



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN**

**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN EN LABVIEW DE UN SISTEMA DE  
DIAGNÓSTICO DE FALLAS ROTÓRICAS EN UN MOTOR DE INDUCCIÓN  
MEDIANTE EL ANÁLISIS ESPECTRAL DE LA CORRIENTE DE  
ALIMENTACIÓN”**

## **TESINA DE SEMINARIO**

**Previa a la obtención del Título de:**

**INGENIERO EN ELECTRICIDAD ESPECIALIZACIÓN  
ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL**

**Presentada por**

**JOSÉ BOLÍVAR RIVERA BUSTAMANTE**

**Guayaquil – Ecuador**

**2011**

## AGRADECIMIENTO

A DIOS y a mis compañeros que me han acompañado y apoyado en mi formación como profesional.

A mis padres, que me han brindado todo su apoyo y respaldo a lo largo de mi vida, a ellos se los debo todo.

A mis profesores que me han impartido sus conocimientos, de manera muy especial al Ing. Hólger Cevallos, por su respaldo y guía en la elaboración de este trabajo.

## DEDICATORIA

A DIOS, por todas las bendiciones brindadas.

A mis familiares, en especial a mis padres que los amo y significan todo para mí.

# **TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

---

Ing. Hólger Cevallos U.

**PROFESOR DEL SEMINARIO DE GRADUACIÓN**

---

Ing. Sara Ríos

**PROFESOR DELEGADO DEL DECANO**

## **DECLARACIÓN EXPRESA**

“La responsabilidad del contenido de esta Tesina de Grado, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la Escuela Superior Politécnica del Litoral”

(Reglamento de graduación de la ESPOL).

---

José Bolívar Rivera Bustamante

## RESUMEN

El sistema implementado en este trabajo se lo diseño e implemento en el programa LabVIEW y propone una alternativa para detectar barras rotas en motores de inducción a través de algoritmos de Análisis Espectral de Corrientes (MCSA).

El sistema acondiciona la señal de corriente de una de las fases de alimentación de un motor, la digitaliza y la envía a un computador. Se filtra la señal digitalmente para evitar ruido y después hallar el contenido espectral de la señal. En ella, se detecta picos en frecuencias específicas calculadas según el criterio establecido. Se analizan las amplitudes de dichos picos y según la diferencia entre ellas, se determina el estado del motor: excelente, bueno, moderado, daño medio, daño severo.

Al terminar la prueba, se presenta un diagnóstico del motor y una recomendación.

# ÍNDICE GENERAL

	<b>Pág.</b>
AGRADECIMIENTO.....	II
DEDICATORIA.....	III
TRIBUNAL DE GRADUACIÓN.....	IV
DECLARACIÓN EXPRESA.....	V
RESUMEN.....	VI
ÍNDICE GENERAL.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XXI
ABREVIATURAS.....	XXIII
SIMBOLOGÍA.....	XXIV
INTRODUCCIÓN.....	XXVI
 <b>CAPÍTULO 1</b>	
<b>FUNDAMENTOS DEL MANTENIMIENTO INDUSTRIAL.....</b>	<b>1</b>
1.1 Generalidades.....	1
1.1.1 Conceptos Básicos.....	1
1.1.2 Mantenimiento.....	3
1.1.2.1 Finalidad del Mantenimiento.....	3

1.1.2.2	Objetivos del Mantenimiento.....	4
1.1.2.3	Cantidad de Mantenimiento.....	4
1.2	Tipos de Mantenimiento.....	6
1.2.1	Correctivo.....	6
1.2.2	Predictivo.....	6
1.2.3	Preventivo.....	7
1.3	Planeación del Mantenimiento.....	7
1.3.1	Principios.....	8
1.3.2	¿Qué es Planear?.....	8
1.3.3	Cronograma.....	9
1.4	Procesos Principales.....	9
1.4.1	Programación.....	9
1.4.2	Administración de Repuestos y Materiales.....	10
1.4.3	Información.....	11
1.4.4	Reportes.....	12
1.4.5	Preparación.....	12
1.5	Análisis de Fallas.....	13
1.5.1	Causas.....	13
1.5.2	Criticidad.....	14
1.5.3	Toma de Decisiones.....	15
1.6	Importancia del Mantenimiento.....	16
1.6.1	Justificación.....	16
1.6.2	Ventajas y Desventajas.....	17

## CAPÍTULO 2

### FUNDAMENTOS DEL ANÁLISIS ESPECTRAL DE CORRIENTES

<b>EN MOTORES DE INDUCCIÓN PARA DETECCIÓN DE FALLAS.....</b>	<b>19</b>
2.1	Introducción..... 19
2.2	Métodos de Monitoreo..... 24
2.2.1	Análisis Circuitual del Motor..... 25
2.2.2	Análisis de Vibraciones..... 25
2.2.3	Análisis Infrarrojo..... 26
2.2.4	Análisis Espectral de Corrientes del Motor..... 26
2.3	Análisis Espectral de Corrientes del Motor..... 27
2.3.1	Antecedentes..... 27
2.3.2	Características del MCSA..... 28
2.3.3	Fundamentos del MCSA..... 29
2.4	MCSA para Detección de Barras Rotas..... 32
2.4.1	Causas y Consecuencias de Barras Rotas..... 32
2.4.2	Desarrollo Conceptual y Matemático..... 36
2.4.2.1	Rango de Diferencias de Amplitudes en Armónicos..... 45
2.4.3	Consideraciones del Método de Diagnóstico..... 46
2.4.3.1	Diferencias en los Diseños de Cada Motor... 47
2.4.3.2	Potencia del Motor..... 47
2.4.3.3	Efectos Debidos a la Carga..... 48

2.4.3.4	Efectos de la Presencia de un Reductor Mecánico de Velocidad.....	49
---------	--	----

### **CAPÍTULO 3**

#### **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE HARDWARE Y SOFTWARE**

	<b>PARA EL SISTEMA DE DIAGNÓSTICO.....</b>	<b>50</b>
3.1	Requerimientos Generales.....	50
3.2	Software a Utilizar.....	51
3.3	Motor y Sistema de Arranque.....	52
3.4	Transformador de Corriente.....	54
3.5	Mecanismo para Regular la Carga del Motor.....	55
3.6	Equipo de Adquisición de Datos.....	56
3.7	Procesamiento Digital de Señales.....	58
	3.7.1 Adquisición.....	58
	3.7.2 Escalamiento.....	61
	3.7.3 Aislamiento a Diferentes Fuentes de Ruido.....	62
	3.7.4 Análisis en Frecuencia.....	63
	3.7.5 Detección de Picos en el Espectro de Corriente.....	65
	3.7.6 Detección de la Falla y Diagnóstico.....	67
3.8	Visión General del Sistema.....	70
	3.8.1 Paleta “Configuración”.....	70
	3.8.2 Paleta “Corriente en Función del Tiempo”.....	71

3.8.3 Paleta “Espectro de Corriente” .....	72
3.8.4 Paleta “Resultado y Diagnóstico” .....	73

## **CAPÍTULO 4**

<b>RESULTADOS</b> .....	76
4.1 Resultados Experimentales, Teóricos y Análisis.....	77
4.1.1 Resultados Teóricos.....	78
4.1.2 Resultados Experimentales.....	79

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## **BIBLIOGRAFIA**

# ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pag.</b>
<b>CAPÍTULO 1</b>	
Figura 1.1 Ejemplo de programación del mantenimiento.....	10
<b>CAPÍTULO 2</b>	
Figura 2.1 Porcentaje de fallas en motores de inducción de acuerdo al componente constitutivo en el que ocurren.....	22
Figura 2.2 Esquema Global para el uso de MCSA.....	32
Figura 2.3 Ejemplo de un rotor con barras rotas.....	34
Figura 2.4 Rotor con múltiples barras rotas.....	34
Figura 2.5 Anillos de unión con barras rotas.....	35
Figura 2.6 Velocidad de deslizamiento.....	38
Figura 2.7 Campo del rotor girando a una velocidad mayor que la velocidad del rotor $N_r$ .....	39
Figura 2.8 Campos rotatorios en atraso y en adelante en un motor con barras rotas.....	41

Figura 2.9	Componentes espectrales de un motor: a) ideal, b) con bandas laterales inherentes a asimetrías en los devanados del rotor, c) con bandas laterales debido a barras rotas.....	44
------------	--	----

### CAPÍTULO 3

Figura 3.1	Programa LabVIEW 2010.....	52
Figura 3.2	Motor utilizado en las pruebas.....	53
Figura 3.3	Contactador, relé térmico y pulsador con luz piloto utilizado en las pruebas.....	55
Figura 3.4	Transformador de corriente utilizado en las pruebas.....	56
Figura 3.5	Mecanismo utilizado en la prueba para regular la carga en el eje del rotor.....	56
Figura 3.6	NI CompactDAQ-9174 utilizada en las pruebas.....	58
Figura 3.7	Modulo NI 9227 utilizado en las pruebas.....	59
Figura 3.8	Diagrama de conexión del secundario del transformador al módulo NI 9227.....	60
Figura 3.9	Configuración de la señal de entrada de corriente en LabView.....	61
Figura 3.10	Escalamiento de la señal de corriente en LabView.....	62
Figura 3.10	Escalamiento de la señal de corriente en LabView.....	63

Figura 3.11	Configuración del filtro digital.....	64
Figura 3.12	Implementación del filtro digital en LabView.....	64
Figura 3.13	Configuración de análisis espectral.....	65
Figura 3.14	Implementación del espectro de corriente.....	66
Figura 3.15	Configuración de detección de picos en el espectro de corriente.....	67
Figura 3.16	Implementación de la detección de picos en el espectro de corriente.....	68
Figura 3.17	Implementación de detección de falla.....	69
Figura 3.18	Implementación del panel de control en LabView del detector de fallas rotóricas en motores de Inducción.....	69
Figura 3.19	Pantalla “configuración”.....	71
Figura 3.20	Pantalla “Corriente en función del tiempo”.....	73
Figura 3.21	Pantalla “Espectro de corriente”.....	74
Figura 3.22	Pantalla “Resultado y diagnóstico”.....	74

## **CAPÍTULO 4**

Figura 4.1	Espectro de corriente del motor sano sin carga (2.4 A).....	80
Figura 4.2	Espectro de corriente del motor sano con carga (2.7 A).....	80

Figura 4.3	Espectro de corriente del motor sano con carga (2.9 A).....	81
Figura 4.4	Espectro de corriente del motor sano con carga (3.1 A).....	82
Figura 4.5	Espectro de corriente del motor sano con carga (3.3 A).....	82
Figura 4.6	Espectro de corriente del motor sano con carga (3.5 A).....	83
Figura 4.7	Espectro de corriente del motor sano con carga (3.8 A).....	84
Figura 4.8	Rotura de una barra en el rotor.....	86
Figura 4.9	Espectro de corriente del motor con 1 barra rota sin carga (2.5 A).....	86
Figura 4.10	Espectro de corriente del motor con 1 barra rota con carga (2.7 A).....	87
Figura 4.11	Espectro de corriente del motor con 1 barra rota con carga (2.9 A).....	88
Figura 4.12	Espectro de corriente del motor con 1 barra rota con carga (3.1 A).....	89
Figura 4.13	Espectro de corriente del motor con 1 barra rota con carga (3.3 A).....	89
Figura 4.14	Espectro de corriente del motor con 1 barra rota con carga (3.5 A).....	90
Figura 4.15	Rotura de 2 barras en el rotor.....	92
Figura 4.16	Espectro de corriente del motor con 2 barras rotas sin carga (2.5 A).....	92

Figura 4.17	Espectro de corriente del motor con 2 barras rotas con carga (2.7 A).....	93
Figura 4.18	Espectro de corriente del motor con 2 barras rotas con carga (2.9 A).....	94
Figura 4.19	Espectro de corriente del motor con 2 barras rotas con carga (3.1 A).....	94
Figura 4.20	Espectro de corriente del motor con 2 barras rotas con carga (3.3 A).....	95
Figura 4.21	Espectro de corriente del motor con 2 barras rotas con carga (3.5 A).....	96
Figura 4.22	Rotura de 3 barras en el rotor.....	98
Figura 4.23	Espectro de corriente del motor con 3 barras rotas sin carga (2.5 A).....	98
Figura 4.24	Espectro de corriente del motor con 3 barras rotas con carga (2.7 A).....	99
Figura 4.25	Espectro de corriente del motor con 3 barras rotas con carga (2.9 A).....	100
Figura 4.26	Espectro de corriente del motor con 3 barras rotas con carga (3.1 A).....	100
Figura 4.27	Espectro de corriente del motor con 3 barras rotas con carga (3.3 A).....	101

Figura 4.28	Espectro de corriente del motor con 3 barras rotas con carga (3.5 A).....	102
Figura 4.29	Rotura de 4 barras en el rotor.....	104
Figura 4.30	Espectro de corriente del motor con 4 barras rotas sin carga (2.5 A).....	104
Figura 4.31	Espectro de corriente del motor con 4 barras rotas con carga (2.7 A).....	105
Figura 4.32	Espectro de corriente del motor con 4 barras rotas con carga (2.9 A).....	105
Figura 4.33	Espectro de corriente del motor con 4 barras rotas con carga (3.1 A).....	106
Figura 4.34	Espectro de corriente del motor con 4 barras rotas con carga (3.3 A).....	107
Figura 4.35	Espectro de corriente del motor con 4 barras rotas con carga (3.5 A).....	107
Figura 4.36	Rotura de 5 barras en el rotor.....	109
Figura 4.37	Espectro de corriente del motor con 5 barras rotas sin carga (2.5 A).....	109
Figura 4.38	Espectro de corriente del motor con 5 barras rotas con carga (2.7 A).....	110

Figura 4.39	Espectro de corriente del motor con 5 barras rotas con carga (2.9 A).....	111
Figura 4.40	Espectro de corriente del motor con 5 barras rotas con carga (3.1 A).....	111
Figura 4.41	Espectro de corriente del motor con 5 barras rotas con carga (3.3 A).....	112
Figura 4.42	Espectro de corriente del motor con 5 barras rotas con carga (3.5 A).....	113
Figura 4.43	Rotura de 6 barras en el rotor.....	115
Figura 4.44	Espectro de corriente del motor con 6 barras rotas sin carga (2.5 A).....	115
Figura 4.45	Espectro de corriente del motor con 6 barras rotas con carga (2.7 A).....	116
Figura 4.46	Espectro de corriente del motor con 6 barras rotas con carga (2.9 A).....	116
Figura 4.47	Espectro de corriente del motor con 6 barras rotas con carga (3.1 A).....	117
Figura 4.48	Espectro de corriente del motor con 6 barras rotas con carga (3.3 A).....	118
Figura 4.49	Espectro de corriente del motor con 6 barras rotas con carga (3.5 A).....	118

Figura 4.50	Rotura de 7 barras en el rotor.....	120
Figura 4.51	Espectro de corriente del motor con 7 barras rotas sin carga (2.5 A).....	121
Figura 4.52	Espectro de corriente del motor con 7 barras rotas con carga (2.7 A).....	121
Figura 4.53	Espectro de corriente del motor con 7 barras rotas con carga (2.9 A).....	122
Figura 4.54	Espectro de corriente del motor con 7 barras rotas con carga (3.1 A).....	123
Figura 4.55	Espectro de corriente del motor con 7 barras rotas con carga (3.3 A).....	124
Figura 4.56	Espectro de corriente del motor con 7 barras rotas con carga (3.5 A).....	124
Figura 4.57	Rotura de 8 barras en el rotor.....	126
Figura 4.58	Espectro de corriente del motor con 8 barras rotas sin carga (2.3 A).....	126
Figura 4.59	Espectro de corriente del motor con 8 barras rotas con carga (2.5 A).....	127
Figura 4.60	Espectro de corriente del motor con 8 barras rotas con carga (2.7 A).....	128

Figura 4.61	Espectro de corriente del motor con 8 barras rotas con carga (2.9 A).....	128
Figura 4.62	Espectro de corriente del motor con 8 barras rotas con carga (3.1 A).....	129
Figura 4.63	Espectro de corriente del motor con 8 barras rotas con carga (3.3 A).....	130
Figura 4.64	Espectro de corriente del motor con 8 barras rotas con carga (3.5 A).....	130

# ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pag.</b>
<b>CAPÍTULO 2</b>	
Tabla II.I Estado del motor según la diferencia de amplitudes en dB's entre el armónico fundamental y el mayor de los armónicos laterales.....	46
<b>CAPÍTULO 3</b>	
Tabla III.I Características del motor utilizado en las pruebas.....	54
<b>CAPÍTULO 4</b>	
Tabla IV.I Resultados obtenidos con el motor sano.....	84
Tabla IV.II Resultados obtenidos con 1 barra rota.....	91
Tabla IV.III Resultados obtenidos con 2 barras rotas.....	97
Tabla IV.IV Resultados obtenidos con 3 barras rotas.....	103
Tabla IV.V Resultados obtenidos con 4 barras rotas.....	108
Tabla IV.VI Resultados obtenidos con 5 barras rotas.....	113
Tabla IV.VII Resultados obtenidos con 6 barras rotas.....	119

Tabla IV.VIII Resultados obtenidos con 7 barras rotas.....	125
Tabla IV.IX Resultados obtenidos con 8 barras rotas.....	131

# ABREVIATURAS

CBM	Condition Based Maintenance
RBM	Reliability Based Maintenance
MCA	Motor Circuit Analysis
MCSA	Motor Current Signature Analysis
dB	Decibeles
Hz	Hertz
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench
RPM	Revoluciones Por Minuto
NI	National Instruments

# SIMBOLOGÍA

$f_1$	Frecuencia del Voltaje de Alimentación al Motor
$N_s$	Velocidad Sincrónica del Campo Magnético Giratorio del Motor
$P$	Número de Pares de Polos de los Devanados del Motor
$N_r$	Velocidad de Giro del Rotor
$s$	Deslizamiento
$f_2$	Frecuencia Asociada a la Velocidad de Deslizamiento
$f_{sb}$	Frecuencia Asociada con las Fallas Rotóricas
HP	Caballos de Fuerza
V	Voltaje
I	Corriente
$V_{ac}$	Voltaje Alterno
A	Amperios
E/S	Entrada Salida
Arms	Amperios RMS
Vrms	Voltios RMS
kS	Kilomuestras
seg	Segundos

Ch	Canal
$f_{sb1}$	Frecuencia del Armónico Lateral Superior
$f_{sb2}$	Frecuencia del Armónico Lateral Inferior

# INTRODUCCIÓN

El mantenimiento industrial se define como un conjunto de normas y técnicas establecidas para la conservación de la maquinaria e instalaciones de una planta industrial, para que proporcione mejor rendimiento en el mayor tiempo posible.

El mantenimiento ha sufrido transformaciones con el desarrollo tecnológico; a los inicios era visto como actividades correctivas para solucionar fallas. Las actividades de mantenimiento eran realizadas por los operarios de las maquinas; con el desarrollo de las máquinas se organiza los departamentos de mantenimiento no solo con el fin de solucionar fallas sino de prevenirlas, actuar antes que se produzca la falla.

Actualmente el mantenimiento busca aumentar y confiabilizar la producción; aparece el mantenimiento preventivo, el mantenimiento predictivo, el mantenimiento proactivo, la gestión de mantenimiento asistido por computador y el mantenimiento basado en la confiabilidad.

El mantenimiento asistido por computador es hoy en día una herramienta muy importante en la detección de todo tipo de fallas en los motores de inducción, en este trabajo nos enfocaremos a estudiar e implementar en el software LabView un método que nos permite determinar el grado de avería de un motor por fallas rotóricas, analizando una de las corrientes de fase.

# **CAPÍTULO 1**

## **FUNDAMENTOS DEL MANTENIMIENTO INDUSTRIAL**

### **1.1 GENERALIDADES**

#### **1.1.1 CONCEPTOS BÁSICOS**

Aclaremos algunas de las terminologías que vamos a utilizar en el transcurso del análisis del mantenimiento:

- a. Mantener. Conjunto de acciones para que las instalaciones y máquinas de una industria funcionen adecuadamente.
- b. Producción. Es un proceso mediante el cual se generan utilidades a la industria.
- c. Falla o avería. Daño que impide el buen funcionamiento de la maquinaria o equipo.
- d. Defecto. Suceso que ocurre en una máquina que no impide el funcionamiento.

- e. Confiabilidad. Buena funcionalidad de la maquinaria y equipo dentro de una industria en definitiva el grado de confianza que proporcione una planta
- f. Disponibilidad. Porcentaje de tiempo de buen funcionamiento de una maquina o equipo por ente de toda la industria es decir producción optima.
- g. Entrenamiento. Preparar o adiestrar al personal del equipo de mantenimiento, para que sea capaz de actuar eficientemente en las actividades de mantenimiento.
- h. Seguridad. Asegurar el equipo y personal para el buen funcionamiento de la planta, para prevenir condiciones que afecten a la persona o la industria.
- i. Prevención. Preparación o disposición que se hace con anticipación ante un riesgo de falla o avería de una máquina o equipo.
- j. Diagnóstico. Dar a conocer las causas de un evento ocurrido en el equipo o máquina o evaluar su situación y su desempeño.
- k. Reparación. Solución de una falla o avería para que la maquinaria o equipo este en estado operativo.
- l. Mejorar. Pasar de un estado a otro que de mayor desempeño de la máquina o equipo.
- m. Planificar. Trazar un plan o proyecto de las actividades que se van a realizar en un periodo de tiempo.

### **1.1.2 MANTENIMIENTO**

Mantenimiento son todas las actividades necesarias para mantener el equipo e instalaciones en condiciones adecuadas para la función que fueron creadas; además de mejorar la producción buscando la máxima disponibilidad y confiabilidad de los equipos e instalaciones.

El mantenimiento está basado en varios principios tales como: Respeto para todos los empleados y funcionarios, buen liderazgo, trabajo en equipo compartiendo responsabilidades, compromiso con la seguridad y medio ambiente, propiciar un ambiente de responsabilidad donde se desarrollen conocimientos y habilidades.

#### **1.1.2.1 FINALIDAD DEL MANTENIMIENTO**

La finalidad del mantenimiento es mantener operable el equipo e instalación y restablecer el equipo a las condiciones de funcionamiento predeterminado; con eficiencia y eficacia para obtener la máxima productividad.

En consecuencia la finalidad del mantenimiento es brindar la máxima capacidad de producción a la planta, aplicando técnicas que brindan un control eficiente del equipo e instalaciones.

### **1.1.2.2 OBJETIVOS DEL MANTENIMIENTO**

1. Garantizar la disponibilidad y la confiabilidad de los equipos e instalaciones.
2. Satisfacer los requisitos del sistema de calidad de la empresa.
3. Cumplir todas las normas de seguridad y medio ambiente.
4. Maximizar la productividad y eficiencia.

Son los objetivos probables dentro de una industria, estos estarían garantizando la disponibilidad de equipo y las instalaciones con una alta confiabilidad de la misma y con el menor costo posible.

### **1.1.2.3 CANTIDAD DE MANTENIMIENTO**

En este espacio analizamos la cantidad de mantenimiento que se debe realizar en una industria.

- a. La cantidad está en función del nivel mínimo permitido de las propiedades del equipo definidas por el fabricante.
- b. El tiempo de uso o de funcionamiento durante el cual el equipo está en marcha y se determina que sus propiedades de funcionamiento bajan.

- c. Forma en que los equipos están sometidos a tensiones, cargas, desgaste, corrosión, etc. Que causan pérdida de las propiedades de los mismos.

El mantenimiento no debe verse como un costo si no como una inversión ya que está ligado directamente a la producción, disponibilidad, calidad y eficiencia; el equipo de mantenimiento debe estar perfectamente entrenado y motivado para llevar a cabo la tarea de mantenimiento; Se debe tener presente la construcción, diseño y modificaciones de la planta industrial como también debe tener a mano la información del equipo, herramienta insumos necesarios para el mantenimiento.

El mantenimiento requiere planeación, calidad, productividad, trabajo en equipo, para reducir costos y pérdidas; este lo descubriremos a medida que desarrollemos el capítulo.

## **1.2 TIPOS DE MANTENIMIENTO**

### **1.2.1 CORRECTIVO**

Comprende el mantenimiento que se lleva con el fin de corregir los defectos que se han presentado en el equipo. Se clasifica en:

- No planificado. Es el mantenimiento de emergencia. Debe efectuarse con urgencia ya sea por una avería imprevista a reparar lo más pronto posible o por una condición imperativa que hay que satisfacer (problemas de seguridad, de contaminación, de aplicación de normas legales, etc.).
- Planificado. Se sabe con antelación qué es lo que debe hacerse, de modo que cuando se pare el equipo para efectuar la reparación, se disponga del personal, repuesto y documentos técnicos necesarios para realizarla correctamente.

### **1.2.2 PREDICTIVO**

Este mantenimiento está basado en la inspección para determinar el estado y operatividad de los equipos, mediante el conocimiento de valores de variables que ayudan a descubrir el estado de operatividad; esto se realiza en intervalos regulares para prevenir las fallas o evitar las consecuencias de las mismas.

Para este mantenimiento es necesario identificar las variables físicas (temperatura, presión, vibración, etc.) cuyas variaciones están apareciendo y pueden causar daño al equipo. Es el mantenimiento más técnico y avanzado que requiere de conocimientos analíticos y técnicos y necesita de equipos sofisticados.

### **1.2.3 PREVENTIVO**

Es el mantenimiento que se realiza con el fin de prevenir la ocurrencia de fallas, y mantener en un nivel determinado a los equipos, se conoce como mantenimiento preventivo directo o periódico, por cuanto sus actividades están controladas por el tiempo; se basa en la confiabilidad de los equipos.

## **1.3 PLANEACIÓN DEL MANTENIMIENTO**

La planeación del mantenimiento nos permite programar los proyectos a mediano y largo plazo de las acciones de mantenimiento que da la dirección a la industria.

Muchos son los beneficios alcanzados al llevar un programa establecido de modelos de mantenimiento, programación y control del área de mantenimiento, cito algunos:

- Menor consumo de horas hombre.
- Disminución de inventarios.
- Menor tiempo de parada de equipos.

- Mejora el clima laboral en el personal de mantenimiento.
- Mejora la productividad (Eficiencia x Eficacia).
- Ahorro en costo.

### **1.3.1 PRINCIPIOS**

La planeación del mantenimiento está centrada en la producción, el trabajo es para limitar, evitar y corregir fallas.

La planeación centrada en los procesos, todo mantenimiento debe seguir un proceso preestablecido y planificado según el manual de mantenimiento de la empresa.

El mejoramiento continuo, la planificación ayuda a evaluar y mejorar la ejecución del mantenimiento y la producción en la industria.

### **1.3.2 ¿QUÉ ES PLANEAR?**

Es trazar un proyecto que contengan los puntos siguientes:

- El Que: Alcance del trabajo o proyecto. En este punto se plantea una lista de órdenes de trabajo a efectuarse, incluyendo solo las necesarias.
- El Como: Procedimientos, normas, procesos. Forma a efectuar el trabajo, incluye documentación técnica, procedimientos y maniobras.

- Los Recursos: Humanos horas hombre necesarias según especialidades, equipos, herramientas, materiales etc.
- La Duración: Tiempo del proyecto o trabajo.

En el mantenimiento básicamente plantaremos estos puntos que estarán en concordancia con los objetivos generales de la empresa.

### **1.3.3 CRONOGRAMA**

Es una programación específica de las actividades de mantenimiento en el tiempo. Se puede trazar cronogramas a mediano y largo plazo, proyectando una visión para el desarrollo de la industria en forma efectiva.

## **1.4 PROCESOS PRINCIPALES**

### **1.4.1 PROGRAMACIÓN**

La programación se fundamenta en el orden de realización de las actividades de mantenimiento según los modelos planteados y tomando en cuenta la periodicidad; se basa en el orden en que se deben realizar los mantenimientos según su urgencia, disponibilidad del equipo de mantenimiento y del material necesario.

La programación del mantenimiento esta dada según el equipo y la inspección que se realicen en la industria: esta programación es diaria, semanal, quincenal, mensual, etc.

PROGRAMACIÓN DE MANTENIMIENTOS CENTRAL HIDROABANICO 37.5MW							
Periodicidad	Casa de máquinas	Captación	Subestación II	Balaquepe	Línea de 69KV	Tubería de presión	Sistema de comunicación
Semanal	Transformador de 18MVA Transformador de 27MVA Baterías		Baterías				
Quincenal	Aire Acondicionado Generador de emergencia	Genrador de emergencia	Aire acondicionado	Verificación limpieza y revegetación			
Mensual	Componentes de cada Unidad Limpieza areas verde Limpieza y chequeo electrico Verificación sistema de incendios	Chequeo eléctrico Limpieza areas verdes Mantenimiento centrales hidráulicas Sistema de compuertas de guillotina	Chequeo eléctrico y limpieza Limpieza areas verdes			Verificación de tubería Válvulas y drenajes	Chequeo eléctrico y limpieza
Trimestral	Mantenimiento guarda polvos generadores y verificación estado de escobillas puesta a tierra Aire Acondicionado	Verificación del sistema en estado manual				Lubricación del sistema de cierre Limpieza de cerramiento Limpieza de drenajes	
Cuatro meses	Verificación niveles de ruido				Recorrido, y verificación de estado		
Semestral	Mantenimiento unidades	Mantenimiento compuerta de mantenimiento Mantenimiento compuertas de guillotina				Mediciones de espesor tubería	
Anual	Mantenimiento unidades Mantenimiento transformadores Termografía y vibraciones	Mantenimiento centrales hidráulicas Termografía y vibraciones	Mantenimiento y limpieza de la subestación Termografía y vibraciones			Inspección interna y ajuste de pernos de las válvulas	

**Figura 1.1 Ejemplo de programación del mantenimiento**

#### 1.4.2 ADMINISTRACIÓN DE REPUESTOS Y MATERIALES

Se debe tomar en cuenta varios aspectos para una administración efectiva de repuestos y materiales:

- Repuestos. En los repuestos a ser almacenados hay que considerar la vida útil del repuesto y el alto costo.
- Materiales. Se considera consumibles y partes de uso general.

Para una gestión efectiva se considera un buen control de inventarios y una actualización continua. Además del almacenamiento de los mismos que debe ser en un lugar de fácil acceso, con una buena distribución y centralizado con el fin de

movilizar en el menor tiempo posible en caso de mantenimientos emergentes; conviene tener en cuenta el beneficio y el valor potencial del repuesto para no asumir riesgos ni un inútil almacenamiento.

También se debe tomar en cuenta los presupuestos y las asignaciones requeridas para la obtención y almacenamiento de estos recursos para que el mantenimiento sea efectivo. En este punto se deben calcular, elaborar y controlar los presupuestos.

#### **1.4.3 INFORMACIÓN**

La información de cada uno de los equipos de la planta deben estar estrictamente detallada; cada uno de los elementos debe tomar en cuenta los aspectos siguientes:

a. Documento informativo básico y fundamental que contiene las características de fabricación de cada equipo o elemento de la industria, este debe contener la siguiente información:

- Instalación de la que forma parte
- Ubicación dentro de la instalación
- Tipo de máquina
- Datos específicos (datos de placa)
- Proveedor y fecha de la compra
- Planos de conjunto y piezas
- Lista y codificaciones de las piezas de repuestos y su respectiva ubicación

- b. Ficha historial de cada máquina o equipo, que contenga la información de la intervención de mantenimiento de la máquina y sus elementos ordenados cronológicamente.
- c. Orden de trabajo que contenga la descripción del trabajo a realizar, recursos, aprobaciones y tiempo programado para la ejecución como mínimo.

#### **1.4.4 REPORTE**

Son documentos que informan el desempeño de los equipos o máquinas dentro de la industria y el modelo de mantenimiento que se le aplica, es decir un informe que se presenta periódicamente y según la cronología en que se aplique el mantenimiento a dicho elemento; permite evaluar y analizar las posibles averías, predecir y controlar periódicamente el comportamiento de equipo y maquinaria.

#### **1.4.5 PREPARACIÓN**

Preparar en mantenimiento es asegurar la calidad de trabajo en el área que se aplica el mantenimiento y por ende incide en la confiabilidad de la industria.

La preparación del mantenimiento es un plan en donde se detalla el trabajo a realizar, se verifica órdenes de trabajo, herramientas, búsqueda de información y preparación del recurso humano que intervendrá en el mantenimiento.

El supervisor de mantenimiento juega un papel importante ya que el verificara con anticipación todos los recursos para el desempeño efectivo de la aplicación del mantenimiento; el mismo buscará al personal idóneo y calificado para el mantenimiento e incluirá en la preparación.

La preparación que se realiza será satisfactoria en la ejecución del mantenimiento; el trabajo en equipo organizado que se llevará acabo son factores motivantes que inciden en la producción.

## **1.5 ANÁLISIS DE FALLAS**

### **1.5.1 CAUSAS**

Son diferentes las causas dentro de una industria para que se produzca una falla en los equipos, estas están vinculadas con el desempeño del equipo.

Tenemos fallas físicas y fallas funcionales:

- Fallas físicas. Están relacionadas con las magnitudes físicas como temperatura, presión, etc.
- Falla funcional. Están relacionadas con la función que desempeñan dentro de la industria.

Las fallas se pueden corregir pero no todas, dependerán del uso y de las inspecciones básicas que se les realice, el operador debe estar atento al desempeño del equipo.

En el análisis de fallas está ligado íntimamente con la criticidad en donde se debe codificar el equipo para priorizar las actividades de mantenimiento preventivo.

En la industria se debe implementar un plan de contingencia de fallas que contenga partes, piezas, repuestos, material de los equipos de alta criticidad.

### **1.5.2 CRITICIDAD**

Es la herramienta de orientación efectiva para la toma de decisiones a que equipo o parte de la industria priorizo actividad de mantenimiento.

La criticidad consiste en determinar o clasificar los equipos existentes según la importancia que tienen para cumplir los objetivos de la industria.

Los equipos críticos, son aquellos que al fallar pueden afectar la seguridad del personal, el entorno ambiental, provocar un paro de la producción o incrementar el costo de mantenimiento.

El objetivo es priorizar el esfuerzo de mantenimiento, enfocado a la satisfacción del cliente, favoreciendo y promoviendo el aprovechamiento de los recursos del área en las actividades de mayor valor.

Para determinar la criticidad dentro de la planta es necesario asignar valores a la máquina o equipo de cero a diez a cada ítem en consideración.

Los criterios para analizar la criticidad pueden ser los siguientes:

- Seguridad.
- Medio ambiente.
- Producción.
- Costos.
- Tiempo medio para reparar.
- Frecuencia de falla.
- Calidad.

### **1.5.3 TOMA DE DECISIONES**

Al llegar a este punto estamos ya en la capacidad de tomar decisiones para un buen desempeño de la industria teniendo en cuenta la información de cada uno de los equipos, su historial, su criticidad, etc.

Son parámetros que hay que tener en cuenta para la planificación del mantenimiento y gestión de recursos, materiales, repuestos, etc.

El jefe de mantenimiento es el encargado de gestionar todos los procesos para que los recursos materiales y humanos estén calificados. Buscando continuamente proveer al cliente máxima productividad y eficiencia sin afectar al medioambiente y dando seguridad a los gestores que intervienen en este proceso.

Todo el proceso de mantenimiento debe ser evaluado constantemente para buscar prevenir, corregir, mejorar el sistema de calidad y fiabilidad de la industria.

## **1.6 IMPORTANCIA DEL MANTENIMIENTO**

### **1.6.1 JUSTIFICACIÓN**

El mantenimiento dentro de la industria es el motor de la producción, sin mantenimiento no hay producción.

Todo equipo está sujeto a normas constantes de mantenimiento, dando así alta confiabilidad a la industria; durante el desarrollo de la tesina descubrimos que el mantenimiento es un proceso en el que interactúan máquina y hombre para generar ganancias, las inspecciones periódicas ayudan a tomar decisiones basadas en parámetros técnicos.

El desempeño de la empresa estará en la calidad de mantenimiento que se provea a cada uno de los elementos, es de suma importancia tener una visión a futuro, planificar y programar el mantenimiento para cubrir toda el área en el tiempo, sea a mediano o largo plazo y además reducir costos de repuestos y materiales, para un mejor desempeño;

El mantenimiento está enfocado en la mejora continua y prevención de fallas, mediante una organización que esta documenta la misma que ayuda al trabajo en equipo, y preparación constante para actuar sin dejar caer la producción.

En la industria el jefe de mantenimiento debe ser un especialista en organización gerencial, para asegurar que todas las tareas de mantenimiento se hagan correcta y eficientemente.

### **1.6.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS**

Muchas son las ventajas al aplicar el mantenimiento eficiente y correctamente, en forma general es garantizar la producción, y mantener los equipos operables aumentando la vida útil.

Tememos modelos de mantenimiento que ayudan a una inspección constante para tomar decisiones basadas en criterios de ingeniería y desempeño de los elementos que conforman la producción.

La planificación ayuda a documentar los mantenimientos que se aplica a cada uno de los equipos, llevar un histórico de desempeño y prevenir fallas.

El análisis del mantenimiento brinda instrumentos que ayudan a llevar una codificación según criticidad de los elementos.

Como desventaja mencionaría el hecho de que el mantenimiento requiere el uso de ciertos materiales ajenos al producto que se fabrica en esa industria, los cuales podrían contaminar el producto.

# **CAPÍTULO 2**

## **FUNDAMENTOS DEL ANÁLISIS ESPECTRAL DE CORRIENTES EN MOTORES DE INDUCCIÓN PARA DETECCIÓN DE FALLAS**

### **2.1 INTRODUCCIÓN**

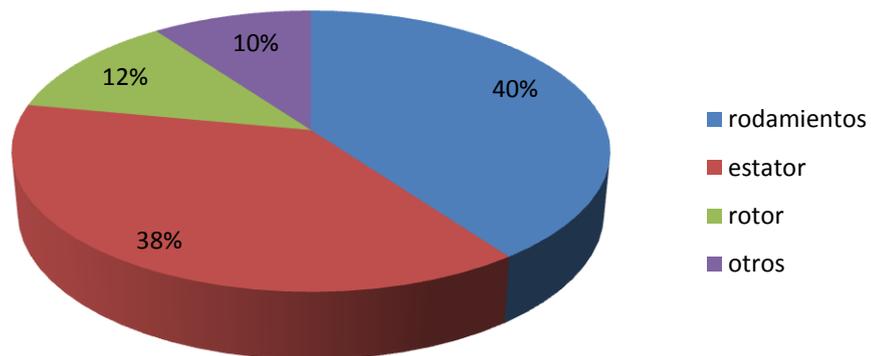
En la actualidad muchas de las tareas que una industria moderna debe llevar a cabo, son realizadas por motores de inducción. En países industrializados un 40 a 50 % de toda la energía producida está destinada para el consumo de estas máquinas. El mercado de estos motores ha crecido de manera tal, que tener un control y monitoreo continuo y eficiente de su comportamiento se ha vuelto indispensable y como consecuencia de esta necesidad, es común que la industria use métodos basados en mantenimientos dentro de sus programas de operación; como por ejemplo:

- “Mantenimiento Basado en la Condición” (condition based maintenance, CBM): es un plan de mantenimiento práctico que busca optimizar la combinación de mantenimientos preventivo, predictivo, previsor y basado en fallas. Para esto se identifica un “equipo de trabajo de confiabilidad” que realice una valoración cualitativa de los procesos de planta, así como de la maquinaria, para determinar la importancia de las tareas que se deberán llevar a cabo. Se debe analizar el tipo de mantenimiento a realizarse para evitar hacer dos actividades en las que se obtenga un mismo resultado. Es importante tener una mejora ininterrumpida del equipo y el programa de mantenimiento se debería reevaluar con una periodicidad anual o semi-anual.
- “Mantenimiento Basado en la Confiabilidad” (reliability based maintenance, RBM): es un método muy similar a CBM, ya que RBM es una estrategia técnica de mantenimiento que busca identificar la metodología apropiada en base de los requisitos de mantenimiento adecuados para cada situación. La diferencia más importante entre RBM y CBM es que RBM usa una rigurosa evaluación cuantitativa de la criticidad del equipo basada en conductas de falla identificadas y sus efectos. Una vez que se ha identificado las conductas de falla, los requisitos de mantenimiento son especificados para cada parte del equipo; con esto se desarrolla los procedimientos para ejecutar un mantenimiento preventivo de tal manera de conseguir un alto índice de confiabilidad.

Estos métodos, junto con esquemas convencionales de mantenimiento se aplican para monitorear el funcionamiento de la maquinaria de tipo eléctrico, entre ellos, los motores de inducción y tienen como objetivo reducir el número de fallas inesperadas y el tiempo improductivo, incrementando el tiempo entre paros planificados para mantenimientos programados, dando como resultado la reducción de los costos de operación y mantenimiento en general.

En la actualidad, la evolución de estrategias de medición, control de procesos, automatización y procesamiento de señales digitales, ha logrado un gran avance en el campo de la investigación de nuevas técnicas, desarrollo de modelos y aplicaciones, para evitar la operación de máquinas eléctricas en condiciones poco seguras y para evaluar el estado de las mismas “En-Línea” evitando que estas dejen de funcionar durante algún proceso de diagnóstico.

Un motor de inducción es un sistema electromecánico, por lo que pueden presentarse fallas de naturaleza eléctrica y mecánica. De acuerdo con estadísticas de fallas en motores de inducción tipo jaula de ardilla, se ha reportado que el porcentaje de fallas, de acuerdo al elemento constitutivo del motor en el que ocurre la falla, es el mostrado en la Figura 2.1.



**Figura 2.1 Porcentaje de fallas en motores de inducción de acuerdo al componente constitutivo en el que ocurren**

- Fallas en los rodamientos: la mayoría de máquinas eléctricas usa cojinetes con elementos rotativos, tales como bolas o rodillos, que son una de las causas más comunes de falla. Una falla en el rodamiento ocasionaría componentes de frecuencia únicas en las mediciones de vibración mecánica y en las señales de otros sensores, estas frecuencias de falla, son función de la geometría del rodamiento y de la velocidad de rotación. Las fallas en los rodamientos, pueden causar también excentricidad del rotor.
- Fallas en el estator: las fallas en los devanados del estator, son a menudo ocasionadas por fallas de aislamiento entre dos espiras adyacentes del devanado; a este tipo de falla se la denomina como falla “espira a espira” o “cortocircuito entre espiras”. Las

corrientes inducidas resultantes producen sobrecalentamiento y causan un desbalance en el flujo magnético. Si esta falla no se detecta, el calentamiento causará más daño al aislamiento del estator hasta desembocar en una falla irreversible. El desbalance del flujo magnético puede resultar en una vibración excesiva que a su vez puede causar fallas prematuras en los cojinetes.

- Fallas en el rotor: las fallas que ocurren en el rotor ocupan alrededor del 12% del total de fallas en motores de inducción. La falla más común en el rotor es la ruptura o agrietamiento de las barras que forman la jaula de ardilla o del anillo de unión que las cortocircuita, esto puede ser atribuible al ciclo térmico o mecánico del rotor durante la operación. Este tipo de falla produce un efecto bastante estudiado en las componentes espectrales de corriente, en las que aparecen un par de bandas laterales alrededor de la frecuencia fundamental.
- Otras: (10%), como la excentricidad del eje que surge cuando el rotor no está perfectamente centrado con respecto del estator dando como resultado un entrehierro no uniforme entre ellos, provocando vibración mecánica anormal. Además que no se puede descartar la posibilidad de que los motores tengan errores de fabricación.

De estos datos, se puede concluir que los problemas en los rotores de motores de inducción tipo jaula de ardilla, son en general, menos frecuentes que las fallas en los devanados estáticos del motor, pero

sin embargo, la posibilidad de que la falla ocurra existe y uno de los problemas más severos que le puede ocurrir a un motor es la ruptura de las barras de la jaula de ardilla del rotor.

En general, la falla de un motor de inducción, que es el núcleo mismo de los procesos industriales más comunes, se traduce en significativas pérdidas, desde un atraso leve en la elaboración de algún detalle, hasta un paro total del sistema de producción, con lo que se sobreentiende un daño a la economía de la empresa. De aquí que el monitoreo de los motores de inducción se vuelve esencial para cualquier tipo de mantenimiento implementado en una industria.

## **2.2 MÉTODOS DE MONITOREO**

El objetivo final y que tiene mayor dificultad en ser alcanzado en el monitoreo “En-Línea” es el de examinar las características y los parámetros que permitan determinar si existe o no una falla, y discriminar la naturaleza de la misma. Los métodos más comunes que se han estado utilizando son entre otros:

- Análisis Circuitual del Motor (Motor Circuit Analysis, MCA)
- Análisis de Vibraciones
- Análisis Infrarrojo
- Análisis Espectral de Corrientes del Motor (Motor Current Signature Analysis MCSA)

### **2.2.1 ANÁLISIS CIRCUITAL DEL MOTOR**

Este método en bajo voltaje usa lecturas individuales de resistencia, impedancia, inductancia, ángulo de fase, corriente con su respectiva respuesta en frecuencia y pruebas de aislamiento a tierra para determinar, evaluar y resolver problemas de conexión, cables, estado del rotor y estator, entrehierro y aislamiento a tierra. Es así que las lecturas de una resistencia son usadas para detectar desconexiones y conductores rotos, mientras que los valores de impedancia e inductancia son comparados para evaluar condiciones de aislamiento entre bobinados. Además, las pruebas de aislamiento a tierra son utilizadas para detectar fallas a tierra, mientras que los ángulos de fase y respuesta en frecuencia, evalúan posibles cortocircuitos entre espiras de los bobinados.

### **2.2.2 ANÁLISIS DE VIBRACIONES**

El análisis de vibraciones requiere que un transductor lleve la señal vibratoria a un dispositivo capaz de analizar su respuesta en frecuencia.

Dependiendo del tipo de carga y del tipo de falla, este análisis provee indicadores de fallas mecánicas y su severidad, además

de dar indicios para detectar fallas eléctricas. Para este proceso se requiere conocimiento del sistema a diagnosticar.

### **2.2.3 ANÁLISIS INFRARROJO**

El principio del análisis infrarrojo es proveer información acerca de la diferencia de temperatura entre objetos. Un análisis infrarrojo se puede aplicar para determinar de manera confiable fallas eléctricas como por ejemplo desconexiones y cortocircuitos. Además, puede prevenir daños mecánicos de una manera menos confiable. Las lecturas varían de acuerdo a la carga y se necesita conocimiento del sistema a ser evaluado.

### **2.2.4 ANÁLISIS ESPECTRAL DE CORRIENTES DEL MOTOR**

El MCSA usa al motor como transductor y analiza cómo varía la corriente a través de él. Usualmente utiliza la representación en frecuencia de la señal. Este método sirve para detectar fallas eléctricas como el cortocircuito entre bobinas, o mecánicas como la ruptura de barras del rotor. Es sensitivo a variaciones de carga, requiere conocimiento de los datos de placa del motor y es usado principalmente para decidir si un motor continúa o no operando.

## **2.3 ANÁLISIS ESPECTRAL DE CORRIENTE DEL MOTOR**

### **2.3.1 ANTECEDENTES**

El análisis de corriente en motores de inducción tiene su origen en Gran Bretaña entre los años de 1970 y 1980. Como resultado de esta investigación se precisó que observando el contenido en frecuencia de la corriente de alimentación de un motor trifásico de inducción, es posible determinar el estado de ciertos componentes del rotor, como por ejemplo las barras de la jaula o los anillos de la misma, además de poder determinar el nivel de excentricidad del entrehierro, y cortocircuitos entre los devanados del estator. El software asociado al MCSA, fue entonces desarrollado en base de estos estudios, como una combinación de leyes fundamentales de la física y el conocimiento empírico recogido del estudio de muchos centenares de motores industriales diferentes.

En la actualidad MCSA, se presenta como una excelente alternativa de monitoreo en línea y no invasivo, usada para diagnosticar ciertos problemas que se pueden presentar en motores de inducción, tales como barras rotas en el rotor, niveles anormales de excentricidad del entrehierro, cortocircuitos en los devanados estáticos en bajo voltaje, y ciertos problemas mecánicos.

En el sistema a ser diseñado, se enfocará únicamente la detección de fallas por barras rotas en la jaula de ardilla del rotor en motores de inducción.

### **2.3.2 CARACTERÍSTICAS DEL MCSA**

Un sinnúmero de pruebas han confirmado que MCSA tiene fortalezas inherentes al método como tal, las más notables se describen a continuación:

- Tiene la capacidad de hacer monitoreo no invasivo y en una posición remota, respecto del equipo al que se está evaluando.
- Proporciona información acerca del daño y el diagnóstico del equipo, comparable con la instrumentación convencional.
- Tiene la capacidad de diferenciar entre un tipo de falla y otra.
- El diagnóstico mediante MCSA, puede ser realizado rápidamente y tan frecuentemente como se desee y por personal relativamente inexperto, usando equipo portátil y económico.
- Es aplicable tanto para máquinas de alta potencia, como para máquinas de potencia fraccionaria, de corriente continua o alterna que pueden ser trifásicas o monofásicas.

- Para máquinas trifásicas, se requiere analizar únicamente la corriente de una de las tres fases.
- Usando MCSA se puede detectar y diferenciar fallas relacionadas con la carga y la alimentación al motor, analizando en forma conjunta las señales de voltaje y corriente de alimentación al motor.

En general, MCSA es un método de monitoreo de maquinaria eléctrica de tipo industrial que se aplica principalmente en motores de inducción; tiene la ventaja de poder hacer el diagnóstico en forma no invasiva, es decir, mientras el motor está trabajando en condiciones normales de operación y proporcionando un alto grado de sensibilidad, selectividad y rentabilidad.

### **2.3.3 FUNDAMENTOS DE MCSA**

MCSA se fundamenta en que a un motor eléctrico convencional, se lo puede ver también como un transductor eficiente y permanentemente conectado, ya que a través de él se puede detectar variaciones en la carga o variaciones de naturaleza mecánica en su funcionamiento. Estas variaciones generadas dentro del sistema mecánico, son convertidas como señales distintivas o “marcas” en la corriente eléctrica de alimentación al motor, por lo que para obtener estas señales, es necesario tomar una muestra de dicha corriente, lo que se puede hacer de forma

confiable y segura con métodos no invasivos. La muestra tomada debe ser procesada con el fin de suministrar indicativos de la condición del motor y para este análisis se puede usar el dominio del tiempo o el dominio de la frecuencia, siendo este último el método más usado actualmente.

MCSA, usa el criterio de que a través de una combinación de las componentes espectrales de señales de voltaje y corriente de alimentación al motor se puede detectar y diferenciar fallas relacionadas con la carga y la alimentación al motor. Se puede, entonces, clasificar a las fallas como de naturaleza eléctrica o mecánica con el siguiente principio:

- Si las componentes que se muestran en la señal de corriente, se reflejan también en la señal de voltaje, se concluye que la falla es de naturaleza eléctrica.
- Si las componentes se muestran en la señal de corriente, pero no en la señal de voltaje, se concluye que el problema es de naturaleza mecánica.

De acuerdo al fundamento de MCSA, se requiere de ciertos elementos para que éste método pueda ser implementado de forma exitosa, tal como se muestra en la Figura 2.2, y esto incluye:

- Tener un conocimiento elemental respecto del diseño y operación de motores de inducción, que pueden ser trifásicos o monofásicos.
- Tener un conocimiento elemental respecto del diseño y operación de motores de inducción, que pueden ser trifásicos o monofásicos.
- Analizar las señales adquiridas en un “Instrumento de MCSA” que permita mostrar el rasgo distintivo en la corriente para poder hacer el diagnóstico del motor en análisis.
- Tener una base de conocimientos experta obtenida a través de la experiencia y la pericia de los operadores dentro de la organización y/o consultores externos, para definir los criterios de gravedad de la falla.
- Una vez hecho el diagnóstico, es el operador encargado del control de la maquinaria quien debe tomar la decisión definitiva, esto es, escoger entre retirar el motor inmediatamente para que sea reparado o dejarlo en funcionamiento y planear un paro programado para rectificar el problema.

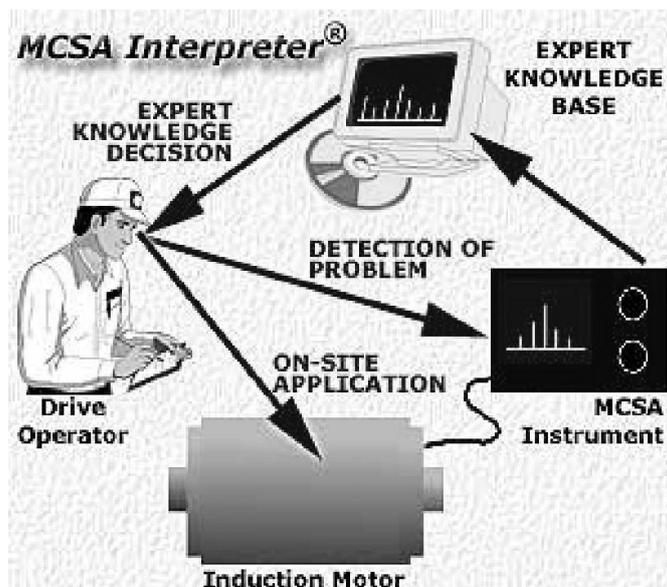


Figura 2.2 Esquema Global para el uso de MCSA

## 2.4 MCSA PARA DETECCIÓN DE BARRAS ROTAS

### 2.4.1 CAUSAS Y CONSECUENCIAS DE BARRAS ROTAS

Las causas para que se produzca la ruptura de las barras de la jaula de un motor de inducción o la ruptura de los anillos que unen dichas barras, son principalmente esfuerzos térmicos y mecánicos a los que un motor puede ser sometido. Estas causas se originan por:

- El arranque directo de motores que para cumplir su ciclo de trabajo deben arrancar varias veces periódicamente y cuyo rotor y jaula no están diseñados para soportar este modo de funcionamiento, lo que provoca altos esfuerzos térmicos y mecánicos.

- La presencia de cargas mecánicas intermitentes, como es el caso de los compresores y trituradoras, pueden someter a la jaula del rotor a altos esfuerzos mecánicos.
- Fallas en el proceso de fabricación del rotor, que podrían ocasionar esfuerzos adicionales a los necesarios.
- Esfuerzos magnéticos causados por fuerzas electromagnéticas desbalanceadas, ruido electromagnético y vibración.
- Degradación del material del rotor debido a químicos o humedad, presentes en el ambiente de trabajo del motor.
- Esfuerzo térmico debido a sobrecarga en el motor, carga desbalanceada, puntos calientes o pérdidas excesivas.
- Esfuerzos mecánicos debido a laminaciones flojas, partes gastadas y fallas en los rodamientos.

Las figuras que se muestran a continuación son un ejemplo de rotores con presencia de barras rotas. En el caso de la Figura 2.3 se expone un rotor en donde se pueden identificar sus partes constitutivas, además de la ruptura y desprendimiento de dos de sus barras. La Figura 2.4 corresponde a un rotor muy defectuoso ya que se encontró que tenía aproximadamente veinte barras rotas, de un total de cuarenta y seis. Finalmente la Figura 2.5 muestra el anillo de unión de un rotor en donde se puede

visualizar cuatro barras rotas y orificios originados por la fundición del aluminio del anillo.

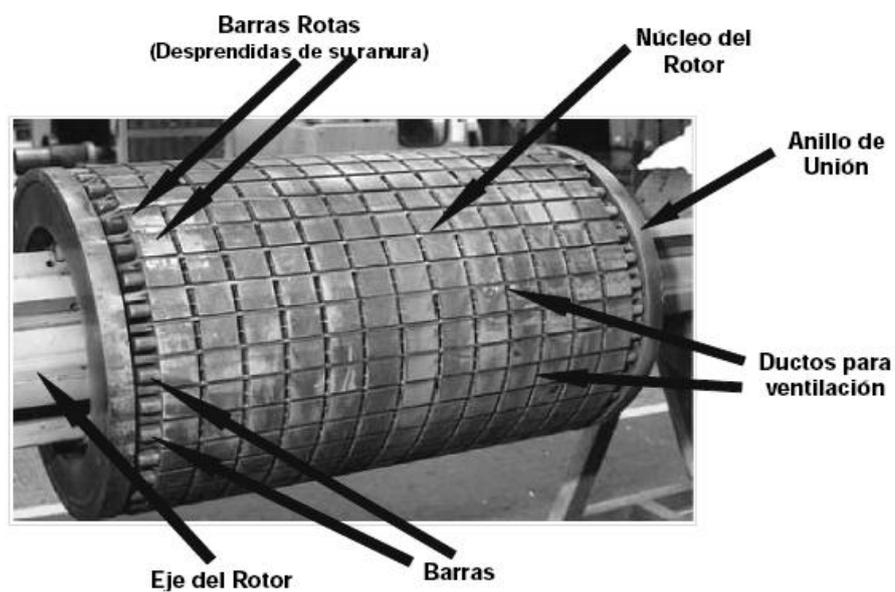


Figura 2.3 Ejemplo de un rotor con barras rotas

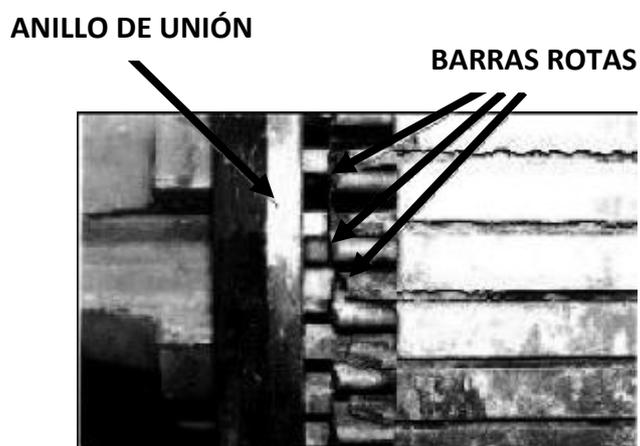


Figura 2.4 Rotor con múltiples barras rotas



**Figura 2.5 Anillos de unión con barras rotas**

La presencia de barras rotas en la jaula de ardilla en un motor de inducción también tiene consecuencias ya que si bien no provoca la falla inminente del motor, puede ocasionar serios efectos secundarios, constituyéndose en un potencial problema. Al poner en funcionamiento el motor, las barras rotas tienden a desprenderse a gran velocidad pudiendo ocasionar daños en los devanados o en el núcleo del estator al golpearlos. Esto afecta el aislamiento, desembocando en una falla cuya consecuencia sería una costosa reparación y la pérdida de la producción por la paralización del proceso al cual el motor está asociado.

Además, en ciertas industrias con presencia de ambientes inflamables, las chispas que se pueden producir por el desprendimiento de las barras rotas al golpear con otros

componentes del motor presentan un grave peligro, que puede atender incluso con la seguridad del personal de la planta.

De todo lo expuesto anteriormente se puede concluir que realizar un monitoreo periódico en los motores de inducción dentro de una industria, con el fin de prevenir y evitar riesgos tanto en la maquinaria como en el personal, es fundamental, y MCSA es un método eficiente para lograrlo.

#### **2.4.2 DESARROLLO CONCEPTUAL Y MATEMÁTICO**

En esta sección se presenta el desarrollo conceptual y matemático que permite fundamentar la aplicación de MCSA para la detección de barras rotas en motores de inducción.

El principio de operación de un motor de inducción consiste en que al ser alimentado con una fuente de corriente alterna trifásica y balanceada, existe circulación de corriente a través de los devanados de armadura, simétricamente dispuestos. Por efecto de inducción aparece una corriente alterna en el rotor.

Como resultado de esto, se produce un campo magnético rotatorio de armadura que gira a velocidad sincrónica y que

adelanta al campo en el rotor, dando como resultado que al colocar el rotor dentro de estos campos tienda a girar arrastrado por ellos, siempre a una velocidad menor que la sincrónica.

Con el fin de justificar el efecto que las barras rotas provocan en un motor de inducción, se analizará el comportamiento de un motor en perfecto estado y luego uno con barras rotas. El análisis parte de la ecuación general que relaciona a la frecuencia del voltaje de alimentación al motor ( $f_1$ ), con la velocidad sincrónica ( $N_s$ ) del campo magnético giratorio, y el número de pares de polos de los devanados ( $p$ ), y esta es:

$$f_1 = \frac{N_s * p}{120}$$

### **Ecuación 2.1**

Para un motor sin barras rotas, únicamente se tiene la presencia de un campo magnético rotatorio en adelante que gira a velocidad sincrónica debido a que se tiene condiciones balanceadas o de perfecta simetría. Al poner el motor en funcionamiento, el rotor girará a una velocidad ( $N_r$ ) menor que la velocidad sincrónica. A la diferencia entre la velocidad sincrónica y la velocidad de rotación del rotor se la denomina velocidad de deslizamiento ( $N_s - N_r$ ), y expresada en “por unidad” respecto de la velocidad sincrónica se representa como:

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s}$$

### Ecuación 2.2

En la Figura 2.6 se ilustra como el rotor gira a una velocidad menor que la velocidad sincrónica y se puede visualizar el concepto de velocidad de deslizamiento. La frecuencia asociada a la velocidad de deslizamiento ( $f_2$ ), que corresponde a la frecuencia de la corriente y voltaje inducidos en el rotor, se define como:

$$f_2 = \frac{(N_s - N_r) * p}{120}$$

$$f_2 = s * \frac{N_s * p}{120}$$

$$f_2 = s * f_1$$

### Ecuación 2.3

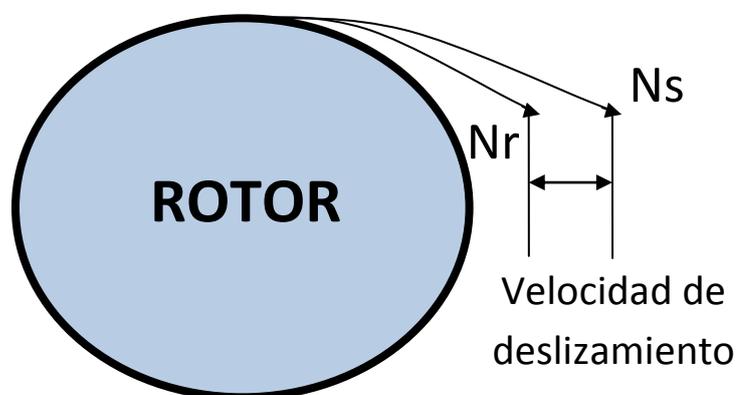
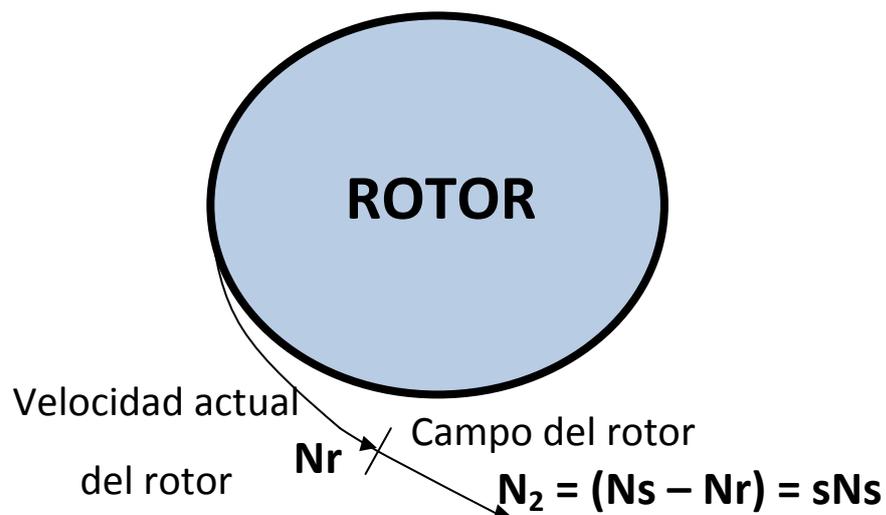


Figura 2.6 Velocidad de deslizamiento

Bajo un modo normal de operación, el campo magnético rotatorio producido por la corriente que circula a través de los devanados del rotor gira a una velocidad mayor que la velocidad del rotor para un instante dado, tal como se muestra en la Figura 2.7. Se puede demostrar que la velocidad del campo magnético rotatorio producida por la circulación de corriente en los devanados del rotor con respecto de los devanados del estator es la velocidad sincrónica, así:

$$N_r + N_2 = N_r + N_s - N_r = N_s$$

**Ecuación 2.4**



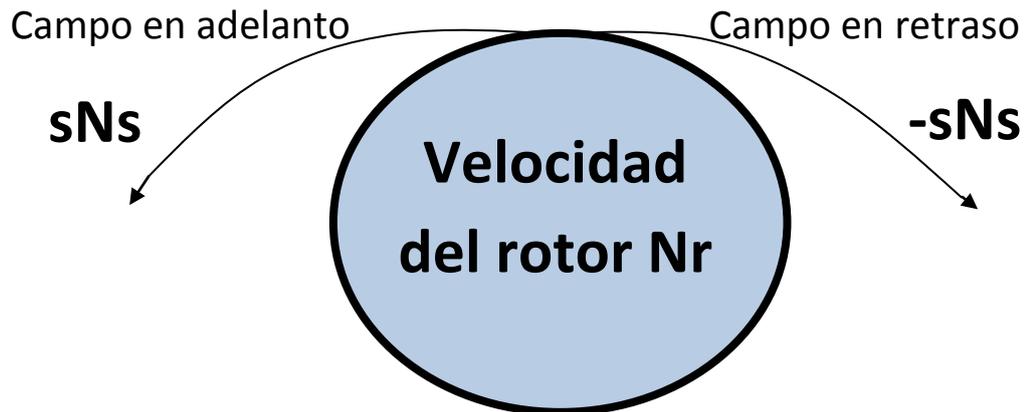
**Figura 2.7** Campo del rotor girando a una velocidad mayor que la velocidad del rotor  $N_r$

Es así que con respecto de un observador estacionario en los devanados del estator, los campos magnéticos rotativos del estator y del rotor giran a velocidad sincrónica. El efecto de tener estos dos campos juntos es producir un torque permanente en la máquina.

Si el motor tiene barras rotas, crea condiciones no balanceadas o de asimetría que generan un campo magnético giratorio adicional en retraso, que gira a velocidad de deslizamiento, esto es a  $-sN_s$  con respecto a la del rotor, tal como se muestra en la Figura 2.8. Con la presencia de este campo un observador estacionario en los devanados del estator observará un campo rotatorio a una velocidad denominada  $N_b$  que, análoga a la expresión 2.4, se define como:

$$N_b = N_r - sN_s$$

**Ecuación 2.5**



**Figura 2.8 Campos rotatorios en atraso y en adelanto en un motor con barras rotas**

Despejando de la expresión 2.2 la velocidad del rotor  $N_r$ , se tiene que:

$$N_r = N_s - sN_s$$

**Ecuación 2.6**

Reemplazando la velocidad del rotor formulada en 2.6 en la expresión 2.5, se puede dejar a  $N_b$  únicamente en función de la velocidad sincrónica  $N_s$  y el deslizamiento  $s$ , así:

$$N_b = N_s - sN_s - sN_s$$

$$N_b = N_s - 2sN_s$$

**Ecuación 2.7**

Multiplicando ambos miembros de la ecuación 2.7 por el número de pares de polos  $p$ , y en base de la expresión 2.1, se puede formular a esta ecuación en términos de frecuencia, así:

$$N_b * p = N_s * p - 2sN_s * p$$

$$f_b = f_1 - 2sf_1$$

$$f_b = f_1(1 - 2s)$$

### **Ecuación 2.8**

Como el campo magnético rotatorio de frecuencia  $f_b$  corta los bobinados del estator, se induce en ellos un voltaje y una corriente con la misma frecuencia del campo rotatorio, denominada  $f_{sb}$ , ya que corresponde a la frecuencia de la corriente que circula por los devanados estáticos, así:

$$f_{sb} = f_1(1 - 2s)$$

### **Ecuación 2.9**

La expresión 2.9 quiere decir que bajo condiciones de asimetría, consecuencia de las barras rotas en un motor de inducción, existe la presencia de una banda lateral en  $2sf_1$  por debajo de la frecuencia fundamental  $f_1$ .

Por efecto de las barras rotas en el motor de inducción, se genera también una variación cíclica de la corriente, que da como resultado un torque y una velocidad oscilatorios al doble de la frecuencia de deslizamiento ( $2sf_1$ ). Producto de esto, aparece una banda lateral a  $2sf_1$  por sobre de la frecuencia de alimentación  $f_1$ , descrita en 2.10. La banda lateral inferior por efecto de la velocidad de oscilación puede disminuir en su magnitud.

$$f_{sb} = f_1(1 + 2s)$$

### **Ecuación 2.10**

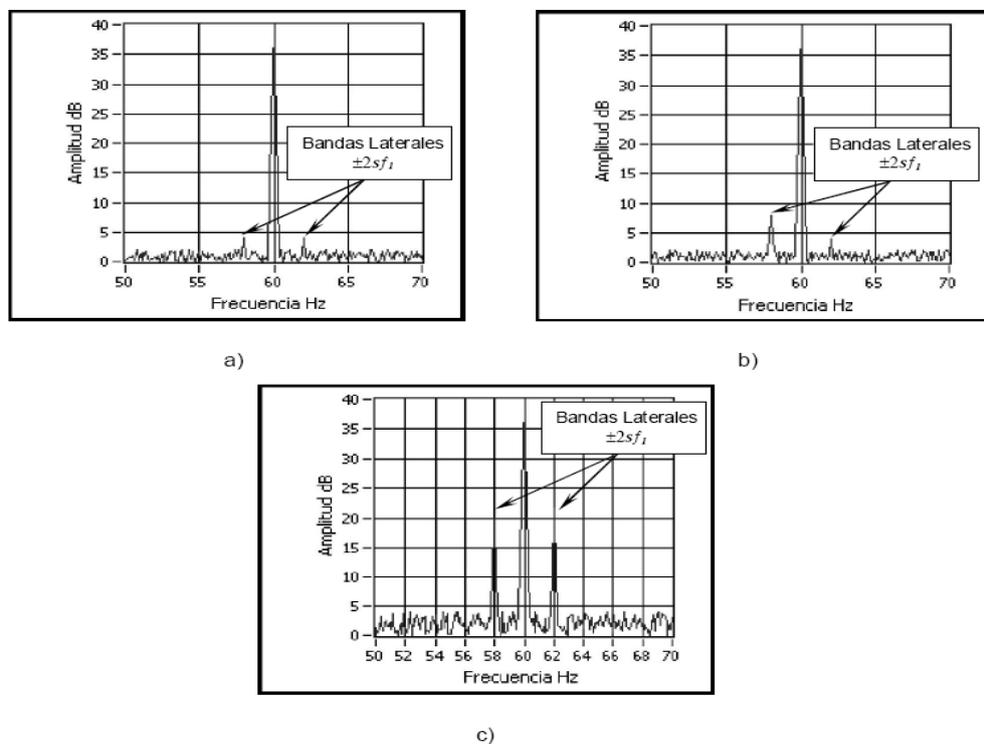
En conclusión, tener barras rotas en el motor, da como resultado componentes de corriente que son inducidas en las bobinas del estator y que, por lo tanto, se ven reflejadas en la corriente de alimentación al motor a frecuencias dadas por 2.11, de donde se puede afirmar que la presencia de barras rotas origina bandas laterales ubicadas a frecuencias del doble de la frecuencia de deslizamiento ( $2sf_1$ ) alrededor de la frecuencia fundamental  $f_1$ .

$$f_{sb} = f_1(1 \pm 2s)$$

### **Ecuación 2.11**

Ahora, cabe señalar que es normal que un motor de inducción que no tenga rotas sus barras, presente asimetrías debido, por

ejemplo, a un desbalance en las impedancias de sus devanados, pero estas asimetrías son pequeñas comparables con las causadas por el efecto de barras rotas. Es por esto que la presencia de las bandas laterales alrededor de la frecuencia fundamental en un motor de inducción sin falla es normal, como se muestra en la Figura 2.9 b), pero la amplitud de estas bandas laterales se ve intensificada con la ruptura de barras en el motor como en la Figura 2.9 c).



**Figura 2.9 Componentes espectrales de un motor: a) ideal, b) con bandas laterales inherentes a asimetrías en los devanados del rotor, c) con bandas laterales debido a barras rotas**

De esta manera, el problema no yace en el medio del diagnóstico para una posible falla, sino en como cuantificar el mismo. Se ha dicho que las amplitudes de los armónicos se ven afectadas por la falla, pero, debido a que la amplitud de los armónicos es función de la carga aplicada al motor, y que además, están presentes aún cuando el motor está sano, por esos motivos, imponer un límite de amplitud como frontera para el diagnóstico no es una opción.

Para solucionar este problema, se propone tomar como referencia para el diagnóstico la diferencia de amplitud entre la fundamental y los armónicos, medida en dB's; de esa forma, se evitará que las medidas sean dependientes de la carga y las amplitudes ya no serán un problema.

#### **2.4.2.1 RANGO DE DIFERENCIAS DE AMPLITUDES EN ARMÓNICOS**

Luego de varias experimentaciones realizadas en el laboratorio, con el banco de pruebas creado para este proyecto, el cual se mostrara en el capítulo posterior, se ha obtenido un resultado bastante fiable, que estipule un rango de diferencias de amplitudes en dB entre el armónico fundamental y el mayor de los armónicos laterales. La tabla que se verá a continuación, refleja este resultado y

proporciona una guía muy segura para emitir diagnósticos sobre el estado del rotor de un motor de inducción según esta diferencia.

<b>ESTADO DEL MOTOR</b>	
<b>EXCELENTE</b>	<b>MAYOR A 50 dB's</b>
<b>BUENO</b>	<b>ENTRE 45 Y 50 dB's</b>
<b>MODERADO</b>	<b>ENTRE 40 Y 45 dB's</b>
<b>REVISAR</b>	<b>ENTRE 35 Y 40 dB's</b>
<b>NECESITA CAMBIO</b>	<b>ENTRE 30 Y 35 dB's</b>
<b>CAMBIAR DE URGENCIA</b>	<b>MENOR A 30 dB's</b>

**Tabla II.I Estado del motor según la diferencia de amplitudes en dB's entre el armónico fundamental y el mayor de los armónicos laterales**

### **2.4.3 CONSIDERACIONES DEL MÉTODO DE DIAGNÓSTICO**

De acuerdo a las variables que afectan a la frecuencia y magnitud de las bandas laterales, se debe considerar aspectos que pueden influir significativamente en el diagnóstico y de acuerdo a estos, llevar a cabo implementaciones diferentes, o incluso, llegar a cambiar de estrategia.

Debido a que las bandas laterales son caracterizadas por la ecuación 2.11, las consideraciones que deben tomarse son las siguientes:

- Diferencias en los diseños de cada motor.
- Potencia del motor.
- Efectos debidos a la carga.
- Efectos de la presencia de un reductor mecánico de velocidad.

#### **2.4.3.1 DIFERENCIAS EN LOS DISEÑOS DE CADA MOTOR**

El diseño de cada motor tiene influencia sobre la velocidad sincrónica ya que esta es función del número de polos específico para cada motor. Además, cabe señalar que los motores de inducción pueden tener dos tipos de rotores: devanados o jaula de ardilla. La estrategia en estudio es aplicable únicamente a éstos últimos.

#### **2.4.3.2 POTENCIA DEL MOTOR**

El sistema debe ser acorde a la potencia del motor sujeto de estudio, tomando en cuenta que en el mercado existe una variedad de motores cuya

potencias oscilan desde fracciones de HP hasta miles de HP.

#### **2.4.3.3 EFECTOS DEBIDOS A LA CARGA**

Existen dos efectos debidos a la carga. El primero se produce si el torque de la carga varía con la posición del rotor. En este caso la corriente contiene componentes espectrales que pueden coincidir con los causados con la condición de falla. Una situación en la que se evidencia este problema es cuando el motor es usado en compresores o trituradores en cuyo caso la carga no es constante en el tiempo. El segundo se produce cuando, aunque teniendo una carga constante, esta no hace que el deslizamiento sea lo suficientemente representativo para alejar las bandas laterales respecto de la fundamental que las “esconde”. De aquí que este método es conveniente para motores con carga constante y equivalente a por lo menos el 75% de su capacidad nominal.

#### **2.4.3.4 EFECTOS DE LA PRESENCIA DE UN REDUCTOR MECÁNICO DE VELOCIDAD**

Cuando el motor está conectado a un reductor mecánico de velocidad puede producir componentes en el espectro de frecuencias de corriente que pueden estar cerca o en el mismo lugar que las bandas laterales.

El presente proyecto expone la implementación de un sistema basado en MCSA para la detección de fallas por ruptura de barras en la jaula de ardilla del rotor de motores de inducción.

# **CAPÍTULO 3**

## **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE HARDWARE Y SOFTWARE PARA EL SISTEMA DE DIAGNÓSTICO**

Al momento de plantearse un proyecto como el establecido en este trabajo, el conocimiento de la persona sobre el tema y el compromiso de llevar a cabo el trabajo, son puntos muy importantes, así como el ambiente que rodeara al individuo durante la ejecución del mismo. En el presente capítulo, se enunciarán, y dentro de lo posible se ilustrarán, todos los medios y herramientas usadas para la puesta a punto de este sistema de diagnóstico de fallas rotóricas en motores de inducción.

### **3.1 REQUERIMIENTOS GENERALES**

El sistema está dirigido a monitorear el estado de motores de inducción siguiendo los siguientes atributos:

- Debe ser confiable y no debe dar falsas indicaciones.
- Debe ser fácil y seguro de operar.

- Debe proveer una buena relación costo-beneficio.
- Debe ser no invasivo.
- Debe ser amigable al usuario.
- Debe ser capaz de adquirir, procesar e interpretar los datos de corriente del motor que se esté analizando.
- Debe poseer criterios de confiabilidad y de optimización de recursos.
- Debe ser implementado con un transductor que se pueda encontrar en el mercado y cuyo desempeño sea efectivo en otras aplicaciones.

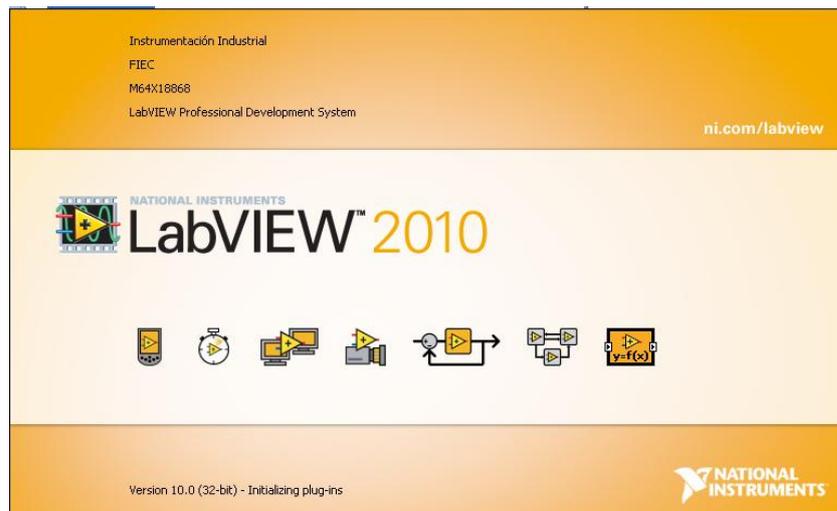
### **3.2 SOFTWARE A UTILIZAR**

El sistema está desarrollado en LabView: Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench que es una aplicación para desarrollos de programas parecido a otros sistemas de desarrollo basado en C++ o BASIC. La diferencia más importante es que LabView no es basado en líneas de código sino en programación gráfica: Lenguaje G. La idea principal es que LabView use diagramas de bloques por los cuales se genere y fluya la información. Además posee librerías específicas de análisis de señales, y adquisición de datos. La ejecución de los programas no los hace línea por línea sino basado en como fluyen los requerimientos de la información.

Esta herramienta tiene la facilidad de hacer interfaces de usuario muy fácilmente en sus “Paneles Frontales” mientras que el código

desarrollado queda transparente al usuario en su “Diagrama de Bloques”.

La versión que se utilizó para la implementación del sistema de detección de fallas es LabVIEW 2010.



**Figura 3.1 Programa LabVIEW 2010**

### **3.3 MOTOR Y SISTEMA DE ARRANQUE**

El sistema está diseñado para trabajar con cualquier tipo de motor de inducción jaula de ardilla, siempre y cuando se encuentre dentro de los límites de corriente del transductor de corriente utilizado.

Se decidió utilizar el motor mostrado en la figura 3.2 con las características mencionadas en la tabla III.I.

<b>CARACTERÍSTICAS DEL MOTOR UTILIZADO EN LAS PRUEBAS</b>	
<b>MARCA</b>	<b>SIEMENS</b>
<b>ALIMENTACIÓN</b>	<b>TRIFÁSICO</b>
<b>VOLTAJE NOMINAL</b>	<b>220 V</b>
<b>CORRIENTE NOMINAL</b>	<b>3,5 A</b>
<b>ROTOR</b>	<b>JAULA DE ARDILLA</b>
<b>FRECUENCIA</b>	<b>60 HZ</b>
<b>POTENCIA</b>	<b>1 HP</b>
<b>NUMERO DE POLOS</b>	<b>4</b>
<b>VELOCIDAD NOMINAL</b>	<b>1660 RPM</b>

**Tabla III.I Características del motor utilizado en las pruebas**



**Figura 3.2 Motor utilizado en las pruebas**

Para poner para dar arranque al motor se utilizó un contactor de 220 Vac marca MEC junto con un relé térmico con un rango de 3 a 6 amperios;

para accionar el contactor se utilizó un pulsador con retención con luz piloto que indica el momento en que se encuentra accionado.



**Figura 3.3** Contactor, relé térmico y pulsador con luz piloto utilizado en las pruebas

### **3.4 TRANSFORMADOR DE CORRIENTE**

Para la adquisición de la corriente del motor en nuestro sistema de detección de fallas rotóricas, se utilizó el transformador de corriente mostrado en la figura 3.4 con las siguientes características:

- Marca: Camsco
- Corriente en el primario: 30 A
- Corriente en el secundario: 5 A



**Figura 3.4 Transformador de corriente utilizado en las pruebas**

### **3.5 MECANISMO PARA REGULAR LA CARGA DEL MOTOR**

Debido a que las pruebas deben realizarse con carga en el eje del rotor, se diseñó y construyó un mecanismo mostrado en la figura 3.5; que consiste en un sistema de polea y banda que junto con unos resortes, aplican carga al motor dependiendo del requerimiento del usuario mediante una manivela, la cual al girar le aplica mayor ó menor tensión a los resortes y esta tensión a su vez es transmitida hacia la banda frenando la polea, provocando que el motor realice mayor ó menor esfuerzo, y aumente ó disminuya su consumo de corriente.



**Figura 3.5 Mecanismo utilizado en la prueba para regular la carga en el eje del rotor**

### **3.6 EQUIPO DE ADQUISICIÓN DE DATOS**

Para adquirir los datos provenientes del secundario del transformador de corriente, se utilizó la NI CompactDAQ-9174, mostrada en la figura 3.6, la cual posee las siguientes características:

- Se puede escoger entre más de 50 módulos de E/S intercambiables en vivo con acondicionamiento de señales integrado.

- Posee 4 contadores/temporizadores de 32 bits de uso general integrados al chasis.
- Se puede ejecutar hasta simultáneamente hasta siete operaciones de E/S analógica temporizada por hardware, E/S digital o de contador/temporizador.
- Se puede escribir medidas de formas de ondas continuas con tecnología patentada NI Signal Streaming.

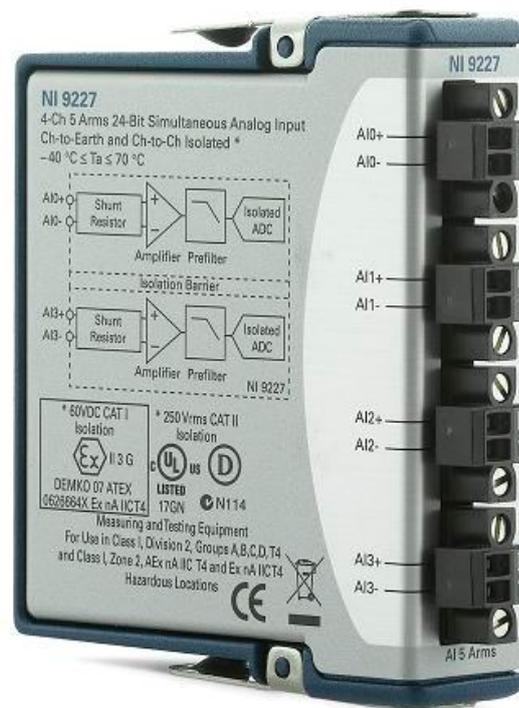


**Figura 3.6 NI CompactDAQ-9174 utilizada en las pruebas**

El módulo que se escogió y que se apegó a los requerimientos del sistema es el NI 9227, mostrado en la figura 3.7, con las siguientes características:

- Posee 4 Entradas analógicas de 5 Arms cada una.
- Posee una resolución de 50 kS/seg/canal.

- Aislamiento entre canales de 250 Vrms.

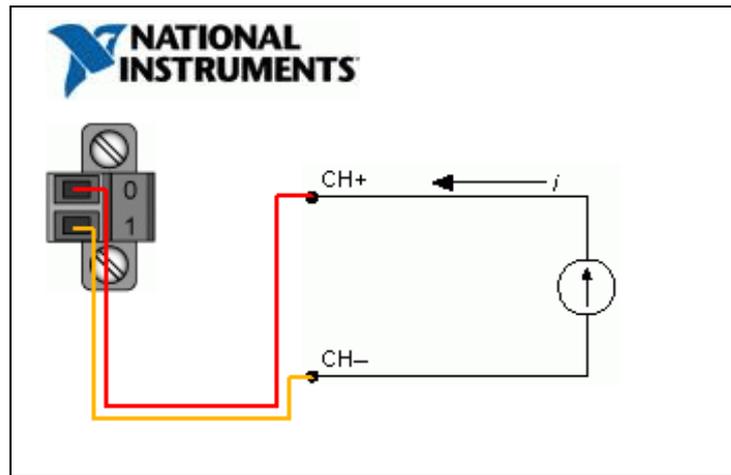


**Figura 3.7** Módulo NI 9227 utilizado en las pruebas

## 3.7 PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES

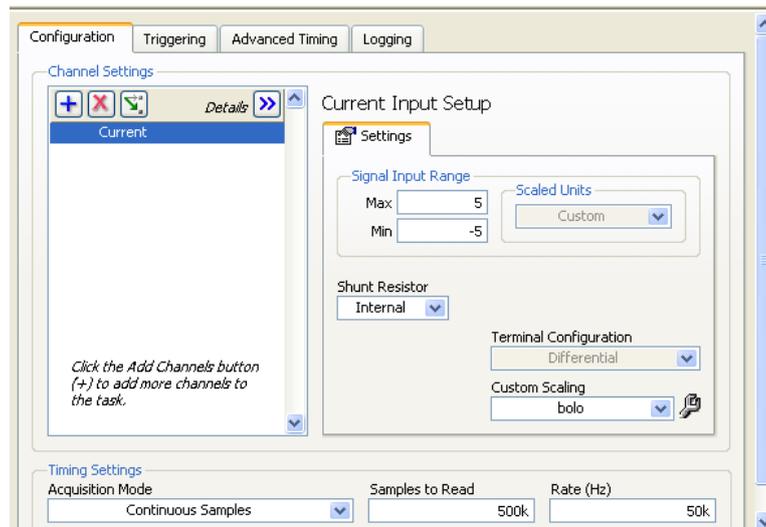
### 3.7.1 ADQUISICIÓN

Para adquirir la señal de corriente proveniente del secundario del transformador, utilizamos el canal 0 del módulo NI 9227 y se realizó el siguiente diagrama de conexiones mostrado en la figura 3.8.



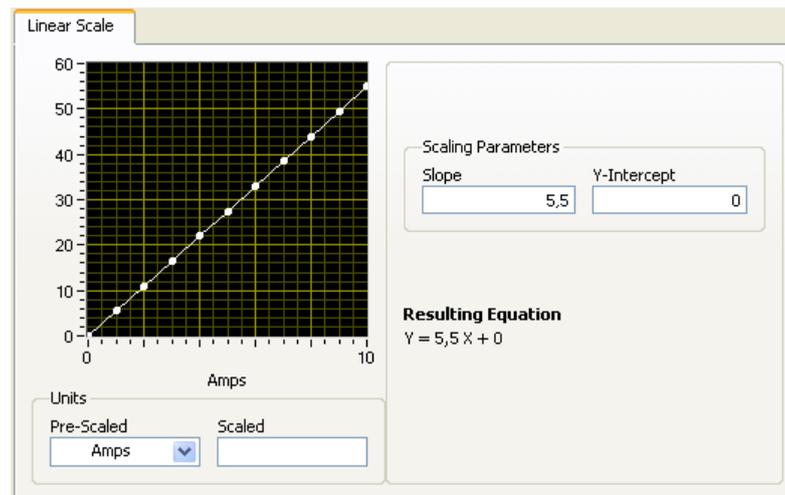
**Figura 3.8 Diagrama de conexión del secundario del transformador al módulo NI 9227**

Una vez realizadas las conexiones, en LabView utilizamos la herramienta llamada DAQ Assistant, mediante la cual configuramos el tipo de señal de entrada a utilizar, el módulo, el canal por el cual ingresará la señal de corriente, el tipo de muestreo, la frecuencia de muestreo y el número de muestras a adquirir, tal como se muestra en la figura 3.9.



**Figura 3.9 Configuración de la señal de entrada de corriente en LabView**

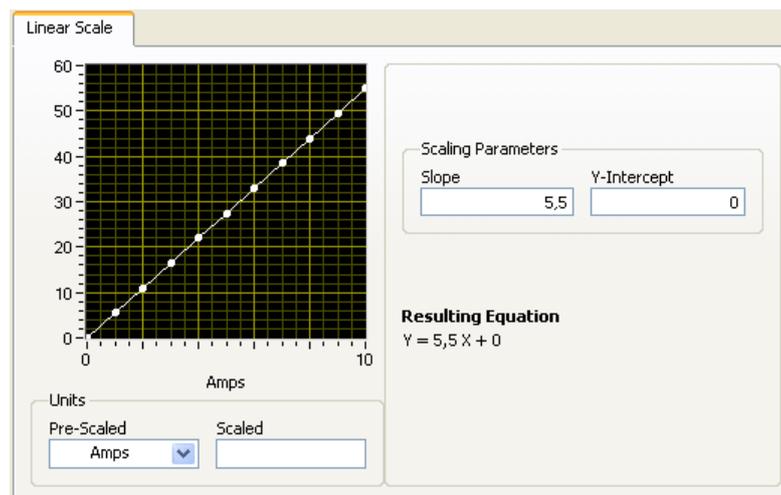
Una vez adquirida la señal, debemos escalarla para que en LabView podamos observar los valores reales de la corriente del motor; debido a que la señal que adquirimos es la del secundario del transformador de corriente y la relación de corrientes nominal del mismo es de 6 a 1, deberíamos multiplicar la señal adquirida por 6, pero se realizó unas pruebas y se determinó que la relación de corrientes real del transformador es de 5.5 a 1, por lo cual multiplicaremos la señal adquirida por 5.5, tal como se muestra en la figura 3.10.



**Figura 3.10 Escalamiento de la señal de corriente en LabView**

### 3.7.2 ESCALAMIENTO

Una vez adquirida la señal, debemos escalarla para que en LabView podamos observar los valores reales de la corriente del motor; debido a que la señal que adquirimos es la del secundario del transformador de corriente y la relación de corrientes nominal del mismo es de 6 a 1, deberíamos multiplicar la señal adquirida por 6, pero se realizó unas pruebas y se determinó que la relación de corrientes real del transformador es de 5.5 a 1, por lo cual multiplicaremos la señal adquirida por 5.5, tal como se muestra en la figura 3.10.

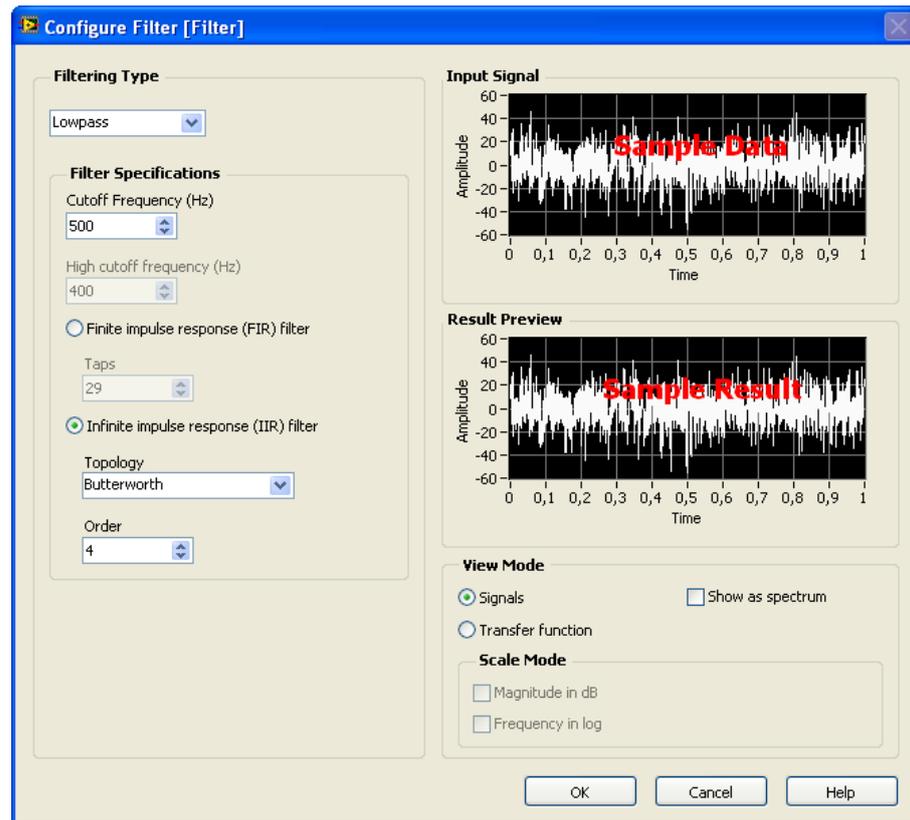


**Figura 3.10 Escalamiento de la señal de corriente en LabView**

### 3.7.3 AISLAMIENTO A DIFERENTES FUENTES DE RUIDO

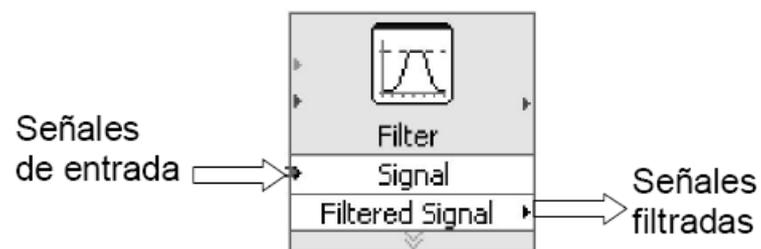
Debido a que la fundamental de la señal de corriente que adquirimos es de 60 Hz y se trabajará con frecuencias alrededor de este valor, se decidió utilizar un filtro tipo pasabajos de topología butterworth de cuarto orden, con frecuencia de corte 500 Hz para evitar que se filtre ruido a nuestra señal muestreada.

Entre el software de National Instruments que viene integrado con LabView está el denominado Express que permite hacer implementaciones con aplicaciones precompiladas y configurables en tiempo de programación. Es así que para el sistema se tiene la siguiente configuración de filtro digital, mostrado en la figura 3.11.



**Figura 3.11 Configuración del filtro digital**

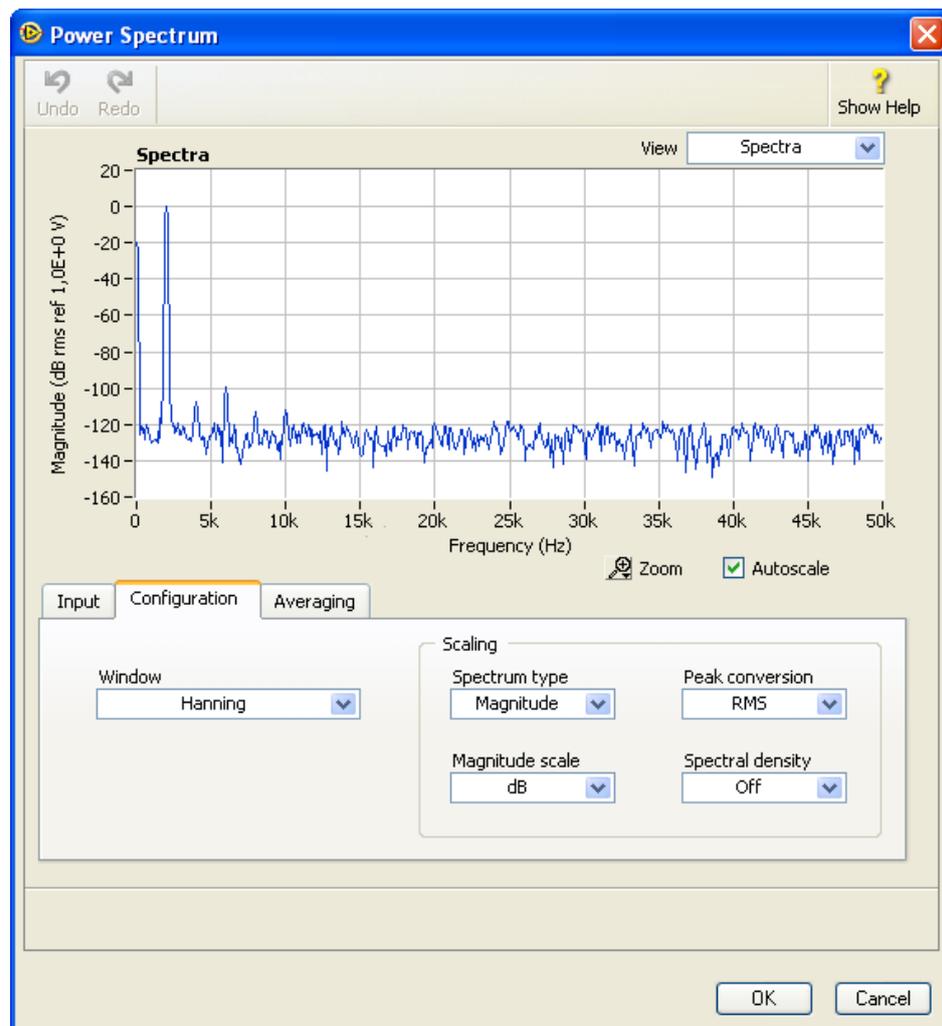
Estas configuraciones se guardan en memoria y se las utiliza en el programa principal mediante un ícono específico, tal como se muestra en la figura 3.12.



**Figura 3.12 Implementación del filtro digital en LabView**

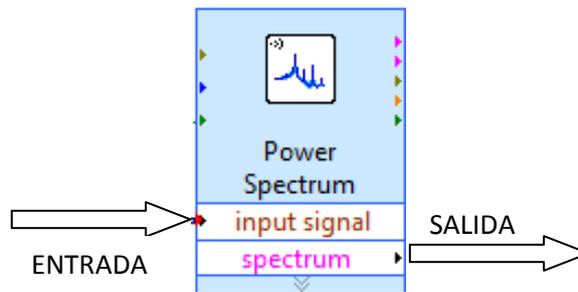
### 3.7.4 ANÁLISIS EN FRECUENCIA

Para la obtención del espectro de corriente del motor, se decidió utilizar la herramienta Power Spectrum de Signal Express de LabView, cuya configuración es mostrada en el gráfico 3.13.



**Figura 3.13 Configuración de análisis espectral**

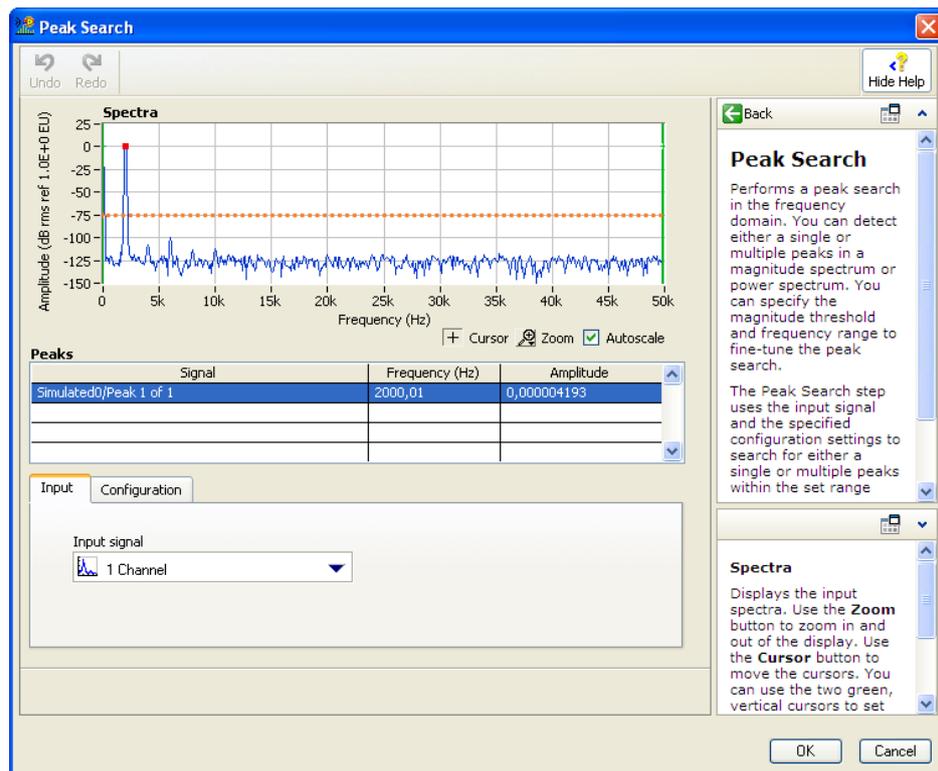
La función que se utiliza para la programación en LabView es mostrada en la figura 3.14.



**Figura 3.14 Implementación del espectro de corriente**

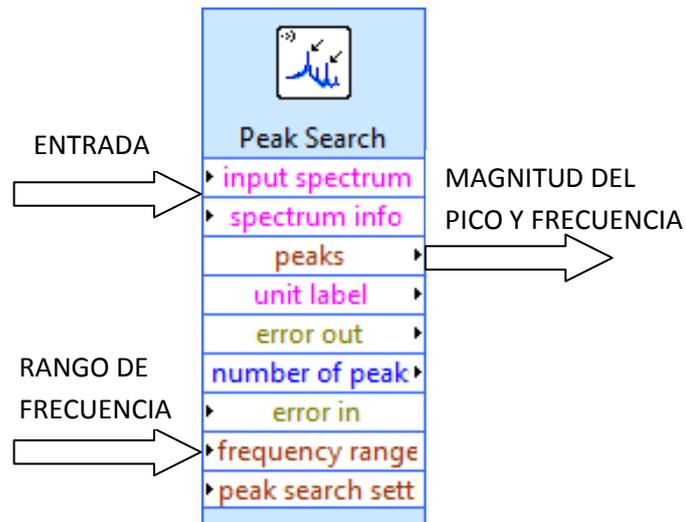
### **3.7.5 DETECCIÓN DE PICOS EN EL ESPECTRO DE CORRIENTE**

Para la detección de los picos en el espectro de corriente se utilizó la herramienta Peak Search de Signal Express, la cual detecta picos en el espectro de corriente según el rango que se le asigne y nos entrega el valor del pico y la frecuencia en la cual se detectó el mismo, la configuración de esta herramienta es mostrada en la figura 3.15.



**Figura 3.15 Configuración de detección de picos en el espectro de corriente**

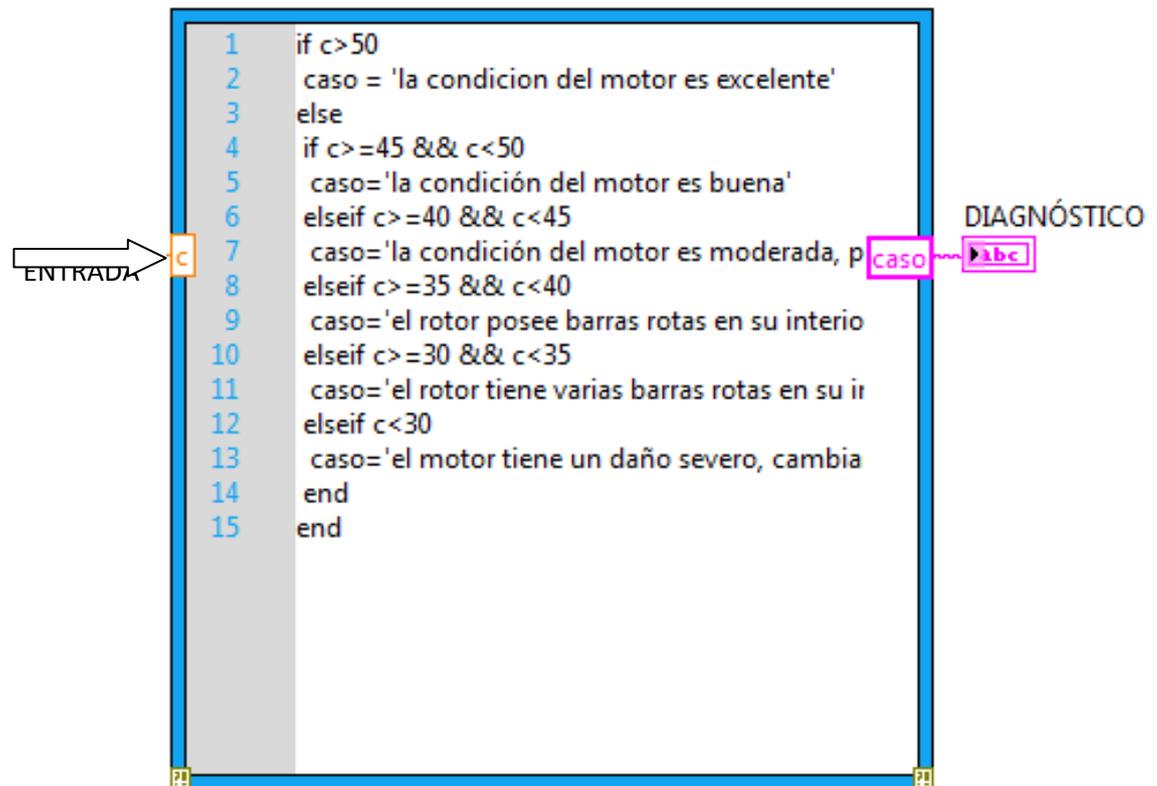
La función que se utiliza para la programación en LabView es mostrada en la figura 3.16.



**Figura 3.16 Implementación de la detección de picos en el espectro de corriente**

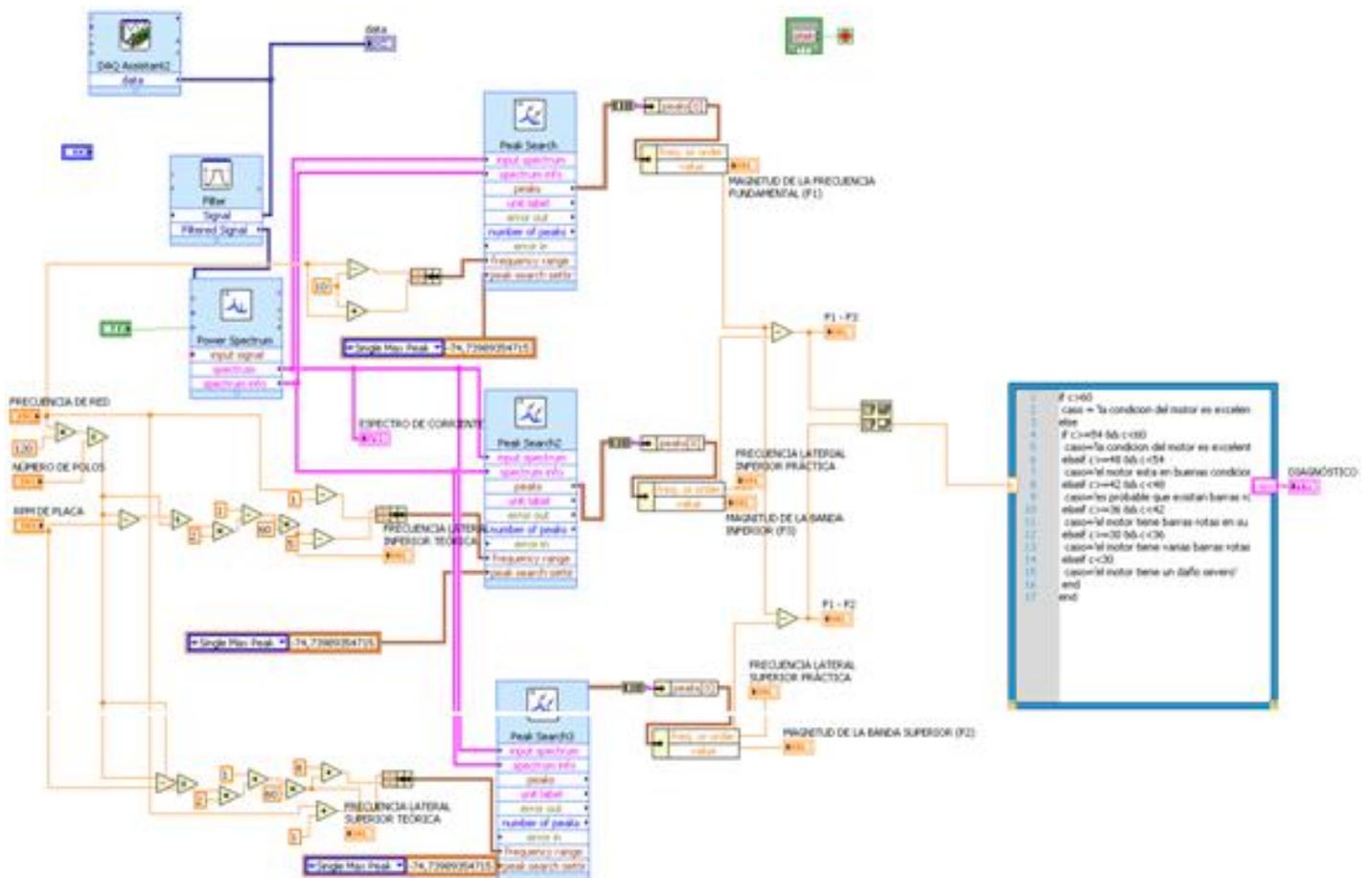
### 3.7.6 DETECCIÓN DE LA FALLA Y DIAGNÓSTICO

Como se trató anteriormente, la sección 2.4.2.1 da el criterio de detección de la falla según la tabla II.I. Una vez hallada la menor diferencia entre el pico de la fundamental y el pico de los armónicos laterales, este valor se ingresa a la función MathScript Node, la cual emite un diagnóstico del motor según el mismo. La implementación de esta función se muestra en la figura 3.17.



**Figura 3.17 Implementación de detección de falla**

La implementación de la totalidad del programa en mostrada en la figura 3.18.



**Figura 3.18 Implementación del panel de control en LabView del detector de fallas rotóricas en motores de Inducción**

Del panel frontal se toman los valores de la frecuencia de red, el número de polos del motor y la velocidad nominal en RPM, con estos valores hallamos los valores teóricos de las frecuencias de los armónicos laterales, los cuales nos sirven para definir el rango de frecuencia en el cual se buscarán los armónicos laterales. Una vez adquirida y filtrada la señal, se detecta los picos de la fundamental y de los armónicos laterales, se encuentra la diferencia entre los picos de la fundamental y los armónicos laterales, y se toma el menor valor, de acuerdo a este valor se dará el diagnóstico de la falla del rotor. Todo dentro de un lazo

while que permite que el programa se esté ejecutando permanentemente.

### **3.8 VISIÓN GENERAL DEL SISTEMA**

El sistema tiene una interfaz basada en cuatro paletas:

- Configuración
- Corriente en función del tiempo
- Espectro de corriente
- Resultado y diagnóstico

Cada una de ellas tiene una función especial y está diseñada para que sea confortable al usuario y fácil de manejar.

#### **3.8.1 PALETA “CONFIGURACIÓN”**

La paleta “configuración” es la pantalla principal de la aplicación y su apariencia se muestra en la figura 3.19.



**Figura 3.19 Pantalla “configuración”**

Aquí se encuentra una interfaz en la que el usuario ingresa los datos del motor a diagnosticar y que son necesarios para la ejecución del programa, los cuales son:

- Frecuencia de red
- Número de polos
- RPM de placa

Ademas posee dos botones:

- Reiniciar prueba
- Stop

Con el botón “reiniciar prueba” puedo hacer una nueva lectura de los picos de corriente y emitir un nuevo diagnóstico del motor que se está analizando, esto puede ser para verificar el diagnóstico antes visto o para analizar otro motor. Con el botón “stop” se

finaliza el lazo while que se está ejecutando en el diagrama de bloques y se termina con las pruebas que se están realizando.

También posee un led de control el cual es necesario activar si el motor se encuentra con carga en el eje, en caso contrario se deberá dejar desactivado.

### 3.8.2 PALETA “CORRIENTE EN FUNCIÓN DEL TIEMPO”

En esta pantalla se muestra la corriente de alimentación del estator en función del tiempo, con la cual podemos observar el valor de la corriente de consumo del estator en ese instante. La apariencia de la pantalla “corriente en función del tiempo” se muestra en la figura 3.20.

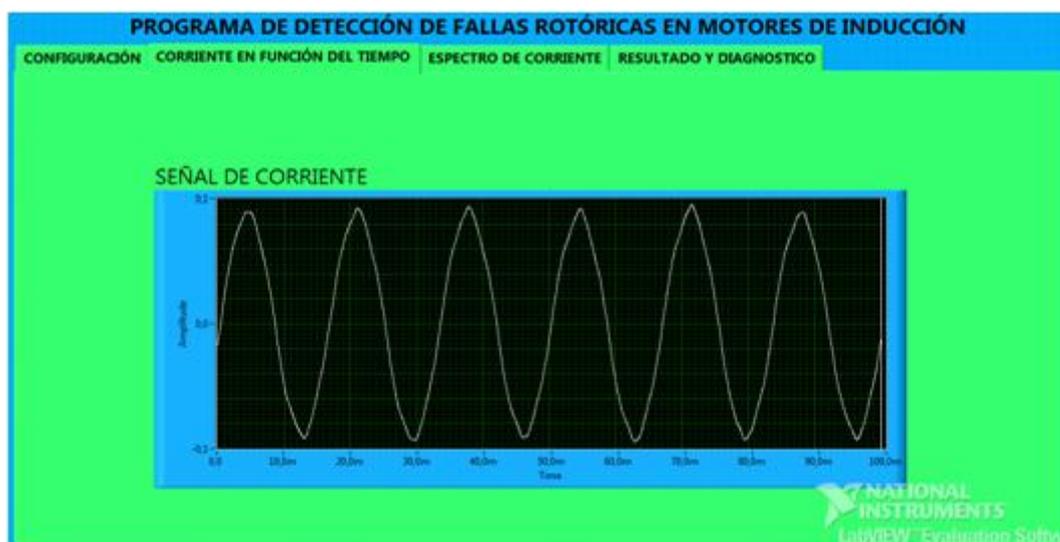


Figura 3.20 Pantalla “Corriente en función del tiempo”

### 3.8.3 PALETA “ESPECTRO DE CORRIENTE”

En la pantalla “espectro de corriente” se muestra el espectro de la corriente analizada, esta pantalla cambia cada vez que se presione el botón “reiniciar prueba” en la paleta “configuración”. La apariencia de la pantalla “espectro de corriente” se muestra en la figura 3.21.

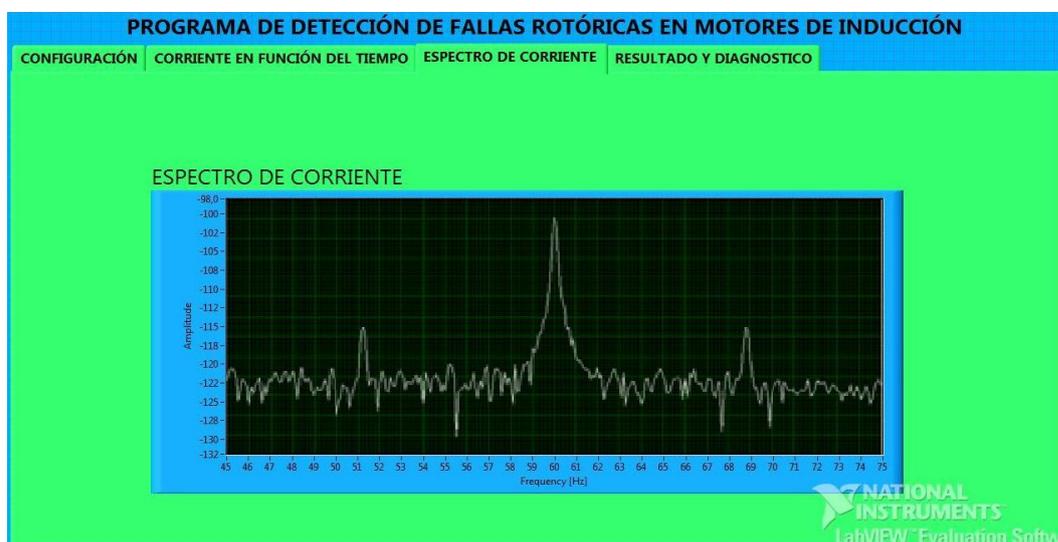
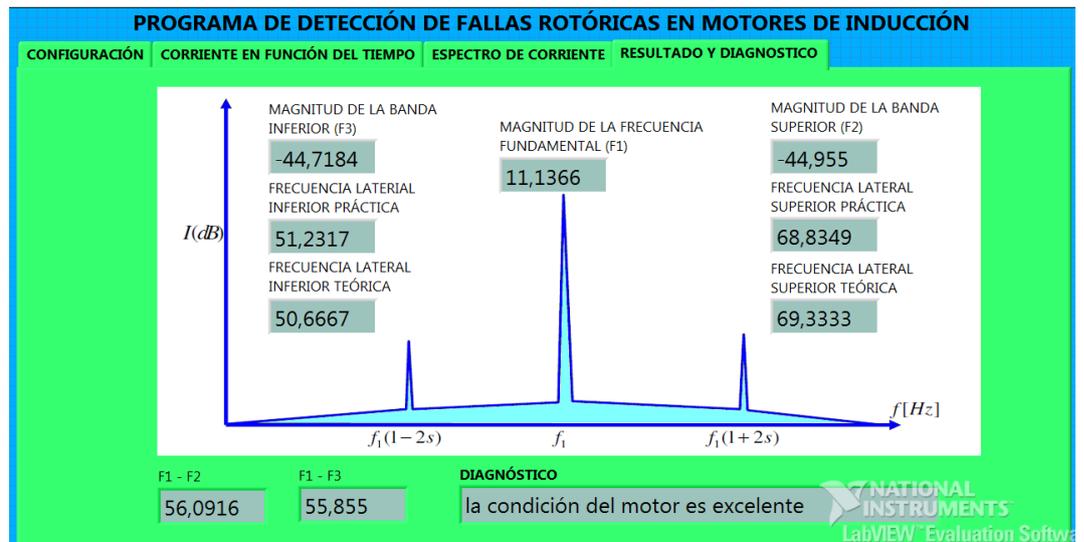


Figura 3.21 Pantalla “Espectro de corriente”

### 3.8.4 PALETA “RESULTADO Y DIAGNÓSTICO”

La paleta “resultado y diagnóstico” es una de las más importantes y su apariencia se muestra en la figura 3.22.



**Figura 3.22 Pantalla “Resultado y diagnóstico”**

En esta pantalla se muestran los siguientes valores teóricos calculados con los datos ingresados en la pantalla configuración:

- Frecuencia lateral inferior teórica
- Frecuencia lateral superior teórica

También se muestran los siguientes valores prácticos tomados de la gráfica del espectro de corriente en la pantalla con el mismo nombre:

- Magnitud de la frecuencia fundamental en dB (F1)
- Magnitud de la banda superior en dB (F2)
- Magnitud de la banda inferior en dB (F3)
- Frecuencia lateral superior práctica
- Frecuencia lateral inferior práctica

- F1 – F2
- F1 – F3

Además de mostrarse también el diagnóstico que nuestro programa nos da con respecto al motor analizado.

# **CAPÍTULO 4**

## **RESULTADOS**

Para el efecto de este proyecto, se realizaron varias experimentaciones, para lo cual fue utilizado un motor de inducción jaula de ardilla, de pequeñas dimensiones y con características citadas en la tabla III.I. Los resultados obtenidos experimentalmente, sirvieron para comprobar lo anteriormente estudiado en la teoría, y para determinar los criterios de diagnóstico que posteriormente quedarán plasmados en el programa. El enfoque fue observar como se refleja en el espectro de corriente la presencia de una avería en el rotor, y para esto se tomo pruebas con diferentes niveles de carga, primero con el motor sano, luego se procedió a la rotura, una a una de las barras del motor, hasta llegar a 8 barras rotas.

## 4.1 RESULTADOS EXPERIMENTALES, TEÓRICOS Y ANÁLISIS

A continuación se mostraran los cálculos teóricos realizados, los gráficos de los espectros de corriente obtenidos en las pruebas hechas en el laboratorio, y los datos reales tomados de de los mismos.

### 4.1.1 RESULTADOS TEÓRICOS

De acuerdo con las características del motor utilizado en las pruebas, mostradas en la tabla III.I y la ecuación 2.11, las bandas laterales deberían encontrarse en las siguientes frecuencias:

$$f_{sb} = f_1(1 \pm 2s)$$

Donde:

$f_{sb}$  : frecuencias de los armónicos laterales.

$f_1$  : frecuencia de alimentación.

$s$ : deslizamiento.

Siendo el deslizamiento, de acuerdo a la ecuación 2.2, igual a:

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s}$$

Donde:

$N_s$ : velocidad sincrónica del motor en rpm.

Nr: velocidad de giro nominal del motor en rpm.

La velocidad sincrónica la obtenemos de la ecuación 4.1, mientras que la velocidad de giro nominal del motor de acuerdo a la tabla III.I es 1660 rpm.

$$N_s = \frac{120 * f_1}{P}$$

#### **Ecuación 4.1**

Donde:

P: número de polos del motor.

Entonces la velocidad sincrónica del motor será:

$$N_s = \frac{120 * 60}{4}$$

$$N_s = 1800$$

De esta manera podemos hallar el deslizamiento:

$$s = \frac{1800 - 1660}{1800}$$

$$s = 0.0778$$

Obteniendo el deslizamiento, procedemos a calcular las frecuencias de los armónicos laterales, superior ( $f_{sb1}$ ) e inferior ( $f_{sb2}$ ):

$$f_{sb1} = 60 * (1 + 2 * 0.0778)$$

$$f_{sb1} = 69.3333$$

$$f_{sb2} = 60 * (1 - 2 * 0.0778)$$

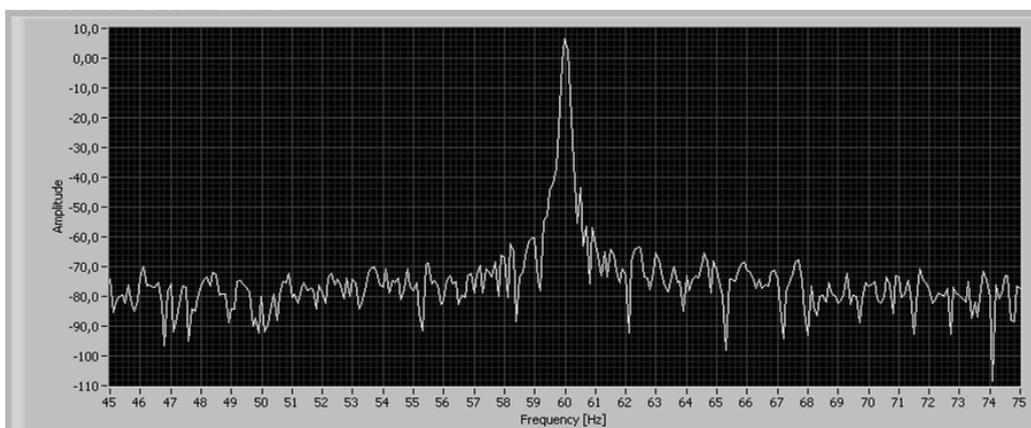
$$f_{sb2} = 50.6667$$

Estos valores son teóricos pero no reales, debido a que esa velocidad de giro nominal es con el 100% de la carga aplicada al motor; pero mientras menor sea la carga en el motor, el rotor girará más cerca de su velocidad de sincronismo, por lo tanto el desplazamiento también será menor, provocando que las frecuencias reales de los armónicos sean más cercanas a la frecuencia fundamental, en este caso 60 Hz.

#### **4.1.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES**

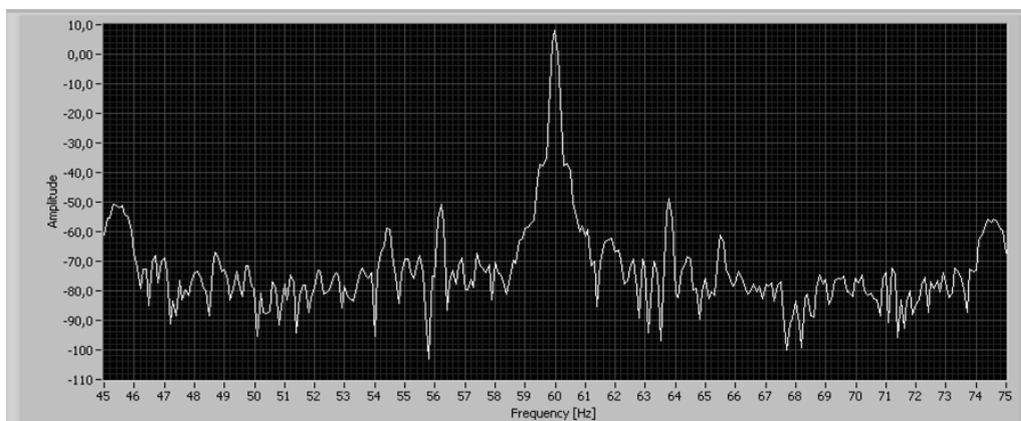
En esta sección se mostrarán todos los espectros de corriente obtenidos de las pruebas realizadas en el laboratorio, y los datos reales obtenidos de los mismos.

Se realizaron pruebas con varios niveles de carga aplicada al motor, primero veremos los resultados obtenidos con un motor sano (sin barras rotas en el rotor).



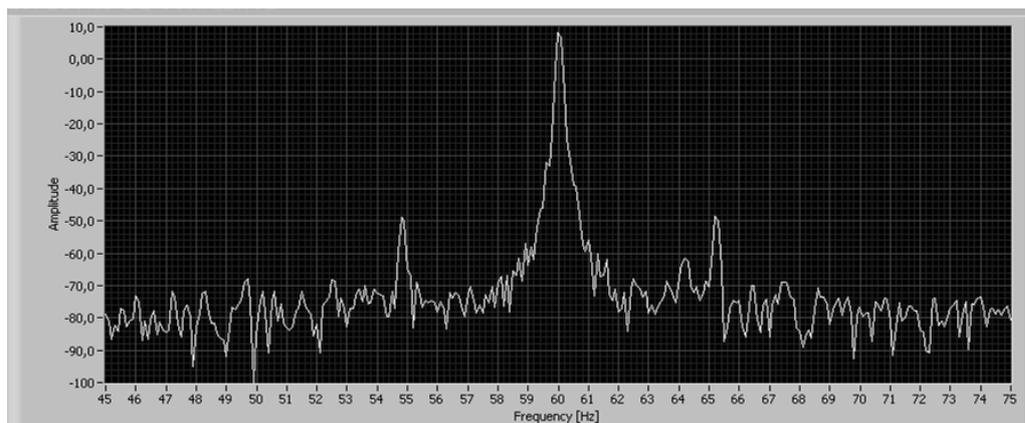
**Figura 4.1 Espectro de corriente del motor sano sin carga (2.4 A)**

En la figura 4.1 no se observa la presencia de armónicos laterales, esto debido a que el motor se encuentra en buenas condiciones y la carga del motor es mínima.



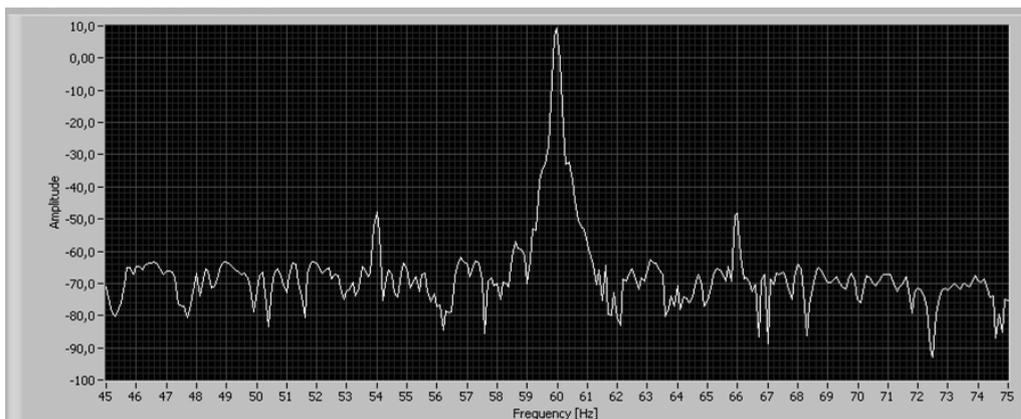
**Figura 4.2 Espectro de corriente del motor sano con carga (2.7 A)**

En la figura 4.2 se pueden observar la presencia de los armónicos laterales debido a la presencia de carga en el motor, pero las magnitudes de estos armónicos son muy pequeñas, la diferencia de amplitudes en dB entre la fundamental y ambos armónicos lateral superior e inferior es de 57.0 y 57.7 respectivamente.



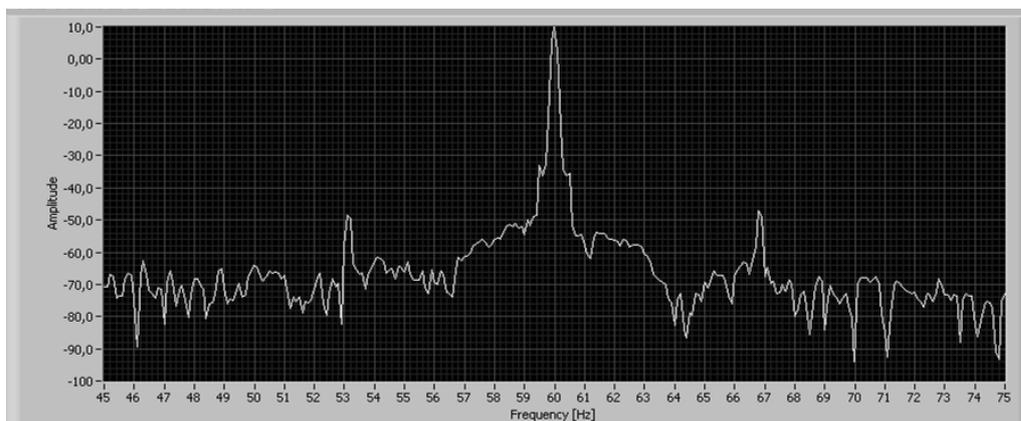
**Figura 4.3 Espectro de corriente del motor sano con carga (2.9 A)**

En la figura 4.3 se observan los armónicos laterales un poco más distanciados de la fundamental pero no se observa un incremento en la magnitud de los mismos, la diferencia de amplitudes en dB entre la fundamental y los armónicos laterales superior e inferior es de 56.6 y 57.0 respectivamente.



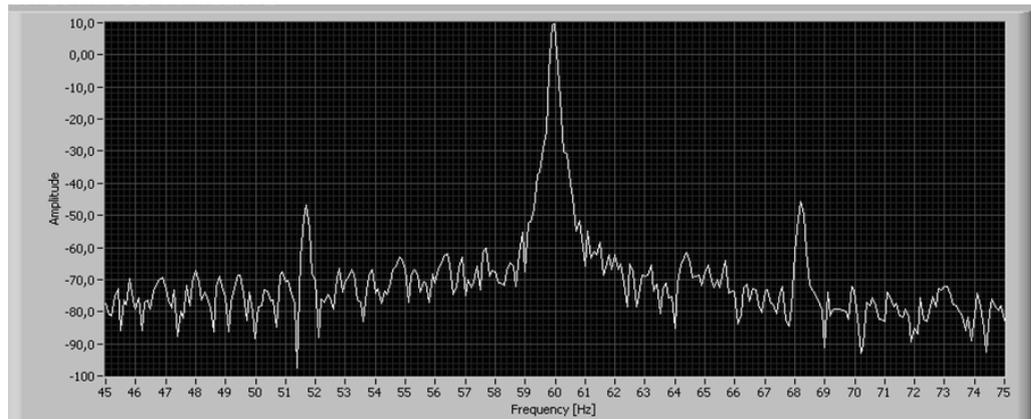
**Figura 4.4 Espectro de corriente del motor sano con carga (3.1 A)**

Al aumentar la carga, observamos como los armónicos laterales se alejan de la fundamental, la diferencia en dB entre la fundamental y los armónicos laterales superior e inferior es de 56.7 y 57.1 respectivamente.



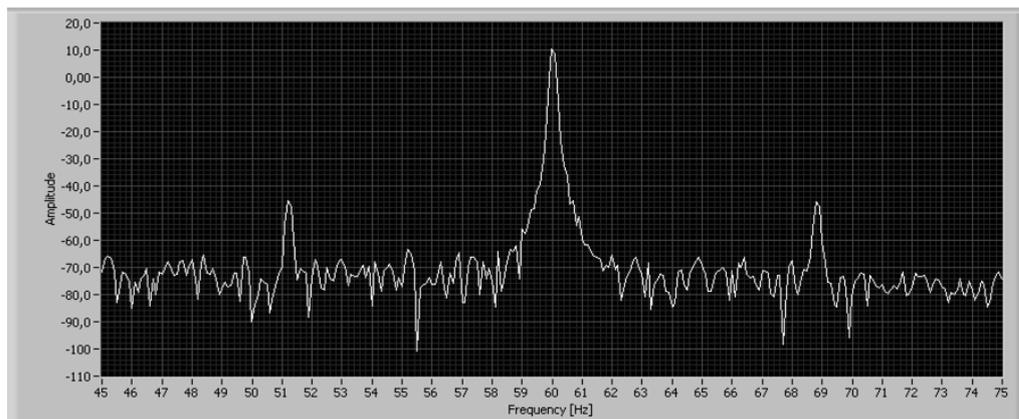
**Figura 4.5 Espectro de corriente del motor sano con carga (3.3 A)**

Los armónicos laterales se pueden apreciar más alejados de la fundamental, sin embargo, su magnitud no ha aumentado y la diferencia de amplitudes en dB entre la fundamental y los armónicos laterales superior e inferior es de 56.3 y 57.5 respectivamente.



**Figura 4.6 Espectro de corriente del motor sano con carga (3.5 A)**

Se nota mayor distanciamiento entre los armónicos laterales y la fundamental. La diferencia de amplitudes en dB entre la fundamental y los armónicos laterales superior e inferior es de 56.2 y 57.3 respectivamente.



**Figura 4.7 Espectro de corriente del motor sano con carga (3.8 A)**

El motor se encuentra sobrecargado, y observamos que se alejan cada vez más los armónicos laterales de la fundamental pero estos no crecen en magnitud. La diferencia de amplitudes en dB entre la fundamental y los armónicos laterales superior e inferior es de 56.0 y 55.8 respectivamente.

A continuación en una tabla se mostrarán todos los datos obtenidos de estos gráficos, tanto teóricos como experimentales.

0 BARRAS ROTAS								
CARGA	CORRIENTE (A)	FRECUENCIA FUNDAMENTAL	F. SUPERIOR TEÓRICA	F. SUPERIOR PRÁCTICA	F. INFERIOR TEÓRICA	F. INFERIOR PRÁCTICA	FUND - SUP (dB)	FUND - INF (dB)
NO	2,4	60	69,3333	NO	50,6667	NO	NO	NO
SI	2,7	60	69,3333	63,7915	50,6667	45,3454	57,0003	57,7396
SI	2,9	60	69,3333	65,236	50,6667	54,8407	56,6732	57,0678
SI	3,1	60	69,3333	65,9571	50,6667	53,9893	56,7258	57,177
SI	3,3	60	69,3333	66,8351	50,6667	53,1403	56,3406	57,5807
SI	3,5	60	69,3333	68,2164	50,6667	51,6829	56,2716	57,34
SI	3,8	60	69,3333	68,8349	50,6667	51,2317	56,0916	55,855

**Tabla IV.I Resultados obtenidos con el motor sano**

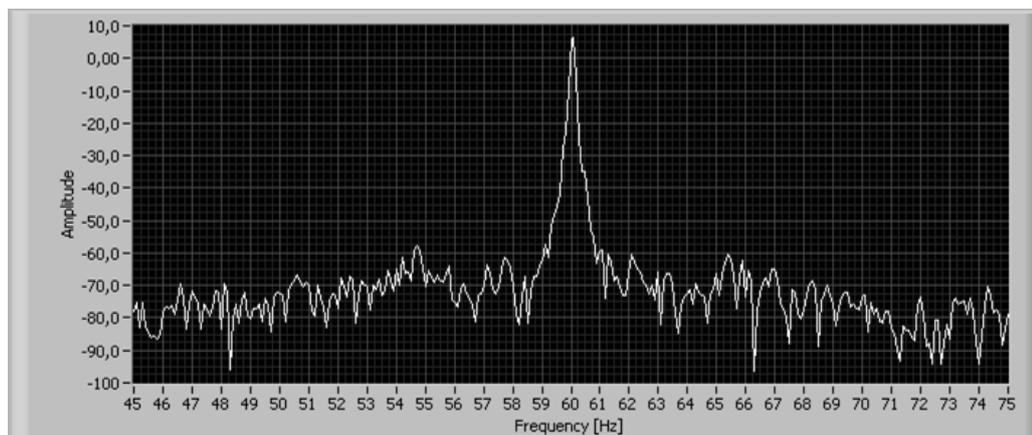
Debido a que el motor se encuentra en buenas condiciones (no posee barras rotas en el rotor), podemos observar que las diferencias de amplitudes entre la fundamental y los armónicos laterales en todas las pruebas (excepto sin carga) oscila entre 55 y 60 dB's. Además es notorio como la frecuencia los armónicos laterales se aleja de la fundamental de 1 a 2 Hz con cada aumento de corriente de 0.2 A en el motor. También se observa que la magnitud del armónico lateral superior es mayor a la magnitud del armónico lateral inferior en todas las pruebas, excepto cuando la corriente del motor es 3.5 A.

Luego de realizadas las pruebas con el motor sano, se procedió a la rotura de una de las barras del rotor, creando un orificio de 1 cm en el rotor para romper las barras en el punto de contacto con el anillo de cortocircuito, tal como se muestra en la figura 4.7.



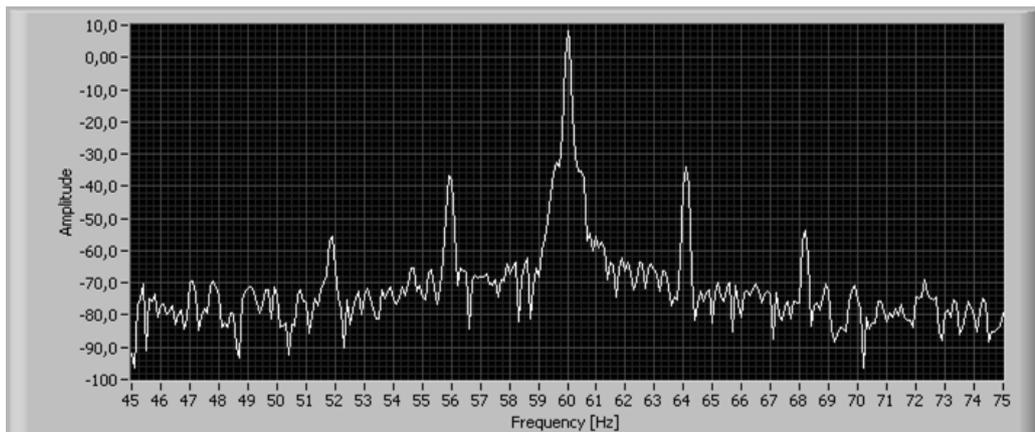
**Figura 4.8 Rotura de una barra en el rotor**

A continuación se mostrarán los gráficos obtenidos de las pruebas con la presencia de una barra rota en el rotor, y los datos reales obtenidos de los mismos.



**Figura 4.9 Espectro de corriente del motor con 1 barra rota sin carga (2.5 A)**

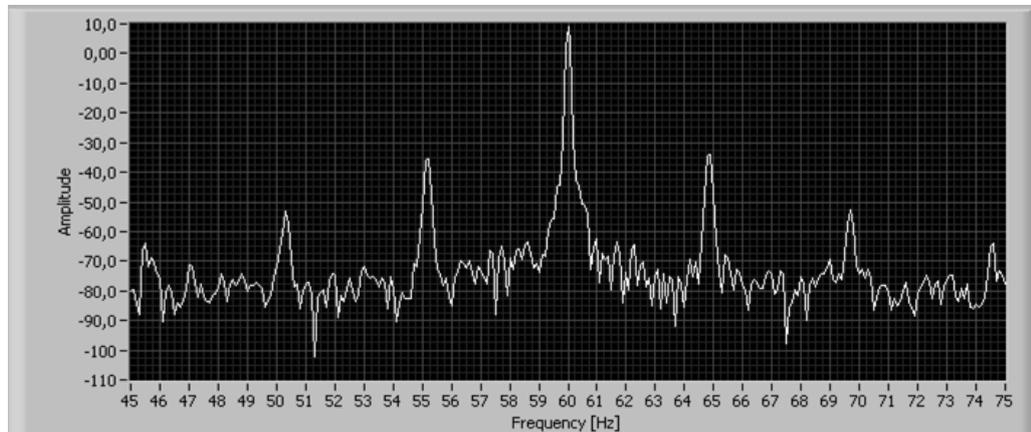
En esta gráfica no podemos distinguir los armónicos laterales, esto debido a que no poseemos carga en el eje del rotor. Por lo tanto no se puede emitir un diagnóstico acertado de la condición del rotor.



**Figura 4.10 Espectro de corriente del motor con 1 barra rota con carga (2.7 A)**

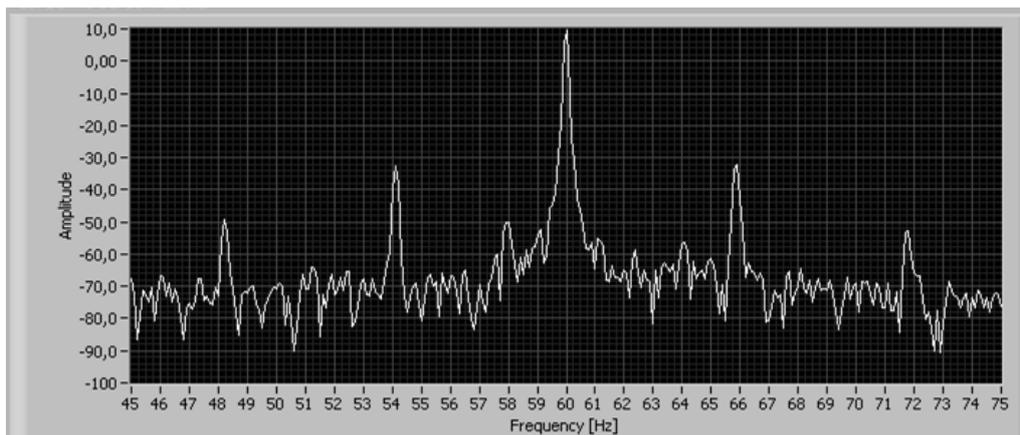
En esta gráfica se pueden apreciar los armónicos laterales superior e inferior, tal como indica la teoría vista previamente en el capítulo 2, también se observan dos pares de armónicos laterales de menor magnitud, denominados de segundo orden, estos se distancian de los de primer orden de igual manera que los de primer orden se distancian de la fundamental; debido a que estos armónicos laterales de segundo orden son de menor magnitud, no son tomados en cuenta para el diagnóstico, por lo tanto el diagnóstico será dado con la diferencia de amplitudes en dB entre

la fundamental y los armónicos laterales superior e inferior de primer orden, las cuales son de 42.7675 y 44.4303 respectivamente.



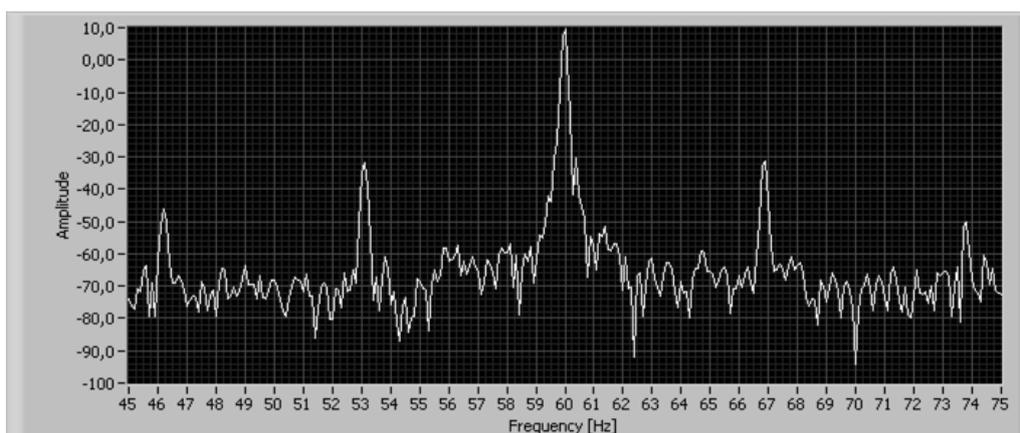
**Figura 4.11 Espectro de corriente del motor con 1 barra rota con carga (2.9 A)**

En esta gráfica se pueden observar los armónicos laterales superior e inferior de primer y segundo orden, además de observarse unos armónicos entre las frecuencias 45-46 y las frecuencias 74-75, estos armónicos serían los de tercer orden, pero su magnitud es muy pequeña para ser tomados en cuenta en el diagnóstico. También observamos como los armónicos laterales se van alejando de la fundamental a medida que aumenta la carga. La diferencia de amplitudes en dB entre la fundamental y los armónicos laterales superior e inferior es de 41.7475 y 43.3862 respectivamente.



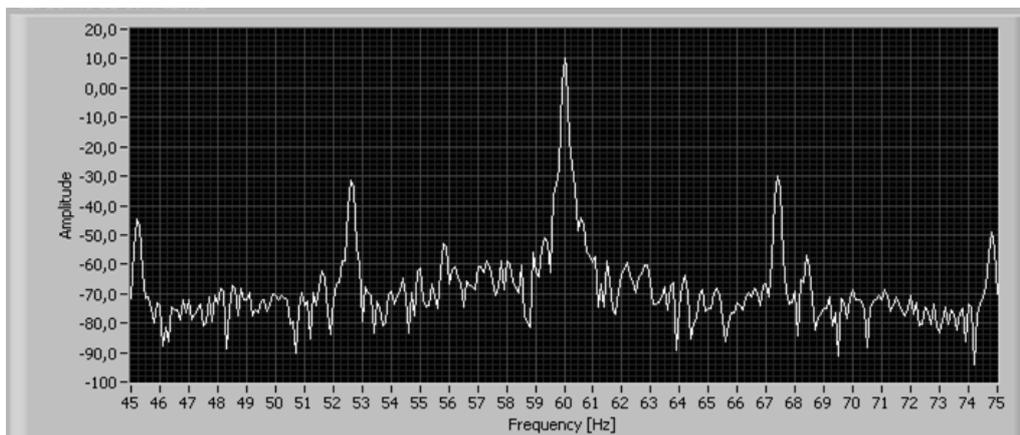
**Figura 4.12 Espectro de corriente del motor con 1 barra rota con carga (3.1 A)**

Se distinguen los armónicos laterales de primer y de segundo orden y se observa como los armónicos laterales se alejan más de la fundamental, debido al aumento de carga. La diferencia de amplitudes en dB entre la fundamental y los armónicos laterales superior e inferior es de 41.2044 y 42.3274 respectivamente.



**Figura 4.13 Espectro de corriente del motor con 1 barra rota con carga (3.3 A)**

Se observa mayor distanciamiento entre los armónicos laterales, debido al aumento de carga. La diferencia de amplitudes en dB entre la fundamental y los armónicos laterales superior e inferior es de 40.6545 y 41.8247 respectivamente.



**Figura 4.14 Espectro de corriente del motor con 1 barra rota con carga (3.5 A)**

Se observa un mayor distanciamiento entre los armónicos laterales y la fundamental, debido al aumento de carga. La diferencia de amplitudes en dB entre la fundamental y los armónicos laterales superior e inferior es de 40.4848 y 41.3949 respectivamente.

En la siguiente tabla se mostraran todos los resultados obtenidos, tanto teóricos como prácticos, de las pruebas hechas al motor con la presencia de una barra rota en el rotor.

1 BARRA ROTA								
CARGA	CORRIENTE (A)	FRECUENCIA FUNDAMENTAL	F. SUPERIOR TEÓRICA	F. SUPERIOR PRÁCTICA	F. INFERIOR TEÓRICA	F. INFERIOR PRÁCTICA	FUND - SUP (dB)	FUND - INF (dB)
NO	2,5	60	69,3333	NO	50,6667	NO	NO	NO
SI	2,7	60	69,3333	64,1029	50,6667	55,9403	42,7675	44,4303
SI	2,9	60	69,3333	64,8536	50,6667	55,1572	41,7475	43,3862
SI	3,1	60	69,3333	65,8672	50,6667	54,1049	41,2044	42,3274
SI	3,3	60	69,3333	66,8602	50,6667	53,0803	40,6545	41,8247
SI	3,5	60	69,3333	67,4146	50,6667	52,6278	40,4848	41,3949

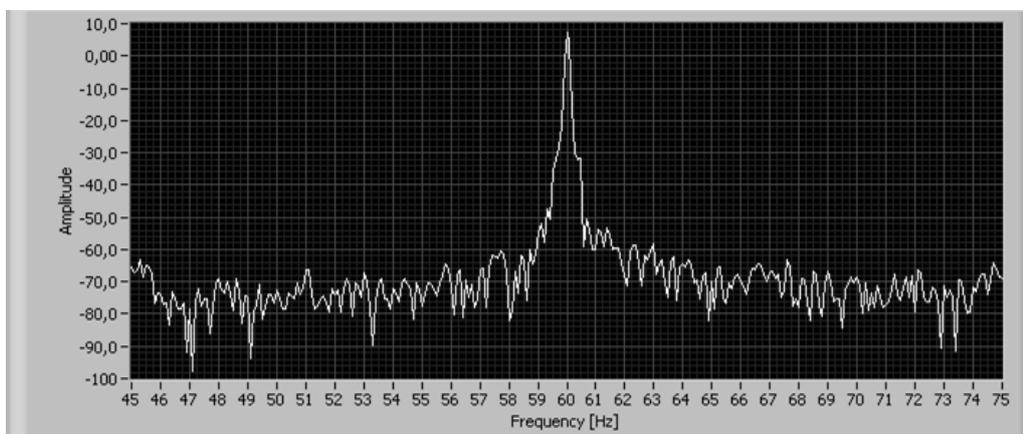
**Tabla IV.II Resultados obtenidos con 1 barra rota**

En esta tabla podemos observar que cuando el motor posee 1 barra rota en su interior, las diferencias de amplitudes en dB entre la fundamental y los armónicos laterales oscilan entre 40 y 45. Además cabe resaltar, que la magnitud del armónico lateral superior es mayor a la magnitud del armónico lateral inferior en todas las pruebas. También observamos como a medida que aumenta la carga en el eje del rotor, en pasos de 0.2 A, las frecuencias de los armónicos laterales se acercan a sus valores teóricos alrededor de 1 Hz por paso.

A continuación se detallarán y analizarán las gráficas de las pruebas realizadas al motor con 2 barras rotas en su rotor y todos los datos reales obtenidos de las mismas.

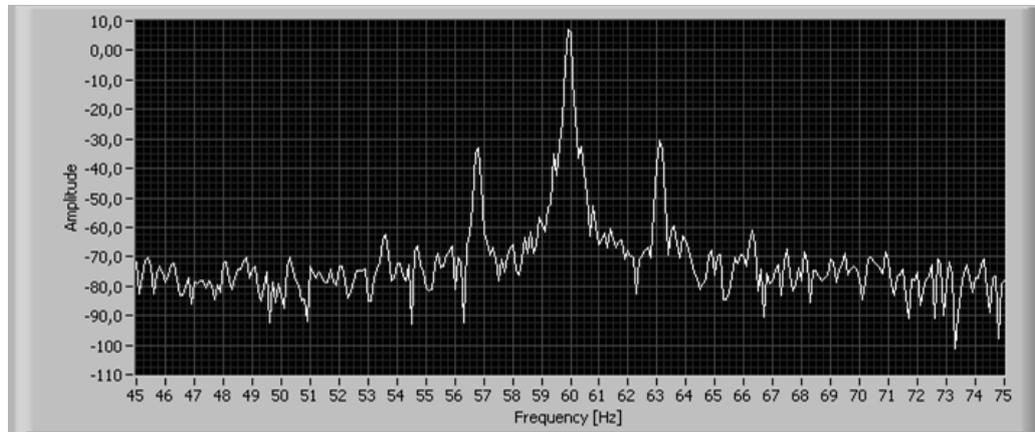


**Figura 4.15 Rotura de 2 barras en el rotor**



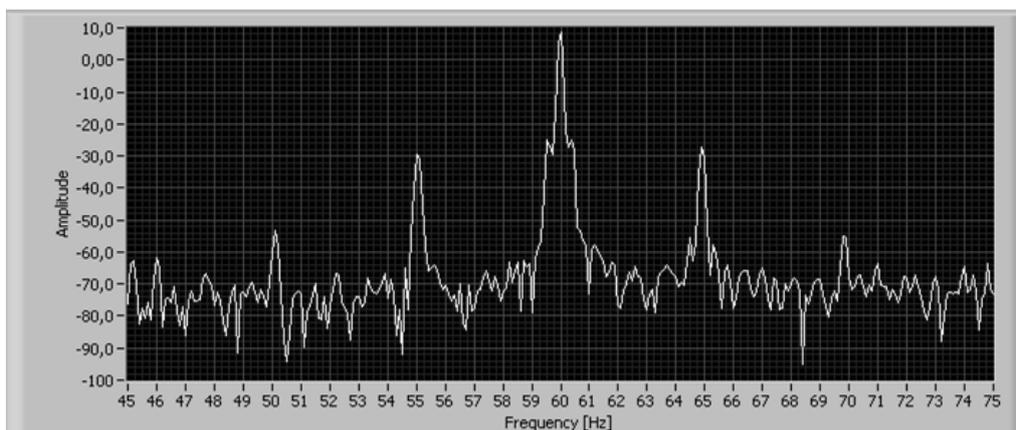
**Figura 4.16 Espectro de corriente del motor con 2 barras rotas sin carga (2.5 A)**

Debido a que el motor se encuentra sin carga, no se puede dar un diagnóstico válido, porque no se pueden apreciar los armónicos laterales.



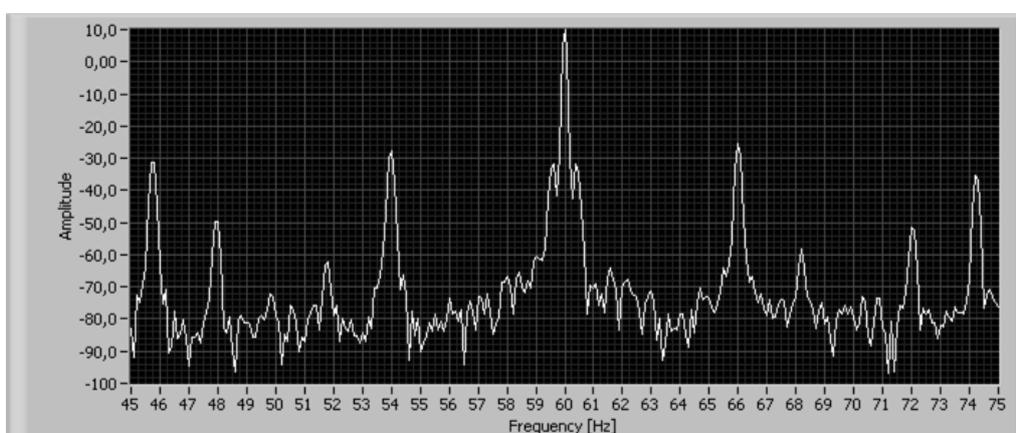
**Figura 4.17 Espectro de corriente del motor con 2 barras rotas con carga (2.7 A)**

Se observan los armónicos laterales de primer orden muy pronunciados, y levemente se pueden apreciar los armónicos laterales de segundo orden. La diferencia de magnitudes en dB entre la fundamental y los armónicos laterales superior e inferior es de 38.3272 y 40.5065 respectivamente.



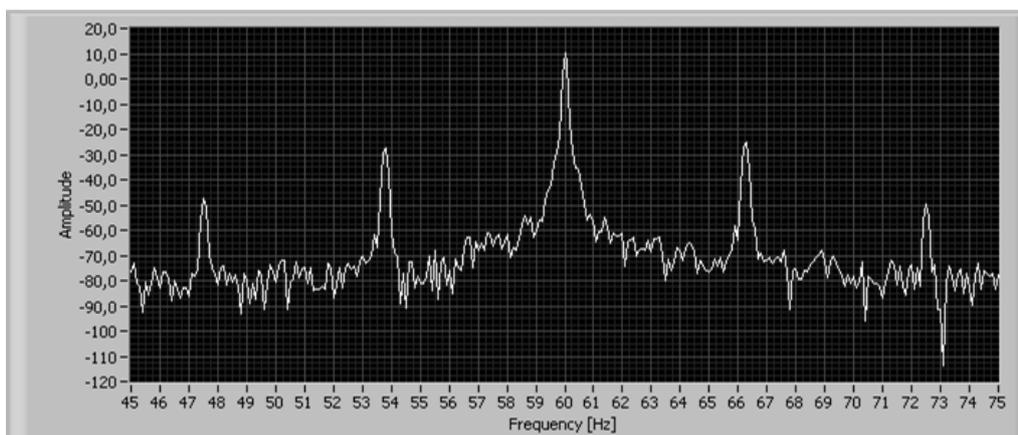
**Figura 4.18 Espectro de corriente del motor con 2 barras rotas con carga (2.9 A)**

Se observa mayor distancia entre la fundamental y los armónicos laterales, también se pueden observar los armónicos de segundo orden de menor magnitud que los de primer orden. La diferencia de magnitudes en dB entre la fundamental y los armónicos laterales superior e inferior es de 35.8538 y 37.7679 respectivamente.



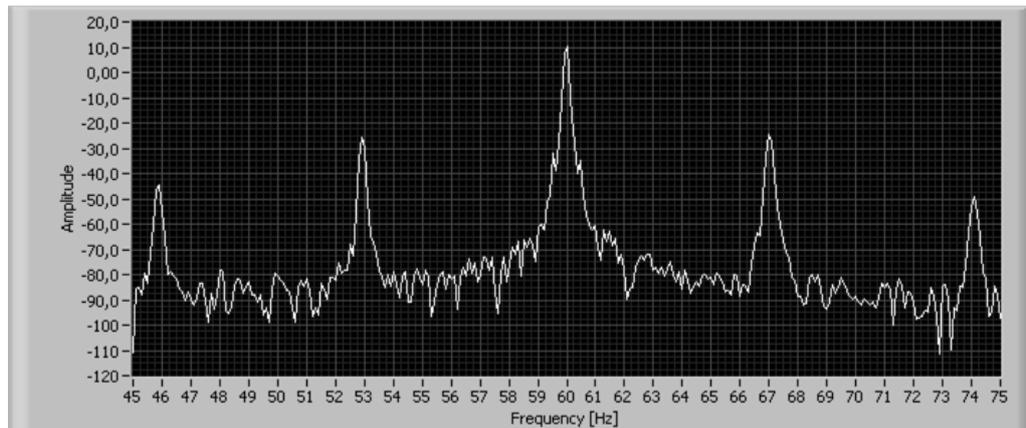
**Figura 4.19 Espectro de corriente del motor con 2 barras rotas con carga (3.1 A)**

Se puede observar mayor distanciamiento entre la fundamental y los armónicos laterales, además se observan los armónicos laterales de segundo orden muy pronunciados y unas bandas se pueden apreciar entre las frecuencias 45-46 y las frecuencias 74-75 de magnitud similar a los armónicos laterales de primer orden, se desconoce el origen de estas bandas, pueden ser originadas por fallas mecánicas en el motor. La diferencia de magnitudes en dB entre la fundamental y los armónicos laterales superior e inferior es de 35.0693 y 36.9379 respectivamente.



**Figura 4.20 Espectro de corriente del motor con 2 barras rotas con carga (3.3 A)**

En esta gráfica se aprecian claramente los armónicos laterales de primer y de segundo orden, también se observa mayor distancia entre la fundamental y los armónicos laterales. La diferencia de magnitudes en dB entre la fundamental y los armónicos laterales superior e inferior es de 34.9522 y 37.0807 respectivamente.



**Figura 4.21 Espectro de corriente del motor con 2 barras rotas con carga (3.5 A)**

En esta gráfica se observan claramente los armónicos de primer y de segundo orden, también se aprecia que los armónicos laterales se encuentran más distanciados de la fundamental. La diferencia de magnitudes en dB entre la fundamental y los armónicos laterales superior e inferior es de 34.52 y 36.3412 respectivamente.

En la siguiente tabla se mostraran todos los resultados obtenidos, tanto teóricos como prácticos, de las pruebas hechas al motor con la presencia de dos barras rotas en el rotor.

2 BARRAS ROTAS								
CARGA	CORRIENTE (A)	FRECUENCIA FUNDAMENTAL	F. SUPERIOR TEÓRICA	F. SUPERIOR PRÁCTICA	F. INFERIOR TEÓRICA	F. INFERIOR PRÁCTICA	FUND - SUP (dB)	FUND - INF (dB)
NO	2,5	60	69,3333	NO	50,6667	NO	NO	NO
SI	2,7	60	69,3333	63,1223	50,6667	56,7631	38,3272	40,5065
SI	2,9	60	69,3333	64,9207	50,6667	55,0399	35,8538	37,7679
SI	3,1	60	69,3333	66,0181	50,6667	53,9694	35,0693	36,9379
SI	3,3	60	69,3333	66,2649	50,6667	53,7684	34,9522	37,0807
SI	3,5	60	69,3333	67,0311	50,6667	52,9188	34,52	36,3412

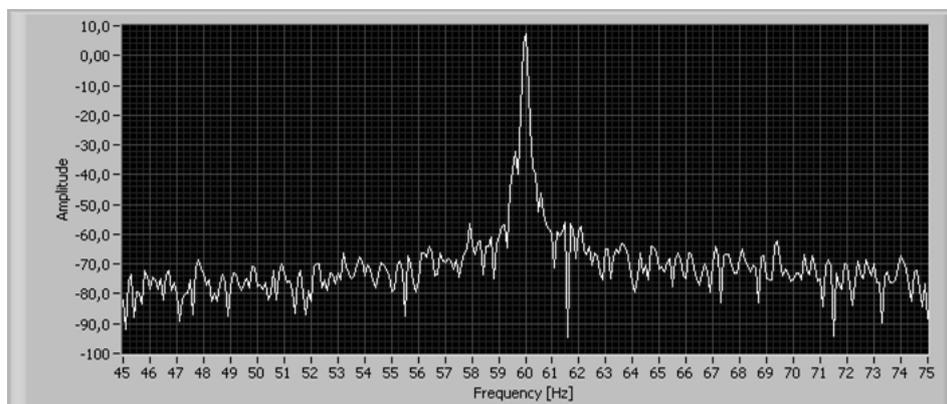
**Tabla IV.III Resultados obtenidos con 2 barras rotas**

En esta tabla nos damos cuenta que con la presencia de dos barras rotas en el rotor, la diferencia de magnitudes en dB entre la fundamental y los armónicos laterales oscila entre 34 y 40. También es muy notorio como a medida que aumentamos 0.2 A la corriente en el motor, la frecuencia real de los armónicos laterales, se desplaza alrededor de 1 Hz hacia sus valores teóricos. También observamos que la magnitud del armónico lateral superior es siempre mayor que la magnitud del armónico lateral inferior.

A continuación serán mostradas las gráficas tomadas de las pruebas hechas al motor cuando este posee tres barras rotas en el rotor, junto con todos los datos reales tomados de estas gráficas.



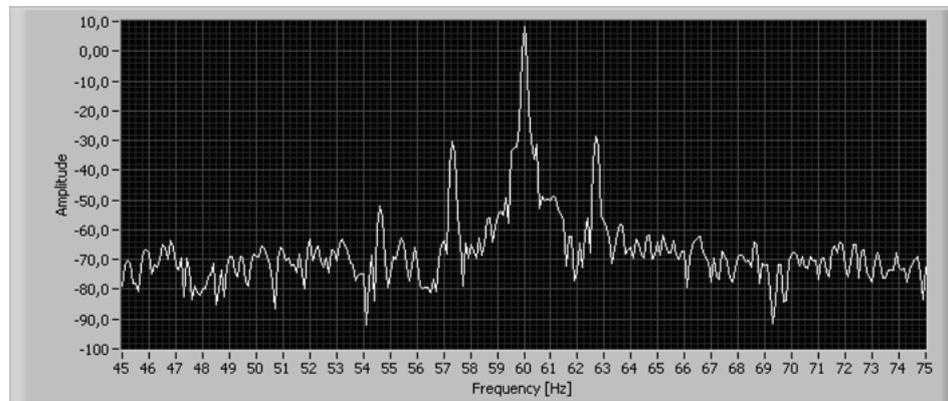
**Figura 4.22 Rotura de 3 barras en el rotor**



**Figura 4.23 Espectro de corriente del motor con 3 barras rotas sin carga (2.5 A)**

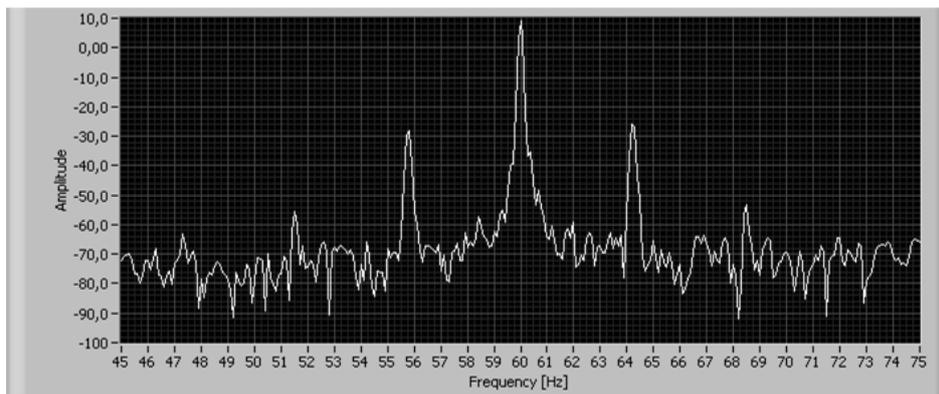
Debido a que el motor no tiene carga en el eje del rotor, no se pueden apreciar los armónicos laterales, por lo que podemos

decir que no se puede emitir un diagnóstico de la condición del rotor.



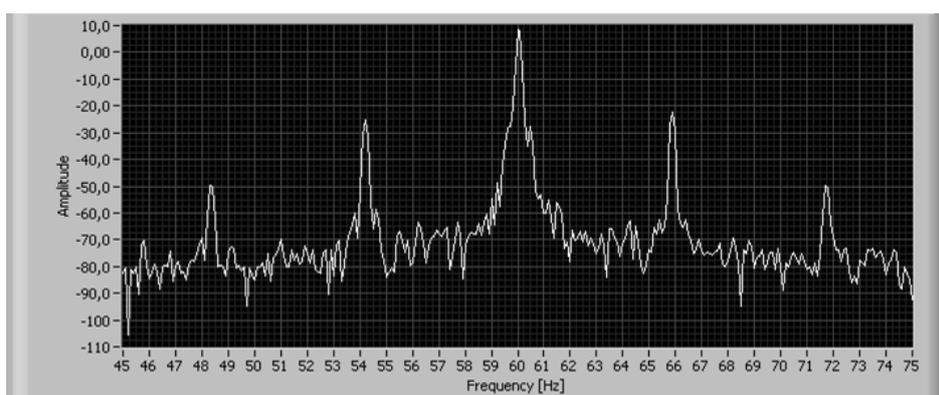
**Figura 4.24 Espectro de corriente del motor con 3 barras rotas con carga (2.7 A)**

Pese a la mínima carga que se ejerce en el eje del rotor, se pueden apreciar los armónicos laterales, estos se encuentran cerca de la frecuencia de la fundamental, lejos de su valor teórico previamente calculado, se observa también un armónico lateral inferior de segundo orden y el superior de segundo orden no se lo puede apreciar de buena manera. La diferencia entre la magnitud de la fundamental y los armónicos laterales superior e inferior es de 36.4262 dB y 38.5267 dB respectivamente



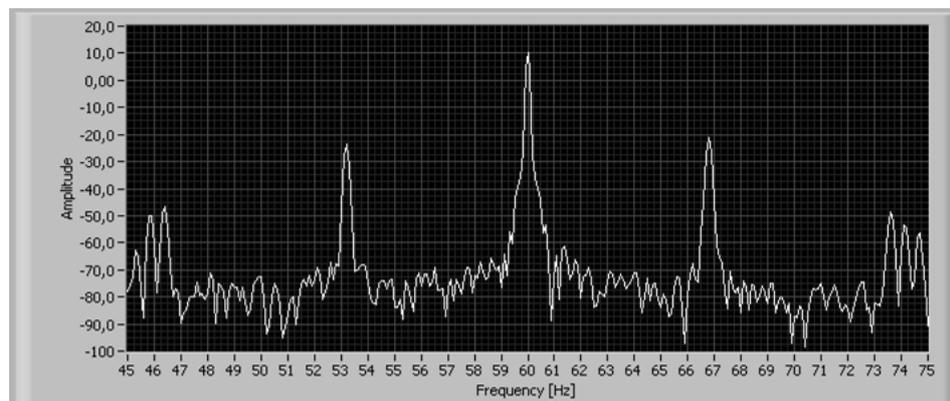
**Figura 4.25 Espectro de corriente del motor con 3 barras rotas con carga (2.9 A)**

Debido al aumento de la carga, se aprecia una mayor distancia entre la fundamental y los armónicos laterales, también se ven ligeramente los armónicos laterales de segundo orden. la diferencia de amplitudes en dB entre la fundamental y los armónicos laterales superior e inferior es de 33.7281 y 36.245 respectivamente.



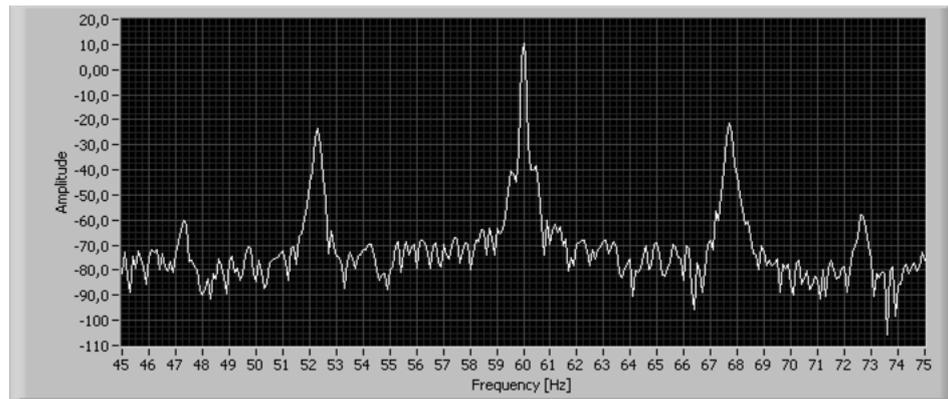
**Figura 4.26 Espectro de corriente del motor con 3 barras rotas con carga (3.1 A)**

En esta gráfica observamos claramente los armónicos laterales de primer y de segundo orden, también apreciamos un mayor distanciamiento entre la fundamental y los armónicos laterales. La diferencia entre la magnitud de la fundamental y los armónicos laterales superior e inferior es de 31.9139 dB y 34.772 dB respectivamente.



**Figura 4.27 Espectro de corriente del motor con 3 barras rotas con carga (3.3 A)**

En esta gráfica se observa mayor distanciamiento entre la fundamental, además podemos observar unas bandas laterales de origen desconocido, entre las frecuencias 45-47 y las frecuencias 73-75, posiblemente son originadas por fallas mecánicas en la estructura del motor. La diferencia entre la fundamental y los armónicos laterales superior e inferior es de 31.5835 dB y 33.8824 dB respectivamente.



**Figura 4.28 Espectro de corriente del motor con 3 barras rotas con carga (3.5 A)**

Se puede notar mayor distancia entre la fundamental y los armónicos laterales, se pueden apreciar también unas bandas de magnitud pequeña entre las frecuencias 47-48 y las frecuencias 72-73, se desconoce el origen de las mismas. La diferencia en dB entre la magnitud de la fundamental y los armónicos laterales superior e inferior es de 31.4793 y 33.6209 respectivamente.

En la tabla IX.IX se observan todos los datos reales obtenidos en las pruebas realizadas al motor cuando este tenía tres barras rotas en su interior.

3 BARRAS ROTAS								
CARGA	CORRIENTE (A)	FRECUENCIA FUNDAMENTAL	F. SUPERIOR TEÓRICA	F. SUPERIOR PRÁCTICA	F. INFERIOR TEÓRICA	F. INFERIOR PRÁCTICA	FUND - SUP (dB)	FUND - INF (dB)
NO	2,5	60	69,3333	NO	50,6667	NO	NO	NO
SI	2,7	60	69,3333	62,7208	50,6667	57,3187	36,4262	38,5267
SI	2,9	60	69,3333	64,2414	50,6667	55,7632	33,7281	36,245
SI	3,1	60	69,3333	65,8911	50,6667	54,1961	31,9139	34,772
SI	3,3	60	69,3333	66,806	50,6667	53,1854	31,5835	33,8824
SI	3,5	60	69,3333	67,7171	50,6667	52,2857	31,4793	33,6209

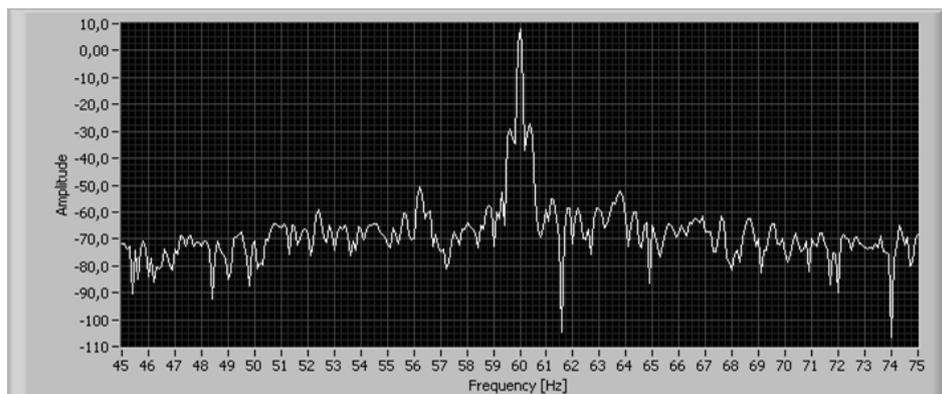
**Tabla IV.IV Resultados obtenidos con 3 barras rotas**

En la tabla IX.IX nos damos cuenta que con 3 barras rotas presentes en el rotor, la diferencia de magnitudes en dB entre la fundamental y los armónicos laterales oscila entre 30 y 38. Observamos también como a medida que aumenta la carga en el eje del rotor, en pasos de 0.2 A, las frecuencias reales de los armónicos laterales se van acercando a su valor teórico de 1 a 2 Hz por paso. Otra observación que cabe destacar es que la magnitud del armónico lateral superior, es siempre mayor que la magnitud del lateral inferior.

A continuación serán mostradas las gráficas de los espectros de corriente tomadas con las pruebas realizadas al motor, cuando este tenía 4 barras rotas presentes en el rotor, además de todos los datos reales tomados de las mismas.

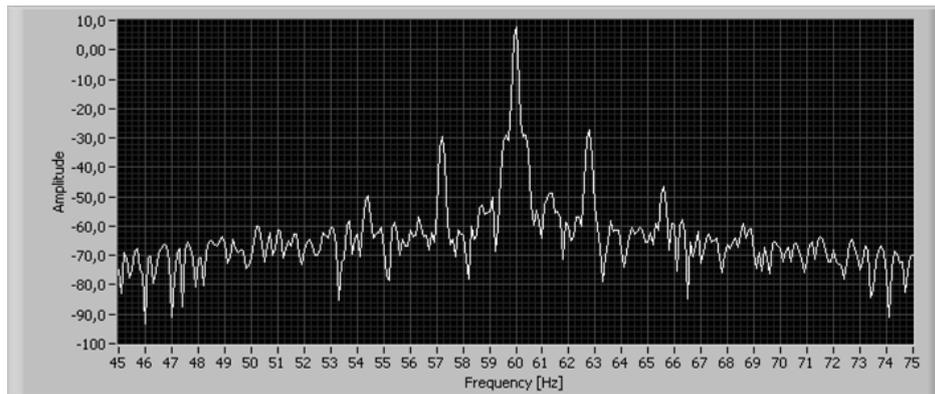


**Figura 4.29 Rotura de 4 barras en el rotor**



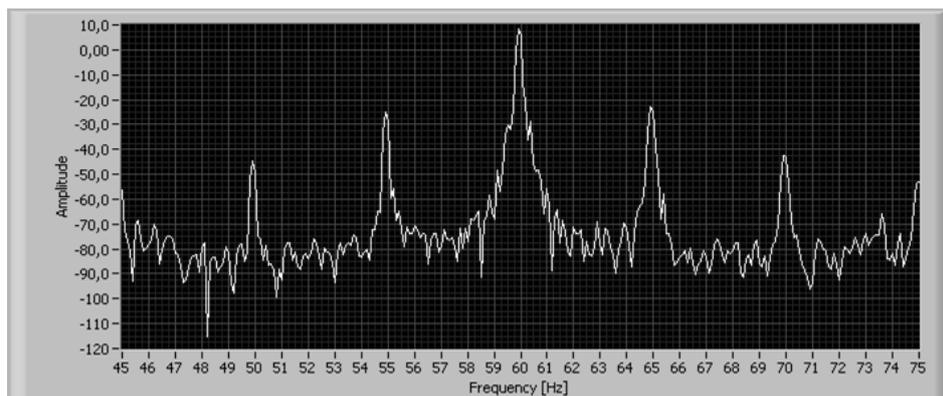
**Figura 4.30 Espectro de corriente del motor con 4 barras rotas sin carga (2.5 A)**

Se observan la presencia de armónicos, pero estos se encuentran muy cerca de la fundamental, por lo tanto no es posible emitir un diagnóstico con esta prueba hecha al motor sin carga.



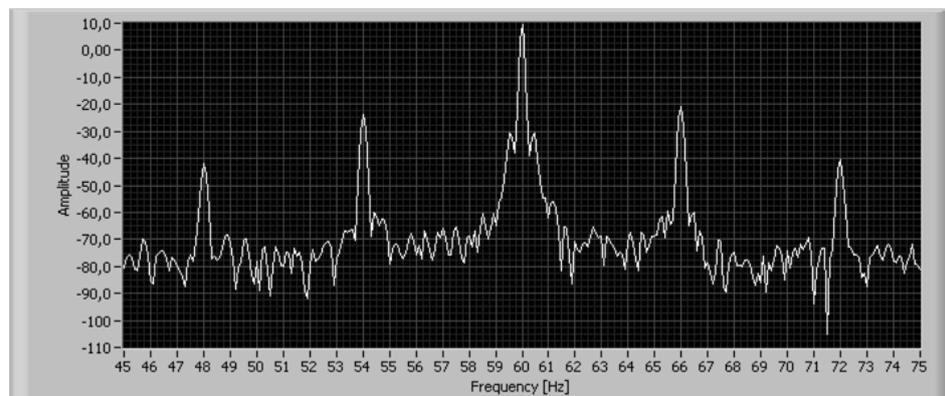
**Figura 4.31 Espectro de corriente del motor con 4 barras rotas con carga (2.7 A)**

Se observa la presencia de los armónicos laterales de primer y de segundo orden, estos armónicos se encuentran cerca de la fundamental y alejados de su valor teórico. La diferencia de magnitudes entre la fundamental y los armónicos laterales superior e inferior es de 35.2435 dB y 37.4386 respectivamente.



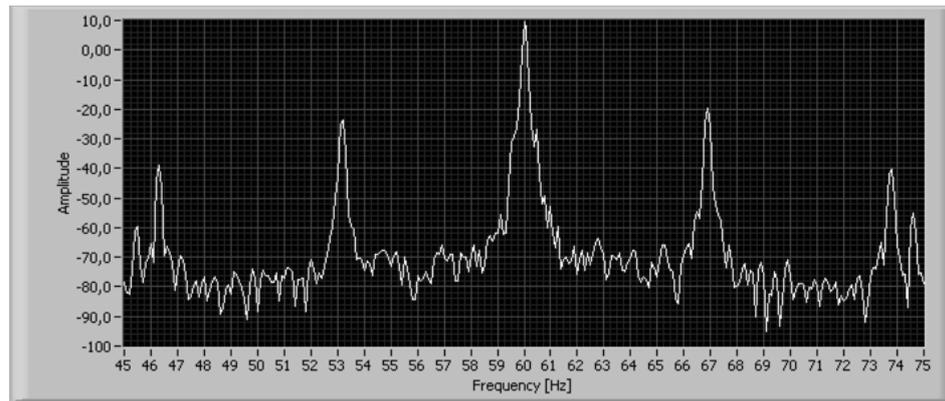
**Figura 4.32 Espectro de corriente del motor con 4 barras rotas con carga (2.9 A)**

En la figura 4.32 apreciamos los armónicos laterales de primer y de segundo orden, estos se encuentran un poco más distanciados de la fundamental que en la figura 4.31 debido al aumento de la carga en el eje del rotor. La diferencia de magnitudes en dB entre la fundamental y los armónicos laterales superior e inferior es de 31.2647 y 34.0936 respectivamente.



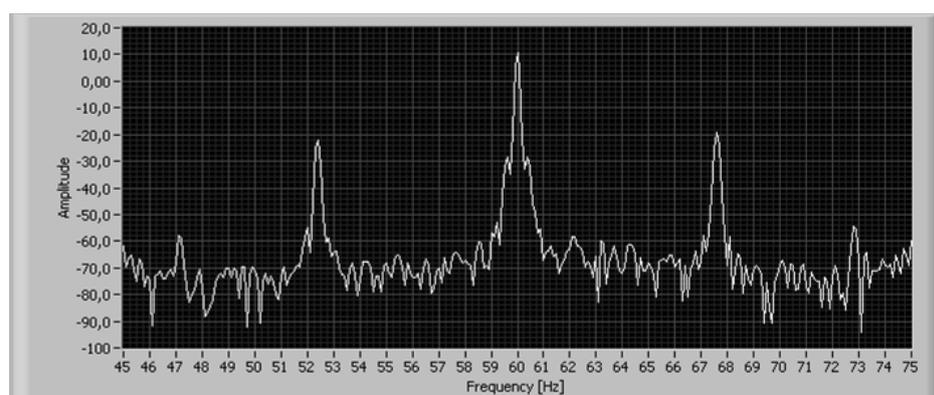
**Figura 4.33 Espectro de corriente del motor con 4 barras rotas con carga (3.1 A)**

En la figura 4.33 se observa un mayor distanciamiento entre la fundamental y los armónicos laterales, así como se aprecia claramente los armónicos laterales de segundo orden de menor magnitud que los de primer orden. La diferencia de magnitudes en dB entre la fundamental y los armónicos laterales superior e inferior es de 30.3465 y 33.292 respectivamente.



**Figura 4.34 Espectro de corriente del motor con 4 barras rotas con carga (3.3 A)**

Se observa un mayor distanciamiento entre la fundamental y los armónicos laterales, además se aprecian los armónicos laterales de segundo orden y junto a ellos unas bandas laterales de magnitud menor y de origen desconocido. La diferencia de magnitudes entre la fundamental y los armónicos laterales es de 29.7058 dB y 32.8493 dB respectivamente.



**Figura 4.35 Espectro de corriente del motor con 4 barras rotas con carga (3.5 A)**

Se aprecian claramente los armónicos laterales y de magnitud importante con respecto a la fundamental. La diferencia de magnitudes entre la fundamental y los armónicos laterales es de 29.6129 dB y 32.588 dB respectivamente.

En la tabla IX.X se mostraran todos los datos reales obtenidos de los espectros de corriente cuando se realizaron la prueba al motor con la presencia de 4 barras rotas en el rotor.

4 BARRAS ROTAS								
CARGA	CORRIENTE (A)	FRECUENCIA FUNDAMENTAL	F. SUPERIOR TEÓRICA	F. SUPERIOR PRÁCTICA	F. INFERIOR TEÓRICA	F. INFERIOR PRÁCTICA	FUND - SUP (dB)	FUND - INF (dB)
NO	2,5	60	69,3333	NO	50,6667	NO	NO	NO
SI	2,7	60	69,3333	62,7725	50,6667	57,1861	35,2435	37,4386
SI	2,9	60	69,3333	64,9376	50,6667	54,9205	31,2647	34,0936
SI	3,1	60	69,3333	65,9901	50,6667	54,0046	30,3465	33,292
SI	3,3	60	69,3333	66,8969	50,6667	53,1599	29,7058	32,8493
SI	3,5	60	69,3333	67,6086	50,6667	52,3764	29,6129	32,588

**Tabla IV.V Resultados obtenidos con 4 barras rotas**

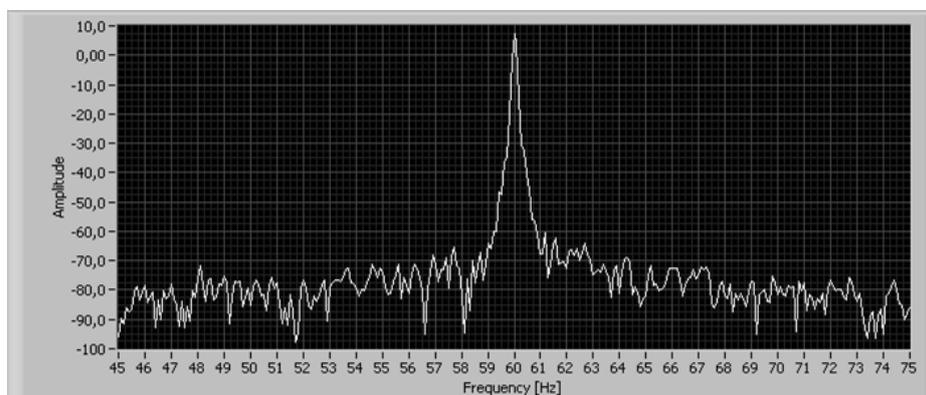
En la tabla IX.X podemos apreciar que cuando el rotor posee 4 barras rotas, la diferencia de magnitudes en dB entre la fundamental y los armónicos laterales oscila entre 29 y 35. Además nuevamente comprobamos como a medida que aumenta la carga en el eje del rotor, las frecuencias reales de las bandas laterales se acercan a sus valores teóricos. Otro dato que también observamos es que la magnitud del armónico lateral superior es

siempre de 2 a 3 dB mayor que la magnitud del armónico lateral inferior.

A continuación se mostraran todas las gráficas de los espectros de corriente, tomados de las pruebas realizadas al motor cuando este tenía 5 barras rotas en el rotor, además de mostrarse todos los datos reales obtenidos de estas gráficas.

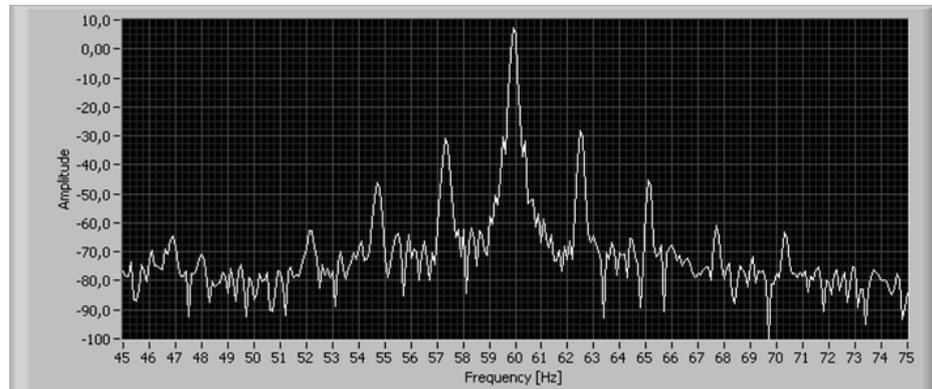


**Figura 4.36 Rotura de 5 barras en el rotor**



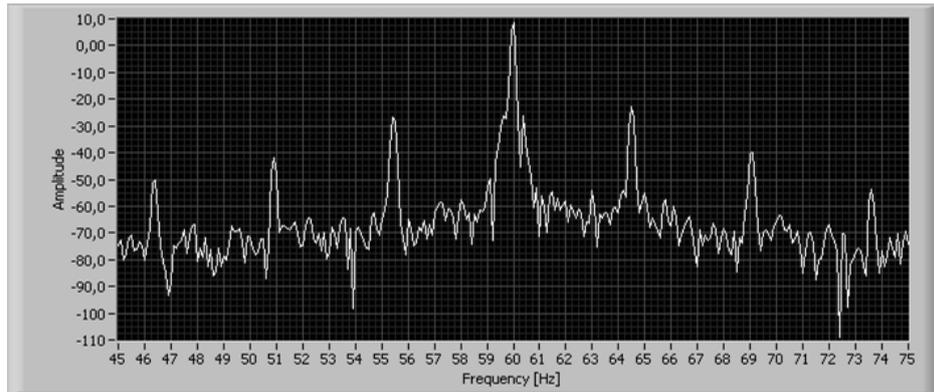
**Figura 4.37 Espectro de corriente del motor con 5 barras rotas sin carga (2.5 A)**

No se puede dar un diagnóstico válido del motor, debido a que no se aprecian los armónicos laterales, esto debido a que el motor no posee carga en el eje del rotor.



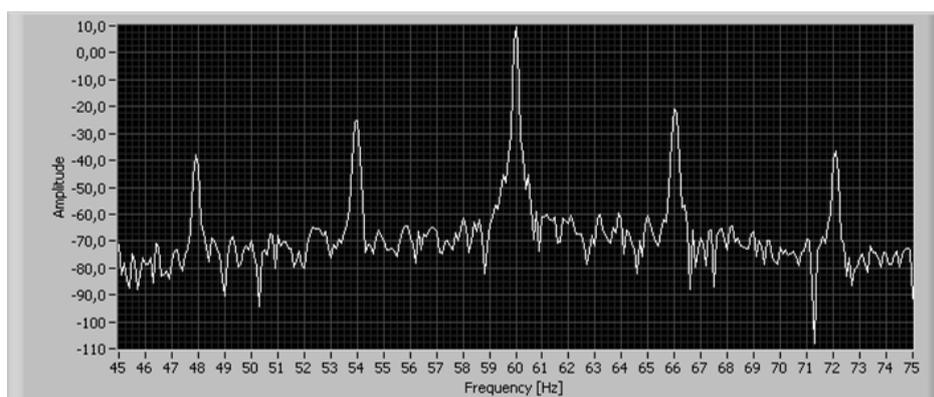
**Figura 4.38 Espectro de corriente del motor con 5 barras rotas con carga (2.7 A)**

En la figura 4.38 observamos los armónicos laterales de primer, segundo, tercer y hasta cuarto orden, a medida que aumenta el orden disminuyen en magnitud, pero para emitir un diagnóstico solo tomamos en cuenta los de primer orden. La diferencia en dB entre la fundamental y los armónicos laterales superior e inferior es de 35.6769 y 38.4718 respectivamente.



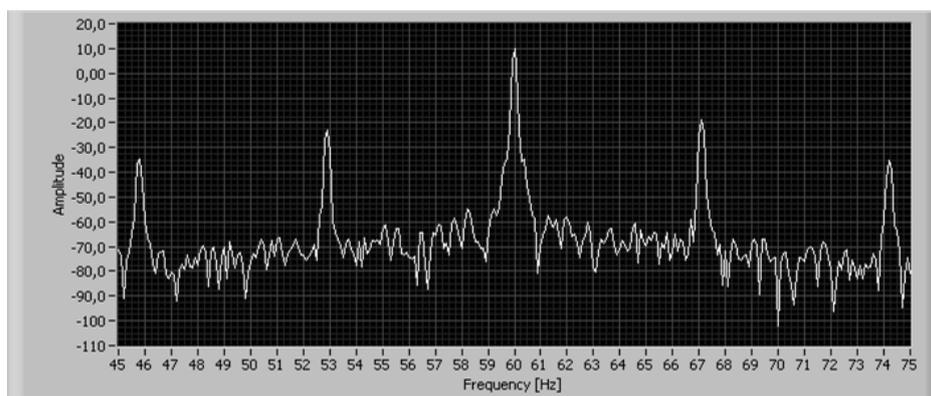
**Figura 4.39 Espectro de corriente del motor con 5 barras rotas con carga (2.9 A)**

Se pueden observar los armónicos laterales de primer, segundo y de tercer orden. Los armónicos laterales se han alejado alrededor de 2 Hz de la fundamental con respecto a la figura 4.38. La diferencia de magnitudes entre la fundamental y los armónicos laterales superior e inferior es de 31.8132 dB y 34.8155 dB respectivamente.



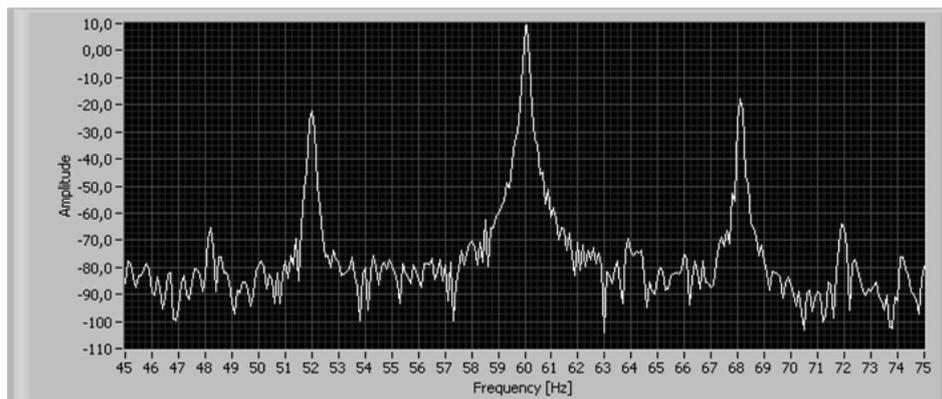
**Figura 4.40 Espectro de corriente del motor con 5 barras rotas con carga (3.1 A)**

En la figura 4.40 observamos claramente los armónicos laterales de primer y de segundo orden, también se observa que los armónicos laterales se han alejado entre 1.5 y 2 Hz de la fundamental, acercándose a su valor teórico. La diferencia de magnitudes en dB entre la fundamental y los armónicos laterales superior e inferior es de 29.7466 y 33.6542 respectivamente.



**Figura 4.41 Espectro de corriente del motor con 5 barras rotas con carga (3.3 A)**

En la figura 4.41 observamos la presencia de los armónicos laterales de primer y de segundo orden, también se observa que los armónicos laterales se han alejado de la fundamental alrededor de 2 Hz con respecto a la gráfica anterior. La diferencia de magnitudes entre la fundamental y los armónicos laterales superior e inferior es de 28.906 dB y 33.0907 dB respectivamente.



**Figura 4.42 Espectro de corriente del motor con 5 barras rotas con carga (3.5 A)**

Se observan los armónicos laterales más alejados de la fundamental con respecto al gráfico anterior, muy cerca de sus valores teóricos. La diferencia de magnitudes en dB entre la fundamental y los armónicos laterales superior e inferior es de 28.3937 y 32.6426 respectivamente.

En la siguiente tabla se mostrarán todos los datos reales y teóricos obtenidos de las pruebas hechas al motor con 5 barras rotas en el rotor.

5 BARRAS ROTAS								
CARGA	CORRIENTE (A)	FRECUENCIA FUNDAMENTAL	F. SUPERIOR TEÓRICA	F. SUPERIOR PRÁCTICA	F. INFERIOR TEÓRICA	F. INFERIOR PRÁCTICA	FUND - SUP (dB)	FUND - INF (dB)
NO	2,5	60	69,3333	NO	50,6667	NO	NO	NO
SI	2,7	60	69,3333	62,5324	50,6667	57,3289	35,6769	38,4718
SI	2,9	60	69,3333	64,5131	50,6667	55,4356	31,8132	34,8155
SI	3,1	60	69,3333	66,0363	50,6667	53,9548	29,7466	33,6542
SI	3,3	60	69,3333	67,105	50,6667	52,8818	28,906	33,0907
SI	3,5	60	69,3333	68,1182	50,6667	51,9847	28,3937	32,6426

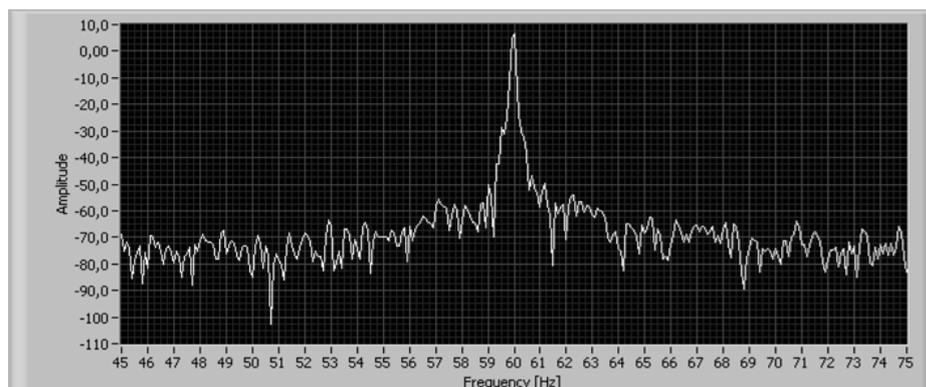
**Tabla IV.VI Resultados obtenidos con 5 barras rotas**

En la tabla IX.XI nos damos cuenta que la diferencia de amplitudes entre la fundamental y los armónicos laterales oscila entre 28 dB y 36 dB. También se observa como a medida que aumentamos 0.2 A la corriente del motor, las frecuencias reales de los armónicos laterales se alejan entre 1.5 y 2 Hz de la fundamental, y cuando el motor se encuentra al 100% de carga, los valores reales de las frecuencias de los armónicos laterales, están muy cerca de sus valores teóricos. Por otro lado, es muy notorio que la magnitud del armónico lateral superior es mayor entre 3 y 4 dB a la magnitud del armónico lateral inferior en todas las pruebas.

A continuación se mostrarán, las gráficas de los espectros de corriente tomados de las pruebas hechas al motor con 6 barras rotas en el rotor, junto con todos los datos reales obtenidos de las mismas.

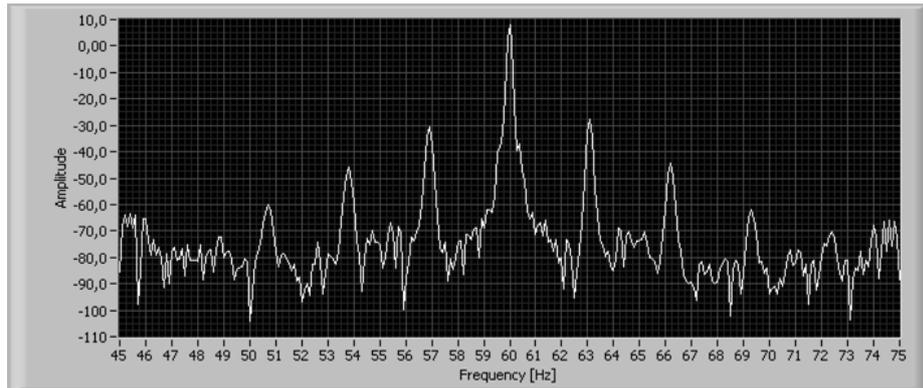


**Figura 4.43 Rotura de 6 barras en el rotor**



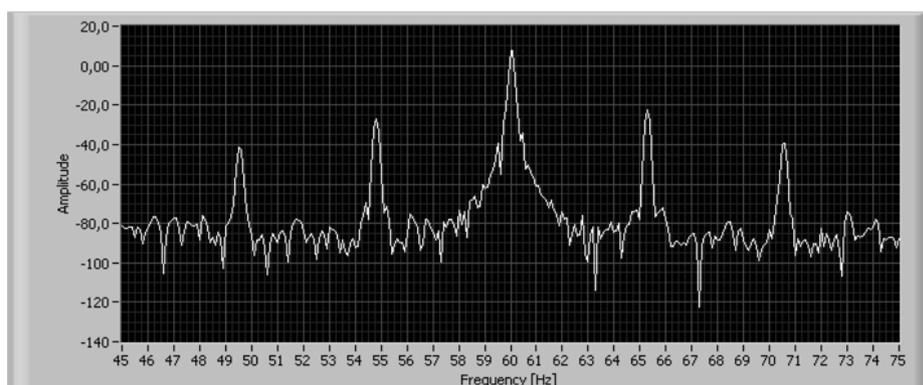
**Figura 4.44 Espectro de corriente del motor con 6 barras rotas sin carga (2.5 A)**

Como ocurrió con otras pruebas hechas al motor, cuando este se encuentra sin carga en el eje del rotor, no es válido dar un diagnóstico del estado del motor debido a que no se aprecian los armónicos laterales, posiblemente porque estos se encuentren muy cerca de la fundamental y es imposible identificarlos.



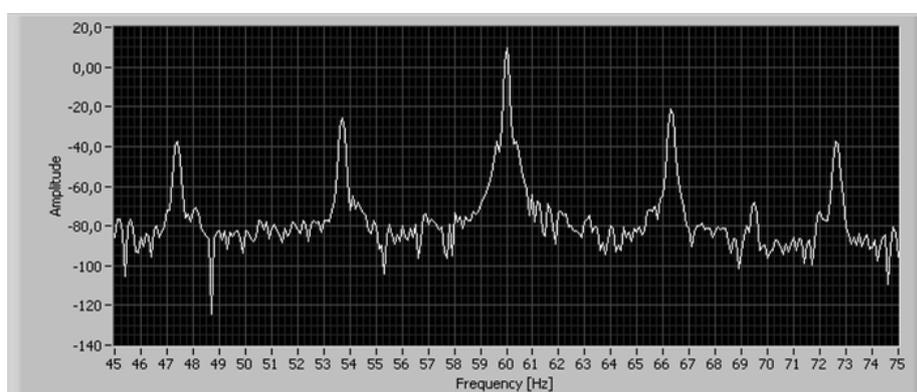
**Figura 4.45 Espectro de corriente del motor con 6 barras rotas con carga (2.7 A)**

En la figura 4.45 se observan los armónicos laterales de primer, segundo y de tercer orden, que a medida que aumentan de orden, disminuyen en magnitud, por lo tanto solo nos fijamos en los armónicos laterales de primer orden. La diferencia de magnitudes entre la fundamental y los armónicos laterales superior e inferior es de 35.599 dB y 38.6146 dB respectivamente.



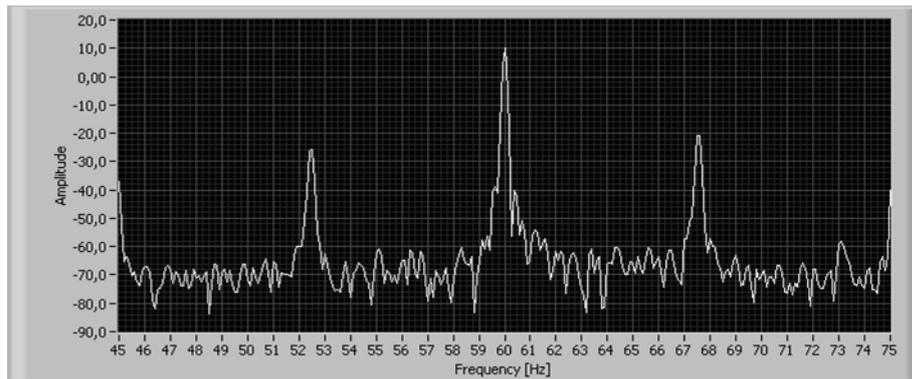
**Figura 4.46 Espectro de corriente del motor con 6 barras rotas con carga (2.9 A)**

En esta gráfica, se pueden distinguir claramente los armónicos laterales de primer y de segundo orden, además se observa un mayor distanciamiento entre los armónicos laterales y la fundamental, debido al aumento de carga en el eje del rotor. La diferencia de magnitudes en dB entre la fundamental y los armónicos laterales superior e inferior es de 31.692 y 35.7272 respectivamente.



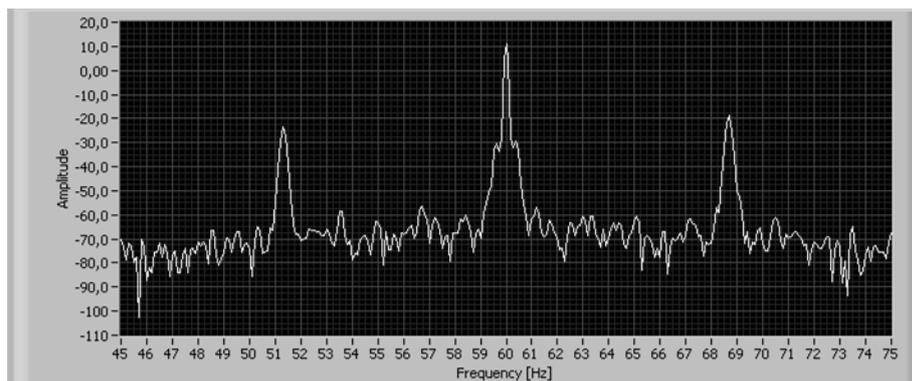
**Figura 4.47 Espectro de corriente del motor con 6 barras rotas con carga (3.1 A)**

En la figura 4.47 se distinguen claramente los armónicos laterales de primer y de segundo orden. Observamos también que la magnitud del armónico lateral superior es ligeramente mayor a la magnitud del armónico lateral inferior. La diferencia de magnitudes entre la fundamental y los armónicos laterales superior e inferior es de 30.5824 dB y 35.2549 dB respectivamente.



**Figura 4.48 Espectro de corriente del motor con 6 barras rotas con carga (3.3 A)**

En esta gráfica observamos un mayor distanciamiento entre los armónicos laterales y la fundamental con respecto al gráfico anterior. La diferencia de magnitudes entre la fundamental y los armónicos laterales superior e inferior es de 29.5384 dB y 34.7269 dB respectivamente.



**Figura 4.49 Espectro de corriente del motor con 6 barras rotas con carga (3.5 A)**

En la figura 4.49 observamos los armónicos laterales muy cerca de sus valores teóricos, esto debido a que el motor se encuentra al 100% de su carga nominal. La diferencia de magnitudes entre la fundamental y los armónicos laterales superior e inferior es de 29.4192 dB y 34.1651 dB respectivamente.

En la siguiente tabla se detallarán todos los valores reales obtenidos de las pruebas realizadas al motor con la presencia de 6 barras rotas en el rotor.

6 BARRAS ROTAS								
CARGA	CORRIENTE (A)	FRECUENCIA FUNDAMENTAL	F. SUPERIOR TEÓRICA	F. SUPERIOR PRÁCTICA	F. INFERIOR TEÓRICA	F. INFERIOR PRÁCTICA	FUND - SUP (dB)	FUND - INF (dB)
NO	2,5	60	69,3333	NO	50,6667	NO	NO	NO
SI	2,7	60	69,3333	63,0911	50,6667	56,8823	35,599	38,6146
SI	2,9	60	69,3333	65,3032	50,6667	54,7917	31,692	35,7272
SI	3,1	60	69,3333	66,3233	50,6667	53,6925	30,5824	35,2549
SI	3,3	60	69,3333	67,549	50,6667	52,4557	29,5384	34,7269
SI	3,5	60	69,3333	68,6769	50,6667	51,3173	29,4192	34,1651

**Tabla IV.VII Resultados obtenidos con 6 barras rotas**

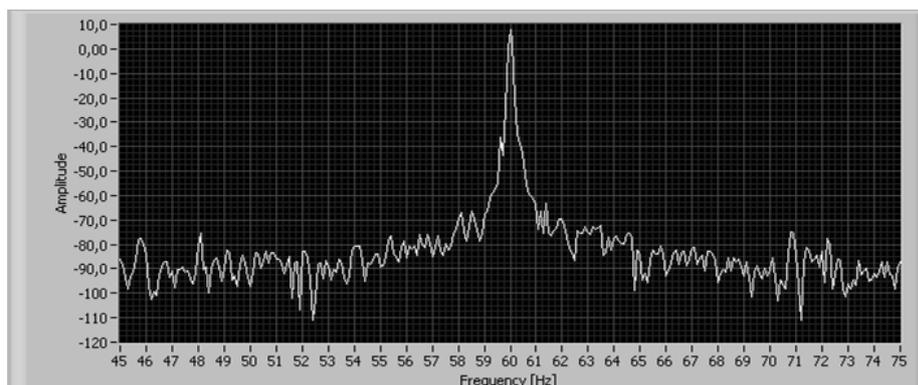
De esta tabla podemos observar que con la presencia de 6 barras rotas en el rotor, la diferencia de magnitudes en dB entre la fundamental y los armónicos laterales, oscila entre 29 y 36 dB. Además observamos que a medida que aumentamos la carga en pasos de 0.2 A, las frecuencias reales de los armónicos laterales se alejan de la fundamental de 1 a 2 Hz por paso. También es muy notorio que la magnitud del armónico lateral superior es

mayor a la magnitud del armónico lateral inferior en todas las pruebas entre 3 y 5 dB.

A continuación, se presentarán todas las gráficas de los espectros de corriente tomados de las pruebas realizadas al motor cuando este posee 7 barras rotas en el rotor, y los datos reales tomados de estas gráficas.

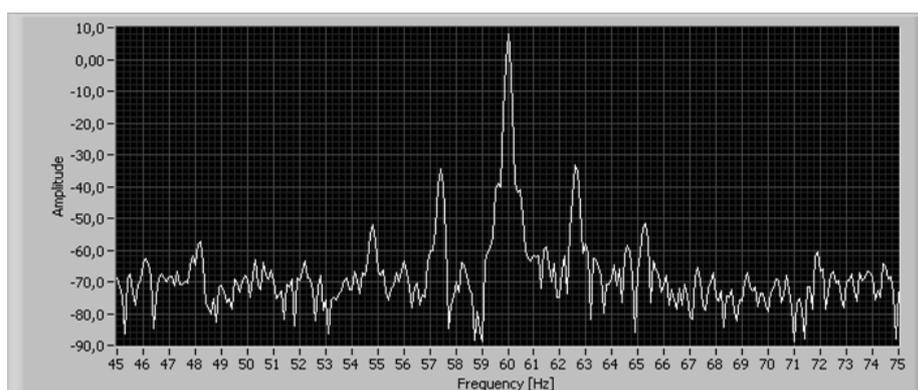


**Figura 4.50 Rotura de 7 barras en el rotor**



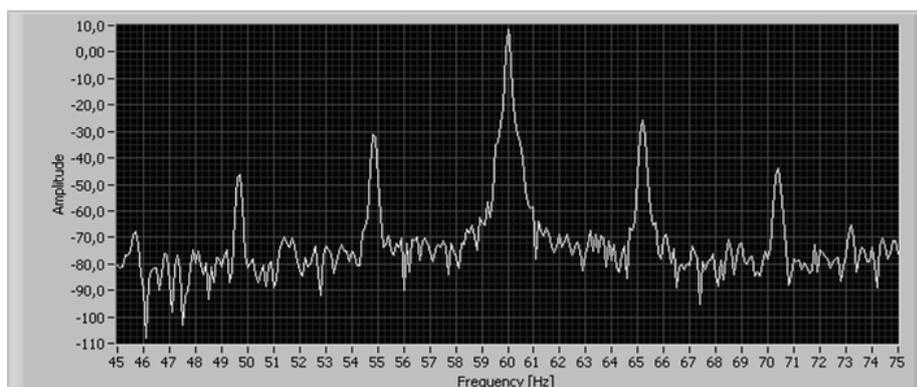
**Figura 4.51 Espectro de corriente del motor con 7 barras rotas sin carga (2.5 A)**

No es posible dar un diagnóstico con esta gráfica del espectro de corriente con el motor trabajando en vacío sin carga en el eje del rotor, debido a que no se pueden distinguir los armónicos laterales, debido a que se encuentran muy cercanos a la fundamental.



**Figura 4.52 Espectro de corriente del motor con 7 barras rotas con carga (2.7 A)**

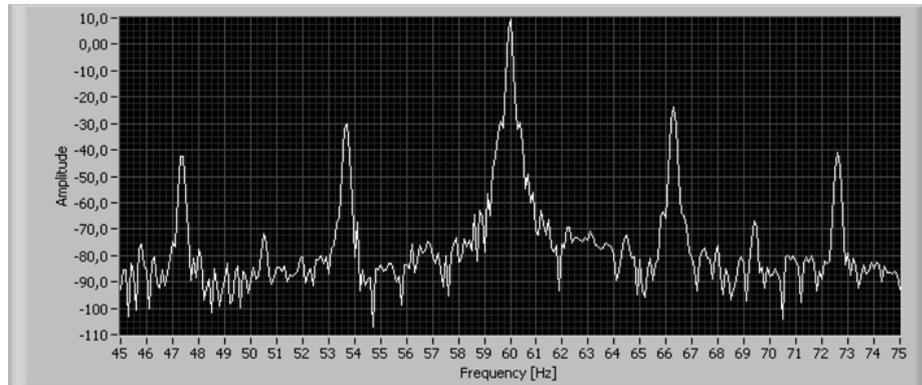
En la figura 4.52 observamos los armónicos laterales de primer, segundo y hasta de tercer orden, pero para efectos de emitir un diagnóstico solo tomamos en cuenta los de primer orden. Observamos que las frecuencias reales de los armónicos laterales se encuentran alejadas de su valor teórico, muy cerca de la fundamental, esto debido a que la carga en el eje del rotor es mínima. La diferencia entre las magnitudes de la fundamental y los armónicos laterales superior e inferior es de 40.5465 dB y 42.2943 dB respectivamente.



**Figura 4.53 Espectro de corriente del motor con 7 barras rotas con carga (2.9 A)**

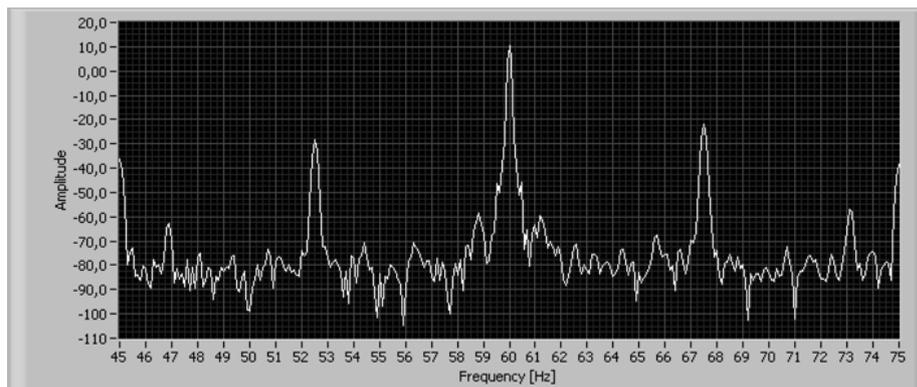
Se distinguen los armónicos laterales de primer y de segundo orden. Se aprecia un mayor distanciamiento entre los armónicos laterales y la fundamental con respecto a la gráfica anterior. La diferencia de magnitudes entre la fundamental y los armónicos

laterales superior e inferior es de 34.7342 dB y 39.1557 dB respectivamente.



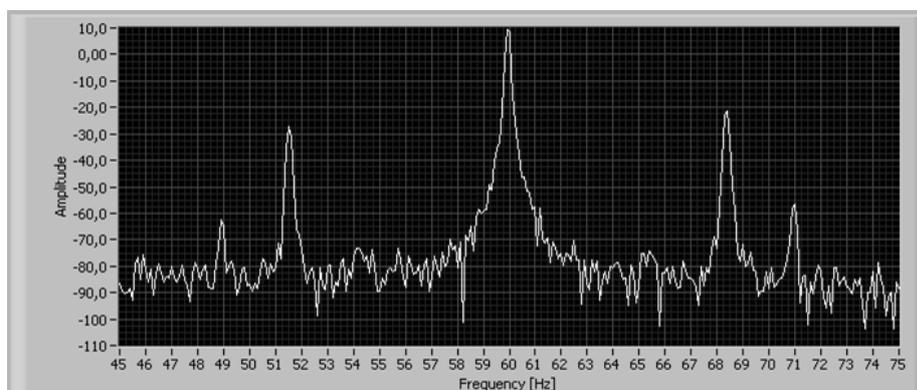
**Figura 4.54 Espectro de corriente del motor con 7 barras rotas con carga (3.1 A)**

Se observan los armónicos laterales de primer y segundo orden, además de observarse unos picos pequeños entre las frecuencias 53-54 y las frecuencias 69-70, su origen es desconocido. Se observa que la distancia entre la fundamental y los armónicos laterales es mayor. La diferencia de magnitudes entre la fundamental y los armónicos laterales superior e inferior es de 33.1827 dB y 38.9434 dB respectivamente.



**Figura 4.55 Espectro de corriente del motor con 7 barras rotas con carga (3.3 A)**

En la figura 4.55 observamos claramente los armónicos laterales más alejados de la fundamental con respecto al gráfico anterior, también es notorio que la magnitud del armónico lateral superior es mayor a la magnitud del armónico lateral inferior entre 5 y 10 dB. La diferencia de magnitudes entre la fundamental y los armónicos laterales superior e inferior es de 32.1067 dB y 38.6405 dB respectivamente.



**Figura 4.56 Espectro de corriente del motor con 7 barras rotas con carga (3.5 A)**

En la figura 4.56 observamos los armónicos laterales más alejados de la fundamental con respecto al gráfico anterior. Se observan unos picos a lado de los armónicos laterales de origen desconocido, posiblemente sea por fallas mecánicas en el motor. La diferencia de magnitudes entre la fundamental y los armónicos laterales superior e inferior es de 31.4972 dB y 37.711 dB respectivamente.

7 BARRAS ROTAS								
CARGA	CORRIENTE (A)	FRECUENCIA FUNDAMENTAL	F. SUPERIOR TEÓRICA	F. SUPERIOR PRÁCTICA	F. INFERIOR TEÓRICA	F. INFERIOR PRÁCTICA	FUND - SUP (dB)	FUND - INF (dB)
NO	2,5	60	69,3333	NO	50,6667	NO	NO	NO
SI	2,7	60	69,3333	62,6366	50,6667	57,3947	40,5465	42,2943
SI	2,9	60	69,3333	65,196	50,6667	54,8412	34,7342	39,1557
SI	3,1	60	69,3333	66,2917	50,6667	53,6645	33,1827	38,9434
SI	3,3	60	69,3333	67,5024	50,6667	52,5109	32,1067	38,6405
SI	3,5	60	69,3333	68,3655	50,6667	51,5185	31,4972	37,711

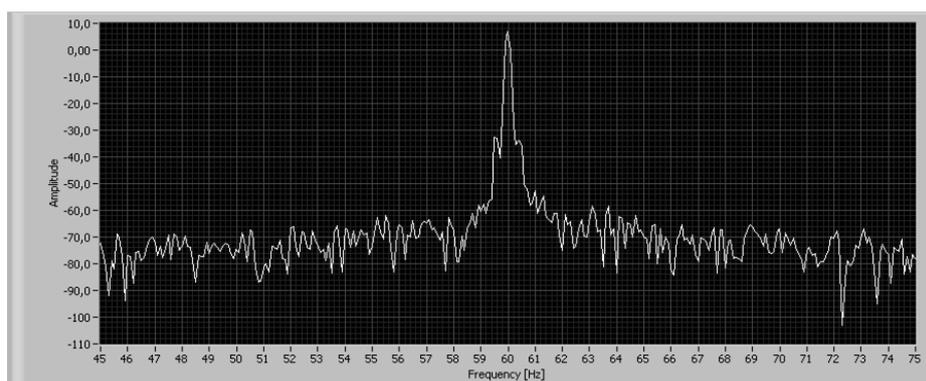
**Tabla IV.VIII Resultados obtenidos con 7 barras rotas**

De la tabla IV.VIII, nos damos cuenta que cuando el motor posee 7 barras rotas en el rotor, la diferencia de magnitudes entre la fundamental y los armónicos laterales oscila entre 30 y 40 dB. También cabe destacar que en todas las pruebas el armónico lateral superior fue mayor al armónico lateral inferior entre 2 a 6 dB. También observamos que a medida que aumentamos la corriente del motor en pasos de 0.2 A, los armónicos laterales de alejan de la fundamental entre 1 a 3 Hz por paso.

A continuación se mostrarán todas las gráficas de los espectros de corriente tomados de las pruebas hechas al motor cuando este posee 8 barras rotas en el rotor, además de todos los datos reales obtenidos de estas gráficas.

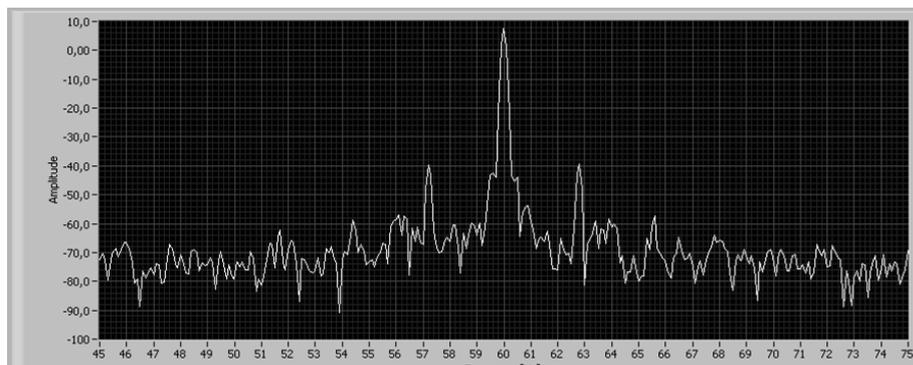


**Figura 4.57 Rotura de 8 barras en el rotor**



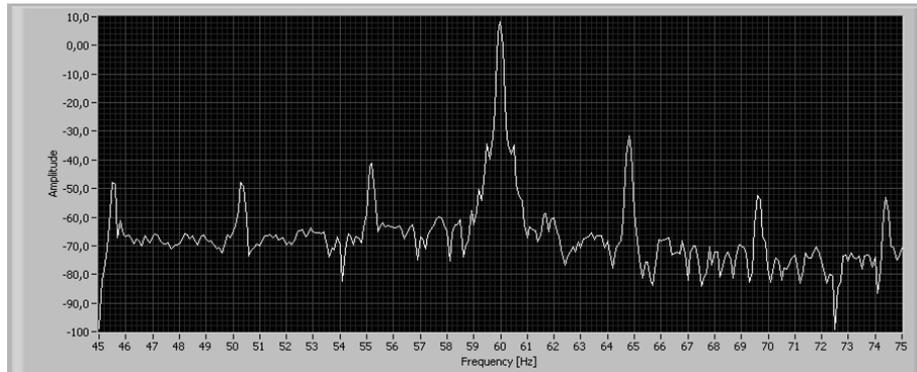
**Figura 4.58 Espectro de corriente del motor con 8 barras rotas sin carga (2.3 A)**

Debido a que el motor se encuentra sin carga en el eje del rotor, no es posible distinguir los armónicos laterales, gracias a que estos se encuentran muy cerca de la fundamental. Por lo tanto, no es posible emitir un diagnóstico del motor con esta prueba.



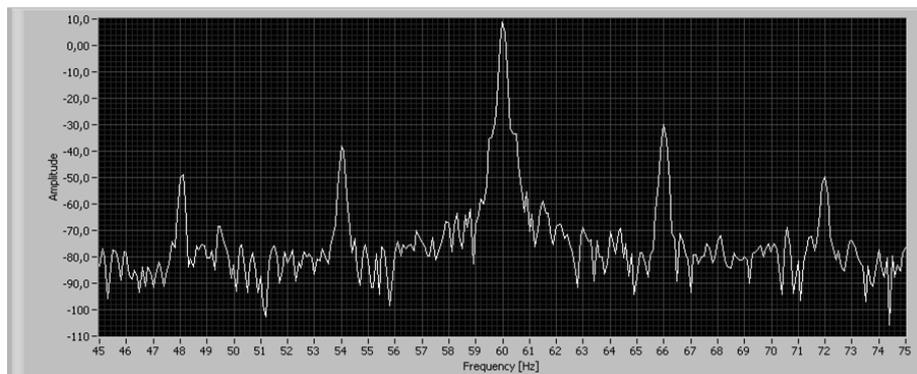
**Figura 4.59 Espectro de corriente del motor con 8 barras rotas con carga (2.5 A)**

Se distinguen los armónicos laterales, aunque de menor magnitud de lo esperado. La diferencia de magnitudes en dB entre la fundamental y los armónicos laterales superior e inferior es de 46.7055 y 46.838 respectivamente.



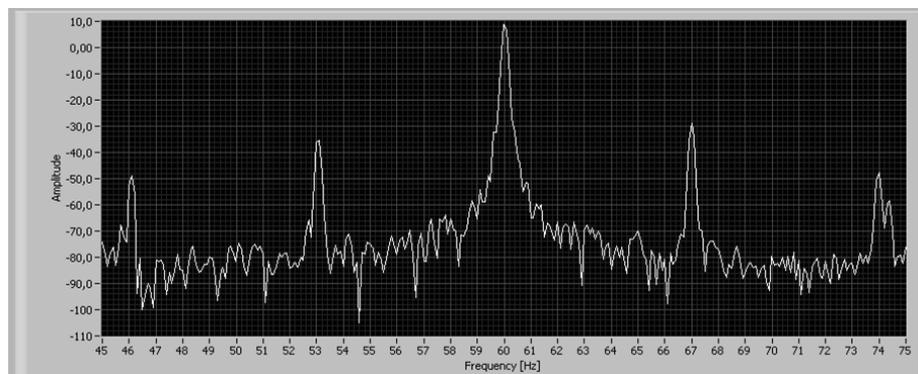
**Figura 4.60 Espectro de corriente del motor con 8 barras rotas con carga (2.7 A)**

En la figura 4.60, distinguimos los armónicos laterales de primer, segundo y tercer orden. También es muy notorio que el armónico lateral superior es mayor al armónico lateral inferior unos 10 dB, aunque su magnitud no es la esperada. La diferencia de magnitudes entre la fundamental y los armónicos laterales superior e inferior es de 40.1527 dB y 48.7394 dB respectivamente.



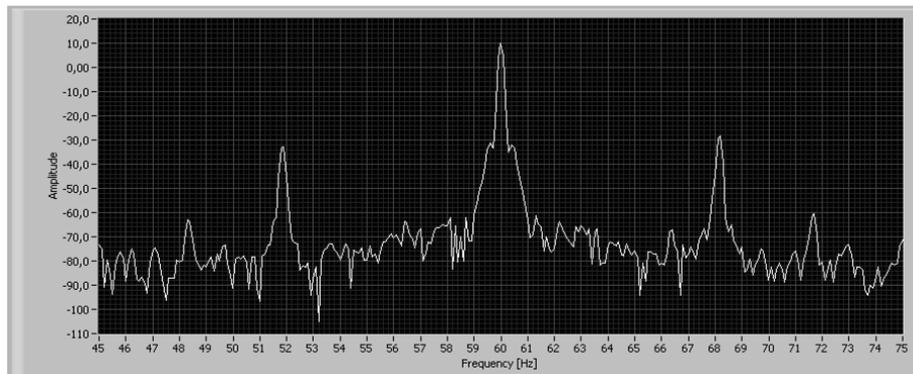
**Figura 4.61 Espectro de corriente del motor con 8 barras rotas con carga (2.9 A)**

En la figura 4.61 se pueden diferenciar claramente los armónicos laterales de primer y segundo orden. Observamos también que los armónicos laterales se alejan de la fundamental con respecto a la gráfica anterior, debido al aumento de carga en el eje del rotor. La diferencia de amplitudes entre la fundamental y los armónicos laterales superior e inferior es de 39.0573 dB y 46.5476 dB respectivamente.



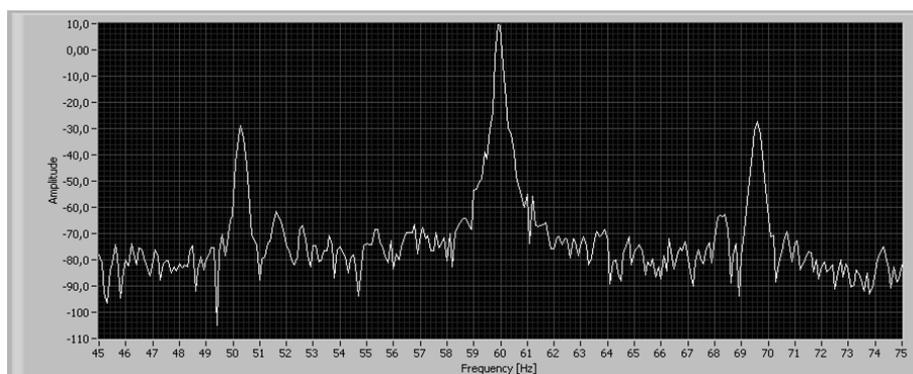
**Figura 4.62 Espectro de corriente del motor con 8 barras rotas con carga (3.1 A)**

En la figura 4.62 se observan los armónicos laterales de primer y de segundo orden, más alejados de la fundamental con respecto a la gráfica anterior. La diferencia de magnitudes entre la fundamental y los armónicos laterales superior e inferior es de 38.5041 dB y 43.9445 dB respectivamente.



**Figura 4.63 Espectro de corriente del motor con 8 barras rotas con carga (3.3 A)**

En la figura 4.63, se pueden apreciar los armónicos laterales, más alejados de la fundamental, con respecto al gráfico anterior, debido al aumento de carga en el eje del rotor. La diferencia de magnitudes entre la fundamental y los armónicos laterales superior e inferior es de 37.5175 dB y 41.6866 dB respectivamente.



**Figura 4.64 Espectro de corriente del motor con 8 barras rotas con carga (3.5 A)**

En esta gráfica podemos observar que por primera vez en todas las pruebas realizadas, las frecuencias reales de los armónicos laterales se alejan de la fundamental más allá de sus valores teóricos. La diferencia de amplitudes entre la fundamental y los armónicos laterales superior e inferior es de 37.9412 dB y 39.4451 dB respectivamente.

En la siguiente tabla se detallan todos los datos reales obtenidos de las pruebas realizadas al motor con 8 barras rotas en el rotor.

8 BARRAS ROTAS								
CARGA	CORRIENTE (A)	FRECUENCIA FUNDAMENTAL	F. SUPERIOR TEÓRICA	F. SUPERIOR PRÁCTICA	F. INFERIOR TEÓRICA	F. INFERIOR PRÁCTICA	FUND - SUP (dB)	FUND - INF (dB)
NO	2,3	60	69,3333	NO	50,6667	NO	NO	NO
SI	2,5	60	69,3333	62,7787	50,6667	57,2203	46,7055	46,838
SI	2,7	60	69,3333	64,8078	50,6667	55,1642	40,1527	48,7394
SI	2,9	60	69,3333	65,9969	50,6667	54,0345	39,0573	46,5476
SI	3,1	60	69,3333	67,0068	50,6667	53,0562	38,5041	43,9445
SI	3,3	60	69,3333	68,1564	50,6667	51,8522	37,5175	41,6866
SI	3,5	60	69,3333	69,577	50,6667	50,3105	37,9412	39,4451

**Tabla IV.IX Resultados del motor con 8 barras rotas**

En la tabla IV.IX nos damos cuenta que cuando el motor posee 8 barras en el rotor, la diferencia de amplitudes entre la fundamental y los armónicos laterales oscila entre 37 y 47 dB, aunque se esperaba que estas diferencias sean menores. Cabe recalcar que con 8 barras rotas en el rotor, el motor no necesita de mucha carga en el eje para aumentar su corriente, por lo que podemos decir que en trabajo normal, este motor colapsaría. También es

necesario destacar que al 100% de la carga (3.5 A), por primera vez se observa que los armónicos laterales se alejan de la fundamental mas allá de sus valores teóricos, esto nos quiere decir que a este valor de carga, el rotor está girando a menor velocidad que la indicada en la placa de características del motor.

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## CONCLUSIONES

1. Tal y como se lo mencionó en el capítulo 2 de esta tesina, se cumple que mientras más grande sea la avería del motor por rotura de sus barras en el rotor, la amplitud de los armónicos laterales relacionados con la falla es cada vez mayor, es decir, la diferencia en dB entre las magnitudes de la fundamental y los armónicos decrecerá.
2. A mayor sea la carga aplicada al motor, menor será la velocidad de giro del rotor y mayor su deslizamiento  $s$ , por lo tanto la distancia entre la fundamental y los armónicos laterales ( $2sf$ ) será mayor. Por ello decimos que es más fácil diagnosticar un motor de inducción por fallas rotóricas cuando este tenga mayor carga aplicada, porque los armónicos se

alejarse de la fundamental y será más fácil distinguirlos, al contrario de lo que sucede con el análisis de un motor en vacío donde los armónicos laterales están en el mismo sitio que la fundamental y no se puede emitir un diagnóstico válido.

3. Con el mismo número de barras rotas y distintos niveles de carga, mientras mayor sea la carga, mayor será la corriente que circula por el rotor y la distorsión debido a la falla es más grande, dando como resultado una mayor amplitud de los armónicos.
4. Cuando el motor posee varias barras rotas en el rotor, el torque mecánico en el eje del rotor es cada vez menor, por lo que podemos concluir que si un motor posee este tipo de daño y no es diagnosticado a tiempo, colapsará tarde o temprano pudiendo ocasionar pérdidas por paros de producción en una industria.
5. Cuando el motor no posee barras rotas en su interior, la diferencia entre la fundamental y los armónicos laterales se mantiene entre los 50 y 60 dB's, pero cuando este sufre la ruptura de una de sus barras, esta diferencia decae entre 10 y 15 dB's.
6. LabView es una herramienta muy poderosa en el desarrollo de aplicaciones con fines industriales, que permite emitir diagnósticos de alta confiabilidad y precisión.

## Recomendaciones:

1. Al momento de diagnosticar las fallas rotóricas en un motor de inducción, asegurarse de que la corriente que circula por el estator se encuentre en un 85% o más de su valor nominal para poder diferenciar de mejor manera la fundamental y los armónicos laterales, además de que la amplitud de los mismos aumentará y el diagnóstico será más acertado.
2. Se podría adquirir la información de la corriente de las tres fases del motor de inducción, con dos transformadores de corriente analizando las tres fases en LabView podríamos tener un diagnóstico más acertado de la falla.
3. Sería bueno abaratar los costos del diagnóstico de fallas rotóricas en un motor de inducción, se puede utilizar otros elementos de adquisición de corriente, se puede sustituir el transformador de corriente por una resistencia shunt en serie con una de las fases del motor y la tarjeta de adquisición en LabView debe de ser una de voltaje y no de corriente.
4. Seguir investigando el tema de diagnóstico de fallas en motores de inducción, más allá del diagnóstico de fallas rotóricas hecho en esta tesina, se puede diagnosticar por análisis de corriente otro tipo de fallas, tales como fallas en los rodamientos, excentricidad en el motor, entre otros.

# BIBLIOGRAFÍA

1. Fernández Cabanas Manés, “Técnicas para el Mantenimiento y Diagnóstico de Máquinas Eléctricas Rotativas”, Primera Edición, Boixareu, 1998.
2. R. Hirvonen, “On-line condition monitoring of defects in squirrel cage motors”, Vol. 2, Int. Conf. Electrical Machines, 1994.
3. P. J. Tayner, “Condition monitoring of electrical machines”, 1<sup>st</sup> edition, Letchworth, 1987.
4. Carvajal Martínez, F.A. y J.M. Ramírez Cruz, “Diagnóstico en línea de motores de inducción mediante el monitoreo de las corrientes de fase, parte I: pruebas de laboratorio”, RVP-98, IEEE Sección México, 1998.

5. M. Cabanas, "Métodos no convencionales para la detección y diagnóstico precoz de fallos en motores eléctricos", 8ª reunión de grupos de investigación de ingeniería eléctrica, Cadiz, 1998.
6. Krause, "Analysis of Electric Machinery", 1<sup>st</sup> edition, Mc-Graw Hill, 1986.
7. Cruz, S.M.A. y Cardoso, A.J.M., "Rotor Cage Fault Diagnosis in three-Phase induction motors by the total Instantaneous Power Spectral Analysis", IEEE – IAS 99 Session 43, 1999.
8. Kliman G., "Noninvasive Detection of Broken Bars in Operating Induction Motors", IEEE Transactions on Energy Conversion Vol. 3, Diciembre 1988.
9. Leon Cohen, "Time Frequency Analysis", Prentice Hall PTR, 1995.
10. Richard G. Lyons, "Understanding Digital Signal Processing", Pearson Education, 2009.