



# Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ciencias Mecatrónica

Tesis

Instrumentación y procesamiento digital de señales en hardware aplicado a engranes dañados.

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de:

**Maestro en Ciencias**

**Presenta:**

Ing. Miguel del Angel Valerio

**Dirigido por:**

Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos.

San Juan del Río, Querétaro, Mayo de 2014



# Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ciencias Mecatrónica

Tesis

Instrumentación y procesamiento digital de señales en hardware aplicado a engranes dañados.

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de:

**Maestro en Ciencias**

**Presenta:**

Ing. Miguel del Angel Valerio

**Dirigido por:**

Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos.

SINODALES

Dr. Roque A. Osornio Ríos

Presidente

Dr. Luis Morales Velázquez

Secretario

Dr. Juan Primo Benítez Rangel

Vocal

Dr. Jesus Rooney Rivera Guillen

Suplente

Dr. Miguel Trejo Hernández

Suplente

Dr. Aurelio Domínguez González

Director de la facultad

Firma

Firma

Firma

Firma

Firma

Dr. Irineo Torres Pacheco

Director de investigación y posgrado

Centro Universitario

Querétaro, Qro. Mayo de 2014



## RESUMEN

En la actualidad los sistemas de monitoreo y detección de fallas de máquinas electromecánicas siguen siendo una importante herramienta para la prevención de anomalías en diversos sistemas de esta índole. Este trabajo presenta una metodología que pretende identificar el desgaste gradual de engranes en una caja reductora acoplada a un motor eléctrico y a un generador, demostrando que con la instrumentación de sensores y el procesamiento digital de señales en software y en hardware se identificarán patrones que discriminaran entre un grado de desgaste y otro. Las técnicas principales de procesamiento de señales utilizadas fueron con base en la transformada de Fourier, analizando corriente, vibraciones y velocidad angular. Se propusieron 4 grados de desgaste para los engranes, el sano con 0%, y otros tres con 25, 50 y 75 por ciento de desgaste, para cada uno de estos engranes se realizaron pruebas operativas, en las cuales se puso en marcha el motor trifásico a plena tensión (60 Hz) y con variación de frecuencia a 65Hz y a 20 Hz, durante estas pruebas se censó la corriente, las vibraciones y la velocidad angular. Posteriormente las señales obtenidas se analizaron en MATLAB® utilizando las herramientas de pre-procesamiento y procesamiento de señales para encontrar los patrones discriminatorios entre uno y otro engrane. Las técnicas utilizadas se implementaron en hardware teniendo un sistema de clasificación de desgaste en engranes.

**Palabras Clave:** (Fallas en engranajes, Procesamiento de Señales)

## **SUMMARY**

Nowadays the monitoring of systems and detection in electromechanical machinery faults are an important tool for prevention to faults in these systems. This thesis presents one methodology for identify the gradual wear in gears into a gearbox, it is joined to one motor and one charge. Using sensors and digital signals processing in software and hardware, help us to identify patterns for we find the gear wear. The principal techniques of processing signals that we used were FFT for the analysis to vibrations and currents. We were proposed four gears with 0, 25, 50 and 75 percent of wear, we were performed five proofs for each one of these gears, and during testing we sensed the current, the vibes and the angular speed. The signal obtained were analyzed in MATLAB® using Fast Fourier Transform and finally we implemented FFT in hardware.

**Keywords** (Gear failures, Signal Processing)

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi familia, mis padres hermanas y a mis sobrinos con todo mi cariño, por su apoyo incondicional en todo momento, a mi asesor el Dr. Roque A. Osornio y todos los miembros del sínodo por tomarse el tiempo de aconsejarme y ayudarme en todas las etapas de esta maestría, a la Universidad Autónoma de Querétaro por brindarme recursos técnicos y humanos de calidad, a mis amigos por su apoyo y amistad y por su puesto a CONACYT y a la sociedad mexicana por el apoyo económico que de ellos recibí (Beca No. 273085).

## ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1 .....	1
1. Introducción.....	1
1.1 Antecedentes .....	2
1.2 Objetivos e hipótesis .....	4
1.2.1 Objetivo general.....	4
1.2.2 Objetivos Particulares.....	4
1.2.3 Hipótesis.....	5
1.3 Justificación.....	5
1.4 Planteamiento general .....	7
Capítulo 2.....	9
2. Fundamentación teórica.....	9
2.1 Estado del arte.....	9
2.2 Motores de Inducción.....	10
2.2.1 Desarrollo del par inducido en un motor de inducción .....	11
2.2.2 El modelo transformador de un motor de inducción .....	14
2.3 Engranajes.....	15
2.3.1 Fallas en engranajes. ....	17
2.3.2 Falla por fractura.....	17
2.3.3 Falla por fatiga superficial (Picadura) .....	18
2.3.4 Falla por flujo plástico.....	18
2.3.5 Falla por desgaste.....	19

2.4	Análisis espectral.....	19
2.4.1	Tipos de Señales.....	20
2.4.2	Dominio del tiempo y de la frecuencia.....	21
2.4.3	Transformada de Fourier.....	23
2.4.4	Transformada rápida de Fourier (FFT).....	24
2.5	FPGAs.....	25
2.5.1	Procesado de señales.....	27
2.5.2	Radix FFT.....	30
Capítulo 3	.....	31
3.	Metodología.....	31
3.1	Acondicionamiento de banco de pruebas.....	33
3.2	Instrumentación.....	35
3.3	Análisis de Señales.....	38
3.3.1	Análisis de Vibraciones.....	38
3.3.2	Análisis de Corriente.....	39
3.4	Procesamiento de Señales en Hardware.....	39
Capítulo 4	.....	42
4.	Pruebas y resultados.....	42
4.1	Engrane Sano.....	43
4.1.1	Análisis de vibraciones 20 Hz.....	44
4.1.2	Análisis de vibraciones 65 Hz.....	46
4.2	Engrane con 25% de desgaste.....	47
4.2.1	Análisis de vibraciones 20 Hz.....	47

4.2.2	Análisis de vibraciones 65 Hz .....	49
4.3	Engrane con 50% de desgaste .....	50
4.3.1	Análisis de vibraciones 20 Hz .....	51
4.3.2	Análisis de vibraciones 65 Hz .....	52
4.4	Engrane con 75% de desgaste .....	54
4.4.1	Análisis de vibraciones 20 Hz .....	54
4.2.3	Análisis de vibraciones 65 Hz .....	55
4.5	Análisis de Corriente .....	56
4.6	Resumen .....	58
4.7	Herramientas en hardware .....	60
Capítulo 5	.....	62
5.	Conclusiones y perspectivas .....	62
5.1	Conclusiones .....	62
5.2	Prospectivas .....	63
REFERENCIAS	.....	64
APENDICE	.....	67

## ÍNDICE DE FIGURAS

### Figura

1.1. Diagrama General.....	7
2.1. Motor de Inducción (Fuente: Wikipedia).....	11
2.2. Desarrollo del par inducido en un motor de inducción. (Fuente: Chapman, 2000).....	12
2.3. Esquemas de conexión para máquinas trifásicas con rotor de jaula de.....	14
2.4. Modelo transformador de un motor de inducción (Fuente: Chapman, 2000) .	15
2.5. Vibración típica de un engrane dañado, a) en el dominio del tiempo y b) en el dominio de la frecuencia (Lozano y Jáuregui, 2013).....	17
2.6. Movimiento armónico simple (Fuente: (Akansu y Haddad, 2001)).....	20
2.7. Señales determinísticas.....	21
2.8. Ejemplos de señales en el dominio del tiempo y de la frecuencia (Lozano y Jáuregui, 2013).....	22
2.9. Espectro de frecuencia (Fuente: Romero, 2006).....	24
2.10. Transformada Rápida de Fourier (Fuente: Arango, 2007).....	25
2.11. FPGA (Fuente: Vera et. Al 1996).....	26
2.12. Sistema de comunicación (Fuente: Bertran, 2006).....	28
2.13. Tipos de perturbaciones (Fuente: Bertran, 2006).....	29
2.14. Radix 2.....	30
3.1. Diagrama general de la Metodología del Proyecto.....	32
3.2. Diagrama eléctrico para arranque a plena tensión de motor trifásico.....	33
3.3. Sistema mecánico.....	34
3.4. Colocación de Sensores.....	35

3.5. Engranés Helicoidales con ejes paralelos.....	37
3.6. Dientes de Engranaje (Corona).....	37
3.7. Código HDL para MAC genérica.....	41
4.1. Espectro de vibraciones engrane sano 20 Hz.....	44
4.2. Espectro de vibraciones engrane sano 2FE 20 Hz.....	45
4.3. Espectro de vibraciones engrane sano 65 Hz.....	46
4.4. Espectro de vibraciones engrane desgastado 25% 20 Hz.....	48
4.5. Espectro de vibraciones engrane sano 2FE 20 Hz.....	49
4.6. Espectro de vibraciones engrane desgastado 25% 65 Hz.....	50
4.7. Espectro de vibraciones engrane desgastado 50% 20 Hz.....	52
4.8. Espectro de vibraciones engrane desgastado 50% 65 Hz.....	53
4.9. Espectro de vibraciones engrane desgastado 75% 20 Hz.....	55
4.10. Espectro de Vibraciones Engrane Desgastado 75% 65 Hz.....	56
4.11. Espectro de corriente 20 Hz.....	57
4.12. Espectro de corriente 65 Hz.....	58
4.13. Resumen primer armónico de vibraciones a 20 Hz.....	59
4.14. Simulación Radix 2(a=1FFFF, b=10000, c=10000, d=1FFFF, nSen=256, nCos=0).....	60
4.15. Simulación Radix (a=10000, b=1E000, c=00000, d=10000, nSen=256, nCos=0).....	61



## ÍNDICE DE TABLAS

### Tabla

1. Datos del sistema mecánico.....	34
2. Datos de Sensores.....	36
3. Casos de Interés .....	36
4. Matriz de Pruebas .....	43
5. Frecuencias de engranaje 0% de desgaste .....	43
6. Frecuencias de engranaje 25% de desgaste .....	47
7. Frecuencias de engranaje 50% de desgaste .....	51
8. Frecuencia de engranajes 75% de desgaste .....	54
9. Resumen de las pruebas.....	59

# Capítulo 1

## 1. Introducción

Los motores de inducción tienen una amplia gama de aplicaciones en el sector industrial, son los motores con mayor índice de eficiencia, y por este motivo son los más utilizados, en muchas de las aplicaciones estos motores están acoplados a otros sistemas mecánicos como poleas y bandas, cajas de engranajes, etc., haciendo que estos sistemas acoplados se encuentren en prácticamente toda la industria, sin embargo, están expuestos a muchos tipos de fallas –mecánicas, eléctricas, de potencia- lo que afecta de manera considerable su eficiencia y su vida útil. En este trabajo de tesis se pretende desarrollar una metodología la cual permita detectar, en un sistema Motor-Caja de engranajes-Carga, (MCC), fallas en engranes en cajas reductoras. La metodología consiste en instrumentar un sistema mecánico, (MCC), con sensores de corriente y de aceleración para en base al análisis de estas señales clasificar las fallas antes mencionadas. Parte importante de este trabajo es la instrumentación del sistema, por lo que es de vital importancia la correcta colocación de los sensores, de los acoplamientos entre el motor y la caja de engranes, y demás aspectos

relacionados con la parte mecánica, también el análisis y procesamiento de señales es crucial para detectar de manera correcta el tipo de falla.

En este primer capítulo se mencionan las razones por las cuales se realiza este trabajo, los antecedentes relacionados con el tema, se incluyen también los objetivos -general y particulares- y se da una descripción muy general de las etapas del proyecto. El segundo capítulo es la revisión de la literatura donde primeramente se revisa el estado del arte para saber cómo surge y cómo ha evolucionado hasta este momento el problema que se pretende solucionar en la tesis, posteriormente se presentan las herramientas teóricas que se requieren para la solución del problema, como son teoremas, conceptos, ecuaciones, etcétera. El tercer capítulo es la metodología donde se describen de manera detallada los pasos realizados para cumplir con los objetivos de la tesis, en esta parte se hace uso de los temas teóricos del segundo capítulo para dar solides y veracidad a dicha metodología. El cuarto capítulo son los resultados y la discusión, donde se evalúa si la hipótesis y los objetivos se cumplieron y si no es así el porqué de ello. Y por último el quinto capítulo de conclusiones y perspectivas del trabajo, aquí se establece el alcance real que tuvo el proyecto y se evalúan futuras mejoras o cambios.

### **1.1 Antecedentes**

El estudio de fallas en motores y sistemas acoplados mediante el análisis de sus vibraciones es un tema muy común e importante a nivel industrial debido a que se pueden predecir diferentes tipos de anomalías de manera indirecta sin necesidad de abrir o detener el sistema. Además el gasto de energía en motores de inducción es otro tema a considerar ya que en el mundo el 85% de la potencia consumida se debe a dicho tipo de máquinas (García et. al., 2012).

Para obtener un diagnóstico certero de las fallas en el sistema MCC es importante clasificar las distintas anomalías, la clasificación de estas se divide en tres grupos, fallas mecánicas, fallas eléctricas y fallas de enlace de potencia, estas

últimas pueden ser, desalineación en acople de ejes, fallas en engranajes, y fallas en transmisión de potencia entre poleas (Arango, 2007). Las anomalías en engranajes son relativamente fáciles de identificar ya que normalmente ocurren a una frecuencia igual a la frecuencia de engrane, es decir, la cantidad de dientes del engranaje multiplicada por las revoluciones por minuto (rpm) del engranaje que falla, aunque no siempre es así. Las fallas más comunes en engranajes son el desgaste, el des-alineamiento, las sobrecargas y dientes agrietados o rotos.

Existen diferentes estudios mecánicos para el análisis de averías de engranes los cuales utilizan la teoría del elemento finito como el trabajo de Rodríguez (2006) quien utiliza este método y el fotoelástico para determinar el desgaste de los engranes debido al esfuerzo que éstos sufren, o como González (2008) quien analiza, de igual manera por el método del elementos finitos, la tensión producida en los dientes de los engranes para la mejora de su rendimiento. Estos trabajos sirven de comparación para con las pruebas que se obtienen experimentalmente.

Según JianPing y Guang (2008) existen algunos métodos de monitoreo de motores que pretenden predecir cuándo un motor está en malas condiciones, sin embargo, diagnosticar sus múltiples fallas constituye todavía un gran reto por lo que sigue siendo un campo de desarrollo tecnológico abierto a la investigación. En este estudio el punto más importante a considerar es el procesamiento que se aplique a las señales obtenidas del monitoreo. Existen muchas técnicas cuya utilización depende de la etapa del proceso y de las características de la señal, como la transformada Wavelet, la transformada de Fourier, la transformada rápida de Fourier, la transformada de Hilbert, entre otras. Dado el gran número de herramientas que se tienen para procesar señales, así como los trabajos desarrollados bajo sus lineamientos, los métodos de diagnóstico de fallas que utilizan dicho procesamiento han demostrado la efectividad para detectar diferentes tipos de anomalías en máquinas, (Shen et al., 2012). La identificación de fallas a través del análisis de vibraciones no es sencilla de realizar debido a

que se requieren diversas técnicas de análisis para eliminar los ruidos de los instrumentos de medición y los debidos a condiciones externas del motor. Como bien mencionan Soltani y Liang (2007), cuando se pretenden analizar las vibraciones de un sistema mecánico complejo que involucren a un motor, la medición de las señales no siempre es clara debido a los ruidos causados por las interferencias de los elementos que componen al sistema, lo que hace necesario realizar un pre-procesamiento de señales para eliminar datos que no correspondan al mismo.

En resumen una vez que se tiene delimitado el campo de estudio, se pueden analizar las vibraciones del sistema en búsqueda de anomalías más específicas. Dependiendo de las señales arrojadas por los instrumentos de medición se realizará el análisis y procesamiento más apropiado, pudiendo aplicar las transformaciones de una manera más óptima, para así optimizar el tiempo de procesamiento.

## **1.2 Objetivos e hipótesis**

### **1.2.1 Objetivo general.**

Instrumentar con sensores un banco de pruebas de motores donde se induzcan fallas mecánicas debidas a desgastes en engranes en el sistema MCC para procesar mediante FPGA las señales provenientes de dichos sensores, y finalmente obtener la detección de la falla correspondiente.

### **1.2.2 Objetivos Particulares**

Instrumentar de manera estratégica el banco de pruebas mediante sensores –de aceleración, de corriente- para la obtención de las señales a analizar.

Analizar las señales obtenidas de los sensores mediante técnicas de procesamiento de señales como, Fourier, transformada rápida de Fourier, para la detección de las fallas correspondientes.

Procesar las señales obtenidas mediante estructuras digitales basadas en FPGA para la implementación de las técnicas analizadas y seleccionadas en la detección de fallas en engranes.

Clasificar las fallas mediante la propuesta de algún criterio para compararlo con los métodos reportados.

### **1.2.3 Hipótesis**

El procesamiento de señales basado en FPGA y la instrumentación con sensores de corriente y de aceleración, permitirán la detección de fallas en el sistema debido a engranes dañados en las cajas reductoras.

### **1.3 Justificación**

El desperdicio de energía eléctrica que se produce cuando un elemento del sistema está dañado puede generar a largo plazo una cifra considerable de dinero, sobre todo a nivel industrial cuando se tienen grandes cantidades de máquinas rotatorias y de gran capacidad, debido a esto se tiene la necesidad de predecir fallas en motores para mejorar los costos de mantenimiento y duración de estas máquinas, y la detección de un mal funcionamiento mecánico en base al análisis de sus vibraciones se ha vuelto un tema de estudio muy importante para dicha detección.

Muchos de los sistemas de monitoreo y detección de fallas en motores que analizan la vibraciones tienen altos costos y están limitados en cuanto a aplicaciones e información de diagnóstico se refiere, además de que con el tiempo se vuelven obsoletas y la tecnología o el aparato se descontinúan por lo que muchas veces es importante saber la metodología que se lleva a cabo en el análisis de las vibraciones para ampliar el panorama ante una toma de decisión ya sea en el mantenimiento predictivo o correctivo.

Los estudios realizados a las cajas reductoras acopladas a motores no contemplan en gran medida el desgaste gradual de los engranes, estos estudios solo se basan en los desgastes considerables que pueden llegar a fracturas o pérdidas de los dientes del engranaje, y así con este trabajo se hará un estudio más minucioso a los desgastes en los engranes para un oportuno diagnóstico de la falla sin necesidad de hacer un paro de emergencia en el sistema o la producción.

Otro problema en los métodos de detección de fallas es el tiempo de procesamiento de las señales obtenidas de los sensores, dado que la mayoría de los trabajos implementan dicho procesamiento en plataformas que trabajan de forma serial, como son códigos en C, en C++, en MATLAB®, etcétera, lo que hacen que el proceso sea lento, en este trabajo se implementa el procesamiento de las señales en FPGA que permite diagnosticar las fallas del sistema de una forma rápida, esto debido a la estructura de programación en paralelo de los códigos VHDL los cuales se ejecutan de forma simultánea haciendo este proceso más rápido computacionalmente hablando, además de las ventajas de portabilidad con la que cuenta esta plataforma, ya que no será necesario estar atenido a fabricantes de software porque éste es totalmente libre.

Y como el software y la programación son totalmente libres, el emplear este tipo de sistemas implica un gasto mínimo comparado con utilizar instrumentos o plataformas comerciales y una total portabilidad.

## 1.4 Planteamiento general

Este trabajo tiene como objetivo instrumentar un banco de pruebas para un sistema MCC para determinar, mediante el estudio de sus vibraciones, las posibles fallas. En la Figura 1.1 se muestra de forma general mediante un diagrama secuencial la metodología que se llevó a cabo en este trabajo.

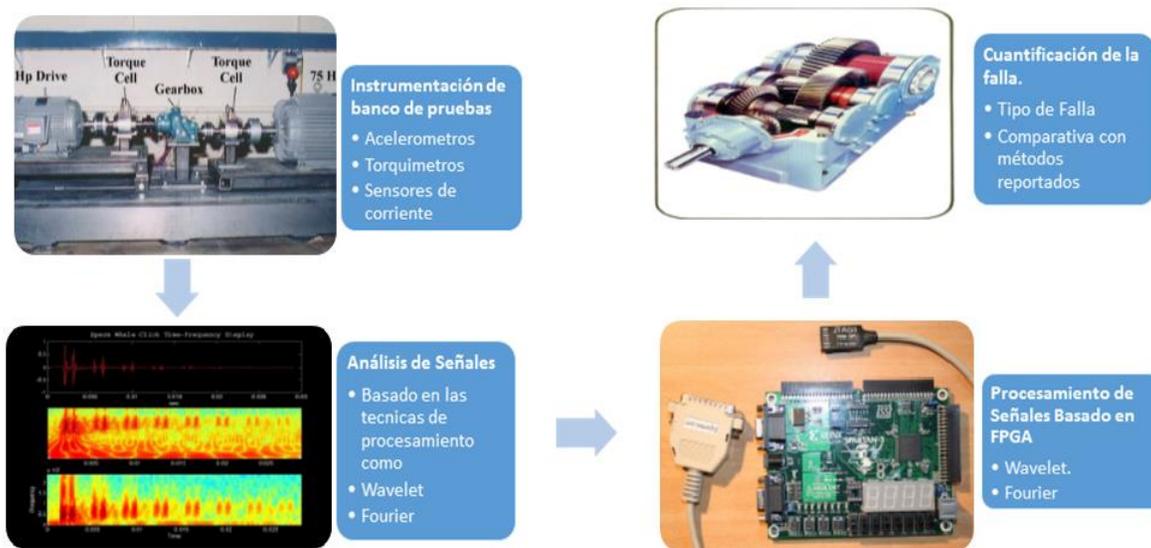


Figura 1.1. Diagrama General.

En la primera etapa se realizó la instrumentación del banco de pruebas, donde lo primero fue acondicionar un motor de inducción de 2 HP (Horse Power) conectado a través de una unión mecánica (cople) a una caja de engranes y ésta a su vez conectada del otro extremo a un carga (generador), teniendo así el sistema a analizar. Posteriormente se colocaron de manera estratégica los sensores mencionados en el diagrama, el acelerómetro se colocó en la caja de engranes para medir sus vibraciones, sensor de corriente fueron colocados en

cada una de las líneas de alimentación y un sensor de velocidad en el eje del generador.

El siguiente paso fue analizar las señales obtenidas de dichos sensores para determinar qué tipo de procesamiento requerían, ésta etapa de análisis se realizó fuera de línea utilizando las herramientas de MATLAB®. Esta parte fue necesaria para saber qué tipo de procesamiento de señales es más óptimo para el sistema, se utilizaron filtros digitales para limpiar la señal de ruidos externos, y posteriormente se aplicó el procesamiento de señales para obtener patrones que determinan la falla del sistema, dicho procesamiento es utilizando el análisis espectral y en tiempo-frecuencia. Las herramientas que se usaron son transformadas de Fourier, transformada rápida de Fourier y transformada Wavelet.

La tercera etapa fue la implementación de las técnicas de procesamiento de señales, seleccionadas en la etapa de análisis, en un FPGA lo cual ahora permitió el procesamiento en línea del sistema, esto dadas las ventajas que conlleva utilizar dispositivos de ejecución en paralelo. Para dicha implementación se programaron los códigos necesarios en HDL para después sintetizarlos y ejecutarlos en un dispositivo FPGA como lo es la Spartan 3E.

Y finalmente, una vez obtenidos los resultados del procesamiento de señales, se cuantificaron los diferentes tipos de fallas del sistema utilizando los criterios de clasificación.

## **Capítulo 2**

### **2. Fundamentación teórica.**

En esta sección se darán a conocer los temas necesarios, que sirven como herramienta para desarrollar y comprender el trabajo.

La primera parte de esta fundamentación teórica trata acerca de los elementos físicos del sistema como el motor de inducción y los tipos de fallas en engranajes, mientras que en una segunda parte se abordarán los temas relacionados con las vibraciones, análisis de señales y el procesamiento de estas últimas.

#### **2.1 Estado del arte.**

Este proyecto surge por la necesidad, a nivel local, nacional e incluso internacional, de detectar fallas en cajas de engranes con un proceso autónomo mediante la instrumentación de diversos sensores, como acelerómetros, encoders, amperímetros, y con un procesamiento digital de señales en hardware. El objetivo de este trabajo es clasificar diferentes tipos de fallas mecánicas en engranes las cuales serán comparadas con métodos reportados para su validación.

Este tipo de trabajos surgieron con el auge de la automatización de los procesos industriales en los cuales se pretendía detectar cuándo un motor ya no estaba en condiciones de uso, y con el paso del tiempo se fue refinando con el fin de dar mantenimiento predictivo a las máquinas, sin embargo, el monitoreo de motores sigue siendo aún un gran reto para la detección oportuna de fallas en éstas máquinas por lo que es un campo abierto a la investigación el cual está en búsqueda de nuevas metodologías y técnicas para ser más precisos en la detección de las muy diversas anomalías que pueden presentar los motores.

Otra parte importante en la detección de fallas en motores es la parte económica ya que se estima que del 100% de la energía eléctrica consumida en México, el 45% de ella es demanda por motores de inducción, por lo que el gobierno a echo esfuerzos para disminuir la perdida de energía en estas máquinas, logrando hacer que las principales empresas consumidoras de energía eléctrica adquieran motores con un nivel elevado de eficiencia (Motores de Alta Eficiencia según la NOM-016-ENER-2005).

## **2.2 Motores de Inducción.**

Una máquina que sólo tiene los devanados de amortiguación es llamada máquina de inducción por que 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 se requiere de corriente de campo DC para operar la máquina (Chapman, 2000).



Figura 2.1. Motor de Inducción (Fuente: Wikipedia)

### 2.2.1 Desarrollo del par inducido en un motor de inducción

La Figura 2.2 muestra un motor de inducción de jaula de ardilla. Al aplicar al estator un conjunto trifásico de voltajes, un conjunto trifásico de corrientes estatóricas que producen un campo magnético  $B_s$  que rota en dirección contraria a las manecillas del reloj. La velocidad de rotación del campo magnético está dada por la ecuación 1.

$$n_{sinc} = \frac{120f_s}{P} \quad (1)$$

Donde  $f_s$  es la frecuencia del sistema, en Hertz, y  $P$  es el número de polos de la máquina. Este campo magnético  $B_s$  pasa sobre las barras del rotor e induce voltaje en ellas. El voltaje inducido en una barra determinada del rotor está dado por la ecuación 2.

$$e_{ind} = (v \times B) * l \quad (2)$$

Donde  $v$  = velocidad de la barra, relativa al campo magnético.

$B$  = vector de densidad de flujo magnético.

$L$  = longitud del conductor en el campo magnético.

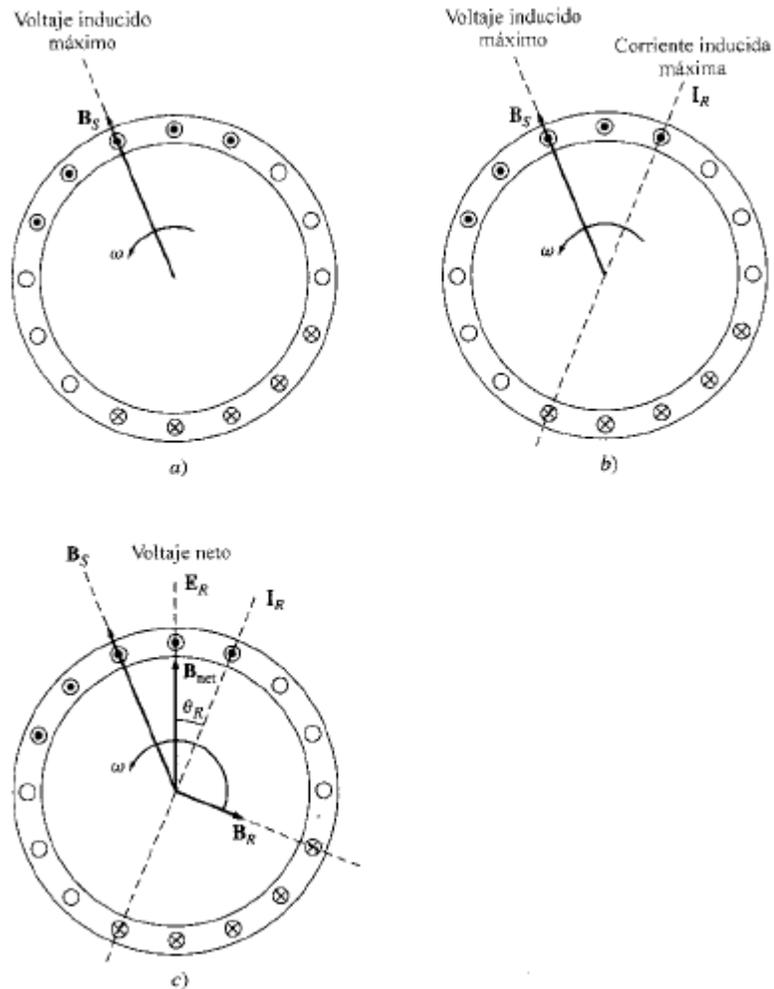


Figura 2.2. Desarrollo del par inducido en un motor de inducción. (Fuente: Chapman, 2000)

Y finalmente se tiene que el par inducido por la máquina se puede expresar como en la ecuación 3 (Chapman, 2000)

$$\tau_{ind} = k B_R \times B_s \quad (3)$$

También a partir de la velocidad sincrónica puede obtenerse el deslizamiento, que se define como “la relación que existe entre la diferencia de velocidad del campo magnético giratorio creado por el devanado estático y del campo inducido en el rotor, y la velocidad del campo inductor creado por el estator, la cual puede expresarse de la siguiente forma:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (4)$$

donde  $n_s$  es la velocidad sincrónica y  $n$  la velocidad del rotor.

Por otro lado, como en el sistema trifásico la suma de los vectores instantáneos de las tres corrientes es, en cada momento, igual a cero, se puede llegar a reducir, agrupando, los seis bornes o conductores para un devanado trifásico, a tres. Dicha agrupación se puede realizar de dos formas distintas, denominadas conexión estrella y conexión triángulo o delta.

a) Conexión estrella (Y): Resulta de unir los extremos finales de las tres ranuras en un punto común, llamado neutro o centro de la estrella. La tensión entre bornes es, en este caso, raíz de tres veces la de la fase, mientras que la corriente de línea es la misma que la de fase.

b) Conexión triángulo ( $\Delta$ ): Resulta de conectar sucesivamente los extremos de las tres ranuras, y los puntos de unión resultantes, con la red. Las tensiones en cada fase del devanado son las mismas que la de la red, mientras que la corriente de línea es raíz de tres veces superior a la de fase.

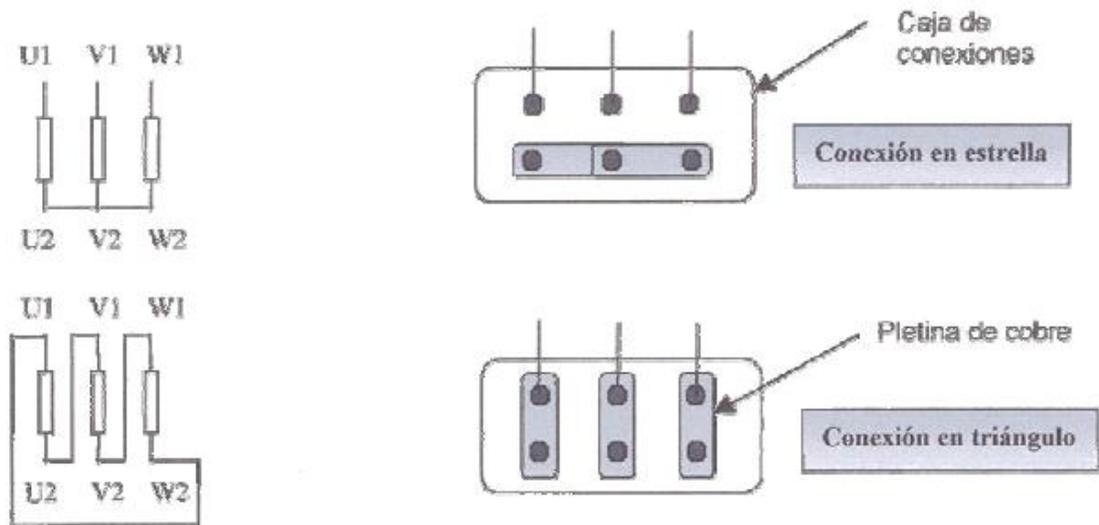


Figura 2.3. Esquemas de conexión para máquinas trifásicas con rotor de jaula de Ardilla (Fuente: Sacchi, 1995)

### 2.2.2 El modelo transformador de un motor de inducción

La Figura 2.4 muestra un circuito equivalente transformador, por fase, el cual representa la operación de un motor de inducción. Como en cualquier transformador existe cierta resistencia y auto inductancia en los devanados primarios (del estator), las cuales deben ser representadas en el circuito equivalente de la máquina. La resistencia del estator se llama  $R_1$  y la reactancia de dispersión será llamada  $X_1$ . Estas dos componentes aparecerán justo a la entrada en el modelo de la máquina.

Así mismo, como cualquier transformador con núcleo de hierro, el flujo en la máquina está relacionado con la integral del voltaje aplicado  $E_1$ . La curva de la fuerza magneto-motriz contra el flujo (curva de magnetización) para esta máquina es comparada a la curva similar para un transformador de potencia. Entonces, la reactancia de magnetización  $X_M$ , en el circuito equivalente tendrá mucho menor valor que en un transformador normal.

El voltaje primario del estator  $E_1$  está acoplado al secundario  $E_R$  por un transformador ideal con relación efectiva de vueltas  $a_{ef}$ . La relación efectiva de vueltas es fácil de determinar en un motor de rotor devanado –es básicamente la relación entre los conductores por fase del estator y los conductores por fase del rotor-.

El voltaje  $E_R$  producido en el rotor ocasiona a su vez un flujo de corriente en el circuito rotor cortocircuito (o secundario) de la máquina. Las impedancias primarias y la corriente de magnetización del motor de inducción son muy similares a las componentes correspondientes en el circuito equivalente del transformador. Un circuito equivalente del motor de inducción difiere de un circuito equivalente del transformador en los efectos de variación de la frecuencia del rotor sobre el voltaje del rotor  $E_R$  y en las impedancias del rotor  $R_R$  y  $jX_R$ .

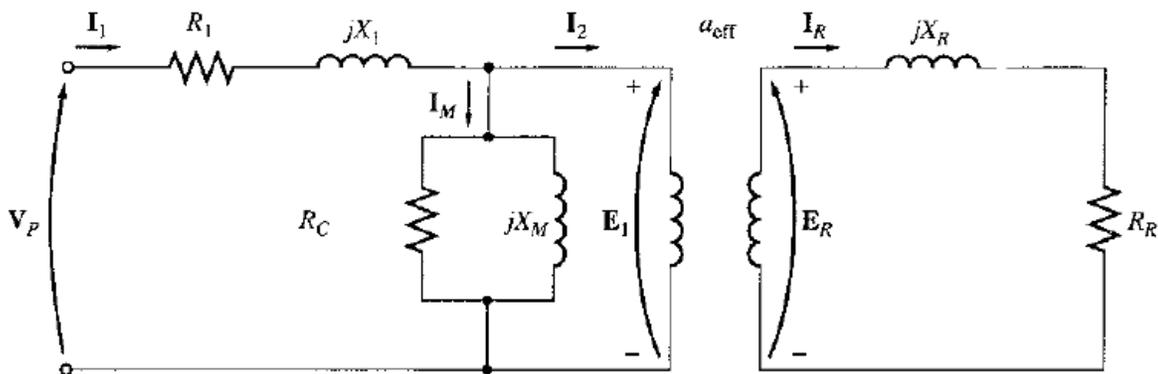


Figura 2.4: Modelo transformador de un motor de inducción (Fuente: Chapman, 2000)

### 2.3 Engranajes

La vibración en los sistemas de engranes es inherente a su operación, ya que al entrar los dientes en contacto se inducen las fuerzas de excitación que producen la vibración. Esto sucede por el juego, o backlash, que se tiene entre los dientes en contacto. Entre mayor sea el juego, mayor será la amplitud de vibración presente en el engranaje. Cada vez que dos dientes entran en contacto producen

un impacto que genera la vibración. La frecuencia de este impacto se conoce como frecuencia de engranaje (FE) y es igual al número de dientes por la velocidad angular del rotor, o sea, que  $FE = N \cdot \omega$ , donde  $N$  es el número de dientes y  $\omega$  la frecuencia de rotación del eje que se está analizando.

Cuando los dientes están en buen estado y el engrane esta concéntrico, la frecuencia de engranaje es de baja amplitud. Si los dientes se desgastan, la envolvente que genera la superficie de contacto entre los engranes se distorsiona y la forma de onda vibratoria deja de ser armónica; esta deformación del perfil excita la segunda y tercera armónicas de la frecuencia de engranaje (2FE y 3FE), por lo que el monitoreo de estas frecuencias es buen indicador del avance del desgaste en los dientes.

Cuando el engrane está excéntrico o el defecto de los engranes se encuentra en unos cuantos dientes, la frecuencia de engranaje se modula, como se indica en la Figura 2.5, el espaciamiento de las bandas laterales es igual a la frecuencia de rotación del eje que tiene el engrane dañado. De los espectro de frecuencias también se puede identificar cual es el eje que produce mayor vibración, ya que el pico de mayor amplitud se presentará a la frecuencia de giro del eje con el engrane dañado.

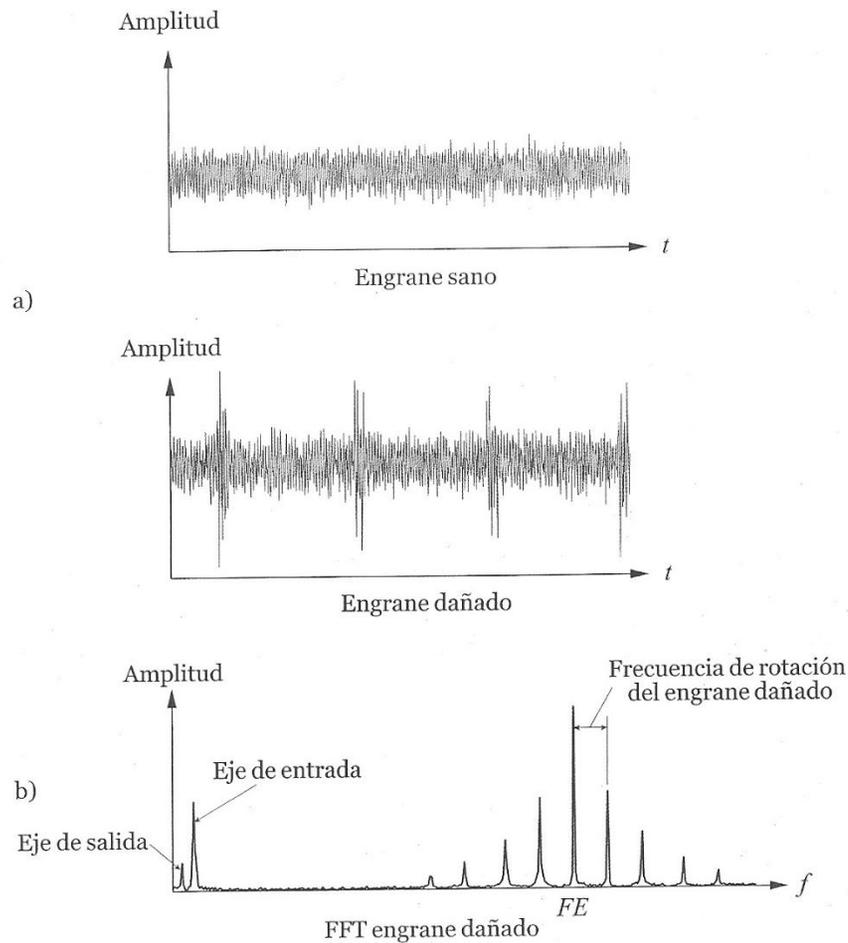


Figura 2.5. Vibración típica de un engrane dañado, a) en el dominio del tiempo y b) en el dominio de la frecuencia (Lozano y Jáuregui, 2013)

### 2.3.1 Fallas en engranajes.

Las fallas en engranajes se han agrupado en cuatro clases generales: fractura, fatiga superficial (picado), flujo plástico y desgaste.

### 2.3.2 Falla por fractura.

La fractura de un diente de un engrane es causada por el esfuerzo de flexión impuesto en él por el torque transmitido. La fractura puede ser por

sobrecarga, frecuentemente de impacto, en cuyo caso se tiene una fractura de apariencia fibrosa y/o granular.

Por otra parte, también se puede tener fractura por fatiga de un diente o una porción sustancial de éste, cuando los esfuerzos periódicos de engrane exceden la resistencia a la fatiga por flexión (Hernández, 2002).

### **2.3.3 Falla por fatiga superficial (Picadura)**

Al producirse el engrane entre dientes de un par de engranajes, conductor-conducido, se inducen en los flancos de contacto un estado complejo de esfuerzos de fatiga de tracción, compresión y corte, por la acción simultánea de fuerzas de contacto y movimiento combinado de deslizamiento y rodadura. Cuando estos esfuerzos superficiales repetitivos superan la resistencia a la fatiga por contacto, se inducen grietas superficiales, las cuales al propagarse y unirse provocan desprendimiento de partículas de material en la superficie de los flancos de contacto, ocurriendo así una falla conocida como picado (Hernández, 2002).

### **2.3.4 Falla por flujo plástico.**

Consiste en una deformación plástica excesiva en los flancos de contacto. Por lo general, este tipo de falla está asociada a cargas muy elevadas o temperaturas altas. En engranajes cementados se puede presentar un aplastamiento de la capa endurecida, por ser ésta demasiado delgada para resistir las cargas de contacto, o debido a una dureza deficiente en el núcleo de los dientes para ofrecer el soporte necesario a la capa cementada (Hernández, 2002).

### **2.3.5 Falla por desgaste.**

Desgaste abrasivo se puede presentar en engranajes cuando se encuentran presentes partículas abrasivas entre las superficies de los flancos de contacto. Por lo general este tipo de desgaste es generado por contaminación del lubricante. Cuando se tiene un picado severo las partículas desprendidas pueden causar abrasión (Hernández, 2002).

## **2.4 Análisis espectral**

Las vibraciones son fluctuaciones de un mecanismo o sistema estructural con respecto a una posición de equilibrio. Las vibraciones son iniciadas cuando un elemento inercial es desplazado de su posición de equilibrio debido a una energía que se le imparte al sistema a través de una fuente externa. Una fuerza o momento de restauración hacen que el elemento regrese a su estado de equilibrio (Graham, 2000). En términos simples, una vibración es un movimiento oscilatorio de pequeña amplitud ( $A$ ) con un cierto periodo ( $T$ ) como se muestra en la Figura 2.6.

Todos los cuerpos presentan una señal de vibración en la cual se plasman algunas de sus características. De acuerdo a esto, las máquinas presentan su propia señal de vibración y en ella se encuentra la información de cada uno de sus componentes relacionados con el movimiento, como son: rotores, ejes y cojinetes. Por tanto, la señal de vibración capturada de una máquina significa la suma vectorial de la vibración de cada uno de sus componentes. La base principal de las señales de vibración en el dominio del tiempo son las ondas sinusoidales, este tipo de ondas son las más simples y son la representación de las oscilaciones puras (Arango 2007).

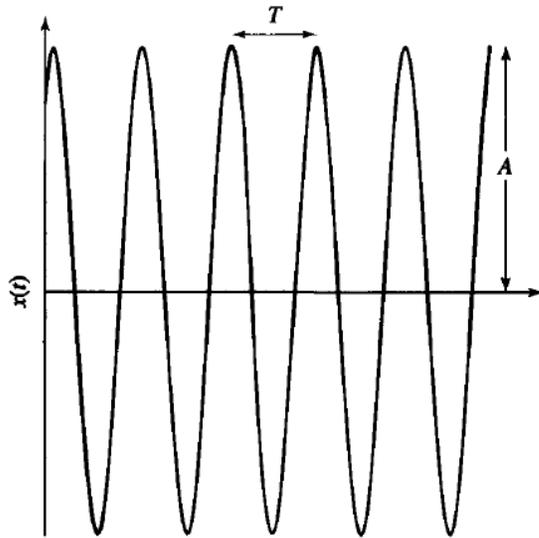


Figura 2.6. Movimiento armónico simple (Fuente: (Akansu y Haddad, 2001))

La amplitud desde el punto de vista de las vibraciones es la cantidad de movimiento que puede tener una masa desde una posición neutral. La amplitud se mide generalmente en valores pico-pico para desplazamiento y valores cero-pico y RMS para velocidad y aceleración (Akansu y Haddad, 2001).

#### 2.4.1 Tipos de Señales

En el análisis de vibraciones, es posible identificar tres tipos de señales: armónicas, periódicas y no-periódicas. A estas últimas también se les conoce como transitorias. Una característica común de estas señales es que su frecuencia y amplitud están definidas para cualquier tiempo  $t$ . Este tipo de señales se conocen como funciones determinísticas. En la Figura 2.7 se muestra una señal armónica, una periódica y una transitoria. Ésta última no varía regularmente con el tiempo; sin embargo, cada vez que ocurra, su forma de onda estará definida. Tal es el caso del arranque de un motor, que tal vez no pudiera presentarse

cíclicamente, pero, cuando sucede, la forma de su onda está determinada. (Lozano y Jáuregui, 2013)

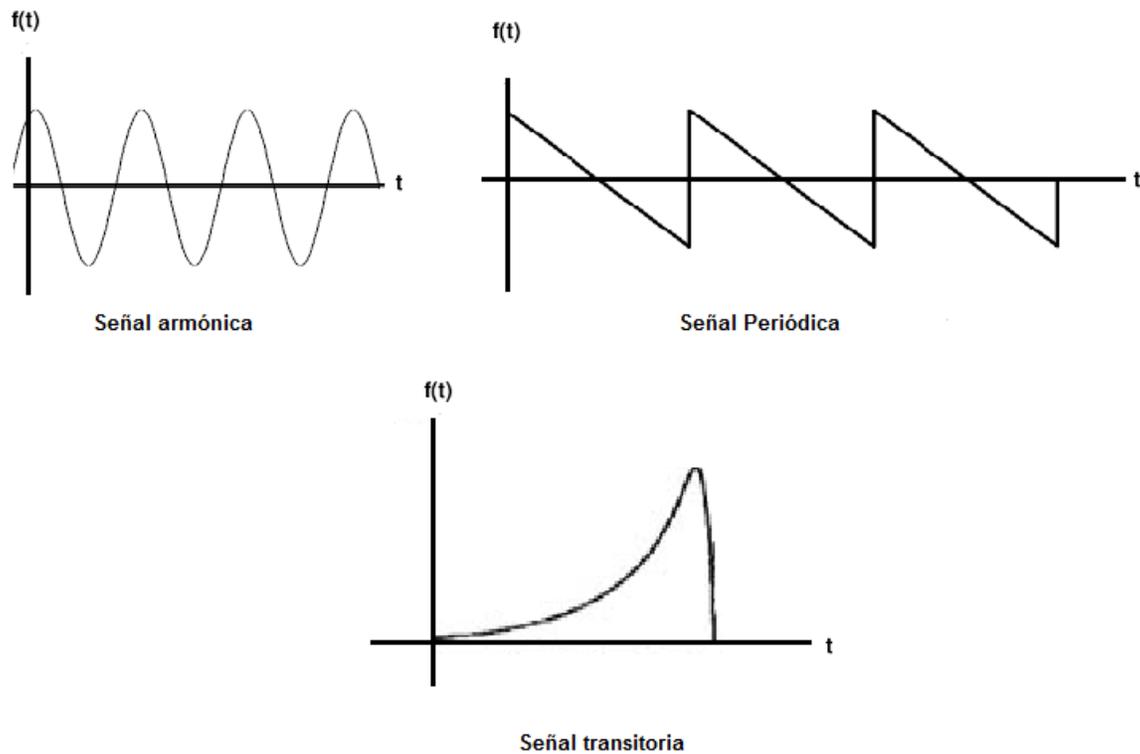


Figura 2.7: Señales determinísticas

#### 2.4.2 Dominio del tiempo y de la frecuencia

Existen otras formas de representar una señal, una de ellas es su representación en el dominio de la frecuencia. En esta representación se puede observar la amplitud de la señal en un eje y la frecuencia en el otro eje, a esta representación se le denomina espectro de frecuencia.

Dependiendo del tipo de señales presentes en la vibración de maquinaria, su análisis será más o menos complejo. Si se tuviera una señal armónica pura, la determinación de la frecuencia y amplitud sería relativamente sencilla y con esto podría identificarse la causa y el efecto que esta vibración estuviera teniendo en la

operación de una máquina. Sin embargo, normalmente, esto no ocurre en la práctica y en cambio se presentan señales aleatorias, periódicas o transitorias.

La gran ventaja del empleo del análisis espectral o análisis de frecuencia en el mantenimiento predictivo de maquinaria es que permite la descomposición de cualquier señal en sus componentes armónicas. Esta descomposición se logra aplicando a la señal en estudio el concepto de las series de Fourier. Si se tiene una señal compleja  $f(t)$  en el dominio de tiempo, o sea, representada en el plano amplitud-tiempo, como la mostrada en la Figura 2.8, se puede obtener una serie de armónicas de diferentes amplitudes y frecuencias, de tal manera que la suma de todas esas señales armónicas dé como resultado la señal inicial. Si se grafican las diferentes componentes de la señal compleja, teniendo en cuenta la frecuencia y amplitud de cada una de ellas en el dominio de la frecuencia, en un plano amplitud-frecuencia, se tendría el espectro de frecuencia de la señal que se analizó. (Lozano y Jáuregui, 2013)

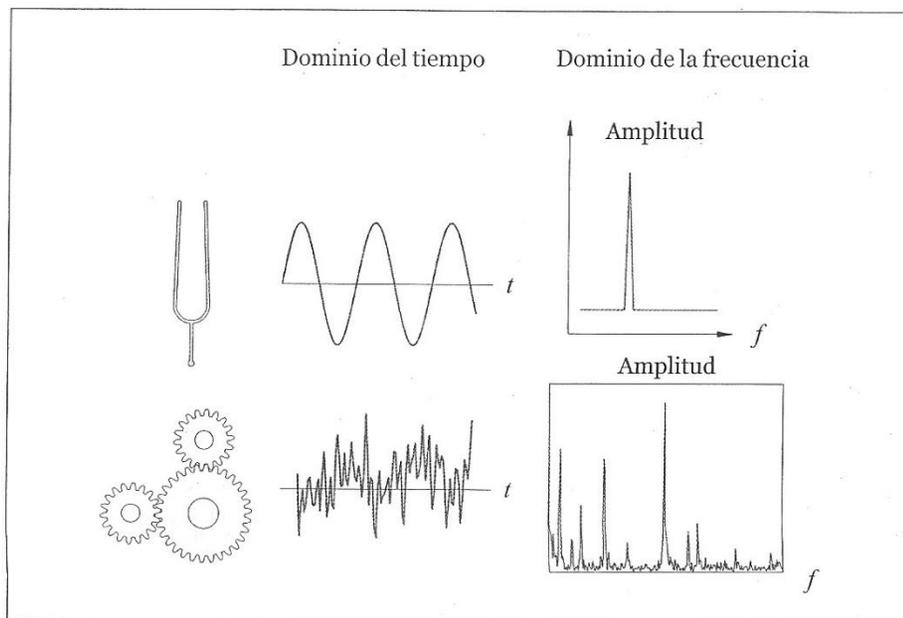


Figura 2.8: Ejemplos de señales en el dominio del tiempo y de la frecuencia  
(Lozano y Jáuregui, 2013)

El matemático Jean Baptiste Fourier (1768-1830) fue quien encontró la forma de representar una señal compleja en el dominio del tiempo por medio de series de curvas sinusoidales con valores de amplitud y frecuencia específicos (Arango, 2007).

La Transformada de Fourier se encarga de transformar una señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia y también es posible obtener la anti-transformada para volver al dominio del tiempo.

### **2.4.3 Transformada de Fourier.**

El análisis de Fourier tiene básicamente cuatro formas (Romero, 2006).

- La serie de Fourier: Transforma una señal infinita periódica en un espectro de frecuencia infinito discrecional.
- La Transformada de Fourier: Transforma una señal continua de tiempo infinito en un espectro de frecuencias continuo infinito.
- La Transformada Discreta de Fourier: Transforma una señal discrecional periódica de tiempo en un espectro de frecuencias discrecional periódico.
- La transformada Rápida de Fourier: Es un algoritmo para calcular de forma sistemática la Transformada discreta de Fourier, además de reducir el número de operaciones en el cálculo.

Los analizadores de espectros que comúnmente se encuentran en el mercado aplican la transformada rápida de Fourier a la señal de vibración adquirida de la máquina, esto no es más que un algoritmo que reduce el número de pasos para el cálculo de la Transformada Discreta de Fourier, luego le calcula todas las series de señales sinusoidales que contiene la señal compleja y por

último las muestra en forma individual en el eje X de la frecuencia, como se muestra en la Figura 2.9.

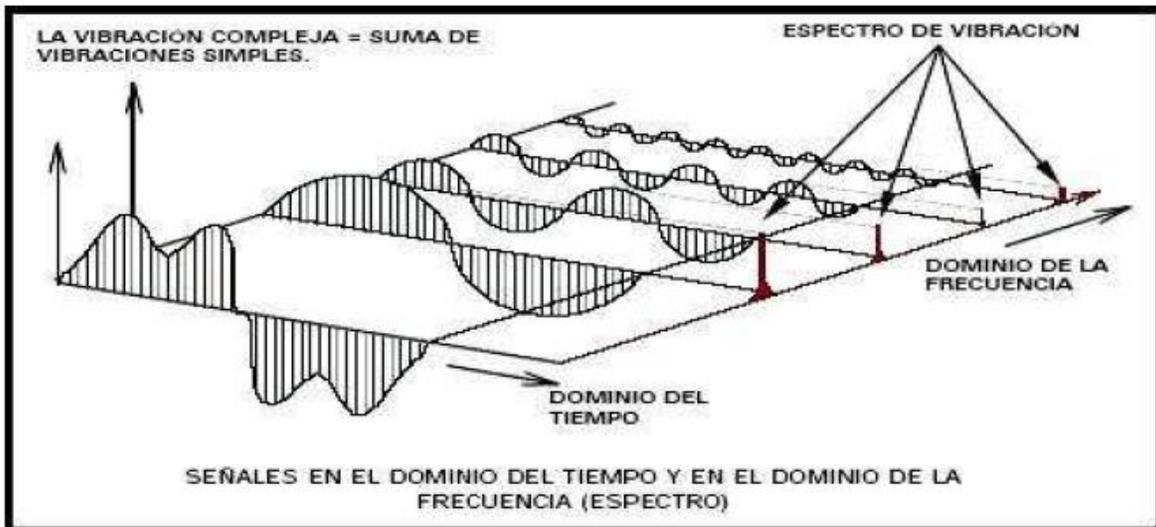


Figura 2.9. Espectro de frecuencia (Fuente: Romero, 2006)

#### 2.4.4 Transformada rápida de Fourier (FFT)

La transformada rápida de Fourier es el método más usado para el estudio de las señales no estacionarias. La idea básica de la FFT es partir la señal inicial en pequeños segmentos en el tiempo y aplicar la Transformada de Fourier a cada segmento para encontrar las frecuencias que existen en esos pedazos, este análisis muestra cómo varía el espectro en el tiempo (Arango, 2007).

La limitación de la FFT está en la imposibilidad de variar el tamaño de la ventana de manera individual para cada segmento.

$$FFT(t', f) = \int [x(t) \cdot \gamma^*(t - t')] * e^{-j2\pi \cdot f \cdot t} dt \quad (5)$$

Donde:

$x(t)$  = Señal original

$\gamma^*(t)$  Función ventana conjugada

En cada instante  $t'$  y frecuencia  $f$  se calcula un nuevo coeficiente de la transformada de Fourier, este proceso está representado en la Figura 2.10.

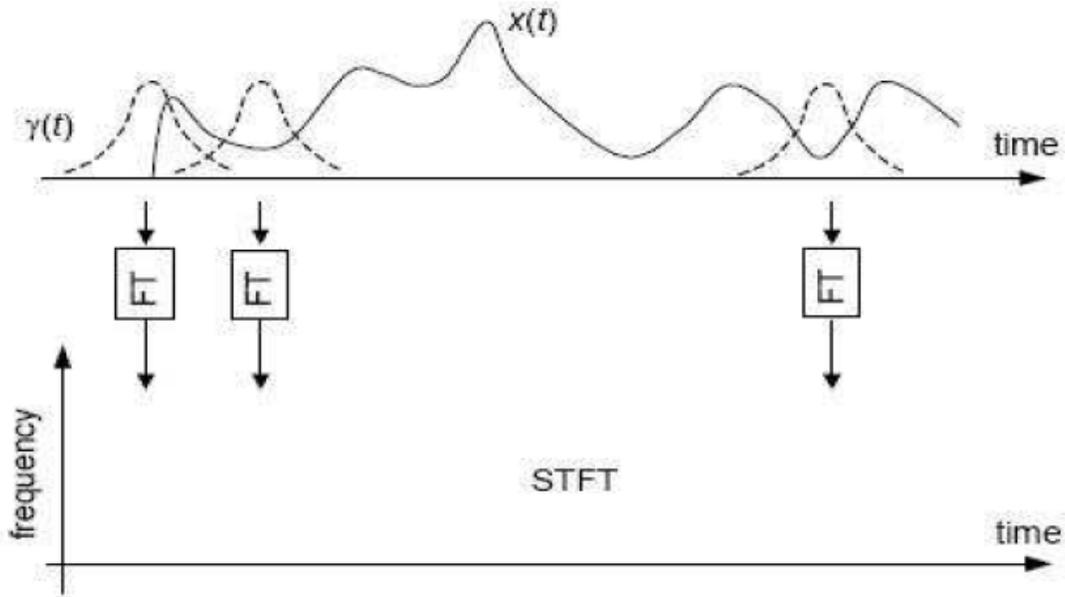


Figura 2.10. Transformada Rápida de Fourier (Fuente: Arango, 2007)

## 2.5 FPGAs

La primera FPGA (siglas de Field Programmable Gate Array: matriz de puertas lógicas programables) aparece en 1985 producida por la compañía XILINX, fundada un año antes, basándose en una idea revolucionaria: combinar la alta densidad y versatilidad de los Gate Arrays (matrices de puertas) con la popularidad y ventajas de los circuitos programables por el usuario (PLDs).

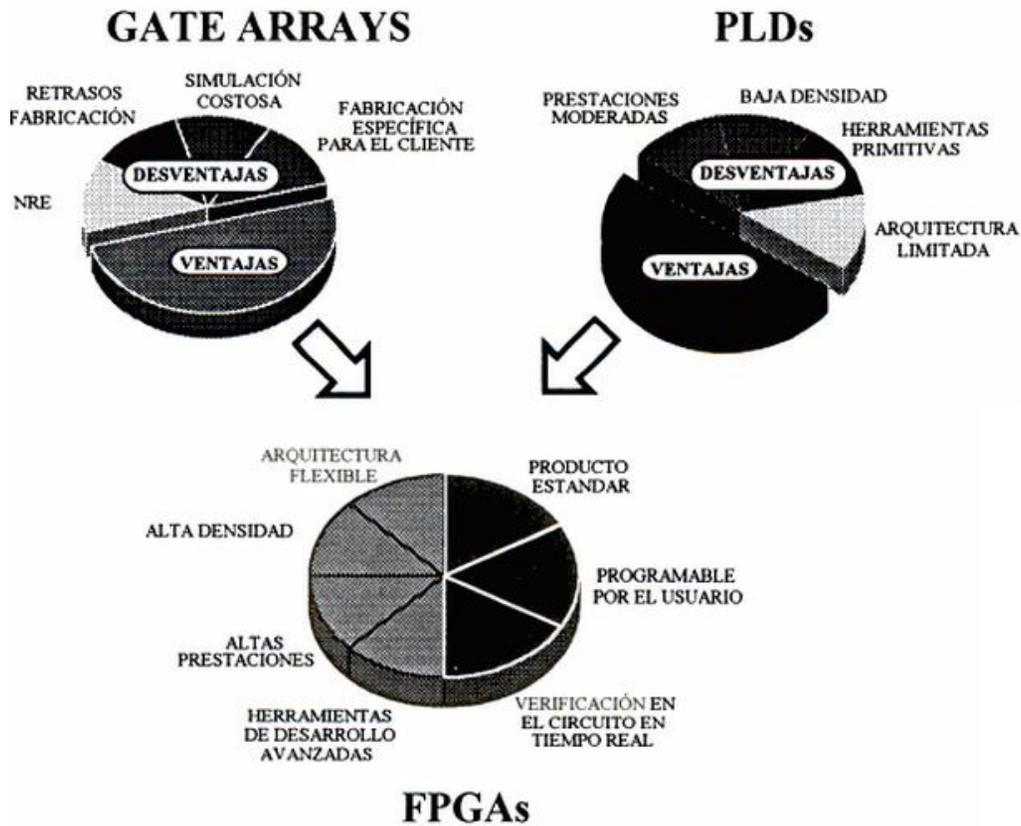


Figura 2.11: FPGA (Fuente: Vera et. Al 1996)

Desde su aparición, la FPGA ha experimentado una importante evolución, tanto en ventas, como en presentaciones (en menos de 3 años se aumentó la densidad 7 veces, la velocidad se multiplicó por 5 y el coste se redujo en un 25% del inicial). Esta aceptación en la industria de la electrónica es debida, en gran medida, a las tendencias actuales, que exigen cada vez mayores prestaciones, integración y fiabilidad, combinadas con un menor costo y consumo (Vera et. Al, 1996).

### 2.5.1 Procesado de señales.

Para comenzar a hablar de procesado de señales primero es importante dar algunos conceptos básicos los cuales ayudarán a comprender mejor el procesamiento.

**Señal:** Magnitud asociada a un fenómeno físico, función de una o varias variables independientes, que puede ser revelada por un instrumento o percibida directamente por el ser humano. En nuestro contexto, esta definición puede simplificarse diciendo que es una "magnitud (eléctrica) cuya variación con el tiempo representa una información".

Ejemplos de señal son la tensión en bornes de un micrófono, el cambio de un semáforo, una sirena de alarma, etcétera. Las señales pueden servir tanto para las comunicaciones entre personas, como entre personas y máquinas o, simplemente, entre máquinas.

**Sistema:** Interconexión de dispositivos o de circuitos (subsistemas) que efectúan algún tipo de operación sobre la señal. Por ejemplo, un osciloscopio, un equipo de HI-FI, un televisor, una red inalámbrica, etcétera.

Como ejemplo de estos conceptos, se presenta la estructura general de un sistema de comunicaciones. Sus elementos básicos, siguiendo el modelo propuesto por Shannon a finales de los años cuarenta, se describen en la Figura 2.12.

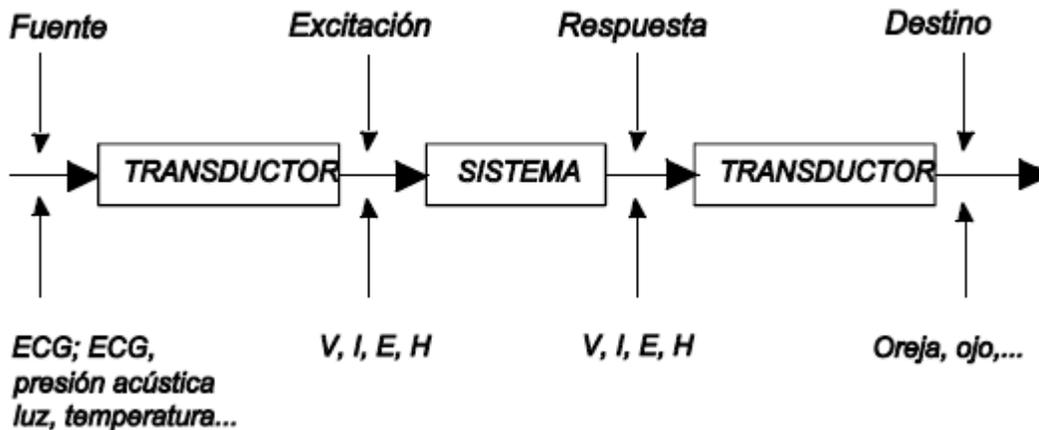


Figura 2.12: Sistema de comunicación (Fuente: Bertran, 2006)

Dentro de un sistema de comunicación pueden presentarse tres tipos de perturbaciones de la señal transmitida: los ruidos, las interferencias y las distorsiones.

**Ruidos:** Son generados por los subsistemas emisor y receptor, por el propio canal o por los medios materiales que los envuelven (ruido propio de los componentes electrónicos, tráfico, ionosfera, entonos industriales...). Son inevitables y de naturaleza aleatoria.

**Interferencias:** Son perturbaciones debidas a la superposición de otras señales procedentes del mismo sistema u otros sistemas cercanos a la señal transmitida (ruido de la red eléctrica, canales de televisión cercanos...). Son evitables con un correcto apantallamiento o limitación de la banda de frecuencia en que se opera, cuando ello es posible.

**Distorsiones:** Son debidas al funcionamiento imperfecto de algún subsistema que cambia la forma de la señal (transistor saturado, dispositivos no lineales...). Es una perturbación asociada a la forma de la señal y, a diferencia de las restantes, desaparece si ésta se anula. No hay distorsión si los subsistemas son lineales y su diseño electrónico es correcto, aunque el uso exclusivo de dispositivos lineales es

poco viable en aplicaciones reales si no es pagando costes adicionales, como el precio de los equipos o el consumo energético (Bertran, 2006).

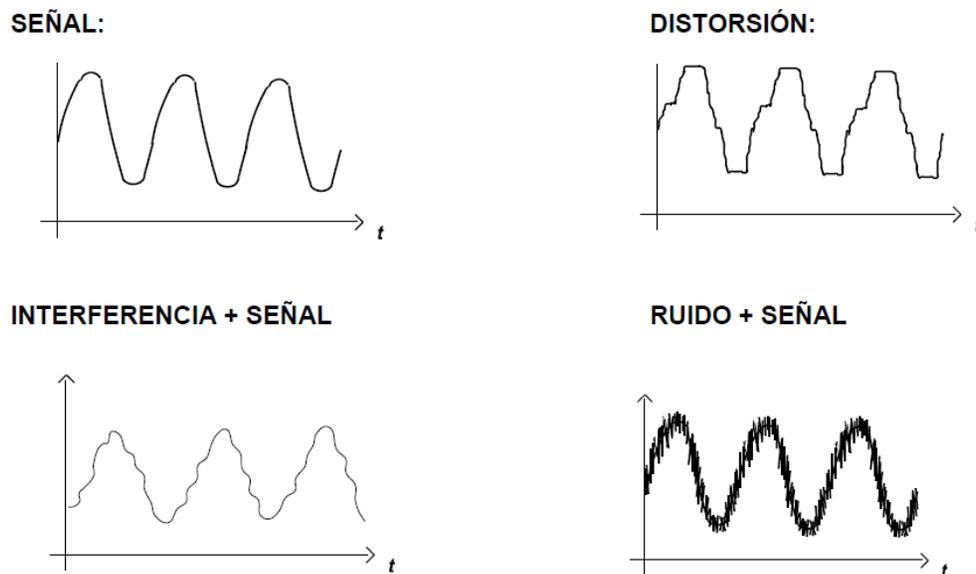


Figura 2.13: Tipos de perturbaciones (Fuente: Bertran, 2006)

Una vez que se conocen los conceptos fundamentales y los tipos de perturbaciones que pueden afectar a una señal, veremos algunos de los procesamientos básicos de señales, como son: filtrado, modulación y codificación.

**Filtrado:** Elimina las contaminaciones de la señal que están fuera de la banda de paso del filtro, que se supone ajustada a la banda de interés de la señal. Según si el filtro es analógico o digital, se habla de procesado de la señal analógica o digital.

**Modulación:** Desplazamiento en frecuencia de la señal a una zona menos contaminada (propiedad de modulación de la transformada de Fourier). Es otro ejemplo de procesado de la señal.

**Codificación:** Es otra acción de procesamiento de la señal en que, después de un proceso de cuantificación de ésta, se asigna una palabra-código a cada nivel cuántico. Si a esta palabra se le añade información (bits) adicional, es posible corregir errores. Por ejemplo, si se conviene que el código 111 corresponde al color verde y el 000 al azul, y por algún problema en el canal se ha recibido el código 110, puede decidirse, con mayor probabilidad de acierto, que se ha transmitido el código correspondiente al color verde (ya que dos de los tres símbolos son correctos) (Bertran, 2006).

### 2.5.2 Radix FFT

La transformada discreta de Fourier de N puntos (TDF) está definida en las siguientes ecuaciones

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_N^{kn} \quad (6)$$

$$W_N^k = \cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right) - j\sin\left(\frac{2\pi k}{N}\right) \quad (7)$$

Donde  $x(n)$  es la señal de entrada en el dominio del tiempo y  $X(k)$  es la TDF.  $n$  representa el indicador discreto en el dominio del tiempo, mientras  $k$  es el indicador normalizado en el dominio de la frecuencia. Un ejemplo grafico de una radix 2 se muestra en la Figura 2.14.

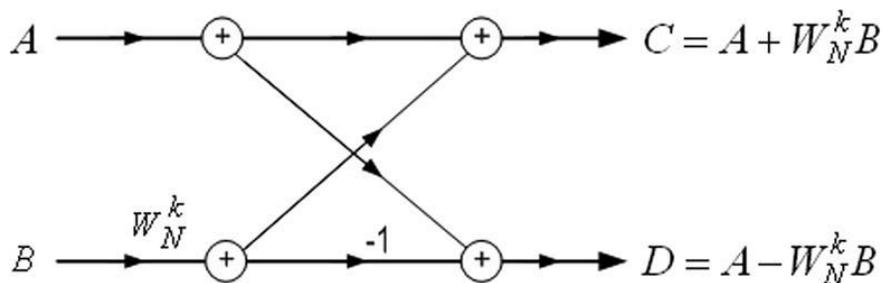


Figura 2.14. Radix 2

## Capítulo 3

### 3. Metodología

En este capítulo se describen la metodología que se siguió en esta investigación para el cumplimiento de los objetivos de este proyecto, para la correcta identificación de fallas mecánicas ocurridas en una caja de engranes dañada acoplada a un motor y a una carga. En la Figura 3.1 se muestra un diagrama muy general de las etapas del trabajo.

La primera parte del proyecto fue el acondicionamiento de un banco de pruebas eléctricas y mecánicas para el monitoreo de un motor de inducción conectado en serie a una caja reductora de engranes y a una carga, dicho banco fue acondicionado para proveer 220 volts de manera trifásica a tensión plena o con una variación de frecuencia.

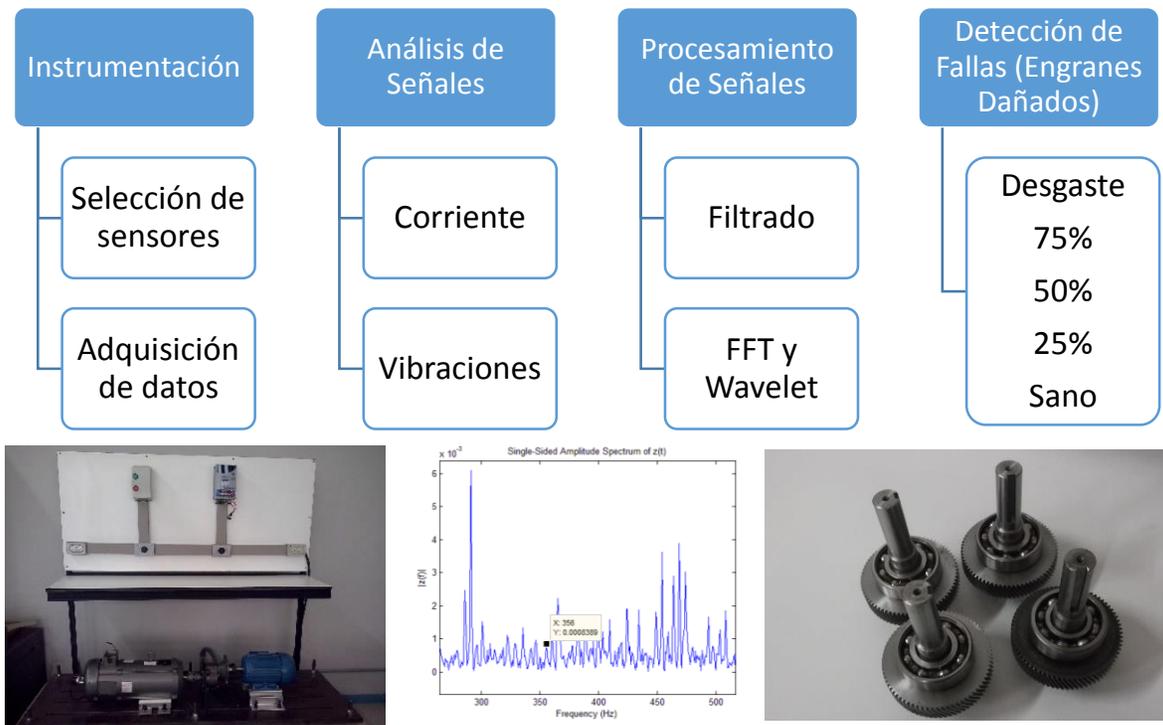


Figura 3.1. Diagrama general de la Metodología del Proyecto

Una vez que se acondicionó el sistema eléctrico y mecánico MCC se realizó la instrumentación con sensores de corriente y vibraciones para la instrumentación del sistema, la siguiente etapa fue analizar las señales (corriente y vibraciones) para el procesamiento en software en busca de algún patrón que permitiera clasificar el tipo de falla, en esta parte se utilizan la transformada de Fourier para un análisis general de las frecuencias y la transformada wavelet para una búsqueda más fina en el espectro, una vez identificada la falla y el método de análisis adecuado para la detección de la anomalía se implementó en una tarjeta FPGA para la cuantificación de la falla (desgaste de engranes). A continuación se describirá de manera detallada cada etapa del proceso.

### 3.1 Acondicionamiento de banco de pruebas

Esta etapa consiste en la construcción y acondicionamiento de un tablero eléctrico donde se montaron los componentes necesarios para arrancar a plena tensión y con frecuencia variable un motor de inducción, el diagrama eléctrico y de control para el arranque y paro de un motor a tensión plena se muestra en la Figura 3.2, además el banco de pruebas cuenta con un riel en el cual se alinearon los tres componentes principales del sistema mecánico, motor, caja de engranes y carga, como se muestra en la Figura 3.3, esto para simular procesos de producción industriales los cuales es común utilicen motores de inducción y reductores de velocidad, las características de los elementos mencionados se muestran en la Tabla 1.

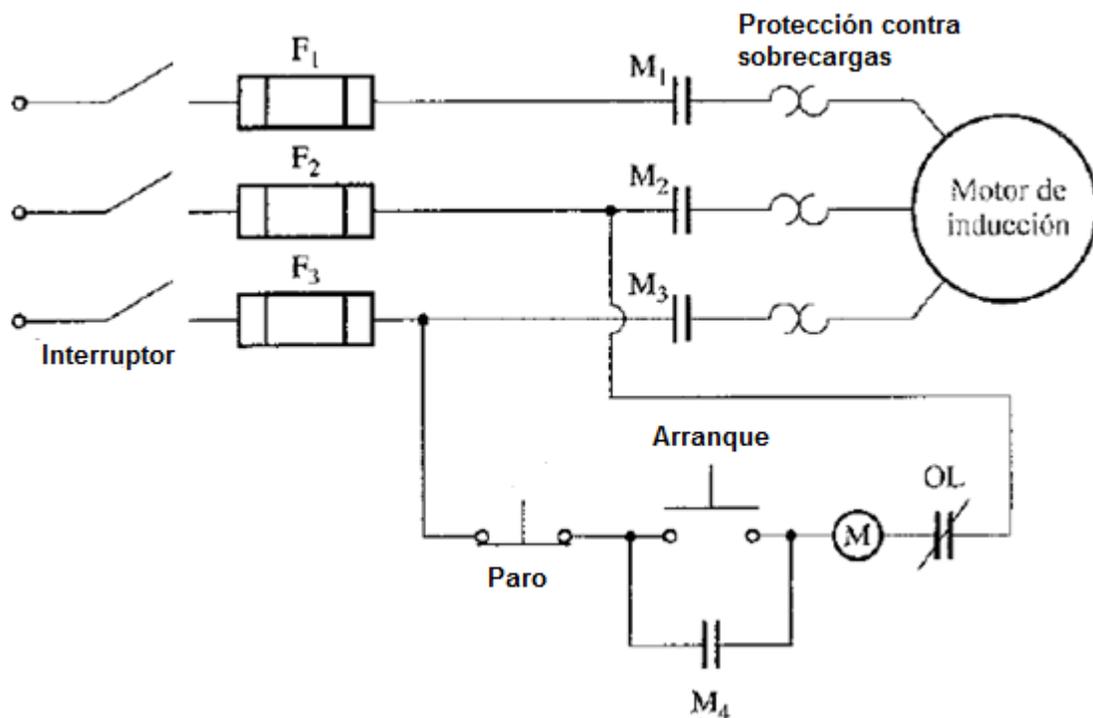


Figura 3.2. Diagrama eléctrico para arranque a plena tensión de motor trifásico

Tabla 1: Datos del sistema mecánico

Motor de Inducción				
Potencia	Alimentación	Conexión	Factor de Potencia	RPM
2 HP	220 V	Estrella (Y)	0,87	3435
Cajas de engranes				
Reducción		Tipo de engranes		
4 a 1		Corona (72 dientes) Piñon (18 dientes) Elicoidales		
Generador				
Potencia		RPM		
5 Hp		3600		

El banco de pruebas antes mencionado fue en donde se indujeron diferentes tipos de fallas mecánicas (desgaste de engranes) para medirlas y clasificarlas de acuerdo a algunos patrones que se mencionaran más adelante. La selección de los elementos mostrados en la Tabla 1 Se eligieron en base a trabajos anteriores que demuestran ser comunes en el sector industrial en Pequeñas y Medianas Empresas (PYME's). La alineación del sistema MCC se realizó en base a conocimientos empíricos.

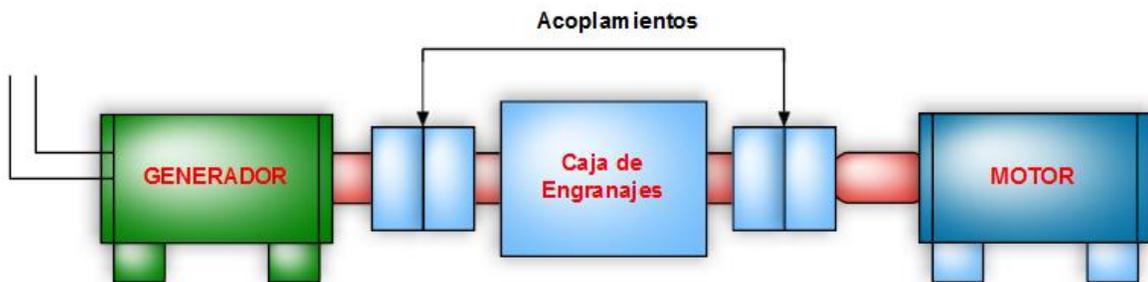


Figura 3.3. Sistema mecánico.

### 3.2 Instrumentación

La instrumentación se realizó primeramente con la colocación de sensores de corriente, velocidad y de vibraciones, en el sistema de la Figura 3.3, el acelerómetro se instaló en la caja de engranes y el amperímetro se colocó en cada una de las líneas de alimentación, esta distribución de sensores se muestra en la Figura 3.4.

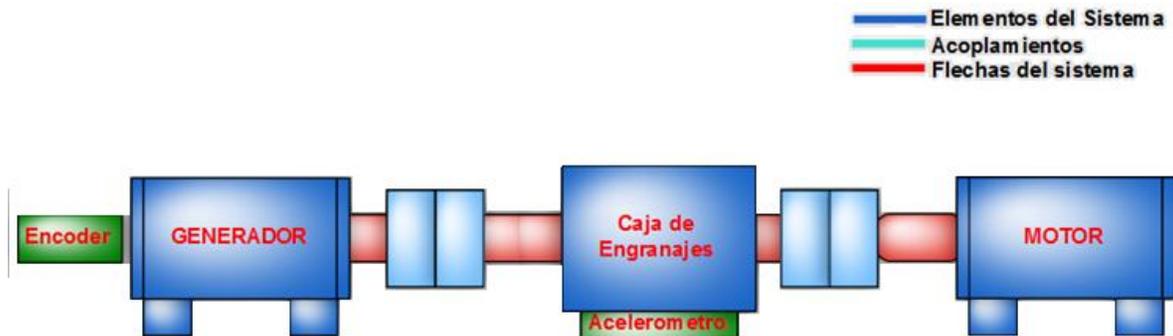


Figura 3.4. Colocación de Sensores

Una de las prioridades de este sistema es identificar el desgaste gradual de los engranes de la caja reductora y su influencia sobre el motor de inducción por tal motivo los sensores fueron enfocados a medir los efectos provocados por dicha caja y es así como se determina la distribución de los sensores, estando conscientes que las vibraciones que se están censando no son provocadas solamente por los engranes sino por todos los componentes que se encuentran vibrando en el sistema, por mala alineación, baleros desgastados, etc, las cuales se omitirán en la medida de lo posible enfocándonos en la caja reductora. Las características de los elementos de medición se muestran en la Tabla 2, donde el acelerómetro es configurado con lenguaje de descripción de hardware para medir  $\pm 58.86 \text{ m/s}^2$  ( $\pm 6$  gravedades) a una frecuencia de 3 KHz, con una transmisión serial SPI y una resolución de 12 bits.

Tabla 2: Datos de Sensores

Acelerometro					
Modelo	Resolución	Frecuencia de op	Características		
LIS3L02AS4	12 bits	3 KHz	Triaxial	6 m/s <sup>2</sup> (g)	SPI
Encoder					
Modelo	Cuentas	V aliment	Frecuencia de respuesta		
E40H8	1000	5 V	300KHZ		

Una vez colocados los sensores se adquieren las señales de cada instrumento de medición para determinadas situaciones y fallas específicas como las que se muestran en la Tabla 3, estas pruebas se realizan múltiples veces (5 ocasiones para cada una) para corroborar la precisión de la medición.

Tabla 3: Casos de Interés

Desgaste de Engrane 0%
Desgaste de Engrane 25%
Desgaste de Engrane 50%
Desgaste de Engrane 75%

Desgaste de engranes.- Para esta prueba se tiene una caja de engranajes helicoidales piñón corona con ejes paralelos con reducción 4:1, como se muestra en la Figura 3.5, con cuatro juegos de estos engranes para representar 4 estados de desgaste, del 0, 25, 50 y 75 porciento.

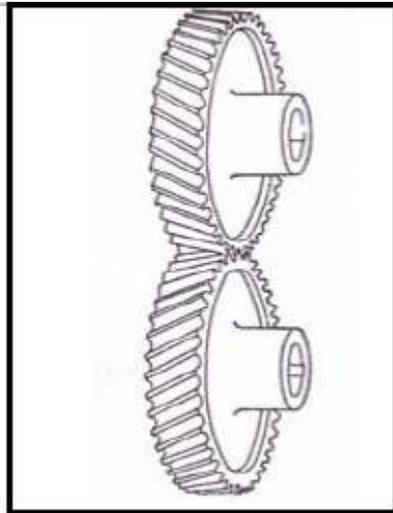


Figura 3.5. Engranés Helicoidales con ejes paralelos.

El desgaste en la caja de engranajes mencionado en la tabla 2, es únicamente en la corona y sobre sus 72 dientes, dicho desgaste se identifica de mejor manera en la Figura 3.6 donde se puede apreciar que a partir de la cresta se mide el desgaste gradual del engrane.

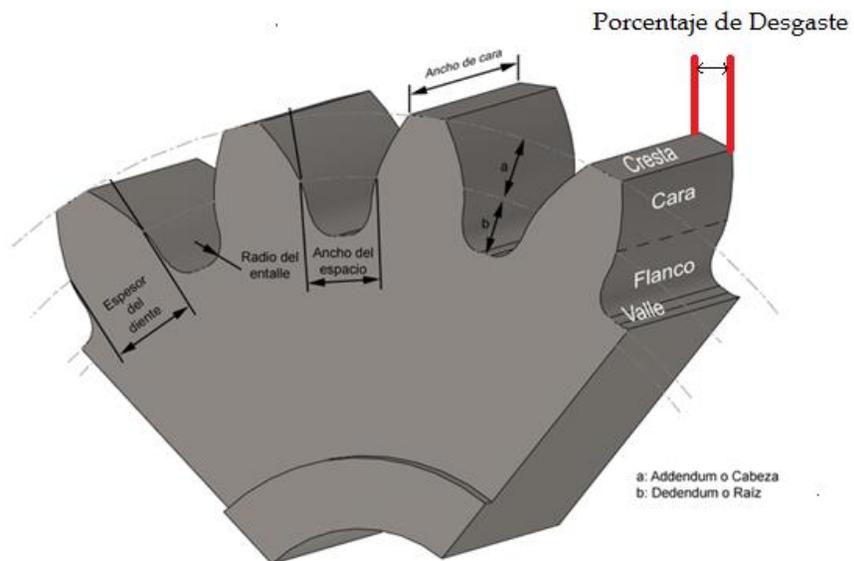


Figura 3.6. Dientes de Engranaje (Corona)

### 3.3 Análisis de Señales

Una vez que se obtienen las señales de los sensores colocados en el banco de pruebas se procede a analizarlas para identificar cada una de los casos mostrados en la Tabla 3, para después mediante algún procesamiento identificar patrones que identifiquen las anomalías.

#### 3.3.1 Análisis de Vibraciones

Esta etapa es realizada en MATLAB® utilizando los datos obtenidos de la instrumentación para analizar los espectros en frecuencia del acelerómetro y del amperímetro colocados en la caja de engranajes para procesar y encontrar patrones que indiquen el grado de desgaste en esta parte del sistema.

El análisis previo de las señales es llevado a cabo, como se menciona anteriormente, en MATLAB® donde se utiliza primeramente una ventana Hann que ayuda a limpiar de ruido la señal de vibraciones y posteriormente se toman 4096 datos en estado estable para aplicar el algoritmo de la transformada rápida de Fourier que tiene por default el software pero que sigue los principios mostrados en las ecuaciones 8 y 9.

$$X(k) = \sum_{j=1}^N x(j) \omega_N^{(j-1)(k-1)}$$
$$x(j) = (1/N) \sum_{k=1}^N X(k) \omega_N^{-(j-1)(k-1)}$$
(8)

$$\omega_N = e^{(-2\pi i)/N}$$

Donde la frecuencia de muestreo es de 3000 Hz que es la máxima soportada por el acelerómetro y la ventana de frecuencias está dada por el código

mostrado en los anexos teniendo así un mapa de frecuencias con los espectros de las señales en un rango de 0 a 1500 Hz (por el teorema de muestreo de Nyquist).

### **3.3.2 Análisis de Corriente**

De manera similar al análisis echo a las vibraciones, se analizan las señales obtenidas de los sensores de corriente para buscar mediante análisis de Fourier patrones frecuenciales que determinen una clara diferencia entre cada grado de desgaste para su detección y clasificación.

### **3.4 Procesamiento de Señales en Hardware**

Para el procesamiento de señales en hardware se genera la herramienta principal que es la Radix 2, la cual no es más que una operación de multiplicación acumulación, por lo que se utiliza el módulo de VHDL denominado MAC que realiza esta operación, la figura muestra el código en HDL empleado para la implementación de dichas operaciones.

```

--                               Unidad de Multiplicación Acumulación
-----

library IEEE;                               -- Librería estandar de IEEE
use IEEE . STD_LOGIC_1164 .all;             -- Paquete estandar 1164 de IEEE
use IEEE . NUMERIC_STD . all ; --! Estandar numerico IEEE

entity ex_GMac is
  generic (ex : integer := 8; --! Parte entera de la entrada X
    fx : integer := 16; --! Parte fraccionaria de la entrada X
    ec : integer := 8; --! Parte entera de coeficiente C
    fc : integer := 0; --! Parte fraccionaria del coeficiente C
    g : integer := 4 --! Guarda ( $g = \log_2(N)$ );      N -- Número de acumulaciones
  );
port (
  CLK : in STD_LOGIC ;
  OPM : in STD_LOGIC_VECTOR (1 downto 0); --! Selector de la MAC

  X : in STD_LOGIC_VECTOR (ex+fx -1 downto 0); --! Datos de Entrada
  --! formato ex.fx
  C : in STD_LOGIC_VECTOR (ec+fc -1 downto 0); --! Coeficientes
  --! formato ec.fc
  Y : out STD_LOGIC_VECTOR (ex+fx -1 downto 0) --! Datos de Salida
  --! formato ex.fx
);
end ex_GMac ;

architecture ex_GMac of ex_GMac is --! Arquitectura de la MAC

  component ex_GLimiter
    generic (er : integer := 10;

  fr : integer := 16;
  ey : integer := 7;
  fy : integer := 11);
  port (
  RAW : in STD_LOGIC_VECTOR (er+fr -1 downto fr -fy -1);
  LIM : out STD_LOGIC_VECTOR (ey+fy -1 downto 0));
  end component ;

  signal R : std_logic_vector (ex+fx -1 downto 0);
  signal MUL : std_logic_vector (ex+ec+fx+fc -1 downto 0);
  signal XMUL ,S : std_logic_vector (g+ex+ec+fx+fc -1 downto 0);
  signal Qn ,Qp : std_logic_vector (g+ex+ec+fx+fc -1 downto 0);
begin

```

```

signal Qn ,Qp : std_logic_vector (g+ex+ec+fx+fc -1 downto 0);
begin

MUL <= std_logic_vector ( signed (X)* signed (C)) when rising_edge (CLK );
XMUL (g+ex+ec+fx+fc -1 downto ex+ec+fx+fc) <= ( others => MUL(ex+ec+fx+fc -1));
XMUL (ex+ec+fx+fc -1 downto 0) <= MUL ;
S <= std_logic_vector ( unsigned (Qp )+ unsigned ( XMUL ));

--! Limitador para ajustar la salida al formato (g+ ex+ec .fx+fc ) to (ex .fx)
Limit : ex_GLimiter generic map (g+ex+ec ,fx+fc ,ex ,fx)
port map (Qp(g+ex+ec+fx+fc -1 downto fc -1) ,R);

Y <= R when rising_edge ( CLK );

Mux : process (OPM ,Qp ,S)
begin
if OPM (1)= ' 1 ' then
Qn <= ( others => ' 0 ' );
elsif OPM (0)= ' 1 ' then
Qn <= S;
else
Qn <= Qp;
end if;
end process ;

Qp <= Qn when rising_edge ( CLK );
end ex_GMac ;

```

Figura 3.7. Código HDL para MAC genérica

El código muestra la descripción en Hardware del módulo genérico para el proceso de multiplicación acumulación con el cual se construye la Radix, no es más que un módulo de multiplicación y otro de acumulación los cuales van multiplicando punto a punto la señal con un conjunto de parámetros (coeficientes).

Para la generación de esos parámetros se creó una memoria en donde se guardaron estos valores ya pre-calculados, que no son otra cosa que el resultado de la representación compleja en senos y cosenos del parámetro  $W_N^k = \cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right) - j\text{sen}\left(\frac{2\pi k}{N}\right)$ .

# Capítulo 4

## 4. Pruebas y resultados

En este capítulo se presentan las pruebas realizadas para la de detección y clasificación de cada una de las fallas en engranes para los caso de interés mostrados en la Tabla 4, así como los resultados, tanto en software como en hardware, que se obtuvieron de dichas pruebas, a continuación se describen las características y condiciones necesarias para la adquisición y el análisis de las señales.

Las características para el análisis de corriente y vibraciones son las mostradas a continuación:

- Frecuencia para sensor de aceleración (LIS3L02AS4) de 3000 Hz
- Frecuencia para adquisición de corriente de 6000 Hz
- La alimentación del motor fue con un variador de frecuencias a 20 y 65 Hz
- Las pruebas se realizaron para muestras de 4096 datos de la señal en estado estable y con una previa ventana Hann sobre la señal.

- Se tomaron 5 pruebas bajo estas condiciones y se promediaron sus espectros para obtener una resultante, solo se muestran los ejes más relevantes de cada prueba.
- En las gráficas de los espectros se etiquetan algunas de las frecuencias de interés.

Tabla 4: Matriz de Pruebas

Matriz de Pruebas		Nivel de desgaste			
		Sano 0%	Desgaste 25%	Desgaste 50%	Desgaste 75%
Frecuencia de Operación	20 Hz	5 pruebas	5 pruebas	5 pruebas	5 pruebas
	65 Hz	5 pruebas	5 pruebas	5 pruebas	5 pruebas

#### 4.1 Engrane Sano

Para cada una de las condiciones de desgaste se realizaron dos pruebas diferentes, en cuanto a la frecuencia de operación del sistema se refiere, una de ellas a 20 y la otra a 65 Hz, esto con la finalidad de identificar si las fallas se visualizan mejor a altas o a bajas frecuencias.

Tabla 5. Frecuencias de engranaje 0% de desgaste

F de operación (Hz)	Encoder (RPM)	F Piñón (Hz)	F Engranaje (Hz)
20	1177	19.62	<u>353.23</u>
65	3843	64.05	<u>1152.92</u>

### 4.1.1 Análisis de vibraciones 20 Hz

Para esta prueba a baja frecuencia la señal de interés en el espectro de frecuencias es muy tenue sin embargo es más obvia la diferencia entre cada uno de los desgaste haciendo más fácil la clasificación de la falla.

En la gráfica de la Figura 4.1, podemos observar la magnitud de la frecuencia de engranaje y a sus lados las bandas laterales que se encuentran separadas, 5 Hz aproximadamente, de  $F_{ENG}$  como lo indica la teoría, ya que esos 5 Hz corresponden a la frecuencia con que está operando la corona debido a la reducción 4:1 ( $19.62 \text{ Hz}/4 = 4.905 \text{ Hz}$ ). Estas magnitudes serán tomadas en cuenta más adelante en una comparativa con respecto a los otros grados de desgaste.

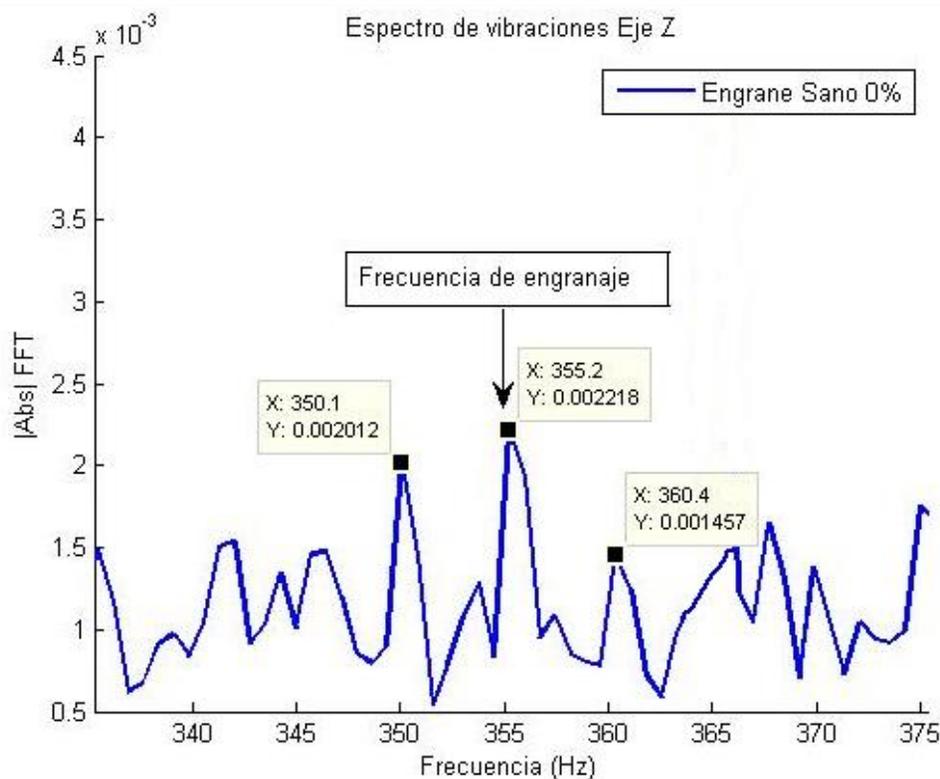


Figura 4.1. Espectro de vibraciones engrane sano 20 Hz

Una de las principales limitantes para el análisis de las señales de vibración fue la frecuencia de muestreo del acelerómetro, dado que sólo tenemos la capacidad de muestrear a 3000 Hz, nuestra ventana de análisis de frecuencias se ve limitada a la mitad, 1500 Hz, con base en el teorema de muestreo de Nyquist. Para este caso de prueba a 20 Hz, tenemos la posibilidad de analizar el segundo armónico 2FE que se muestra en la Figura 4.2.

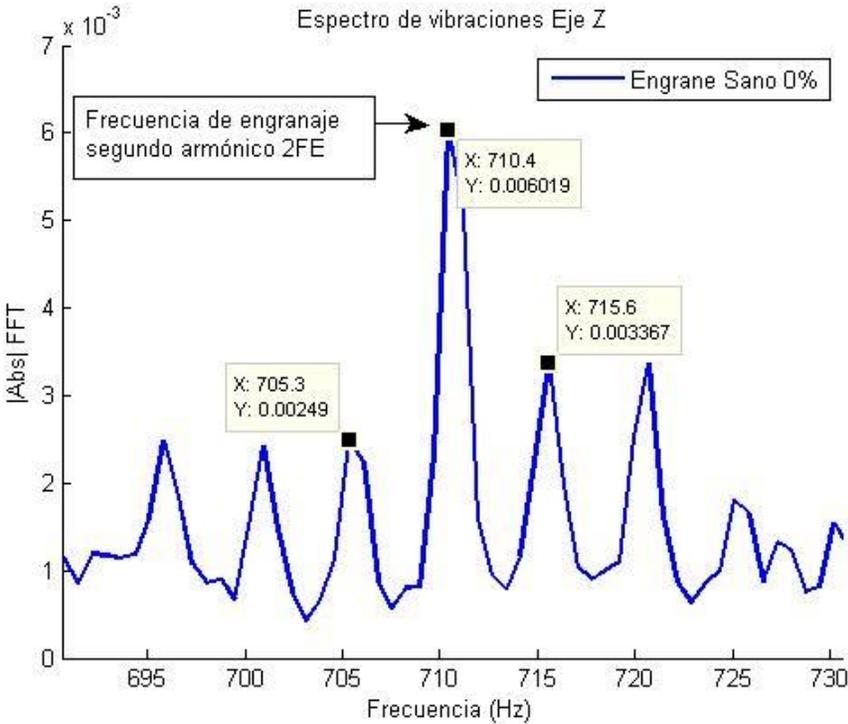


Figura 4.2. Espectro de vibraciones engrane sano 2FE 20 Hz

Al igual que para el primer armónico podemos apreciar la frecuencia de engranaje pero ahora correspondiente al segundo armónico, 2FE ( $2 \times 355.23 \text{ Hz} = 710.46 \text{ Hz}$ ), con sus respectivas bandas laterales de 5 Hz aproximadamente.

### 4.1.2 Análisis de vibraciones 65 Hz

En esta prueba la condición del engrane es de un desgaste del 0% por lo que en la Figura 4.3 se muestra de manera muy tenue la frecuencia de vibración de engranaje que sería la multiplicación de los dientes del piñón por la frecuencia fundamental que en este caso es de 64.05 Hz teniendo que la frecuencia de interés es:

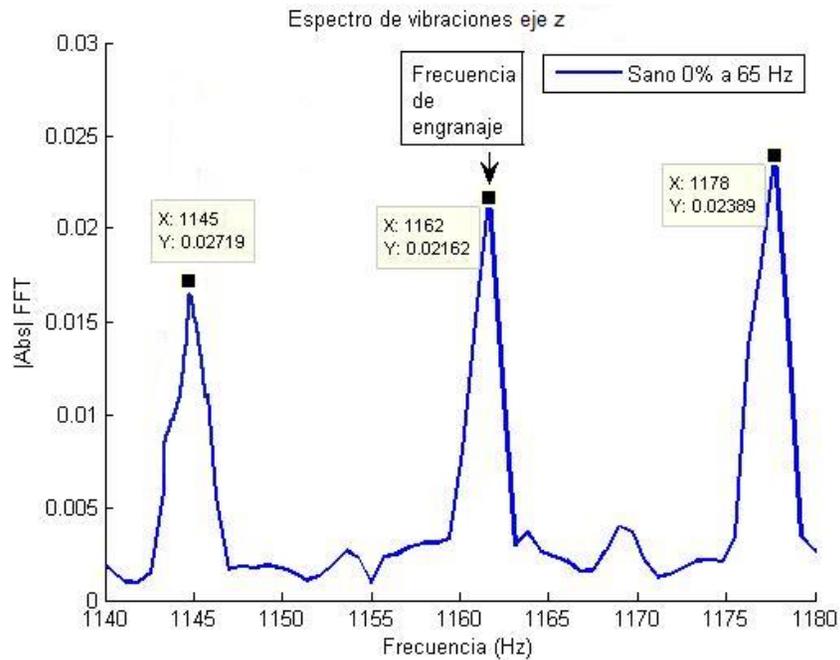


Figura 4.3. Espectro de vibraciones engrane sano 65 Hz

En esta prueba fue más difícil encontrar la frecuencia de engranaje ya que se encuentra desfasada debido a una mala alineación o excentricidad en el sistema, las bandas laterales corresponden a la frecuencia con la que gira el generador ( $64.05\text{Hz}/4 = 16$ ). Bajo estas condiciones, a 65 Hz, no fue posible determinar un patrón que permitiera clasificar los niveles de desgaste en los engranes.

## 4.2 Engrane con 25% de desgaste

Para las pruebas con el 25% de desgaste se realizaron 5 pruebas de diez segundos cada una en estado estable, y se promediaron para obtener un solo espectro de frecuencias para cada eje y para cada frecuencia, al igual que el engrane sano, se realizaron pruebas a 20 y a 65 Hertz. En la tabla se muestran las frecuencias de engranaje correspondientes con este desgaste.

Tabla 6. Frecuencias de engranaje 25% de desgaste

<b>F de operación (Hz)</b>	<b>Encoder (RPM)</b>	<b>F Piñón (Hz)</b>	<b>F Engranaje (Hz)</b>
<b>20</b>	1183	19.72	<u>355.05</u>
<b>65</b>	3857	64.29	<u>1157.24</u>

### 4.2.1 Análisis de vibraciones 20 Hz

El estudio de las vibraciones del sistema, a bajas frecuencias, resulta ser más apropiado para la identificación del desgaste de los engranes, principalmente apreciadas en el eje z o radial. La frecuencia de engranaje está en función de las revoluciones por minuto a las que gira el sistema y esta a su vez representa la frecuencia real a la que gira. Los datos más importantes se muestran en la Tabla 6

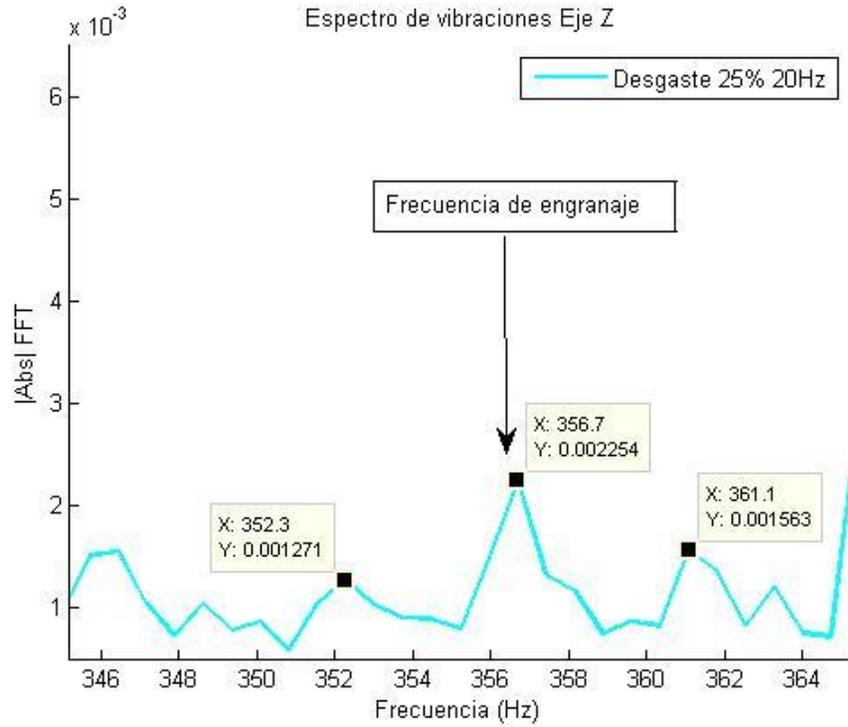


Figura 4.4. Espectro de vibraciones engrane desgastado 25% 20 Hz

En la Figura 4.4 podemos identificar claramente la frecuencia de engranaje FE, y sus bandas laterales de 5 Hz, más adelante se toma en cuenta la amplitud de estas frecuencias para determinar si se puede o no la clasificación del desgaste de los engranes.

En este caso de estudio, dado que la frecuencia de operación es baja, podemos observar, en el espectro de frecuencia, el segundo armónico de la frecuencia de engranaje, como se muestra en la Figura 4.5

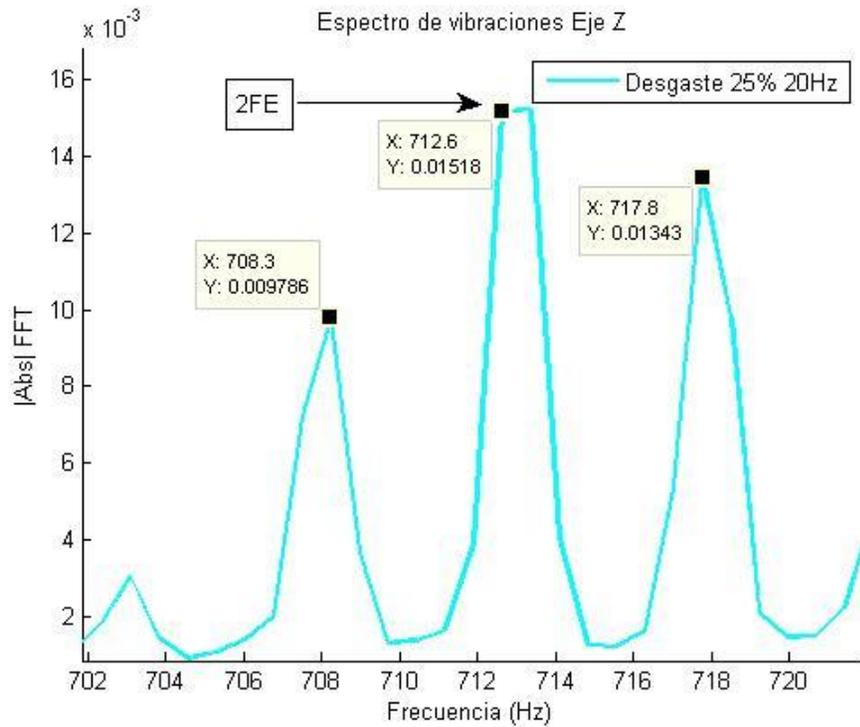


Figura 4.5. Espectro de vibraciones engrane sano 2FE 20 Hz

#### 4.2.2 Análisis de vibraciones 65 Hz

Para el desgaste del 25% se aprecia una pequeña diferencia en la magnitud de la frecuencia del piñón lo que indica que efectivamente se encuentra vibrando más debido al daño sufrido por dicho desgaste, la Figura 4.6 muestra dicho incremento, donde podemos observar un incremento de la amplitud de FE con respecto al engrane sano.

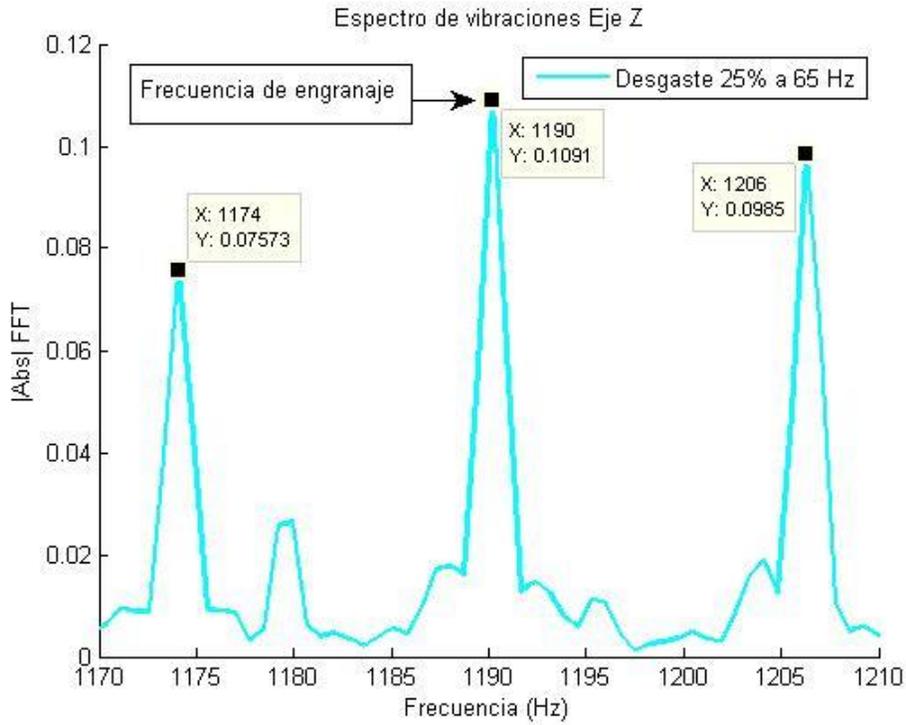


Figura 4.6. Espectro de vibraciones engrane desgastado 25% 65 Hz

En la gráfica se observa que las bandas laterales corresponden a la frecuencia de engranaje, ya que se encuentran separadas ( $64.29/4 = 16.07$  Hz), que es la frecuencia a la que gira la corona del engrane debido a la reducción 4:1.

### 4.3 Engrane con 50% de desgaste

A continuación se muestra el análisis realizado a las vibraciones producidas mientras estuvo montado el engrane con 50 % de desgaste, al igual que los casos anteriores, el eje z es donde más claras se observan las frecuencias de engranaje y por ese motivo son las que analizamos en las figuras siguientes. En la tabla se muestran las frecuencias de interés tanto para las pruebas a 20 Hz como a 65 Hz.

Tabla 7. Frecuencias de engranaje 50% de desgaste

F de operación (Hz)	Encoder (RPM)	F Piñón (Hz)	F Engranaje (Hz)
20	1179	19.65	353.81
65	3849	64.16	1154.97

#### 4.3.1 Análisis de vibraciones 20 Hz

Para esta prueba a bajas frecuencias la señal de interés está dada por la ecuación mostrada  $F_{ENG} = F_{piñón} * No\ de\ dientes = 353.81\ Hz$  que se observa en la Tabla 7, en donde la frecuencia real de operación del motor es de 19.65 Hz, y el número de dientes del piñón es de 18.

En la Figura 4.7 se observa como dentro del espectro de vibraciones, medido sobre el eje z, podemos encontrar claramente la frecuencia de engranaje debida al golpeteo que tienen los dientes tanto del piñón como de la corona, a la hora de estos estar girando a cierta velocidad angular, también podemos observar sus bandas laterales debidas a la frecuencia a la que se encuentra girando la corona ( $19.65Hz/4 = 4.91\ Hz$ ). Las amplitudes de estas frecuencias se comparan en la Tabla 9, que es el resumen de las pruebas donde podemos discriminar entre un grado de desgaste y otro.

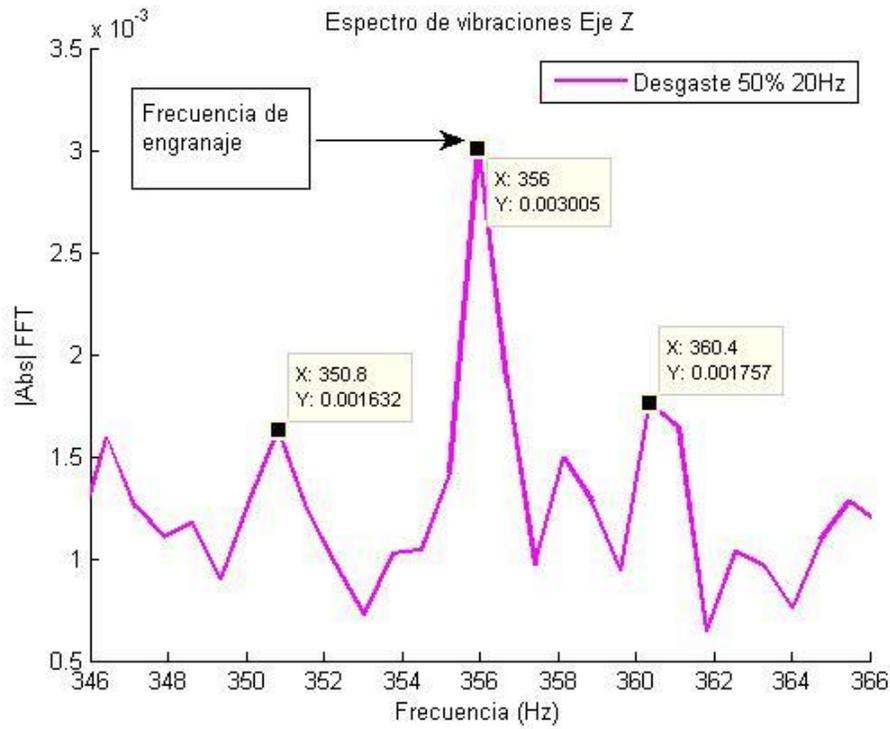


Figura 4.7. Espectro de vibraciones engrane desgastado 50% 20 Hz

### 4.3.2 Análisis de vibraciones 65 Hz

El 50% de desgaste es un daño considerable en la vida de un engrane sin embargo por condiciones de operación y de alineación del sistema no es posible identificar claramente la diferencia del desgaste, contrario a lo que sucedió con las pruebas a 20 Hz donde si es posible visualizar una diferencia congruente entre un engrane dañado y otro.

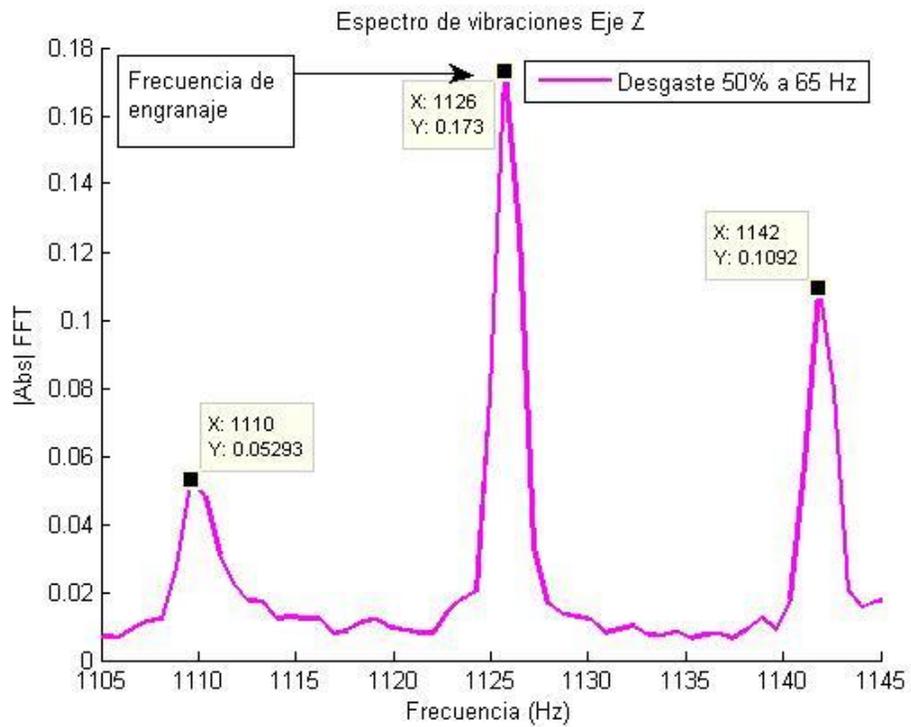


Figura 4.8. Espectro de vibraciones engrane desgastado 50% 65 Hz

La figura muestra que la frecuencia de engranaje se encuentra ligeramente desfasada, con respecto a cómo se observa en el cálculo de la tabla, sin embargo las bandas laterales muestran una amplitud considerable comparada con la frecuencia de engranaje, lo que nos indica que efectivamente existe un daño en el engrane aunque este no se pueda comparar con los otros grados de desgaste.

#### 4.4 Engrane con 75% de desgaste

En la Tabla 8 se muestran los datos más importantes con los cuales se realizó el análisis de vibraciones para el engrane con 75% de desgaste, la frecuencia real de rotación del motor obtenida del encoder y la frecuencia del piñón que a su vez permitió calcular la frecuencia de interés, la de engranaje.

Tabla 8. Frecuencia de engranajes 75% de desgaste

<b>F de operación (Hz)</b>	<b>Encoder (RPM)</b>	<b>F Piñón (Hz)</b>	<b>F Engranaje (Hz)</b>
<b>20</b>	1167	19.45	350.19
<b>65</b>	3795	63.25	1138.59

##### 4.4.1 Análisis de vibraciones 20 Hz

En esta prueba se puede observar que la amplitud correspondiente a la frecuencia de engranaje es bastante pronunciada con respecto a los demás grados de desgaste, la Figura 4.9 también muestra las bandas laterales a la FE como ya se mencionó anteriormente estas se encuentran a 5 Hz de distancia.

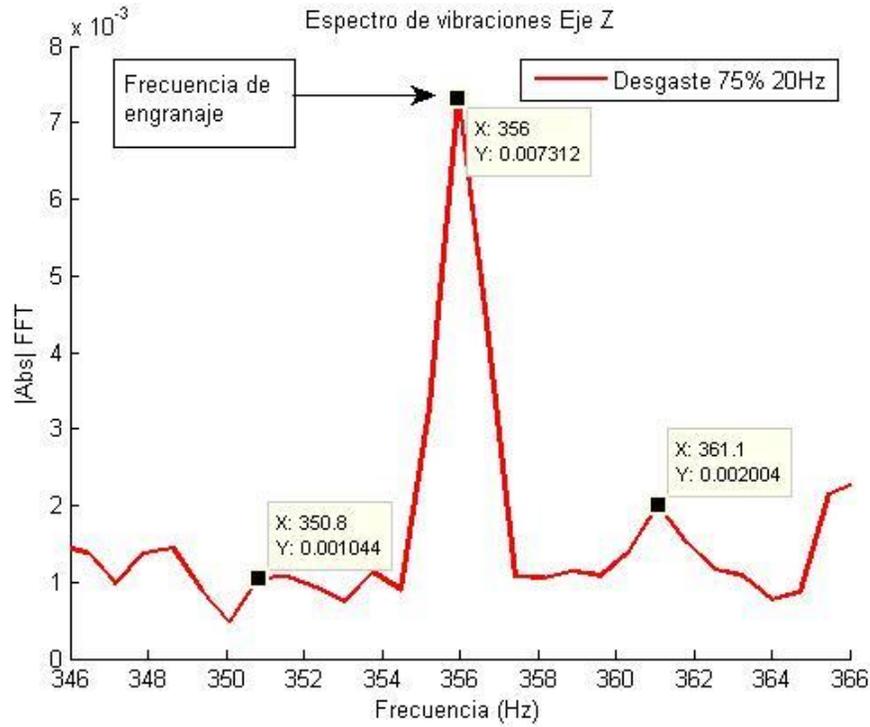


Figura 4.9. Espectro de vibraciones engrane desgastado 75% 20 Hz

#### 4.2.3 Análisis de vibraciones 65 Hz

El último de los desgastes y el más severo es el del 75% en donde el diente del engranes está casi sin forma, el análisis de vibraciones revela una frecuencia de interés, como en los casos anteriores que es la frecuencia del piñón, sin embargo su amplitud no tiene mucha diferencia con respecto al desgaste del 50%, la figura muestra la componente espectral de dicha prueba.

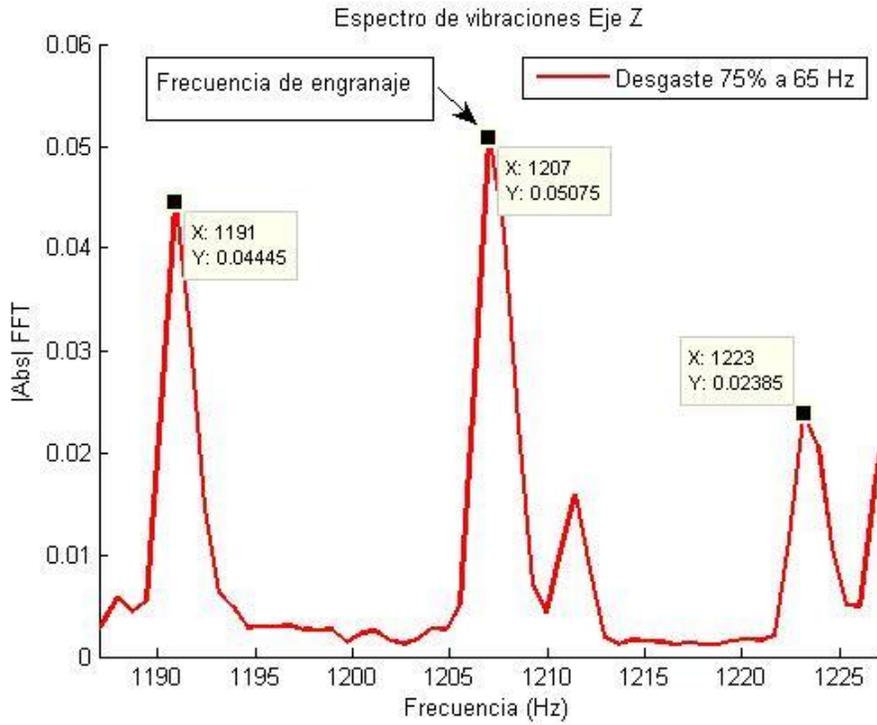


Figura 4.10. Espectro de Vibraciones Engrane Desgastado 75% 65 Hz

#### 4.5 Análisis de Corriente

Para el caso de la corriente se analizó la frecuencia de operación de 20 y 65 Hz buscando encontrar parámetros, en el espectro de frecuencia, que permitan clasificar los desgaste de los engranes, la Figura 4.11 muestra la FFT para la prueba de 20 Hz de cada uno de los engranes, se puede observar que la frecuencia de operación de cada uno de ellos es muy similar en amplitud por lo que no es posible identificar el desgaste en base a algún criterio.

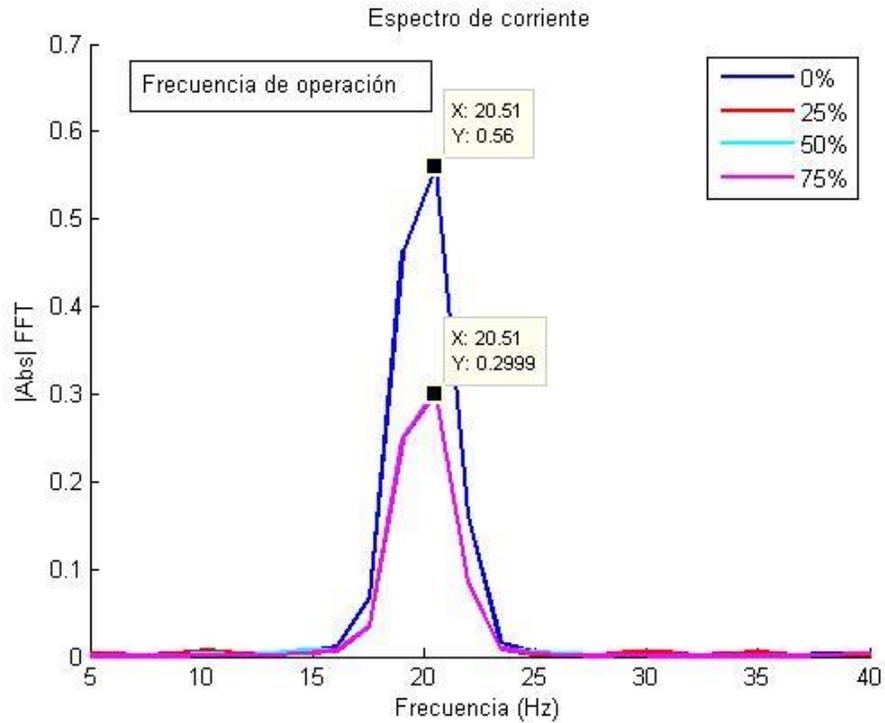


Figura 4.11. Espectro de corriente 20 Hz

Los armónicos de cada uno de los engranes desgastados son similares en amplitud, a excepción del de 0% de desgaste, por lo que no es posible clasificar el daño con base en sus amplitudes, quedando descartado el análisis a corriente dado que la información obtenida no presenta parámetros que permitan discriminar los grados de desgaste.

Para las pruebas a 65 Hz se observa que la amplitud de las frecuencias de operación (64.45 Hz) son prácticamente iguales entre los desgastes del 25, 50 y 75%, por lo que no es posible determinar el grado de desgaste de los engranes con base en esta información. Entonces el análisis de corriente no es tomado en cuenta para la clasificación de las fallas en engranajes.

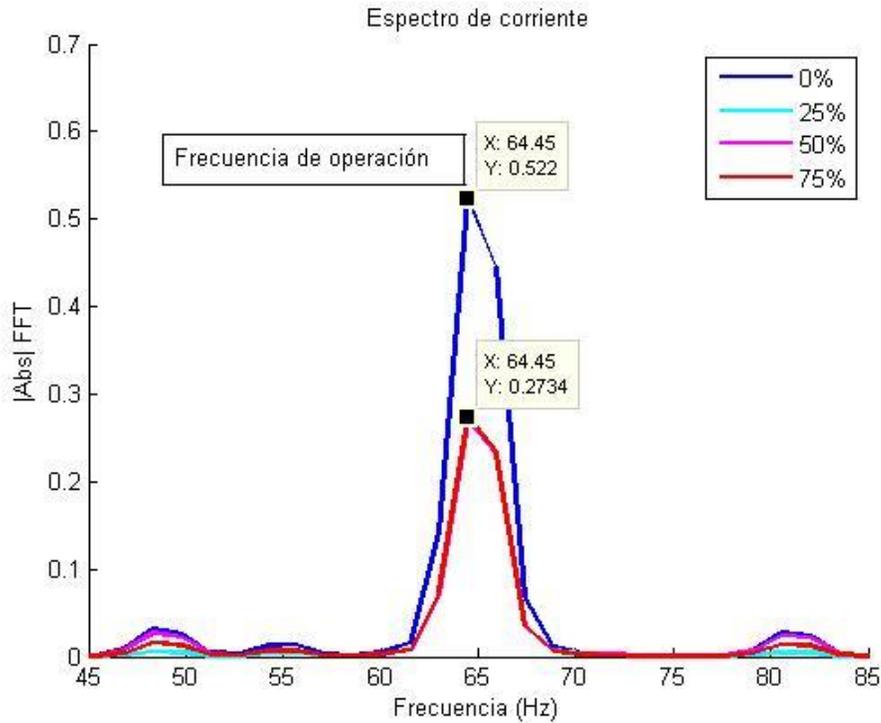


Figura 4.12 Espectro de corriente 65 Hz

De igual manera en la Figura 4.12 se observa que no es posible discriminar el desgaste de los engranes con base en la amplitud de los armónicos quedando también descartado el análisis a corriente a 65 Hz.

#### 4.6 Resumen

De todos los análisis hechos a las distintas pruebas antes mencionadas, se puede resumir que los datos más aceptables para clasificar los desgaste de los engranes son los obtenidos del análisis, a 20 Hz, que se hizo a las vibraciones, por lo que en la Tabla 9 se muestran los datos relevantes obtenidos de estas pruebas, donde se observa que cuanto mayor es el desgaste del engrane mayor es la amplitud de la frecuencia de engranaje.

Tabla 9: Resumen de las pruebas

Desgaste	Frecuencia de operación	Frecuencia de engranaje	Primer Armónico Vibraciones a 20 Hz
0% desgaste	19.62 Hz	353.23 Hz	0.0022 x10 <sup>-3</sup> m/s <sup>2</sup>
25% desgaste	19.72 Hz	355.05 Hz	0.0022 x10 <sup>-3</sup> m/s <sup>2</sup>
50% desgaste	19.65 Hz	353.81 Hz	0.0030 m/s <sup>2</sup>
75% desgaste	19.45 Hz	350.19 Hz	0.0073 m/s <sup>2</sup>

La Figura 4.13 muestra de mejor manera lo explícito en la tabla 9, observando que efectivamente podemos clasificar el desgaste de los engranes con base en las amplitudes de las frecuencias de engranaje.

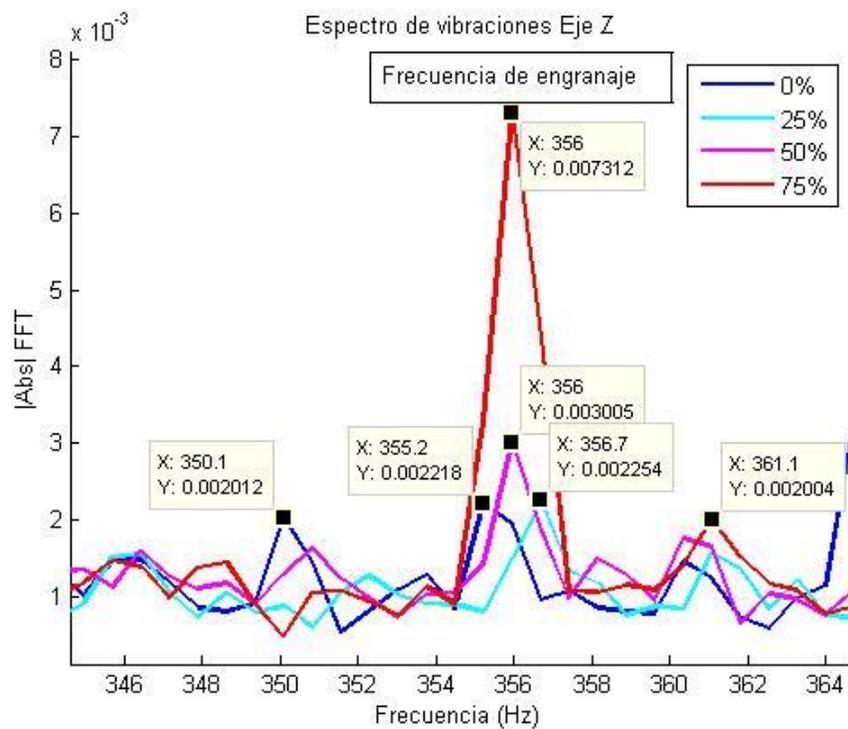


Figura 4.13. Resumen primer armónico de vibraciones a 20 Hz

En la figura se puede observar como la amplitud del desgaste del engrane al 75% es superior que la del 50, 25 y 0%, con un valor de 0.007 m/s<sup>2</sup> y de igual manera la amplitud del 50% de desgaste es mayor que la del 25 y 0%, y así sucesivamente siendo la de 0% de desgaste la de menor amplitud.

#### 4.7 Herramientas en hardware

La principal herramienta en hardware para el procesamiento de señales es el código de la Radix 2, que como se menciona anteriormente es desarrollado utilizando la una unidad de multiplicación y acumulación de manera iterativa, en la Figura 4.14 se muestra una simulación de la descripción en hardware en donde “a” y “b” son los datos de entrada y “c” y “d” son los valores de salida, las variables Vs y Vc corresponden a los valores del seno y del coseno respectivamente, las operaciones que se lleva a cabo son:

$$c = a + W_N^k * b \quad \text{ó} \quad c = a + \left[ \cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right) - j \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi k}{N}\right) \right] * b$$

$$d = a - W_N^k * b \quad \text{ó} \quad d = a - \left[ \cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right) - j \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi k}{N}\right) \right] * b$$

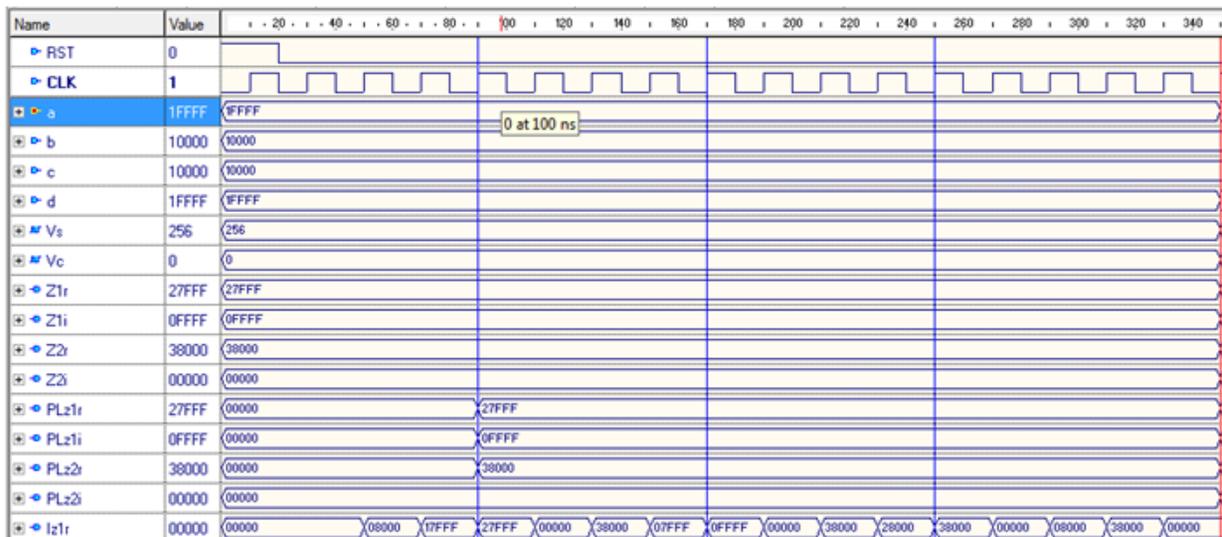


Figura 4.14 Simulación Radix 2(a=1FFFF, b=10000, c=10000, d=1FFFF, nSen=256, nCos=0).

La figura muestra otro ejemplo del funcionamiento de la radix2 con valores pre-establecidos de a, b, seno y coseno se realizan las operaciones para el cálculo de “c” y “d”.



Figura 4.15 Simulación Radix (a=10000, b=1E000, c=00000, d=10000, nSen=256, nCos=0)

# Capítulo 5

## 5. Conclusiones y prospectivas

### 5.1 Conclusiones

La metodología presentada en este trabajo permite detectar el desgaste gradual en engranes (75%, 50%, 25% y 0% de desgaste) mediante el análisis de vibraciones cuando el sistema opera a 20 Hz, en las vibraciones se observó la gradualidad del desgaste en la frecuencia fundamental.

En el análisis de vibraciones a 65 Hz no existe coherencia en las magnitudes de la frecuencia de engranaje por lo que no fue posible clasificar el desgaste de los engranes, las causas por las cuales no fue posible pudieron ser; la presencia de otras fallas o anomalías en el sistema como, des-alineamiento, o que la fabricación de los engranes haya sido defectuosa, viéndose reflejado esto a altas frecuencias.

En el análisis de corriente tampoco fue posible identificar claramente la diferencia de las amplitudes en para cada frecuencia de operación ni tampoco en sus armónicos.

En el análisis de vibraciones, se observó que, no todos los ejes medidos del acelerómetro, proporcionan información útil para la discriminación de cada una de las etapas del desgaste, fue el eje normal al eje del sistema el que brindó mayor información en su espectro frecuencial y por tal caso el punto de estudio y análisis, se puede observar como las amplitudes en las gráficas de frecuencia son mayores (en la frecuencia de engranaje) cuando mayor es el desgaste y menor es la frecuencia de operación.

## **5.2 Prospectivas**

El sistema sigue abierto a un análisis más profundo en cuanto a procesamiento de señales sin embargo con las técnicas mencionadas en esta metodología fue suficiente para la detección de las cuatro condiciones de desgaste en los engranes.

Realizar pruebas de funcionamiento a menor frecuencia para tratar de disminuir los efectos causados por la excentricidad de los engranes.

Establecer una metodología para la alineación de los elementos del sistema para evitar vibraciones producidas por des-alineamiento.

Otra prospectiva para este trabajo es la implementación de análisis termográfico, utilizando una cámara con la capacidad de medir la temperatura en cada punto del sistema y poder identificar como dichas temperaturas varían con el grado de desgaste del engrane, además se podrán reproducir otras fallas en el sistema como son, baleros rotos, des-alineamiento, desbalance, etc., que ya se han trabajado en la universidad anteriormente, teniendo así un banco de pruebas bastante completo en cuanto a la detección de fallas comunes en sistemas MCC.

## REFERENCIAS

Akansu Ali and A. Haddad Richard. 2001. Multiresolution Signal Decomposition. Bell Communications Research. Sede Morristown, NJ, Second Edition.

Arango Flores Gustavo Adolfo. 2007. Clasificación de fallas en motores eléctricos utilizando señales de vibración. Universidad Tecnológica de Pereira. Colombia.

Bertran Albertí Eduard. 2006. Procesado Digital de Señales. Sede Barcelona. Universidad Politécnica de Catalunya. Primera Edición

Chapman Stephen J. 2000. Máquinas eléctricas. Sede Bogotá. Editorial Mc Graw Hill. Tercera Edición.

García Ramírez Armando G., Osornio Ríos Roque A., Granados Lieberman David, García Pérez Arturo, Romero Troncoso Rene J. 2012. Smart Sensors for Online Detection of Multiple-Combined Faults in VSD-Fed Induction Motors.

González Quintero O., González Quintero E. 2008. Análisis del estado tensional en el contacto de dientes de engranajes cilíndricos mediante el Método de Elementos Finitos. Tesis de Maestría. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. Cuba

Graham Kelly S. 2000. Fundamentals of Mechanical Vibrations. Sede Estados Unidos de América. Editorial Mc Graw Hill. Segunda Edición.

Hernández Albañil Héctor, Espejo Mora Édgar. 2002. Mecánica de fractura y análisis de falla. Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. Primera Edición.

JianPing Jing, Guang Meng. 2008. A novel method for multi-fault diagnosis of rotor system. *Mechanism and Machine Theory*. Elsevier 697–709.

Lozano Guzmán Alejandro A., Jáuregui Correa Juan Carlos A. 2013. Las vibraciones mecánicas en el mantenimiento predictivo. Fundación Universitaria de Derecho, Administración y Política, S. C. FUNDAp. Primera Edición.

Rodríguez Valdez Jorge. 2006. Determinación de los esfuerzos en dientes de una rueda tipo Catarina por los métodos fotoelástico y del elemento finito. Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional.

Romero Mariscal Eduardo. 2006. Procesamiento digital de señales vibratorias mediante la transformada wavelet packets. Tesis Ingeniería Mecánica, Universidad Carlos III de Madrid.

Sacchi, J.; Rifaldi, A. Cálculo y diseño de máquinas eléctricas, 1era edición, Universidad Nacional de la Plata, Argentina, 1995.

Shen Changqing, Wang Dong, Kong Fanrang, Peter W. Tse. 2012. Fault diagnosis of rotating machinery based on the statistical parameters of wavelet packet paving and a generic support vector regressive classifier. Harbin Institute of Technology. *Measurement*. Elsevier 46 1551–1564.

Soltani Bozchalooi I., Liang Ming. 2007. A joint resonance frequency estimation and in-band noise reduction method for enhancing the detectability of bearing fault signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*. Elsevier 22 915–933.

Vera Repullo José A., Jiménez Buendía Manuel, González Valdés A. José. 1995. FPGAs Circuitos de Lógica Programable. Sede España. Universidad de Murcia.

## APÉNDICE

### **A. Programas en MATLAB® para el análisis de las señales de vibración y corriente.**

#### A.1. Programa para el acomodo de datos (vibraciones)

```
clear all; clc; close all

r=7;% Numero de identificador
    % NP = Numero de prueba

%-----Cargando datos-----
ID = r;
NP = 0;

A0 = sprintf('PruebaV%d_%d.txt', ID, NP);
Data0 = load(A0);

ID = r;
NP = 1;

A1 = sprintf('PruebaV%d_%d.txt', ID, NP);
Data1 = load(A1);

ID = r;
NP = 2;

A2 = sprintf('PruebaV%d_%d.txt', ID, NP);
Data2 = load(A2);

ID = r;
NP = 3;

A3 = sprintf('PruebaV%d_%d.txt', ID, NP);
Data3 = load(A3);

ID = r;
NP = 4;

A4 = sprintf('PruebaV%d_%d.txt', ID, NP);
```

```

Data4 = load(A4);

%*****

%%%%%%%%%%%% Vibraciones

Ax0 = Data0(:,2).*(12/4096)-6;
Ay0 = Data0(:,4).*(12/4096)-6; % Conversión de complemento a 2 a m/s2
Az0 = Data0(:,3).*(12/4096)-6;

Ax1 = Data1(:,2).*(12/4096)-6;
Ay1 = Data1(:,4).*(12/4096)-6; % Conversión de complemento a 2 a m/s2
Az1 = Data1(:,3).*(12/4096)-6;

Ax2 = Data2(:,2).*(12/4096)-6;
Ay2 = Data2(:,4).*(12/4096)-6; % Conversión de complemento a 2 a m/s2
Az2 = Data2(:,3).*(12/4096)-6;

Ax3 = Data3(:,2).*(12/4096)-6;
Ay3 = Data3(:,4).*(12/4096)-6; % Conversión de complemento a 2 a m/s2
Az3 = Data3(:,3).*(12/4096)-6;

Ax4 = Data4(:,2).*(12/4096)-6;
Ay4 = Data4(:,4).*(12/4096)-6; % Conversión de complemento a 2 a m/s2
Az4 = Data4(:,3).*(12/4096)-6;

%Recorte de datos del segun 10 al 20 (Estado Estable)
for i=1:4096
    AxE0(i,1)=Ax0(55904+i,1);
    AyE0(i,1)=Ay0(55904+i,1);
    AzE0(i,1)=Az0(55904+i,1);

    AxE1(i,1)=Ax1(55904+i,1);
    AyE1(i,1)=Ay1(55904+i,1);
    AzE1(i,1)=Az1(55904+i,1);

    AxE2(i,1)=Ax2(55904+i,1);
    AyE2(i,1)=Ay2(55904+i,1);
    AzE2(i,1)=Az2(55904+i,1);

    AxE3(i,1)=Ax3(55904+i,1);
    AyE3(i,1)=Ay3(55904+i,1);
    AzE3(i,1)=Az3(55904+i,1);

    AxE4(i,1)=Ax4(55904+i,1);
    AyE4(i,1)=Ay4(55904+i,1);
    AzE4(i,1)=Az4(55904+i,1);
end

```

```

%-----Ventana Hanning-----
vha=hanning(length(AxE0));
Ax00=AxE0.*vha;
Ay00=AyE0.*vha;
Az00=AzE0.*vha;
Ax10=AxE1.*vha;
Ay10=AyE1.*vha;
Az10=AzE1.*vha;
Ax20=AxE2.*vha;
Ay20=AyE2.*vha;
Az20=AzE2.*vha;
Ax30=AxE3.*vha;
Ay30=AyE3.*vha;
Az30=AzE3.*vha;
Ax40=AxE4.*vha;
Ay40=AyE4.*vha;
Az40=AzE4.*vha;
%-----

TV = (0:size(AxE0,1)-1)/3000; % Vector de Tiempo
figure

%-----Graficas de aceleración estado estable
subplot(3,1,1);plot(TV,Ax00)
title('Eje X, Estado Estable')
ylabel('m/s2')
subplot(3,1,2);plot(TV,Ay00)
title('Eje Y, Estado Estable')
ylabel('m/s2')
subplot(3,1,3);plot(TV,Az00)
title('Eje Z, Estado Estable')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('m/s2')
%-----

%-----Tranformada rapida de Fourier

L=length(Ax00);
Fs2 = 3000; % Frecuencia de muestreo de sensor

NFFT = 2^nextpow2(L); % Next power of 2 from length of y
f = Fs2/2*linspace(0,1,NFFT/2+1); % frecuencia

%FFT Señal 0
xFT0 = fft(Ax00,NFFT)/L;
yFT0 = fft(Ay00,NFFT)/L;
zFT0 = fft(Az00,NFFT)/L;

```

```

%FFT Señal 1
xFT1 = fft(Ax10,NFFT)/L;
yFT1 = fft(Ay10,NFFT)/L;
zFT1 = fft(Az10,NFFT)/L;

%FFT Señal 2
xFT2 = fft(Ax20,NFFT)/L;
xFT2(1)=0;
yFT2 = fft(Ay20,NFFT)/L;
zFT2 = fft(Az20,NFFT)/L;

%FFT Señal 3
xFT3 = fft(Ax30,NFFT)/L;
yFT3 = fft(Ay30,NFFT)/L;
zFT3 = fft(Az30,NFFT)/L;

%FFT Señal 4
xFT4 = fft(Ax40,NFFT)/L;
yFT4 = fft(Ay40,NFFT)/L;
zFT4 = fft(Az40,NFFT)/L;

%-----Promedio de los espectros-----
xFT = (xFT0+xFT1+xFT2+xFT3+xFT4)/5;
yFT = (yFT0+yFT1+yFT2+yFT3+yFT4)/5;
zFT = (zFT0+zFT1+zFT2+zFT3+zFT4)/5;
xFT(1)=0;
yFT(1)=0;
for i=1:10
zFT(i)=0;
end
%-----Gráficas-----
figure
plot(f,2*abs(xFT(1:NFFT/2+1)))
title('Single-Sided Amplitude Spectrum of x(t)')
xlabel('Frequency (Hz)')
ylabel('|x(f)|')

figure
plot(f,2*abs(yFT(1:NFFT/2+1)))
title('Single-Sided Amplitude Spectrum of y(t)')
xlabel('Frequency (Hz)')
ylabel('|y(f)|')

figure
plot(f,2*abs(zFT(1:NFFT/2+1)))
title('Single-Sided Amplitude Spectrum of z(t)')
xlabel('Frequency (Hz)')
ylabel('|z(f)|')

```

## **B. Artículo publicado en congreso**



## Sistema de medición inercial IMU basado en FPGA

M. del Ángel Valerio, R.A. Osornio-Ríos, J.J. de Santiago Pérez, M. Trejo-Hernández, J.P. Benítez-Rangel, R.J. Romero-Troncoso

**Resumen:** Las unidades de medición inercial (*inertial measurement unit, IMU*), acelerómetros y giroscopios, hoy en día cuentan con una amplia gama de productos comerciales, dichas unidades de medición con frecuencia requieren de señales digitales para su configuración, llamados manejadores (o *drivers* en inglés), estas señales comúnmente son provistas por elementos externos a la unidad inercial y suelen ser creadas en microcontroladores o procesadores digitales de señales. En este trabajo se presenta un sistema IMU propietario que utiliza un procesador digital de señales basado en lenguaje de descripción de hardware (*Hardware Description Language, HDL*) e implementado en un arreglo de compuertas programables en campo (*field programmable gate arrays, FPGA*) teniendo las ventajas de reconfigurabilidad, portabilidad, velocidad de procesamiento, entre otras. El funcionamiento del acelerómetro y del giroscopio, triaxiales ambos, es verificado haciendo mediciones en un motor de inducción obteniendo el espectro de tiempo-frecuencia para corroborar la frecuencia de funcionamiento de dicha máquina.

Palabras Clave: FPGA, VHDL, unidades de medición inercial (IMU).

### Abstract:

Inertial measurement units (IMUs) such as accelerometers and gyroscopes have a wide commercial product range nowadays. These units of measurement often need other digital signals for their configuration called drivers. The drivers are provided by an external unit and these signals are created by either microcontrollers or digital signal processors. In this paper, a digital signal processor based on hardware description language (HDL) was used, and this was implemented on one field programmable gate arrays

(FPGA) with advantages such as configurability, portability, processing speed and the designs and targets are themselves. The work of the accelerometer and gyroscope was verified doing measurements in an induction motor and obtaining the time-frequency spectrum to corroborate with the operation machine.

Keywords: FPGA, VHDL, inertial measurement unit (IMU).

### Introducción

Los acelerómetros son instrumentos destinados a medir aceleraciones, un sensor de aceleración triaxial tiene la capacidad de medir la aceleración en 3 ejes. El giróscopo o giroscopio es un dispositivo mecánico que sirve para medir, mantener o cambiar la orientación en el espacio de algún aparato.

Una unidad de medición inercial (IMU) es un dispositivo electrónico que mide e informa acerca de la velocidad, orientación y fuerzas gravitacionales de un aparato, usando una combinación de acelerómetros y giroscopios con la capacidad de medir aceleración y velocidad angular respectivamente teniendo en total 6 grados de libertad (3 del acelerómetro y 3 del giroscopio) con los cuales podemos tener acceso a toda la dinámica del sistema a instrumentar. Dichos sistemas IMU son usados en aviones, naves espaciales, transbordadores, satélites, dispositivos GPS [1-3], buques, misiles guiados, y en sistemas de monitoreo de vibraciones [4] como es el caso de aplicación en este trabajo, por lo que resultan de gran utilidad en muchos sectores de la industria. La gran mayoría de los sistemas IMU comerciales son costosos y varían dependiendo de la marca del fabricante además de que su arquitectura de programación serial hace que el sistema sea más lento y con una alta carga computacional.

Las señales de control en los sistemas de medición inerciales son comúnmente generadas en microcontroladores, procesadores digitales de señales (*digital signal processing, dsp*), o a través de la pc sin embargo existen otras alternativas como es el lenguaje HDL implementado en FPGA que tiene la ventaja de ser más rápido en el

procesamiento gracias a su ejecución de forma paralela y generar bajo consumo de potencia, también es portable a cualquier otro sistema FPGA y es totalmente reconfigurable. Existen trabajos relacionados con, la adquisición de datos de los IMU, basado en FPGA [5] los cuales presenta el diseño a bloques del sistema de adquisición explicando su funcionamiento y sus ventajas sin embargo no se aprecia con claridad la implementación en FPGA ni la verificación del correcto funcionamiento del sistema.

En este trabajo se presenta la propuesta de un IMU propietario basado en acelerómetros y giroscopios MEMs y un Pic, el IMU es manejado por un core basado en FPGA, en el cual se disminuye la carga computacional, y además se cuenta con la ventaja de que está abierto a múltiples aplicaciones debido a su combinación con otros cores basados en FPGA lo cual permite tener un sistema integral de bajo costo comparado con productos comerciales. En este trabajo el sistema IMU esta aplicado al monitoreo de vibraciones de un motor de inducción aunque bien en trabajos futuros pudiese aplicarse al monitoreo y control de sistemas robóticos.

## Fundamentación Teórica

### Acelerómetro LIS331DLH

Este es un dispositivo de alto rendimiento con un bajo consumo de energía, es un acelerómetro lineal de 3 ejes, con interfaz de salida serial SPI, el diagrama de tiempos para la transmisión SPI se muestra en la figura 1, el dispositivo tiene escalas de medición de  $\pm 2g/\pm 4g/\pm 8g$  y es capaz de medir aceleraciones con frecuencias de 0.5 Hz hasta 1kHz, el tamaño de cada dato de salida es de 16 bits.

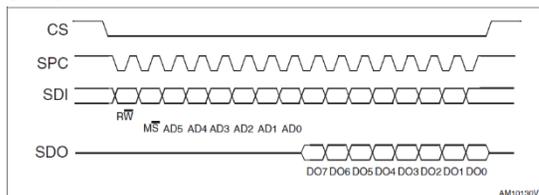


Fig. 1 Diagrama de tiempos de transmisión SPI.

En donde CS es la habilitación del puerto serial y es controlada por el SPI master. Este pasa de alto a bajo para empezar la transmisión y regresa a alto para finalizar. EL SPC es el reloj del puerto serial y es controlado de igual forma por el SPI master. SDI y SDO son los datos de entrada y salida, del

puerto serial, respectivamente. Los comandos de leer y escribir registros son completados en 16 ciclos de reloj (SPC).

### Giroscopio L3GD20

El L3GD20, al igual que el acelerómetro LIS331DLH, es un dispositivo de baja potencia triaxial considerado un MEM (*Microelectromechanical System*) el cual mide la aceleración angular en grados por segundo (*degrees per second, dps*) de igual manera cuenta con transmisión de datos serial SPI y su diagrama de tiempos es el mismo del acelerómetro, y se muestra en la figura 1. El LeGD20 tiene una escala de medición de  $\pm 250dps/\pm 500dps/\pm 2000dps$ .

### Pic16LF1823

El Pic16LF1823 es un microcontrolador de microchip de baja potencia en la gama de nano componentes el cual cuenta con características importantes que se muestran en la tabla 1.

Tabla 1: Características PIC16LF1823

Características	
Comunicación	SPI/I <sup>2</sup> C
Convertidor A/D	8 CH/10 BITS
Módulos de Transmisión	RS-232/RS485
Timmers	8 BITS

Cuenta con comunicación serial SPI y I<sup>2</sup>C y con módulos RS-232 y RS-485 para una amplia gama de transmisión y recepción de datos. Cuenta con 8 canales para conversión de analógico a digital con una resolución de 10 bit, tiene entradas y salidas digitales y 2 timers de 8 bits.

### Metodología

El diagrama mostrado en la figura 2 presenta de manera general la metodología y los componentes involucrados en el diseño e implementación del sistema IMU. Para corroborar su funcionamiento el sistema es probado en un motor de inducción trifásico de 2 HP de 220 V y frecuencia de 60 Hz. Los módulos de acelerómetro y giroscopio son los encargados de adquirir las vibraciones, el bloque del microcontrolador recibe las señales provenientes de los sensores de una manera serial a través del protocolo SPI y las manda al FPGA Xilinx 3, por RS-485, el bloque del FPGA recibe los datos y los almacena en su memoria SRAM

para posteriormente enviarlos a la PC o a otro dispositivo para su procesamiento. A continuación se detalla cada uno de estos bloques principales.

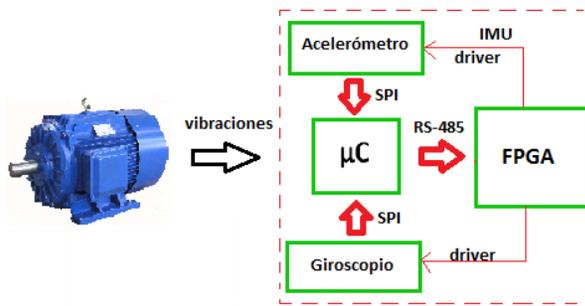


Fig. 2 Diagrama general sistema IMU.

Los sensores digitales, acelerómetro y giroscopio, reciben las señales manejadoras que les permiten funcionar y transmitir sus datos provenientes del motor, dichas señales manejadoras son las mostradas en la figura 1 las cuales son programadas en lenguaje HDL y sintetizadas en el FPGA, la figura 3 muestra un diagrama más específico de estos sensores y sus señales de entrada y salida, cada una se describe en la parte de la fundamentación teórica.

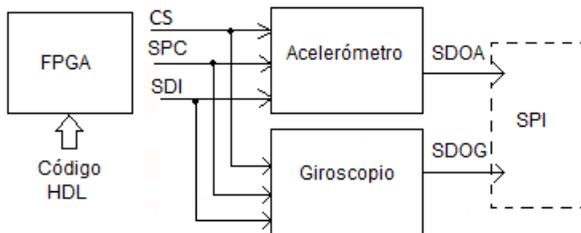


Fig. 3 Diagrama Sensores Digitales.

Una vez que se tienen funcionando los sensores el bloque del microcontrolador recibe los datos de los sensores (con el protocolo SPI) y los envía de manera continua y serial al FPGA (con RS-485), esta rutina se realiza cuando el micro recibe una señal de inicio, en la figura 4 se muestra cómo es que el microcontrolador interactúa con los sensores y con el FPGA. El microcontrolador es el módulo intermediario entre los sensores y el arreglo de compuertas programables en campo, la frecuencia de transacción de los datos a través de SPI y del RS-485 es de aproximadamente 1KHz.

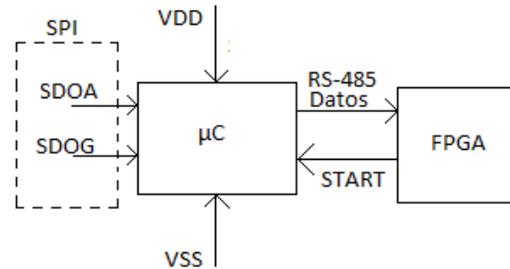


Fig. 4 Interacción del microcontrolador.

El módulo FPGA es el encargado de recibir los datos provenientes de los sensores a través del microcontrolador, además de dar la señal de inicio antes mencionada. Guarda los datos en la memoria SRAM que tiene integrada para finalmente enviarlos a través de una transmisión serial a la PC la cual en software recibe los datos, que son acomodados y convertidos a gravedades para su análisis, según el rango seleccionado (+2g, +4g o +8g) que en este caso es de +2g. En la figura 6 se muestra el diagrama a bloques del FPGA y las señales que interactúan con él.

Una vez transferidos todos los datos a la PC se obtienen con Matlab las gráficas de vibraciones respecto al tiempo y se aplica la transformada rápida de Fourier (TRF) para obtener el espectro tiempo frecuencia y observar las componentes frecuenciales.

## Resultados

Se diseñó y desarrolló un sistema IMU propietario basado en FPGA mejorando algunos aspectos con respecto a los sistemas comerciales, gracias a los diseños propios de cores y tarjetas (PCBs) se implementó el sistema con baja carga computacional, abierto a múltiples áreas de aplicación y con un costo económico bajo, en la figura 6 se muestran los diseños propietarios de las tarjetas IMU y de adquisición de datos en FPGA. Se realizaron 2 pruebas aplicadas a un motor de inducción trifásico de 2HP y 220 V.



Fig. 6 Tarjetas Propietarias.

Una de las pruebas fue la medición de vibraciones utilizando el acelerómetro LIS331HLD bajo los siguientes lineamientos, con una duración de 40 segundos con el sensor trabajando a 1KHz, con una configuración de  $\pm 2g$  ( $m/s^2$ ), y aplicando un filtro pasa bajas, se obtuvieron los resultados mostrados en la figura 6 donde en la parte superior de la imagen se observan las vibraciones obtenidas en los 40 segundos, se puede corroborar que los datos obtenidos del sensor son correctos ya que como se observa detecta la gravedad de la tierra y en base a ella oscila de manera natural por el trabajo del motor, además se reitera el buen funcionamiento al ver la parte inferior de la figura 6, el diagrama Tiempo-frecuencia revela la frecuencia fundamental de operación de 60 Hercios.

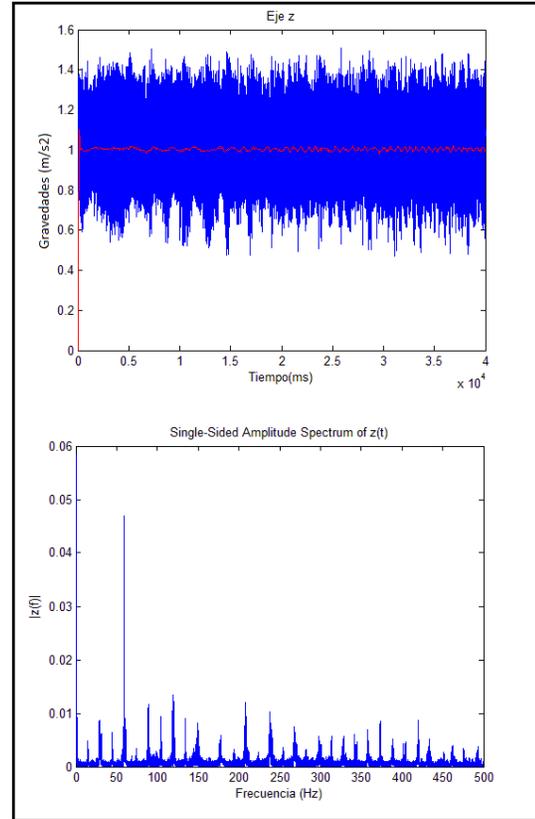


Fig. 6 Gráficas de tiempo y Tiempo-Frecuencia Acelerómetro.

La segunda prueba está igualmente aplicada en el motor anteriormente mencionado, con una configuración de  $\pm 250dps$ , pero en lugar de medir las vibraciones se midió la velocidad angular provista por el giroscopio L3GD20 donde se obtuvieron los resultados mostrados en la figura 7, en esta prueba no es tan evidente el funcionamiento del sistema giroscópico si solo observamos la primer gráfica, sin embargo en la parte inferior de la misma figura se observa la componente frecuencial fundamental del motor (60 Hz) y con ello verificamos que es correcta la medición.

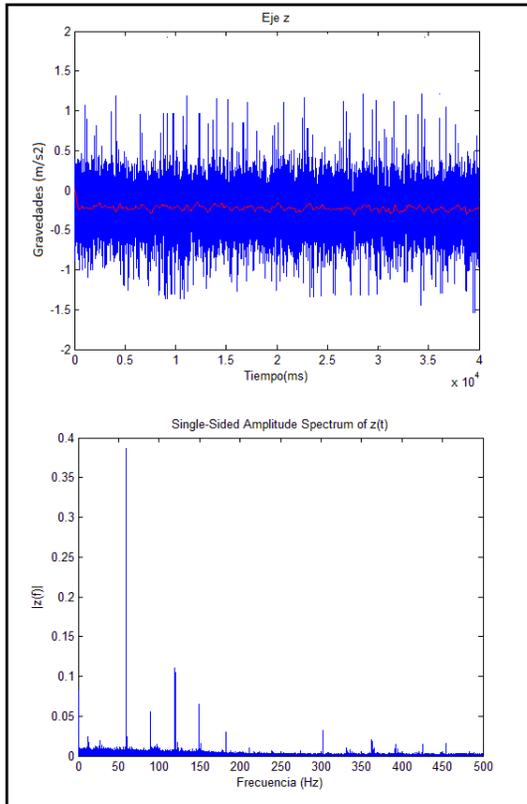


Fig. 7 Gráficas de tiempo y Tiempo-Frecuencia Giroscopio.

## Conclusiones

Los resultados de las 2 pruebas realizadas muestran el correcto funcionamiento del sistema IMU desarrollado en este trabajo, desde la etapa de adquisición de datos de los sensores hasta el procesamiento dado en Matlab para la separación de los mismos, los resultados son claros dado que lo que se pretendía observar principalmente era la componente frecuencial de 60 Hz presente en el motor de inducción y proveniente de la toma de corrientes. El sistema presenta las ventajas mencionadas en un principio como fue bajo consumo computacional para la adquisición y transmisión de los datos del IMU, un bajo costo económico dado que las tarjetas y los cores fueron diseñados en la Universidad Autónoma de Querétaro a través del grupo de procesamiento digital de señales en hardware (*Hardware Signal Processing, HSP digital*) y también es una plataforma que está abierta a múltiples aplicaciones que cumplan con las características del sistema, y si no cumpliesen con dichas características, el sistema es totalmente

reconfigurable para adaptarse a la aplicación. Como posibles aplicaciones también está la detección de fallas en motores de inducción o el monitoreo de sistemas robóticos donde es crucial controlar la posición y orientación del órgano terminal.

## Referencias

- [1] Ezzaldeen Edwan, Stefan Knedlik, Junchuan Zhou and Omar Loffeld, "GPS/INS Integration for GF-IMU of Twelve Mono-axial Accelerometers Configurations", IEEE WPNC, 2009.
- [2] Seong-Baek Kim, et al., "A Bimodal Approach for GPS and IMU Integration for Land Vehicle Applications", IEEE 0-7803-7954-3/03, 2003.
- [3] Roy R. Minor and David W. Rowe, "Utilization of GPSMEMS-IMU for Measurement of Dynamics for Rang Testing of Missiles and Rockets", IEEE 0-7803-4330-1, 1998.
- [4] Liu.Gang Yang et al., "Detecting and Extracting Vibration Disturb in IMU Testing in Field" IEEE 978-1-4244-6349-7, 2010.
- [5] Changrui Bai, Zhou Zhang, Xiaoying Han, "A Design and Realization of FPGA-based IMU Data Acquisition System" IEEE 978-1-4577-1997-4, 2011.

## Currículo corto de los autores

**Miguel del Ángel Valerio.** Recibió el título de Ingeniero Electromecánico por la Universidad Autónoma de Querétaro, actualmente es alumno de la Maestría en Ciencias en Mecatrónica ofrecida por la Universidad Autónoma de Querétaro.

**Roque Alfredo Osornio Ríos.** Recibió el título de Ingeniero en Electrónica por el Instituto Tecnológico de Querétaro, y el grado de Maestro en Ciencias y Doctor en Ingeniería por la Universidad Autónoma de Querétaro. Forma parte del Sistema Nacional de Investigadores. Actualmente es profesor de tiempo completo de la Universidad Autónoma de Querétaro.

**J. Jesús Santiago Pérez.** Obtuvo la Licenciatura y Maestría en Matemáticas Aplicadas así como el Doctorado en Ingeniería por parte de la Universidad Autónoma de Querétaro. Actualmente se encuentra trabajando como profesor investigador en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro.

**Miguel Trejo Hernández.** Obtuvo la Licenciatura en Electromecánica, la Maestría en Instrumentación y Control Automático y el Doctorado en Ingeniería por parte de la

Universidad Autónoma de Querétaro. En la actualidad se encuentra trabajando como profesor investigador en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro

**Juan Primo Benítez Rangel.** Obtuvo la Licenciatura en Electromecánica, la Maestría en Instrumentación y Control Automático y el Doctorado en Ingeniería por parte de la Universidad Autónoma de Querétaro. Sus áreas de desarrollo son procesos de manufactura e instrumentación.

**René de J. Romero Troncoso.** Obtuvo el título de Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica y el grado de Maestro por parte de la Universidad de Guanajuato y su grado de Doctor de la Universidad Autónoma de Querétaro con honores en el 2004. Actualmente es profesor en FIMEE y forma parte del Sistema Nacional de Investigadores.