entrada diferencial, salida de 3MSPS(AD7352) de *Analog Devices*. Para este experimento se utilizó la tarjeta EVAL-AD7352 que contiene el ADC y sus etapas de acondicionamiento de señal. Para el control de todo el sistema de adquisición, se utilizó una tarjeta propietaria basada en FPGA(PLCUAQ816) [Morales-Velazquez, 2010], esta tarjeta controla el ADC y guarda los datos en una memoria RAM dinámica, para posteriormente enviar los datos vía USB a la PC. El número de datos a adquirir es controlado desde el PC por un programa desarrollado en C++ y el cual comunica con la FPGA.

Para realizar los experimentos con rodamiento dañado, se realizó un daño artificial al rodamiento, perforando un agujero de un diámetro de 1.191mm, en la pista exterior del rodamiento, usando una broca de tungsteno. Este fallo ha sido usado y reportado en diferentes estudios de fallas en rodamientos [Saucedo, 2016; V.mien et al, 2014], el rodamiento usado es el modelo 6205-2ZNR y se muestra en la figura 3. Las características geométricas del rodamiento son las siguientes, contiene 9 balines de 7.9mm de diámetro y el diámetro externo es de 39mm con un ángulo de contacto de 0°.

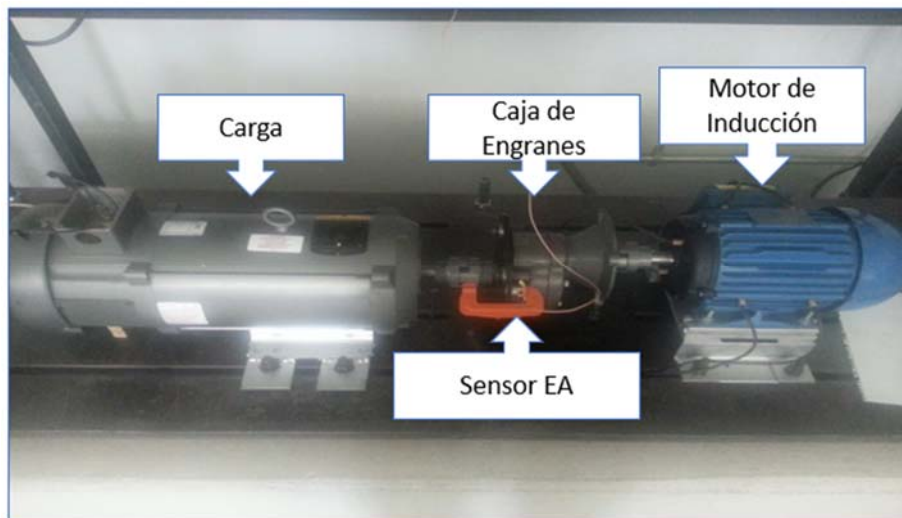


Figura 2 Banco de pruebas usado en el experimento



Figura 3 Rodamiento dañado.

3. Resultados

Los resultados son obtenidos aplicando la metodología propuesta. Se obtuvo la adquisición de la señal de emisión acústica en cada experimento, se realizó 10 adquisiciones de cada configuración del banco de pruebas, la señal obtenida se muestra en la figura 4. Las primeras observaciones notables entre las señales del sistema dañado y el sano, es la cantidad de ruido que presentan sin hacer ningún procesamiento. La señal es diezmada, filtrada y se aplica FFT para llegar al resultado mostrado en la figura 5, donde es analizado el ancho de banda de interés para la comparación de los armónicos. Al realizar un sistema con falla y el sistema sano, se notan amplitudes en el espectro de la señal que coinciden entre las dos, aunque el espectro de la señal con falla contiene un nivel más alto de ruido. Además, se compararon promedios y desviación estándar lo cual indica la presencia de más contenido armónico en la señal del sistema con falla. Estos indicadores son las principales referencias para realizar la comparación entre las señales de los dos estados del banco de pruebas analizado, teniendo así los indicadores de falla. Los armónicos calculados con la ecuación (4) son también tomados como referencia para la comparación, tomando armónicos mayores de 100kHz de la frecuencia de

contacto externo del rodamiento. Los indicadores de falla se calculan de cada señal, los promedios de los indicadores son los siguientes:

Tabla 1 Promedios de Indicadores de Falla.

| | Sistema con Falla | Sistema Sano |
|-----------------------------|-------------------|--------------|
| Promedio de Amplitud de FFT | 9.59411dB | 7.2671dB |
| Desviación Estándar | 0.0887 volts | 0.0615 volts |
| Amplitud de Armónicos | 11.61dB | 9.559dB |

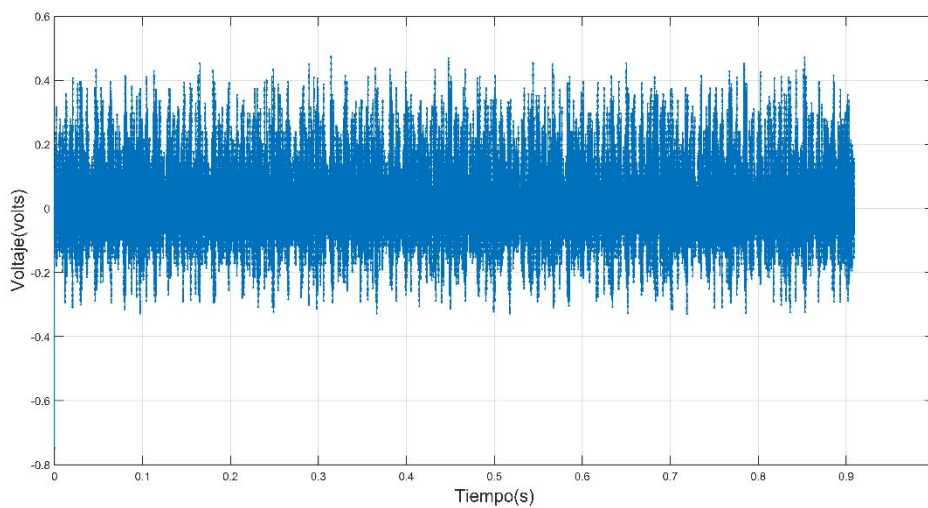


Figura 4 Señal cruda.

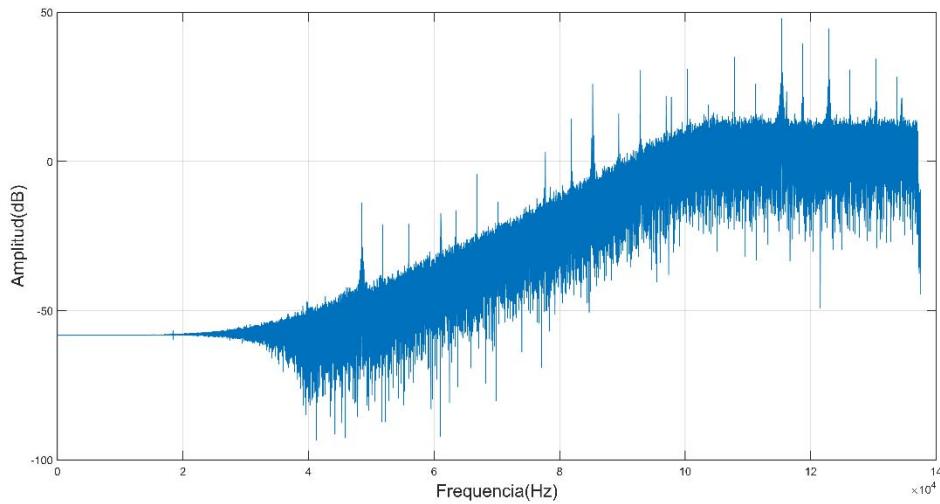


Figura 5 Señal filtrada y aplicando FFT

4. Discusión

Para la detección de la falla, se analizan las comparaciones realizadas para los estados de falla y sano. En la figura 6 se muestra el espectro de la condición sana del sistema realizando un acercamiento de la señal anterior mostrada en la figura 5; en el espectro se destacan armónicos a comparar, además de mostrar una línea roja que indica el promedio de la señal del sistema falla y la línea verde el promedio de la señal del sistema sano. En la figura 7 se muestra el espectro en la condición del sistema con falla, teniendo al igual que la figura 6, señalando los armónicos en el espectro para su comparación, además de mostrar los promedios con las líneas roja y verde para su visualización. Las diferencias de los armónicos entre los estados del sistema varían entre 3 a 5 dB, analizando entre la banda donde se aplicó el filtro pasa-banda, lo cual indica la presencia de la falla en el rodamiento del sistema. La presencia de la falla se puede ver desde los diferentes indicadores de fallas presentadas, las cuales son: nivel de ruido, nivel de contenido armónico, diferencia de promedio, varianza de las señales y diferencia de armónicos de la frecuencia de rodamiento exterior.

El sistema de adquisición utilizado para este experimento está en prototipo, lo cual limita al sistema de trabajar a una frecuencia de adquisición más alta, por las perturbaciones y ruido que interferían con las señales de control de alta frecuencia del FPGA para controlar el ADC y transferir los datos. El sistema realiza las primeras pruebas en detección de fallas de esta índole, para darle un enfoque como un sistema complementario, por su principal ventaja de la EA de trabajar en altas frecuencias.

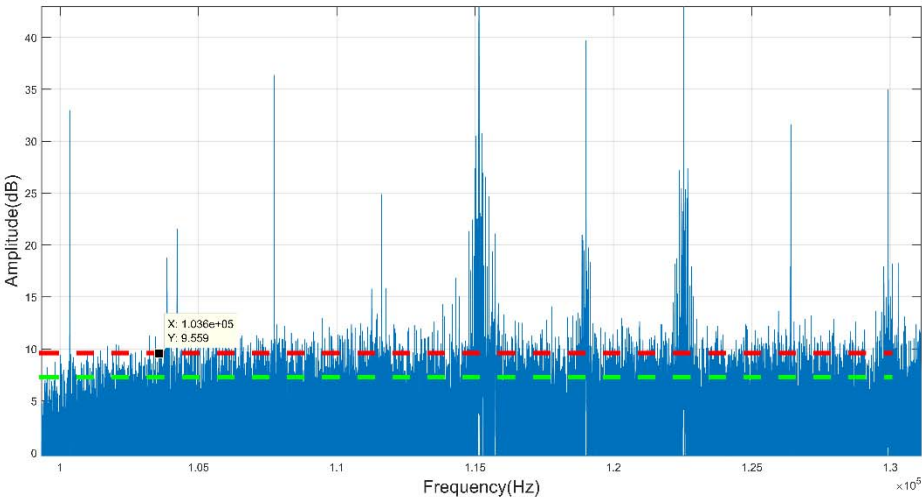


Figura 6 Acercamiento en la banda de interés de la FFT, Sistema sano.

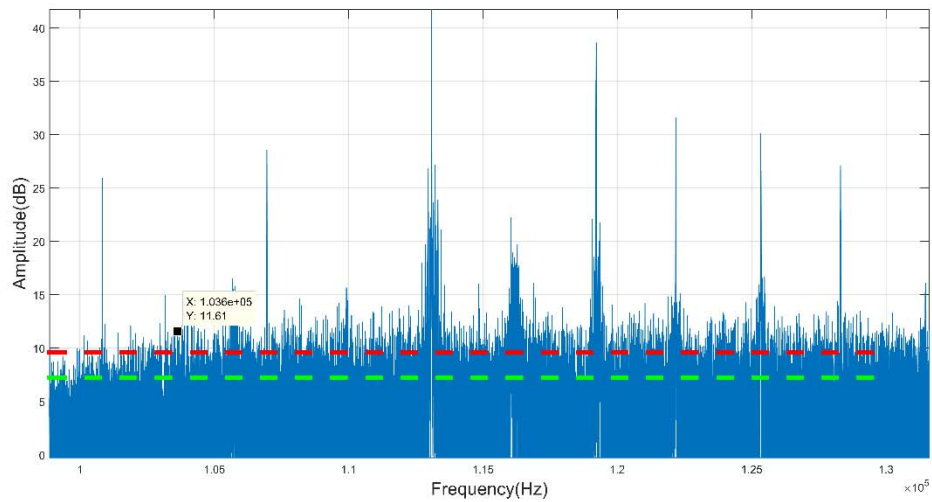


Figura 7 Acercamiento en la banda de interés de la FFT, Sistema dañado.

5. Conclusiones

Este trabajo propone una metodología para el análisis de señales de EA para el diagnóstico de falla en rodamiento. Se utilizó un sistema que aún está en prototipo para la adquisición de señales de EA, con tecnología FPGA que tiene ventajas como ser reconfigurable y de arquitectura abierta, esto se aprovecha en el sistema siendo un reconfigurable la frecuencia de adquisición. La cadena cinemática propuesta está compuesta por un motor de inducción, caja de engranes y una carga mecánica, se utilizó con dos configuraciones, sano y con falla de rodamiento en el motor de inducción. Al procesar las señales y analizarlas, se realizaron comparaciones de diferentes indicadores propuestos para la identificación de falla de rodamiento. Cada comparación de los indicadores muestra una diferencia, siendo mayor el nivel de dB en las señales del sistema con fallo de rodamiento.

El método de EA es propuesto como complementario, ya que su ancho de banda de trabajo puede visualizar espectros de altas frecuencias que otros métodos no pueden, por las limitaciones físicas de los sensores principalmente.

Para tener mejor resolución en el análisis de las señales de EA se trabaja en realizar un sistema de adquisición en una tarjeta que contenga todas las etapas, para evitar los problemas de ruido que interrumpían con las señales de control. Este trabajo es preámbulo para futuros trabajos y diferentes aplicaciones de la EA en las cadenas cinemáticas, así como extenderse a futuros desarrollos de sistemas para aplicaciones industriales para la detección de fallas como un sistema adicional de monitoreo no invasivo.

Agradecimientos

Este trabajo de investigación fue respaldado por CONACyT.

6. Referencias

- [1] Amini, A., Entezami, M., Huang, Z., Rowshandel, H., & Papaelias, M. (2016). Wayside detection of faults in railway axle bearings using time spectral kurtosis analysis on high-frequency acoustic emission signals. *Advances in Mechanical Engineering*, 8(11), 1687814016676000.
- [2] Caesarendra, W., Kosasih, B., Tieu, A. K., Zhu, H., Moodie, C. A., & Zhu, Q. (2016). Acoustic emission-based condition monitoring methods: Review and application for low speed slew bearing. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 72, 134-159.
- [3] Delgado-Arredondo, P. A., Garcia-Perez, A., Morinigo-Sotelo, D., Osornio-Rios, R. A., Avina-Cervantes, J. G., Rostro-Gonzalez, H., & Romero-Troncoso, R. D. J. (2015). Comparative study of time-frequency

decomposition techniques for fault detection in induction motors using vibration analysis during startup transient. *Shock and Vibration*, 2015.

- [4] Gohar, R., & Akturk, N. (1998). 'Vibrations Associated With Ball Bearings. In Conference on Multi body Dynamics, Proc. I. Mech. Engrs (pp. 43-63).
- [5] Hao, R. J., Lu, W. X., & Chu, F. L. (2008). Review of diagnosis of rolling element bearings defaults by means of acoustic emission technique. *Journal of Vibration and Shock*, 27(3), 75-79.
- [6] Henriquez P., Alonso, J. B., Ferrer, M. A., & Travieso, C. M. (2014). Review of automatic fault diagnosis systems using audio and vibration signals. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 44(5), 642-652.
- [7] James Li C, Li S (1995) Acoustic emission analysis for bearing condition monitoring. *Wear* 185(1):67–74
- [8] Kral, C., & Habetler, T. G. (2010). Condition monitoring and fault detection of electric drives. INTECH Open Access Publisher.
- [9] Mba D (2003) Acoustic emissions and monitoring bearing health. *Tribol Trans* 46(3):447–451
- [10] McFadden P, Smith J (1984) Acoustic emission transducers for the vibration monitoring of bearings at low speeds. *Proc Inst Mech Eng Part C J Mech Eng Sci* 198(2):127–130
- [11] Morales-Velazquez, L., de Jesus Romero-Troncoso, R., Osornio-Rios, R. A., Herrera-Ruiz, G., & Cabal-Yopez, E. (2010). Open-architecture system based on a reconfigurable hardware–software multi-agent platform for CNC machines. *Journal of Systems Architecture*, 56(9), 407-418.
- [12] Niknam, S. A., Songmene, V., & Au, Y. J. (2013). The use of acoustic emission information to distinguish between dry and lubricated rolling element

- bearings in low-speed rotating machines. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69(9-12), 2679-2689.
- [13] Pao, Y. H., Gajewski, R. R., & Ceranoglu, A. N. (1979). Acoustic emission and transient waves in an elastic plate. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 65(1), 96-105.
- [14] Pollock, A. A. (1973). Acoustic emission-2: acoustic emission amplitudes. *Non-destructive testing*, 6(5), 264-269.
- [15] Saucedo-Dorantes, J. J., Delgado-Prieto, M., Ortega-Redondo, J. A., Osornio-Rios, R. A., & Romero-Troncoso, R. D. J. (2016). Multiple-fault detection methodology based on vibration and current analysis applied to bearings in induction motors and gearboxes on the kinematic chain. *Shock and Vibration*, 2016.
- [16] Saxena, A., & Saad, A. (2006). Genetic algorithms for artificial neural net-based condition monitoring system design for rotating mechanical systems. In *Applied Soft Computing Technologies: The Challenge of Complexity* (pp. 135-149). Springer Berlin Heidelberg.
- [17] Tandon N, Nakra B (1992) Comparison of vibration and acoustic measurement techniques for the condition monitoring of Rolling element bearings. *Tribol Int* 25(3):205–212
- [18] Tandon, N., & Nakra, B. C. (1992). Vibration and acoustic monitoring techniques for the detection of defects in rolling element bearings—a review. *The shock and vibration digest*, 24(3), 3-11.
- [19] Tandon, N., & Choudhury, A. (1999). A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings. *Tribology international*, 32(8), 469-480.

- [20] V.Mien, K. Hee-Jun, and S. Kyoo-Sik, "Rolling element bearing fault diagnosis based on non-local means de-noising and empirical mode decomposition," IET Science, Measurement and Technology, vol. 8, no. 6, pp. 571–578, 2014.
- [21] Vahaviolos, S. J. (1999). Acoustic emission: standards and technology update. ASTM.
- [22] Van Hecke, B., Qu, Y., & He, D. (2015). Bearing fault diagnosis based on a new acoustic emission sensor technique. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, 229(2), 105-118.
- [23] Yoshioka, T., & Fujiwara, T. (1982). A new acoustic emission source locating system for the study of rolling contact fatigue. Wear, 81(1), 183-186.

7. Autores

Luis Alejandro Romero Ramírez. received the engineering degree in mechatronic from Universidad de Guanajuato. He is curretly student the M.C. from Universidad Autonoma de Queretaro.

Luis Morales Velázquez. Received the engineering degree in electronic from Universidad de Guanajuato. And the M.E and Ph. D. degrees from the Universidad Autonoma de Queretaro. He is currently a Head Professor with the Universidad Autonoma de Queretaro, San juan del Rio, Mexico.

Roque A. Osornio Ríos. received the B.E. degree from the Instituto Tecnológico de Queretaro, Queretaro, Mexico, and the M.E. and Ph.D. degrees from the Universidad Autonoma de Queretaro, Queretaro. He is a National Researcher with the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Mexico. He is currently a Head Professor with the Universidad Autonoma de Queretaro, San Juan del Rio, Mexico. He has been the adviser of over 20 theses and the coauthor of over 23 technical papers in international journals and conferences. His fields of interest include hardware signal processing and mechatronics. Dr. Osornio-Rios is the recipient of the 2004 ADIAT National Award on Innovation for his works in applied mechatronics.

René de Jesús Romero-Troncoso. received the Ph.D. degree in mechatronics from the Autonomous University of Queretaro, Queretaro, Mexico, in 2004. He is a National Researcher level 3 with the Mexican Council of Science and Technology, CONACYT. He is currently a Head Professor with the University of Guanajuato and an Invited Researcher with the Autonomous University of Queretaro, Mexico. Dr. Romero–Troncoso was a recipient of the 2004 Asociación Mexicana de Directivos de la Investigación Aplicada y el Desarrollo Tecnológico Nacional Award on Innovation for his work in applied mechatronics, and the 2005 IEEE ReConFig Award for his work in digital systems. He is part of the editorial board of Hindawi's The Scientific World Journal and the International Journal of Manufacturing Engineering.

Daniel Morfíngo Sotelo. received the B.S.and Ph.D. degrees in electrical engineering from the University of Valladolid (UVA), Spain, in 1999 and 2006, respectively. He was a Research Collaborator on Electromagnetic Processing of Materials with the Light Alloys Division of CIDAUT Foundation since 2000 until 2015. He is currently with the Research Group in Predictive Maintenance and Testing of Electrical Machines, Department of Electrical Engineering, UVA and with the HSPdigital Research Group, México. His current research interests also include condition monitoring of induction machines, optimal electromagnetic design, and heuristic optimization.