

**DETECCIÓN DE FALLAS EN UN MOTOR DE
INDUCCIÓN USANDO MCSA (MOTOR CURRENT
SIGNATURE ANALYSIS).**

ALDO FERNANDO RICO MAESTRE

MIGUEL ÁNGEL TRISTANCHO CABALLERO



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA,
ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES
Bucaramanga
2011**

**DETECCIÓN DE FALLAS EN UN MOTOR DE
INDUCCIÓN USANDO MCSA (MOTOR CURRENT
SIGNATURE ANALYSIS).**

ALDO FERNANDO RICO MAESTRE

Tesis para optar por el título de ingeniero electrónico

MIGUEL ÁNGEL TRISTANCHO CABALLERO

Tesis para optar por el título de ingeniero electrónico

Director:

PhD. GABRIEL ORDÓÑEZ PLATA

Codirector:

MSc(c). SILVIA OVIEDO CASTILLO



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA,
ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES
Bucaramanga
2011**

DEDICATORIAS

A Dios por permitirme levantarme cada día, a mis padres Samuel y Yaneth por apoyarme siempre, tanto económica como moralmente y por el amor que siempre me brindan sin importa lo que pase, a mi hermano Samuel por ayudarme día a día, a mi amada novia Brenda por ser la mejor compañera y motivación para terminar esta importante parte de mi vida y por estar allí siempre que la he necesitado, a mi compañero Miguel, con quien siempre pudimos sacar a flote el proyecto y derribamos diferentes barreras que se nos cruzaron en el camino.

Aldo Fernando Rico Maestre

A Dios que ha sido, es, y será mi guía, a mis padres Rosabel y Arsenio, a mi abuelita Ana y mi hermano Francisco con quienes cuento para todo, a mi compañero Aldo y mis amigos que siempre han confiado en mí, y a todas aquellas personas que de alguna u otra manera han aportado al desarrollo de mi ser como persona y como profesional.

Miguel Ángel Tristancho Caballero

CONTENIDO

<i>INTRODUCCIÓN</i>	19
<i>1. MARCO CONCEPTUAL</i>	21
1.1. MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA.....	21
1.1.1. Motor de inducción trifásico.....	22
1.2. ANÁLISIS DE LA SEÑAL.	25
1.2.1. Transformada de Fourier.....	25
1.2.1.1. Transformada de Fourier discreta (DFT).....	25
1.2.1.2. Transformada rápida de Fourier (FFT).....	25
1.2.2. Periodograma por el método de Welch.....	27
1.2.3. Componente de secuencia negativa.	28
<i>2. IMPLEMENTACIÓN DE LA PARTE EXPERIMENTAL</i>	30
2.1. BANCO UTILIZADO PARA REALIZAR LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES.....	30
2.2. EQUIPO UTILIZADO PARA LA REALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES.....	32
2.3. FALLAS A ESTUDIAR.....	36
<i>3. ANÁLISIS DE LAS FALLAS A LAS CUALES FUERON SOMETIDOS LOS MOTORES DE INDUCCIÓN</i>	38
3.1. ESPECTROS DE REFERENCIA PARA EL ANÁLISIS DE LAS FALLAS.....	38
3.2. CORTOCIRCUITO EN EL ESTATOR DEL MOTOR DE INDUCCIÓN.	41
3.2.1 Tipos de corto circuitos.....	41
3.2.2. Inducción de la falla de corto circuito en los motores sometidos a prueba en el laboratorio.....	42
3.2.3. Características de las componentes de frecuencias en la corriente cuando se presenta la falla de corto circuito.	44
3.2.4. Análisis de los resultados experimentales de la falla de corto circuito entre espiras utilizando la herramienta MCSA.....	45
3.2.4.1. Análisis de los resultados de un cortocircuito en el estator con una carga del 85% de la nominal.....	45

3.2.4.2. Análisis de los resultados de un cortocircuito en el estator con una carga del 65% de la nominal.	49
3.2.4.3. Análisis de los resultados de un cortocircuito en el estator con el motor en vacío.....	53
3.2.5. Análisis de los resultados experimentales de la falla de corto circuito entre espiras utilizando la componente de secuencia negativa.	57
3.2.6. Análisis de las herramientas de diagnóstico.....	62
3.3. EXCENTRICIDAD EN EL ENTREHIERRO.	62
3.3.1. Excentricidad estática.	62
3.3.2. Excentricidad dinámica.	63
3.3.3. Excentricidad combinada estática – dinámica.....	64
3.3.4. Inducción de la falla de excentricidad en el entrehierro en los motores sometidos a prueba en el laboratorio.	65
3.3.5. Características de las componentes de frecuencias en la corriente cuando se presenta la falla de excentricidad en el entrehierro.....	66
3.3.6. Análisis de los resultados experimentales de la falla de excentricidad en el entrehierro utilizando la herramienta MCSA.	67
3.3.6.1. Análisis de los resultados de excentricidad en el entrehierro con una carga del 85% de la nominal.	67
3.3.6.2. Análisis de los resultados de excentricidad en el entrehierro con una carga del 65% de la nominal.	70
3.3.6.3. Análisis de los resultados de excentricidad en el entrehierro con el motor en vacío.	74
3.3.7. Análisis de los resultados experimentales de la falla de excentricidad en el entrehierro utilizando la componente de secuencia negativa.....	80
3.3.8. Análisis de las herramientas de diagnóstico.....	84
3.4. RUPTURA DE BARRAS.....	85
3.4.1. Inducción de la falla de ruptura de barras en el motor sometido a prueba en el laboratorio.....	86
3.4.2. Características de las componente de frecuencias en la corriente cuando se presenta la falla de ruptura de barras.	88
3.4.3. Análisis de los resultados experimentales de la falla ruptura de barras utilizando la herramienta MCSA.	90
3.4.3.1. Análisis de los resultados de la falla ruptura de barras con una carga del 85% de la nominal.	93
3.4.3.2. Análisis de los resultados de la falla ruptura de barras con una carga del 65% de la nominal.	97

3.4.3.3. Análisis de los resultados de la falla ruptura de barras con el motor en vacío.	101
3.4.4. Análisis de los resultados experimentales de la falla ruptura de barras utilizando la componente de secuencia negativa.	102
3.4.5. Análisis de las herramientas de diagnóstico.....	105
3.5. FALLA EN LA PISTA EXTERNA DEI RODAMIENTO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN.	106
3.5.1. Fallas comunes en rodamientos.....	109
3.5.1.1. Fatiga superficial.	109
3.5.1.2. Descarga eléctrica.	109
3.5.1.3. Desgaste abrasivo.	109
3.5.1.4. Desgaste adhesivo.....	109
3.5.1.5. Corrosión.....	110
3.5.1.6. Indentación.....	110
3.5.1.7. Fractura.....	110
3.5.1.8. Ludimiento.....	110
3.5.1.9. Rodadura irregular.	110
3.5.2. Inducción de la falla en la pista externa del rodamiento del motor sometido a prueba en el laboratorio.	111
3.5.3. Características de las componente de frecuencias en la corriente cuando se presenta la falla en la pista externa del rodamiento.....	114
3.5.4. Análisis de los resultados experimentales de la falla en la pista externa del rodamiento utilizando la herramienta MCSA.	116
3.5.4.1. Análisis de los resultados de la falla en la pista externa de rodamiento con una carga del 85 % de la nominal.	117
3.5.4.2. Análisis de los resultados de la falla en la pista externa de rodamiento con una carga del 65 % de la nominal.	119
3.5.4.3. Análisis de los resultados de la falla en la pista externa de rodamiento con el motor en vacío.	122
3.5.5. Análisis de los resultados experimentales de la falla en la pista externa del rodamiento utilizando la componente de secuencia negativa.	125
3.5.6. Análisis de las herramientas de diagnóstico.....	128
<i>CONCLUSIONES</i>	130
<i>OBSERVACIONES</i>	132
<i>RECOMENDACIONES</i>	133

<i>TRABAJOS FUTUROS</i>	134
<i>BIBLIOGRAFÍA</i>	135

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1.PARTES DE UN MOTOR DE CORRIENTE ALTERNA	22
FIGURA 1.2.MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO JAULA DE ARDILLA	24
FIGURA 2.1.BANCO PARA PRUEBAS.....	30
FIGURA 2.2.ESQUEMA DEL BANCO PARA PRUEBAS	31
FIGURA 2.3.MAQUINA DE CORRIENTE CONTINUA	32
FIGURA 2.4.AUTOTRANSFORMADOR	33
FIGURA 2.5.SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	34
FIGURA 2.6.BANCO DE BOMBILLAS.....	35
FIGURA 3.1.ESPECTRO DE LA SEÑAL SIN FALLA CARGA 85 %	39
FIGURA 3.2.ESPECTRO DE LA SEÑAL SIN FALLA CARGA 65 %	39
FIGURA 3.3.ESPECTRO DE LA SEÑAL SIN FALLA SIN CARGA.....	40
FIGURA 3.4.ÉSTATOR DEL MOTOR DE INDUCCIÓN	42
FIGURA 3.5.ESQUEMA DE CORTOCIRCUITOS EN EL ESTATOR.....	43
FIGURA 3.6.MOTOR CON TERMINALES EXPUESTOS PARA GENERAR LOS CORTOCIRCUITOS	44
FIGURA 3.7. ESPECTRO DE CORTOCIRCUITO SEVERIDAD 1CARGA 85 %	47
FIGURA 3.8. ESPECTRO DE CORTOCIRCUITO SEVERIDAD 2CARGA 85 %	48
FIGURA 3.9. ESPECTRO DE CORTOCIRCUITO SEVERIDAD 3 CARGA 85 %	49
FIGURA 3.10. ESPECTRO DE CORTOCIRCUITO SEVERIDAD 1 CARGA 65 %	51
FIGURA 3.11. ESPECTRO DE CORTOCIRCUITO SEVERIDAD 2 CARGA 65 %	52
FIGURA 3.12. ESPECTRO DE CORTOCIRCUITO SEVERIDAD 3 CARGA 65 %	53
FIGURA 3.13. ESPECTRO DE CORTOCIRCUITO SEVERIDAD 1 SIN CARGA	55
FIGURA 3.14. ESPECTRO DE CORTOCIRCUITO SEVERIDAD 2 SIN CARGA	56
FIGURA 3.15. ESPECTRO DE CORTOCIRCUITO SEVERIDAD 3SIN CARGA	57
FIGURA 3.16. COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA COMPONENTE DE SECUENCIA NEGATIVA CUANDO SE PRESENTA UN CORTOCIRCUITO EN EL ESTATOR Y EL MOTOR ESTÁ EN VACÍO	59
FIGURA 3.17. COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA COMPONENTE DE SECUENCIA NEGATIVA CUANDO SE PRESENTA UN CORTOCIRCUITO EN EL ESTATOR Y EL MOTOR ESTA FUNCIONANDO AL 65 % DE LA CARGA NOMINAL ...	60
FIGURA 3.18. COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA COMPONENTE DE SECUENCIA NEGATIVA CUANDO SE PRESENTA UN CORTOCIRCUITO EN EL ESTATOR Y EL MOTOR ESTA FUNCIONANDO AL 85 % DE LA CARGA NOMINAL ...	61
FIGURA 3.19. FORMA DE PRODUCIRSE LA EXCENTRICIDAD ESTÁTICA	63
FIGURA 3.20. FORMA DE PRODUCIRSE LA EXCENTRICIDAD DINÁMICA	64
FIGURA 3.21. FORMA DE PRODUCIRSE LA EXCENTRICIDAD ESTÁTICA-DINÁMICA	65
FIGURA 3.22. ARANDELAS PARA INDUCIR LA FALLA.....	66

FIGURA 3.23. ESPECTRO DE EXCENTRICIDAD EN EL ENTREHIERRO SEVERIDAD 1 CARGA 85 %	68
FIGURA 3.24. ESPECTRO DE EXCENTRICIDAD EN EL ENTREHIERRO SEVERIDAD 2 CARGA 85 %	69
FIGURA 3.25. ESPECTRO DE EXCENTRICIDAD EN EL ENTREHIERRO SEVERIDAD 3 CARGA 85 %	70
FIGURA 3.26. ESPECTRO DE EXCENTRICIDAD EN EL ENTREHIERRO SEVERIDAD 1 CARGA 65 %	72
FIGURA 3.27. ESPECTRO DE EXCENTRICIDAD EN EL ENTREHIERRO SEVERIDAD 2 CARGA 65 %	73
FIGURA 3.28. ESPECTRO DE EXCENTRICIDAD EN EL ENTREHIERRO SEVERIDAD 3 CARGA 65 %	74
FIGURA 3.29. ESPECTRO DE EXCENTRICIDAD EN EL ENTREHIERRO SEVERIDAD 1 SIN CARGA.	76
FIGURA 3.30. ESPECTRO DE EXCENTRICIDAD EN EL ENTREHIERRO SEVERIDAD 2 SIN CARGA.	77
FIGURA 3.31. ESPECTRO DE EXCENTRICIDAD EN EL ENTREHIERRO SEVERIDAD 3 SIN CARGA.	78
FIGURA 3.32. COMPORTAMIENTO CRECIENTE DEL BARRIDO DE CARGA SEVERIDAD 3.	79
FIGURA 3.33. COMPORTAMIENTO DECRECIENTE DEL BARRIDO DE CARGA SEVERIDAD 3.	80
FIGURA 3.34. COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA COMPONENTE DE SECUENCIA NEGATIVA CUANDO SE PRESENTA EXCENTRICIDAD EN EL ENTREHIERRO Y EL MOTOR ESTÁ EN VACÍO.....	81
FIGURA 3.35. COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA COMPONENTE DE SECUENCIA NEGATIVA CUANDO SE PRESENTA EXCENTRICIDAD EN EL ENTREHIERRO Y EL MOTOR ESTÁ FUNCIONANDO AL 65% DE LA CARGA NOMINAL	82
FIGURA 3.36. COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA COMPONENTE DE SECUENCIA NEGATIVA CUANDO SE PRESENTA EXCENTRICIDAD EN EL ENTREHIERRO Y EL MOTOR ESTÁ FUNCIONANDO AL 85% DE LA CARGA NOMINAL	83
FIGURA 3.37. SECCIÓN TRANSVERSAL DEL ROTOR DEL MOTOR	86
FIGURA 3.38. ROMPIMIENTO DE LAS BARRAS DEL MOTOR	87
FIGURA 3.39. ROTOR CON UNA BARRA ROTA.	87
FIGURA 3.40. ROTOR CON DOS BARRAS ROTAS.	88
FIGURA 3.41. ROTOR CON TRES BARRAS ROTAS	88
FIGURA 3.42. COMPARACIÓN DE ESPECTROS PARA FUNCIONAMIENTO SIN CARGA.	91
FIGURA 3.43. COMPARACIÓN DE ESPECTROS PARA FUNCIONAMIENTO CON CARGA 65 %	92
FIGURA 3.44. COMPARACIÓN DE ESPECTROS PARA FUNCIONAMIENTO CON CARGA 85 %.	93
FIGURA 3.45. ESPECTRO DE RUPTURA DE BARRAS SEVERIDAD 1 CARGA 85 %.	95

FIGURA 3.46. ESPECTRO DE RUPTURA DE BARRAS SEVERIDAD 2 CARGA 85 %.	96
FIGURA 3.47. ESPECTRO DE RUPTURA DE BARRAS SEVERIDAD 3 CARGA 85 %	97
FIGURA 3.48. ESPECTRO DE RUPTURA DE BARRAS SEVERIDAD 1 CARGA 65 %	99
FIGURA 3.49. ESPECTRO DE RUPTURA DE BARRAS SEVERIDAD 2 CARGA 65 %	100
FIGURA 3.50. ESPECTRO DE RUPTURA DE BARRAS SEVERIDAD 3 CARGA 65 %	101
FIGURA 3.51. ESPECTRO DE RUPTURA DE BARRAS PRUEBA SIN CARGA	102
FIGURA 3.52. COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA COMPONENTE DE SECUENCIA NEGATIVA CUANDO SE PRESENTA LA FALLA DE RUPTURA DE BARRAS Y EL MOTOR ESTÁ EN VACÍO	103
FIGURA 3.53. COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA COMPONENTE DE SECUENCIA NEGATIVA CUANDO SE PRESENTA LA FALLA DE RUPTURA DE BARRAS Y EL MOTOR ESTA FUNCIONANDO AL 65% DE LA CARGA NOMINAL	104
FIGURA 3.54. COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA COMPONENTE DE SECUENCIA NEGATIVA CUANDO SE PRESENTA LA FALLA DE RUPTURA DE BARRAS Y EL MOTOR ESTA FUNCIONANDO AL 85% DE LA CARGA NOMINAL	105
FIGURA 3.55. PARTES DE UN RODAMIENTO DE BOLAS.	107
FIGURA 3.56. INDUCCIÓN DE LA FALLA EN LA PISTA EXTERNA DEL RODAMIENTO	112
FIGURA 3.57. FALLA RAYADO SUPERFICIAL	112
FIGURA 3.58. FALLA RAYADO MODERADO	113
FIGURA 3.59. FALLA RAYADO PROFUNDO	113
FIGURA 3.60. ESQUEMA DEL RODAMIENTO DE BOLAS	115
FIGURA 3.61. ESPECTRO DE FALLA EN LA PISTA EXTERNA DE RODAMIENTO SEVERIDAD 1 CARGA 85 %	118
FIGURA 3.62. ESPECTRO DE FALLA EN LA PISTA EXTERNA DE RODAMIENTO SEVERIDAD 2 CARGA 85 %	118
FIGURA 3.63. ESPECTRO DE FALLA EN LA PISTA EXTERNA DE RODAMIENTO SEVERIDAD 3 CARGA 85 %	119
FIGURA 3.64. ESPECTRO DE FALLA EN LA PISTA EXTERNA DE RODAMIENTO SEVERIDAD 1 CARGA 65 %	121
FIGURA 3.65. ESPECTRO DE FALLA EN LA PISTA EXTERNA DE RODAMIENTO SEVERIDAD 2 CARGA 65 %	121
FIGURA 3.66. ESPECTRO DE FALLA EN LA PISTA EXTERNA DE RODAMIENTO SEVERIDAD 3 CARGA 65 %	122
FIGURA 3.67. ESPECTRO DE FALLA EN LA PISTA EXTERNA DE RODAMIENTO SEVERIDAD 1 SIN CARGA	123
FIGURA 3.68. ESPECTRO DE FALLA EN LA PISTA EXTERNA DE RODAMIENTO SEVERIDAD 2 SIN CARGA	124
FIGURA 3.69. ESPECTRO DE FALLA EN LA PISTA EXTERNA DE RODAMIENTO SEVERIDAD 3 SIN CARGA	124
FIGURA 3.70. COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA COMPONENTE DE SECUENCIA NEGATIVA CUANDO SE PRESENTA UNA FALLA EN LA PISTA EXTERNA DEL RODAMIENTO Y EL MOTOR ESTÁ EN VACÍO	126
FIGURA 3.71. COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA COMPONENTE DE SECUENCIA NEGATIVA CUANDO SE PRESENTA UNA FALLA EN LA PISTA EXTERNA	

DEL RODAMIENTO Y EL MOTOR ESTÁ FUNCIONANDO AL 65% DE LA CARGA NOMINAL	127
FIGURA 3.72. COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA COMPONENTE DE SECUENCIA NEGATIVA CUANDO SE PRESENTA UNA FALLA EN LA PISTA EXTERNA DEL RODAMIENTO Y EL MOTOR ESTÁ FUNCIONANDO AL 85% DE LA CARGA NOMINAL	128

LISTA DE TABLAS

TABLA 2.1. CARACTERÍSTICAS DE LAS CONDICIONES DE CARGA.....	36
TABLA 3.1. CARACTERÍSTICAS DE CORTOCIRCUITOS	43
TABLA 3.2. FRECUENCIAS GENERADAS [Hz] EN UN CORTO CIRCUITO CON UNA CARGA EN EL MOTOR DEL 85% DE LA CARGA NOMINAL Y FRECUENCIA DE LA RED 60 [Hz]	46
TABLA 3.3. FRECUENCIAS GENERADAS [Hz] EN UN CORTO CIRCUITO CON UNA CARGA EN EL MOTOR DEL 65% DE LA CARGA NOMINAL Y FRECUENCIA DE LA RED 60 [Hz]	50
TABLA 3.4. FRECUENCIAS GENERADAS [Hz] EN UN CORTO CIRCUITO CON EL MOTOR FUNCIONANDO EN VACÍO Y FRECUENCIA DE LA RED 60 [Hz]	54
TABLA 3.5. FRECUENCIAS GENERADAS [Hz] POR EXCENTRICIDAD EN EL ENTREHIERRO CON UNA CARGA EN EL MOTOR DEL 85% DE LA CARGA NOMINAL Y FRECUENCIA DE LA RED 60 [Hz]	67
TABLA 3.6. FRECUENCIAS GENERADAS [Hz] POR EXCENTRICIDAD EN EL ENTREHIERRO CON UNA CARGA EN EL MOTOR DEL 65% DE LA CARGA NOMINAL Y FRECUENCIA DE LA RED 60 [Hz]	71
TABLA 3.7. FRECUENCIAS GENERADAS [Hz] POR EXCENTRICIDAD EN EL ENTREHIERRO CON EL MOTOR EN VACÍO Y FRECUENCIA DE LA RED 60 [Hz]	75
TABLA 3.8. VELOCIDAD Y DESLIZAMIENTO PARA BARRIDO DE CARGA SEVERIDAD 3	79
TABLA 3.9. CARACTERÍSTICAS DE LA FALLA RUPTURA DE BARRAS CON DIFERENTE CARGA	91
TABLA 3.10. FRECUENCIAS GENERADAS [Hz] EN LA FALLA DE RUPTURA DE BARRAS CON UNA CARGA EN EL MOTOR DEL 85% DE LA CARGA NOMINAL Y FRECUENCIA DE LA RED 60 [Hz].	94
TABLA 3.11. FRECUENCIAS GENERADAS [Hz] EN LA FALLA DE RUPTURA DE BARRAS CON UNA CARGA EN EL MOTOR DEL 65% DE LA CARGA NOMINAL Y FRECUENCIA DE LA RED 60 [Hz]	98
TABLA 3.12. FRECUENCIAS GENERADAS [Hz] EN UNA FALLA DE PISTA EXTERNA DE RODAMIENTOS CON UNA CARGA EN EL MOTOR DEL 85% DE LA CARGA NOMINAL Y FRECUENCIA DE LA RED 60 [Hz].	117
TABLA 3.13. FRECUENCIAS GENERADAS [Hz] EN UNA FALLA DE PISTA EXTERNA DE RODAMIENTOS CON UNA CARGA EN EL MOTOR DEL 65% DE LA CARGA NOMINAL Y FRECUENCIA DE LA RED 60 [Hz].	120
TABLA 3.14. FRECUENCIAS GENERADAS [Hz] EN UNA FALLA DE PISTA EXTERNA DE RODAMIENTOS CON EL MOTOR EN VACÍO Y FRECUENCIA DE LA RED 60 [Hz]. .	122

TITULO: DETECCIÓN DE FALLAS EN UN MOTOR DE INDUCCIÓN USANDO MCSA (MOTOR CURRENT SIGNATURE ANALYSIS)*

Autores: Aldo Fernando Rico Maestre, Miguel Ángel Trisancho Caballero **

Palabras Claves: Motor de inducción, señales, transformada de fourier, welch, componente secuencial negativa.

RESUMEN

Este proyecto se desarrolló con el fin de aportar resultados prácticos al proceso de aprendizaje en el análisis de señales y aplicar en la industria nacional la metodología MCSA, de creciente popularidad a nivel mundial en el campo de mantenimiento predictivo de maquinas rotativas, por medio de la validación experimental de dicha técnica bajo distintos escenarios.

Este trabajo busca investigar el comportamiento de un motor de inducción bajo diferentes condiciones de carga y con diversas fallas que se pueden presentar por ciertos factores presentes en industrias o cualquier lugar donde se necesite operar; las fallas estudiadas son: Corto circuito en el devanado del estator, barras rotas, fallas en pista interna de rodamientos y excentricidad del entrehierro. Para esto se contó con motores y un sistema de adquisición de datos adquiridos con recursos de vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE) como parte del proyecto "Detección y Diagnostico de Fallas en un Motor de Inducción Usando MCSA" desarrollado por el grupo DICBOT de la escuela de ingeniería mecánica.

El análisis de la corriente se hace usando la transformada rápida de Fourier y la estimación de densidad espectral de potencia con el método Welch; así se evidencia el comportamiento de las diferentes señales en el dominio de la frecuencia, dado que las fallas se evidencian en forma de componentes espectrales ajenas a las componentes usuales de frecuencia de los motores en condición normal de operación. Se analizó la corriente de cada una de las fases de los motores bajo condición de falla y la magnitud de la componente secuencial negativa, de donde se definieron indicadores cuya amplitud relativa a la condición normal evidencia la severidad de la falla inducida.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Gabriel Ordóñez Plata. Co-directora: Silvia Juliana Oviedo Castillo.

TITLE: FAULT DETECTION IN AN INDUCTION MOTOR USING MCSA (MOTOR CURRENT SIGNATURE ANALYSIS)*

Authors: Aldo Fernando Rico Maestre, Miguel Ángel Tristancho Caballero**

Keywords: Induction motor, signals, Fourier transform, Welch, negative sequence component.

ABSTRACT

This project was done in order to provide practical results to the learning process in the signal analysis field and bring into the national industry the MCSA methodology that has an increasing popularity worldwide in the rotating machines predictive maintenance field, by means of the experimental validation of that technique in different conditions.

This work presents an induction motor research by analyzing its current behavior when it's being subjected to different load conditions and being interfered by different failures that commonly affect machines working in the industry and some other operating fields. The faults studied in this project are: Stator winding short-circuit, broken bars, bearing outer-race failure and rotor-stator eccentricity. The work support consisted in motors and a data acquisition system that were acquired with the Research and Extension Vice-rectory (VIE) resources as part of the project "Detección y Diagnostico de Fallas en un Motor de Inducción Usando MCSA" developed by the DICBOT group from the mechanic engineer school.

The current analysis is done by using the Fast Fourier Transform and the Welch Power Spectral Density Estimate; this way the different signals are evidenced in the frequency domain, that's because the failures are evidenced in spectral component shapes that are usually not coincident with the usual frequency components in normal operating motors. The three phases currents were analyzed for the failure conditions and the negative sequence current magnitude, from which were defined indicators whose amplitude relative to the normal condition evidences the induced failure severity.

* Work Degree.

** Faculty of Physicmecánics. School of Engineering Electric, Electrónica and Telecommunications. Directress: Gabriel Ordóñez Plata. Codirectress: Silvia Juliana Oviedo Castillo.

INTRODUCCIÓN

Como es conocido los motores de inducción trifásicos son los principales consumidores de energía eléctrica en el mundo, ya que estos constituyen la fuerza motriz principal de las industrias modernas; por esta razón es de vital importancia que las empresas que usan estos motores puedan contar con un método confiable para mantener sus procesos internos de producción efectivos, eficaces y sin pausas.

Los motores eléctricos de inducción son utilizados en la gran mayoría de procesos industriales debido a su versatilidad y sencillez en su mantenimiento. Pese a esto, si en alguna de estas máquinas se exceden las condiciones de funcionamiento para las que fue diseñado, si hay ausencia de mantenimientos preventivos o si por causa de la fatiga mecánica del equipo relacionada con el tiempo de uso del mismo pueden llegar a presentarse fallas, en algunas ocasiones permanentes en cualquiera de sus partes, comprometiendo así los procesos asociados al mismo. Estas fallas se traducen en pérdidas de tiempo y dinero durante su reparación o adquisición de nuevos componentes.

Debido a esto, es necesario contar con un método que permita diagnosticar de una forma efectiva y sin detener la máquina qué tipo de falla ha ocurrido en esta, reduciendo así tiempo y costos, ya sea en la reparación de la máquina o en el reemplazo del mismo. Esto se puede lograr implementado

un esquema de mantenimiento predictivo analizando la señal de corriente del estator de las máquinas eléctricas.

En este trabajo de grado se puso a prueba de forma experimental la metodología MCSA, por medio de la inducción de cuatro diferentes tipos de fallas comunes en motores de inducción. La literatura reporta diferentes indicadores de acuerdo con un análisis del modelo teórico del motor. Estos indicadores fueron rastreados en el espectro de la señal de corriente en distintos escenarios de falla y carga que posteriormente fueron analizados.

La extensiva experimentación permitió establecer las condiciones de monitorización que permiten detectar las fallas desde una condición mínima de severidad, para motores de 2 HP/220 V.

1. MARCO CONCEPTUAL

En este capítulo se presenta un resumen de las características básicas de los motores de inducción y de los algoritmos utilizados en el procesamiento de las señales de corriente en el estator para determinar el tipo de falla que se puede presentar.

1.1. MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA.

Los motores eléctricos son máquinas rotatorias que transforman la energía eléctrica en energía mecánica [2]. Debido a sus múltiples ventajas, entre las que cabe citar su economía, limpieza, comodidad y seguridad de funcionamiento, el motor eléctrico ha reemplazado en gran parte a otros sistemas, tanto en la industria como en el transporte, las minas, el comercio, o el hogar.

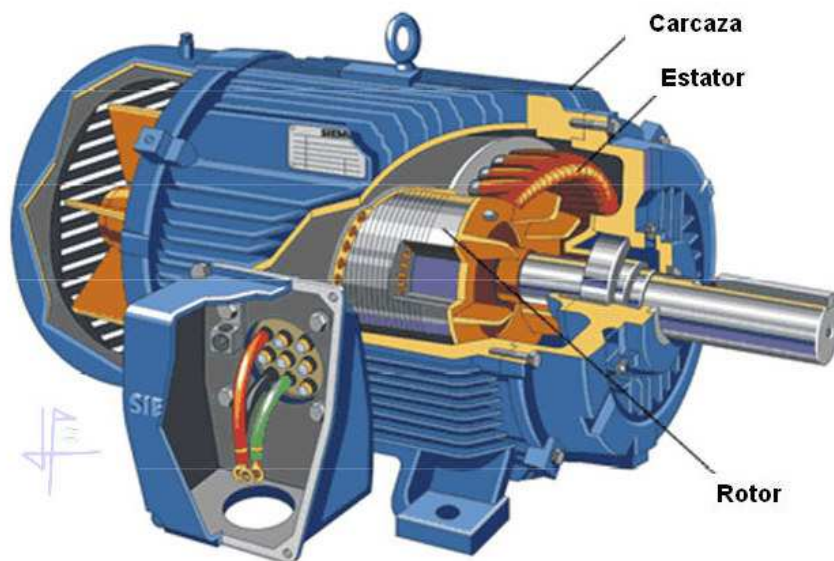
En la actualidad, el motor de corriente alterna asíncrono es el más utilizado en las aplicaciones que requieren movimiento, debido fundamentalmente a su buen rendimiento, bajo mantenimiento y sencillez en su construcción.

Las partes básicas de un motor de corriente alterna (ver Figura 1.1) son las siguientes:

- **Carcasa:** Caja externa que envuelve las partes eléctricas del motor.
- **Estator:** Consta de un apilado de chapas magnéticas y sobre ellas está enrollado el bobinado del estator, encargado de generar el energía electromagnética que se convierte en energía motriz; esta parte del motor es parte fija y esta unida a la carcasa del mismo.

- **Rotor:** Consta de un apilado de chapas magnéticas y sobre ellas está enrollado el bobinado del rotor, que constituye la parte móvil del motor y resulta ser la salida o eje del motor.

Figura 1.1. Partes de un motor de corriente alterna.



Fuente:<http://acdcmotorygenerator.blogspot.com/2009/05/partes-motor-corriente-alterna.html>.

1.1.1. Motor de inducción trifásico.

Los motores de inducción o asíncronos son motores eléctricos de corriente alterna. El motor de inducción trifásico está formado básicamente por el rotor (puede ser de jaula de ardilla o bobinado) y el estator en el cual se encuentran alojadas las bobinas inductoras, las cuales son tres y deben estar desfasadas espacialmente 120° entre sí. Al energizar las tres bobinas con la tensión nominal de fase del sistema, circulará corriente por cada una de

estas y se inducirá un campo magnético giratorio alrededor del rotor. De acuerdo con la ley de inducción de Faraday este campo magnético variable inducirá una tensión al cortar las bobinas del rotor, dado por la ecuación 1.1:

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.1)$$

Adicionalmente, todo conductor por el que circula una corriente eléctrica, dentro de un campo magnético experimenta una fuerza que lo tiende a poner en movimiento; además en todo conductor que se mueva dentro de un campo magnético se induce una tensión, a esto se le denomina efecto *Faraday* (o efecto generador) [3].

El campo magnético giratorio creado por el bobinado del estator genera una fuerza electromotriz al cortar los conductores del rotor, induciendo una corriente en él.

La acción mutua entre el campo giratorio del estator y las corrientes inducidas en el rotor generan una fuerza electrodinámica en los conductores del rotor que lo hacen girar.

Para que lo anterior ocurra, la velocidad del rotor y la velocidad del campo magnético del estator no pueden ser iguales, ya que girarían al mismo tiempo y las líneas de campo generadas en el estator, nunca cortarían los conductores de rotor y no se generaría la fuerza electromagnética. A esta diferencia entre estas velocidades se le denomina deslizamiento.

El motor de inducción no requiere de escobillas ni de colector, su armadura es de placas de metal magnetizable y el sentido alterno de circulación, de la

corriente en las espiras del estator genera un campo magnético giratorio que arrastra las placas de metal magnetizable del rotor y las hace girar. Este motor es el más utilizado, debido a su fortaleza y sencillez de construcción, buen rendimiento y bajo costo, además que sus características de funcionamiento se adaptan bien a una marcha a velocidad constante. En la Figura 1.2 se muestran las partes de un motor de inducción trifásico jaula de ardilla.

Figura 1.2. Motor de inducción trifásico jaula de ardilla.



Fuente: Los autores.

Un motor eléctrico con un rotor de jaula de ardilla también se llama "motor de jaula de ardilla" [4]. La forma del rotor es la de un cilindro montado en un eje e internamente contiene barras conductoras longitudinales de aluminio o de cobre con surcos y conectados juntos en ambos extremos poniendo en cortocircuito los anillos que forman la jaula. El nombre se deriva de la semejanza entre esta jaula de anillos y barras y la rueda de un hámster.

1.2. ANÁLISIS DE LA SEÑAL.

Con relación al procesamiento de las señales de las corrientes del estator, a continuación se realiza un resumen de las herramientas utilizadas para el análisis con la herramienta MCSA (MOTOR CURRENT SIGNATURE ANALYSIS), así como las componentes de secuencia de un sistema trifásico.

1.2.1. Transformada de Fourier.

La transformada de Fourier es una operación matemática que transforma una señal del dominio en el tiempo a dominio de la frecuencia y viceversa [5]. Cuando la señal es periódica esta se puede descomponer en una combinación lineal de señales armónicamente relacionadas, las cuales son ortogonales entre sí. Por consiguiente las señales de un sistema de corriente alterna se pueden descomponer en la combinación lineal de señales trigonométricas. El conjunto de constantes que ponderan la componente de cada frecuencia forman el espectro de frecuencias, importante para obtener información que no es evidente en el dominio del tiempo.

1.2.1.1. Transformada de Fourier discreta (DFT).

La transformada discreta de Fourier (DFT) es un algoritmo que permite evaluar las componentes armónicas de una señal discreta periódica, la cual puede haber sido generada a partir del muestreo de una señal continua.

1.2.1.2. Transformada rápida de Fourier (FFT).

La Transformada Rápida de Fourier (FFT) [6], es una versión óptima de la DFT en cuanto al número de operaciones requeridas para evaluar los

coeficientes de una señal discreta periódica. Uno de los algoritmos de FFT más utilizado en el tratamiento de señales es aquel en el cual el número de muestras utilizadas en el algoritmo es una potencia de dos. Las diversas formas de realizar FFT son de gran utilidad en diversas aplicaciones de tratamiento de señales digitales, especialmente el filtrado digital.

La transformada discreta de Fourier de una serie de muestras de una señal ($\mathbf{x}[n]$) se define como:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-\frac{j2\pi}{N}nk} \quad k = 0, \dots, N - 1 \quad (1.2)$$

Para evaluar los N coeficientes de $\mathbf{X}[k]$ de la ecuación (1.2), se requieren N^2 operaciones aritméticas que requieren sumas y restas de variables complejas; mediante un algoritmo FFT es posible obtener los mismos coeficientes con solo $N \log_2 N$ operaciones.

La idea que permite este ahorro de tiempo es la descomposición de la transformada en otras transformadas más simples y estas a su vez en otras más simples, hasta llegar a 2 elementos donde k puede tomar valores de 0 y 1. Una vez resueltas estas transformadas simples, se deben agrupar en otras de niveles superiores que deberán resolverse de nuevo y así sucesivamente hasta llegar al nivel más alto; al final deben ordenarse los resultados obtenidos.

Por otra parte, la transformada discreta de Fourier inversa (IDFT), se define como:

$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{\frac{j2\pi}{N}nk} \quad n = 0, \dots, N - 1 \quad (1.3)$$

1.2.2. Periodograma por el método de Welch.

[7]El método de Welch es un método no paramétrico que se utiliza para mejorar la relación señal ruido de las señales cuya densidad espectral de potencia es estimada utilizando un periodograma. El periodograma es un método para la obtención de densidad espectral de potencia, que está definido como:

$$\hat{S}_k(e^{jw}) = \sum_{k=-N+1}^{N-1} \hat{r}_k(k) e^{-jkw} \quad (1.4)$$

Donde:

$\hat{S}_k(e^{jw})$: Periodograma

$\hat{r}_k(k)$: Secuencia de auto correlación.

N : Puntos de longitud de cada segmento.

La estimación del periodograma con el método de Welch consiste en dividir una señal en el dominio del tiempo en segmentos que se sobreponen o traslapan en un 50 %, para luego aplicar a cada segmento una ventana en el dominio del tiempo. Finalmente el periodograma es obtenido utilizando la transformada discreta de Fourier y luego estimando la magnitud elevada al cuadrado de dicha transformada en cada segmento, para luego promediar los resultados de todos los segmentos y obtener la densidad espectral de potencia de la señal. Para el caso de este trabajo de grado, se decidió emplear el periodograma de Welch debido a que la densidad espectral obtenida para ciertas señales de corriente permitió diferenciar la presencia de una falla, junto con los diferentes grados de severidad inducidos.

1.2.3. Componente de secuencia negativa.

Las asimetrías que se pueden presentar en un sistema trifásico y específicamente en los motores eléctricos se deben a diversas razones, siendo las más comunes: Un cortocircuito en el devanado del estator, las asimetrías inherentes a la construcción de la máquina o los sensores, las fluctuaciones en la carga mecánica del motor por un inadecuado acople entre la carga y el motor y un suministro de tensión desbalanceado [8]. Estas asimetrías en sistemas trifásicos de tres hilos (sin neutro), se pueden estimar a partir de los cambios en la magnitud de la corriente de secuencia negativa, la cual es cero si: la tensión del sistema trifásico esta balanceada, en la construcción del motor no se presentó ningún problema de asimetrías y el acople del motor con la carga mecánica es adecuado.

La componente de secuencia negativa de la corriente en un sistema trifásico se obtiene como:

$$I_{a2} = \frac{1}{3}(I_a + \alpha^2 I_b + \alpha I_c) \quad (1.5)$$

Siendo I_a , I_b e I_c las corrientes de las componentes fundamentales de la señal de corriente de cada una de las fases y α es un operador rotacional de fase que es igual a $e^{j2\pi/3}$.

Por otro lado, en Bollen y Yu-Hua (2006)[14] se da una interpretación de la ecuación 1.5 en el dominio tiempo; considerando que el operador α , corresponde a una rotación de 120° en el plano complejo, se reemplaza por

un retardo en el tiempo sobre un tercio del ciclo. Esta consideración permite obtener la corriente de secuencia negativa en el dominio del tiempo como:

$$i_{a12}(t) = \frac{1}{3} \left\{ i_{a1}(t) + i_{b1} \left(t - \frac{1}{3}T \right) + i_{c1} \left(t - \frac{2}{3}T \right) \right\} \quad (1.6)$$

Donde: T es el periodo de la señal de corriente, $i_{a1}(t)$, $i_{b1}(t)$ e $i_{c1}(t)$ son las corrientes de la componente fundamental de cada una de las fases del sistema trifásico en el dominio del tiempo de la componente e $i_{a12}(t)$ es la corriente de la componente de secuencia negativa de la corriente fundamental.

Esta formulación tiene un menor costo computacional aunque presenta como desventaja los retardos debidos al filtrado inicial que permite obtener la componente fundamental de las señales de corriente. Esta limitante no afecta significativamente el proceso de detección de fallas como un cortocircuito del devanado, por cuanto este tipo de falla se caracteriza por un deterioro progresivo.

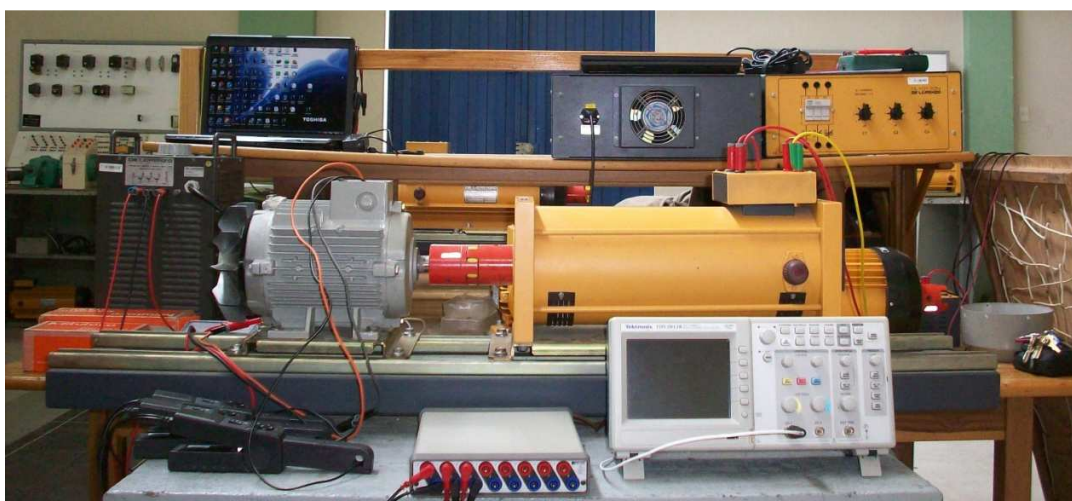
Para analizar las señales con este método se utilizo la herramienta Simulink de Matlab[®] que cuenta con las herramientas necesarias para realizarlo.

2. IMPLEMENTACIÓN DE LA PARTE EXPERIMENTAL.

En este capítulo se describe la implementación desarrollada para realizar la parte experimental del trabajo de grado y se especifican las fallas a que fueron sometidos los motores para caracterizar diferentes tipos de fallas con distintos grados de severidad, las cuales serán analizadas en el capítulo 3.

2.1. BANCO UTILIZADO PARA REALIZAR LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES.

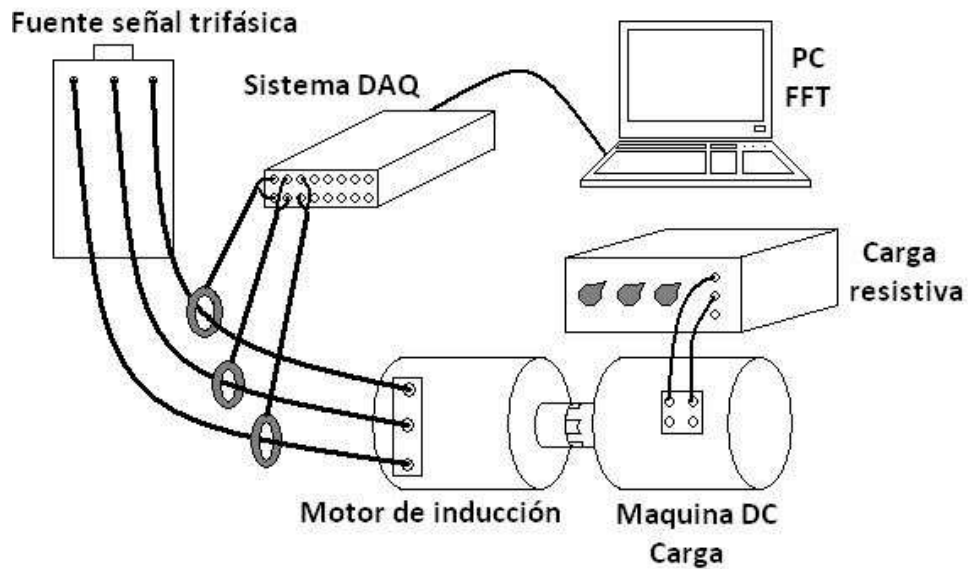
Figura 2.1. Banco para pruebas.



Fuente: Los autores.

En la Figura 2.1 se muestra el banco utilizado para las pruebas experimentales realizadas en el desarrollo del proyecto con cada uno de los dispositivos requeridos. Las pruebas se realizaron en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas en la Universidad Industrial de Santander, ya que se cuenta con el suministro de tensión adecuado para la realización de las diferentes pruebas.

Figura 2.2. Esquema del banco para pruebas.



Fuente: Los autores.

Para la adquisición de las señales de corriente de las fases del motor se utilizó el sistema Dataq Instruments DI-720 Series[®], con el cual se capturó la señal en tiempo real usando el software Windaq del mismo fabricante, tomando muestras de la señal de corriente de cada una de las tres fases del motor. Una vez adquiridas las muestras de las señales de corriente en el dominio del tiempo se procedió a realizar el análisis de la FFT utilizando el programa MatLab[®]. Para la realización de la FFT se tomaron 65536 muestras con las cuales se pueden obtener hasta 32768 componentes armónicas y se utilizó la ventana Hanning para reducir el ruido introducido por los lóbulos laterales. El esquema utilizado se muestra en la Figura 2.2.

2.2. EQUIPO UTILIZADO PARA LA REALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES.

Se contó con 4 motores de inducción (ver Figura 1.2) adquiridos con recursos de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE) como parte del proyecto “Detección y Diagnóstico de Fallas en un Motor de Inducción Usando MCSA” desarrollado por el grupo DICBOT de la escuela de Ingeniería Mecánica, con las siguientes especificaciones:

Motor SIEMENS 1LA7 090-4YA80

Potencia 2 HP Temperatura de trabajo: T_a -16 - 40 [°C] FS 1.16

Tensión de alimentación: 220 YY / 440 Y [V]. Corriente: 7.0 / 3.5 [A]

Peso: 12.7 [Kg]. Velocidad síncrona: 1800 rpm

Figura 2.3. Máquina de corriente continua.



Fuente: Los autores.

Se utilizó una máquina de corriente continua (ver Figura 2.3) como generador acoplado al motor SIEMENS, con el objetivo de generar la carga requerida para la realización de las pruebas. Este máquina es del Laboratorio de

Máquinas Eléctricas de la Universidad Industrial de Santander y sus especificaciones son: Generador DE LORENZO DL 1023
Tensión 220 [V]. Potencia 1,1 [Kw], Velocidad 3000 rpm,
excitación 160 [V] / 0.25 [A]

Figura 2.4. Autotransformador.



Fuente: Los autores.

Para acondicionar la magnitud de las señales de tensión del sistema trifásico que suministra la tensión a los motores, se utilizó un autotransformador (ver Figura 2.4) que al igual que el generador pertenece al laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Universidad Industrial de Santander. Las especificaciones de este equipo son las siguientes: Autotransformador DE LORENZO

Vent: 400 [V] f: 50/60 [Hz]. Vsal: 0-450 [V]. I: 8 [A]. S: 6,24 [KVA] Ta: 25[°C].

Figura 2.5. Sistema de adquisición de datos.



Fuente: Los autores.

La adquisición de las muestras de las señales de corriente de las fases del estator se realizó con el sistema de DATAQ® INSTRUMENTS. En la Figura 2.5 se observa el sistema de adquisición y al lado izquierdo, las tres pinzas utilizadas para la adquisición de las señales de corrientes del motor; este sistema se conecta al PC por puerto USB y allí en el software WinDaQ se realiza la adquisición de las señales.

Las especificaciones del sistema de adquisición de las señales es el siguiente: [15] Sistema DATAQ® INSTRUMENTS DI-720 SERIES

Tensión de alimentación: 9-36 [VDC] Consumo de potencia: 4,5 [W]

Temperatura: -40 – 100 [°C] [7].

Para variar la carga en el motor de acuerdo con las necesidades de las pruebas realizadas, se utilizó como carga eléctrica un banco de 16 bombillas incandescentes de 220 [W] (ver Figura 2.6) para generar la carga necesaria para realizar las pruebas con las condiciones establecidas. Es un banco que consta de 16 bombillos de 220, que pueden ser encendidos por partes, logrando conseguir diferentes condiciones de carga del motor.

Figura 2.6. Banco de bombillas.



Fuente: Los autores.

Aparte de estos equipos, se usaron implementos comunes de laboratorio como:

- **Multímetro:** Se utilizó para medir la tensión de alimentación de los motores y para controlar la tensión de la carga del generador DC.
- **Amperímetros de corriente alterna:** Se utilizaron para medir en todo momento las corrientes de las fases del estator del motor y así notar cualquier cambio en ellas.

- **Tacómetro:** Se utilizó para medir la velocidad de giro del rotor del motor.
- **Reóstato:** se utilizó para variar la tensión autoalimentada en el generador DC.

2.3. FALLAS A ESTUDIAR.

Durante la operación de un motor los problemas mecánicos en el mismo también pueden crear desequilibrios en el flujo de corriente que pueden ser identificados en el espectro de la misma. El proceso de análisis se aplicará a cuatro fallas que afectan a los motores de inducción:

- Cortocircuito en el estator.
- Excentricidad del entrehierro.
- Ruptura de barras.
- Falla en la pista externa de los rodamientos.

Cada falla se analizó en 3 diferentes escenarios de carga del motor de inducción como sigue:

Tabla 2.1. Características de las condiciones de carga.

	Porcentaje de la carga nominal	Deslizamiento S	Velocidad del rotor
Sin carga	0 %	0.0039	1793 rpm
Carga 1	65 %	0.022	1760 rpm
Carga 2	85 %	0.038	1730 rpm

Los porcentajes de carga fueron seleccionados dentro de un rango de condiciones sobre las que normalmente funcionan los motores en la industria

y en base al proyecto general desarrollado por el grupo DICBOT de la escuela de ingeniería mecánica; no se realizaron pruebas a plena carga debido a que las fallas inducidas interfieren con el funcionamiento normal del motor y podrían exigir corrientes excesivas.

Cada falla se indujo teniendo en cuenta 3 grados de severidad de la misma, severidad incipiente, severidad moderada y severidad alta, para lo cual se incrementaba el nivel de la falla que se aplicaba al motor de prueba.

3. ANÁLISIS DE LAS FALLAS A LAS CUALES FUERON SOMETIDOS

LOS MOTORES DE INDUCCIÓN.

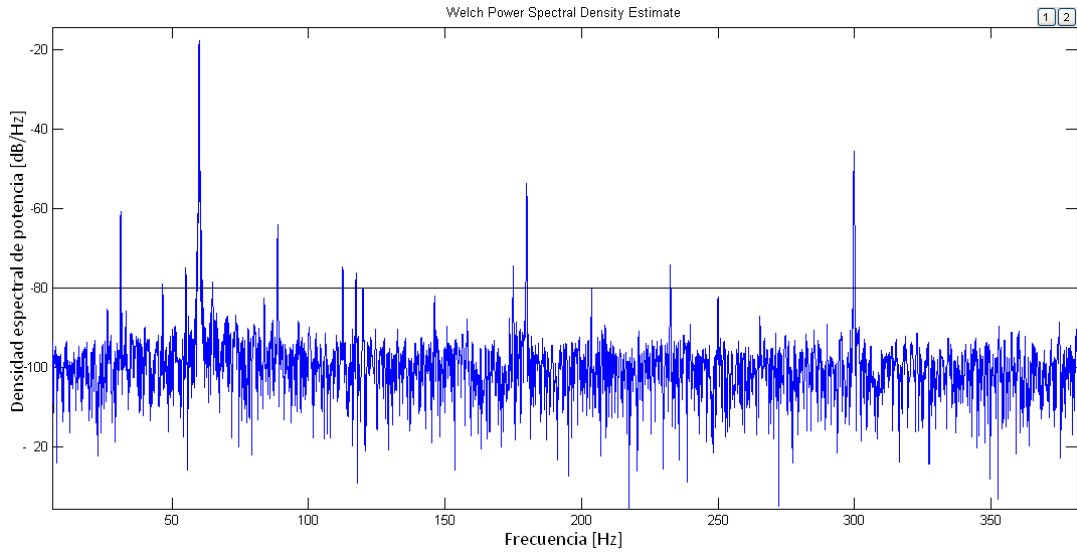
La especificación de los tipos de fallas a las que fueron sometidos los motores de inducción y el análisis de las características de estas fallas son expuestas en este capítulo.

3.1. ESPECTROS DE REFERENCIA PARA EL ANÁLISIS DE LAS FALLAS.

Inicialmente se realizaron pruebas a los motores sin ninguna falla, esto con el fin de tener una referencia para detectar las fallas posteriormente. El análisis de estas señales en los motores muestra resultados muy similares para cada uno de ellos. Las figuras 3.1, 3.2 y 3.3 muestran los tres espectros correspondientes a la potencia de la densidad espectral de corriente de una de las fases para las tres condiciones de carga estudiadas.

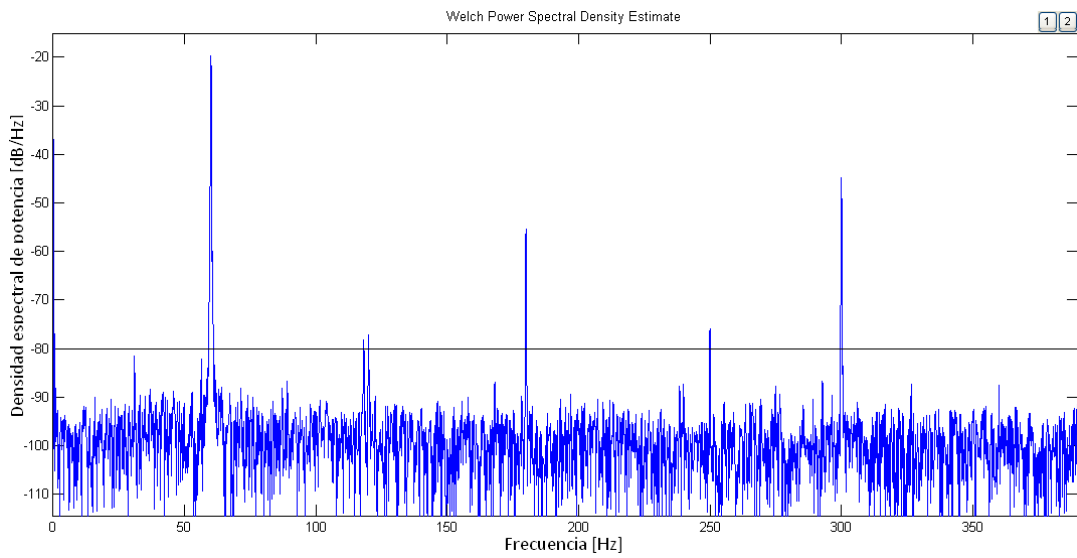
La densidad espectral de la potencia de la señal de la corriente de una de las fases del motor sin falla, trabajando al 85% de plena carga se muestra Figura 3.1, esta misma variable cuando el motor sin falla está trabajando al 65% de plena carga se muestra en la Figura 3.2 y finalmente la Figura 3.3 muestra el comportamiento de esta variable cuando el motor sin falla esta en vacío.

Figura 3.1. Espectro de la señal sin falla carga 85 %.



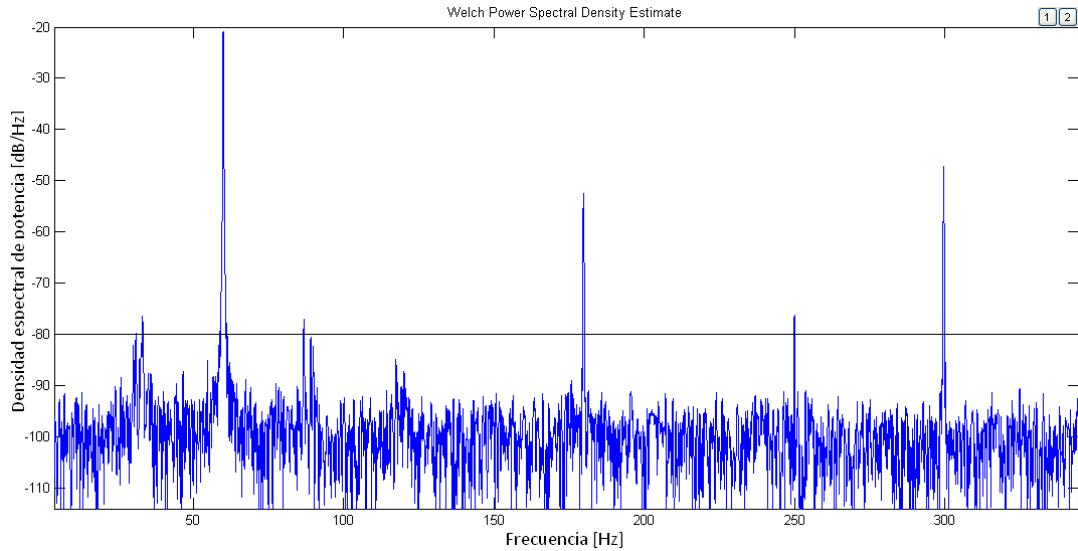
Fuente: Los autores.

Figura 3.2. Espectro de la señal sin falla carga 65 %.



Fuente: Los autores.

Figura 3.3. Espectro de la señal sin falla sin carga.



Fuente: Los autores.

Las figuras 3.1 a 3.3 muestran que la mayor densidad espectral de frecuencia de la señal de corriente se presenta en la frecuencia fundamental. También como era de esperarse aparece densidad espectral a las frecuencias del tercero y quinto armónico.

Se optó por definir como considerables las componentes de frecuencia de magnitudes mayores a un 25% de la fundamental en la escala dB/Hz (aproximadamente 0,000068% de la fundamental en escala lineal) para tener un punto de comparación. Se definió este porcentaje debido a que la magnitud de las componentes espectrales apreciables para motores sin fallas se encuentra por lo general en valores superiores a ese rango.

3.2. CORTOCIRCUITO EN EL ESTATOR DEL MOTOR DE INDUCCIÓN.

Un corto circuito entre espiras se presenta al coincidir espiras en las cuales el aislamiento se ha deteriorado. Debido a este evento, las corrientes en las fases del motor trifásico presentan un desbalance que en ciertas circunstancias es no es detectado por las protecciones térmicas del motor [9].

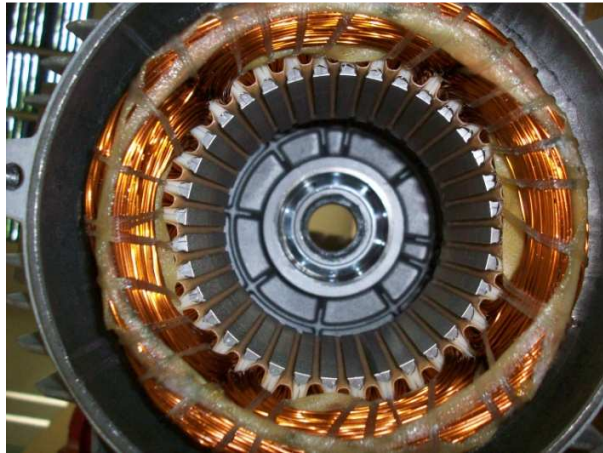
3.2.1 Tipos de corto circuitos.

Los tipos de cortocircuitos en el estator se pueden presentar entre: Espiras del mismo devanado o de devanados distintos, una espira y el hierro del estator y por lo general ocurren después de un tiempo de estar en funcionamiento el motor.

El cortocircuito más común es entre espiras y cuando se presenta en una de las fases, el campo magnético generado por el estator deja de ser balanceado, lo cual trae como consecuencias el aumento de la vibración de la máquina, y por ende degradación del aislamiento, así como daños en los rodamientos del motor, acortando la vida útil de estos elementos. Este tipo de eventos incrementa la temperatura del motor y el corto circuito se termina expandiendo a más espira y eventualmente termina dañando como mínimo los devanados del estator. Este tipo de fallas pueden ocurrir repetidamente en un motor y muchas veces no son detectadas por el sistema de protección hasta cuando la falla ha dañado los devanados.

3.2.2. Inducción de la falla de corto circuito en los motores sometidos a prueba en el laboratorio.

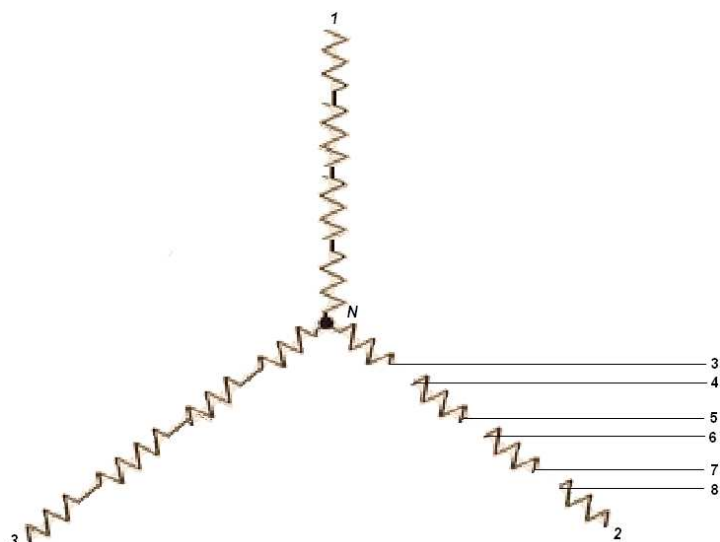
Figura 3.4. Estator del motor de inducción.



Fuente: Los autores.

Para inducir esta falla se desmontaron los devanados de las fases del estator del motor (ver Figura 3.4) y se modificó el de una de las fases, al cual se le conectaron terminales en determinadas espiras de uno de los devanados para definir el porcentaje de corto que se induciría. Teniendo los terminales de conexión de estas espiras por fuera del motor, se estableció el porcentaje de corto circuito requerido uniendo los terminales que se muestran en el esquema de la Figura 3.5. Con la configuración mostrada en esta figura se programaron tres porcentajes de corto circuito en el devanado de una de las fases tal como se presentan en la Tabla 3.1.

Figura 3.5. Esquema de cortocircuitos en el estator.



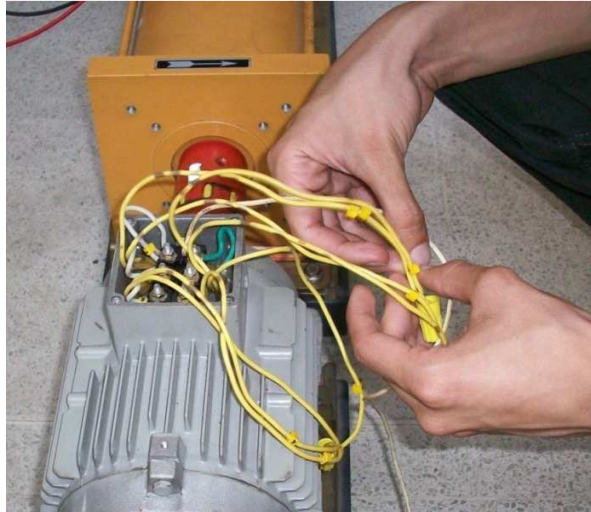
Fuente: Los autores.

Tabla 3.1. Características de cortocircuitos.

Severidad	Porcentaje de corto	Puntos a unir
Sin falla	0 %	3 - 4, 5 - 6, 7 - 8
Severidad 1	2 %	3 - 4 - N, 5 - 6, 7 - 8
Severidad 2	5 %	3 - 4 - 5 - 6, 7 - 8
Severidad 3	10%	3 - 4 - 7 - 8, 5 - 6

Cada cortocircuito se hace con el fin de observar qué efectos puede producir en cada fase y en el sistema trifásico en general, estos cortocircuitos se inducen uniendo los terminales que están expuestos en el motor, los cables de color amarillo en la figura 3.6.

Figura 3.6. Motor con terminales expuestos para generar los cortocircuitos.



Fuente: Los autores.

3.2.3. Características de las componentes de frecuencias en la corriente cuando se presenta la falla de corto circuito.

Cuando se presenta un corto circuito entre espiras del estator, tanto el campo magnético generado en el estator como las corrientes inducidas en el rotor se desbalancean, generando por consiguiente un torque también desbalanceado. El efecto de este desbalance es la pérdida de linealidad en el proceso y por consiguiente se generan componentes de frecuencia que dependen de la frecuencia fundamental de la señal de tensión, del deslizamiento y del número de pares de polos del motor. En la referencia [1] se establece que las frecuencias en el espectro de la corriente debidas a las fallas de corto circuito se obtienen con la ecuación 3.1.

$$f_{st} = f_1 \left\{ \frac{n}{p} (1 - s) \pm k \right\} \quad (3.1)$$

Donde:

f_{st} =componentes debidas a espiras en cortocircuito.

f_1 =frecuencia fundamental de la tensión de suministro.

$n=1, 2, 3$, etc.

$k=1, 3, 5$, etc.

p = pares de polos.

s =deslizamiento.

3.2.4. Análisis de los resultados experimentales de la falla de corto circuito entre espiras utilizando la herramienta MCSA.

Una vez realizado el montaje se procedió a adquirir los datos de las señales de corriente en el estator para posteriormente analizar la densidad espectral de potencia de los resultados obtenidos.

3.2.4.1. Análisis de los resultados de un cortocircuito en el estator con una carga del 85% de la nominal.

La Tabla 3.2 presenta las frecuencias de las componentes que se esperan se generen en la corriente del motor cuando se presenta un corto circuito y la condición de carga es del 85%. De acuerdo con los datos de la Tabla 2.1 el deslizamiento del motor para esta condición de funcionamiento es: **$s=0,039$** . Este valor des se reemplaza en la Ecuación 3.1 con el valor de **$p=2$** (dos pares de polos) obteniendo estos valores de frecuencia.

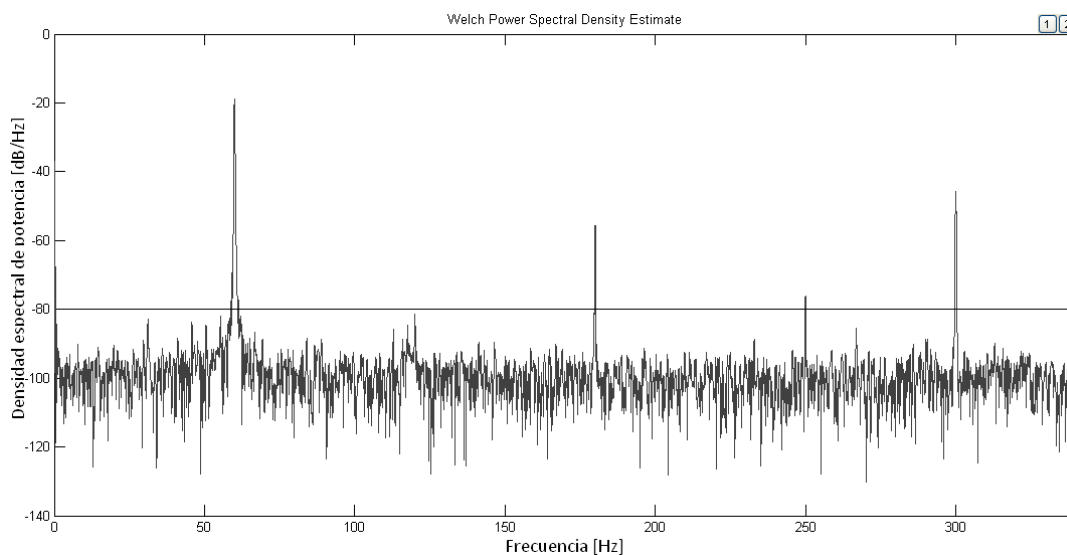
Tabla 3.2. Frecuencias generadas [Hz] en un corto circuito con una carga en el motor del 85% de la carga nominal y frecuencia de la red 60 [Hz].

88,78	117,56	146,35	175,13	203,91	232,7	261,48	290,26	319,05
31,21	2,43	26,35	55,13	83,91	112,7	141,48	170,26	199,05

La Figura 3.7 muestra la densidad espectral de potencia de la corriente de la fase donde se conecta el devanado sometido a corto circuito para una falla con severidad 1 (corto circuito en el 2 % del devanado) y el motor funcionando al 85% de plena carga.

Comparando los resultados de la Tabla 3.2 con las componentes de frecuencia obtenidas del espectro de potencia de la Figura 3.7, se encontró que ninguna de ellas es relevante.

Figura 3.7. Espectro de cortocircuito severidad 1 carga 85 %.

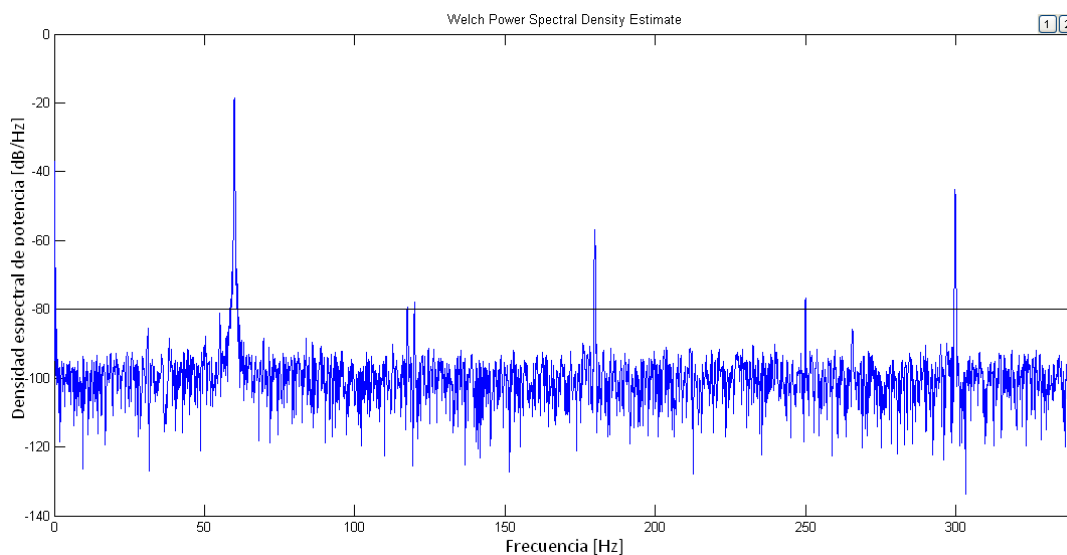


Fuente: Los autores.

La Figura 3.8 muestra la densidad espectral de potencia de la corriente de la fase donde se conecta el devanado sometido a corto circuito para una falla con severidad 2 (corto circuito en el 5 % del devanado) y el motor funcionando al 85% de plena carga.

Comparando los resultados de la Tabla 3.2 con las componentes de frecuencia obtenidas del espectro de potencia de la Figura 3.8, se encontró que solamente la componente de frecuencia en 117,56 Hz es relevante para este caso.

Figura 3.8. Espectro de cortocircuito severidad 2 carga 85 %.

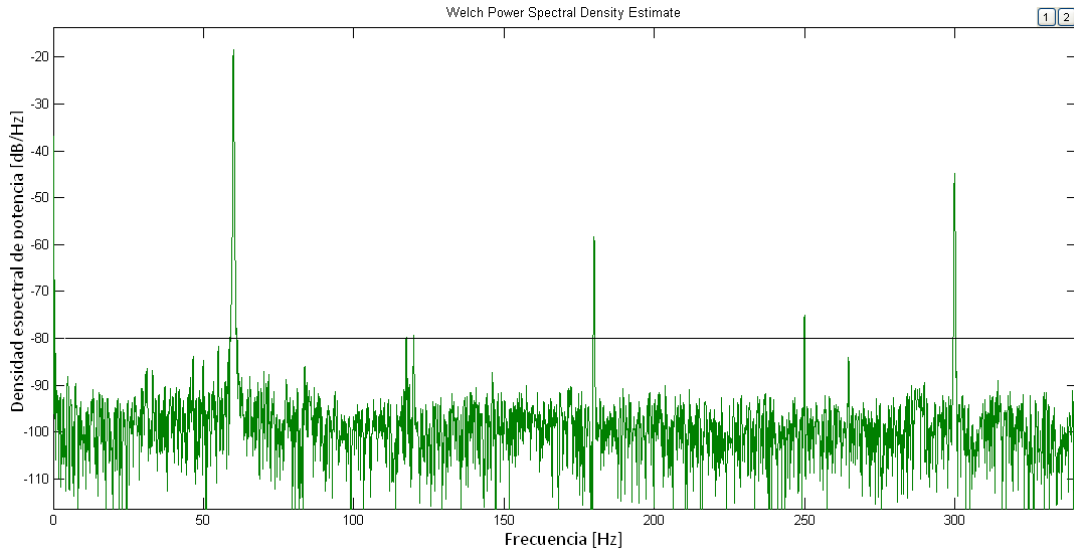


Fuente: Los autores.

La Figura 3.9 muestra la densidad espectral de potencia de la corriente de la fase donde se conecta el devanado sometido a corto circuito para una falla con severidad 3 (corto circuito en el 10 % del devanado) y el motor funcionando al 85% de plena carga.

Comparando los resultados de la Tabla 3.2 con las componentes de frecuencia obtenidas del espectro de potencia de la Figura 3.9, se encontró que solamente la componente de frecuencia en 117,56 Hz es relevante para este caso.

Figura 3.9. Espectro de cortocircuito severidad 3 carga 85 %.



Fuente: Los autores.

3.2.4.2. Análisis de los resultados de un cortocircuito en el estator con una carga del 65% de la nominal.

La Tabla 3.3 presenta las frecuencias de las componentes que se esperan se generen en la corriente del motor cuando se presenta un corto circuito y la condición de carga es del 65%. De acuerdo con los datos de la Tabla 2.1 el deslizamiento del motor para esta condición de funcionamiento es: $s=0,022$. Este valor s se reemplaza en la Ecuación 3.1 con el valor de $p=2$ (dos pares de polos) obteniendo estos valores de frecuencia.

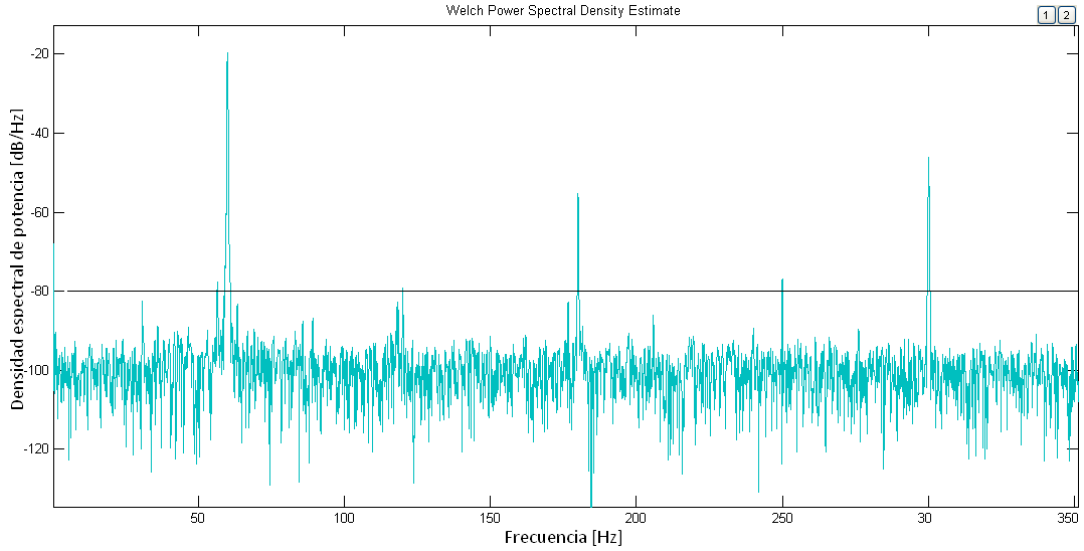
Tabla 3.3. Frecuencias generadas [Hz] en un corto circuito con una carga en el motor del 65% de la carga nominal y frecuencia de la red 60 [Hz].

89,38	118,76	148,15	177,53	206,91	236,3	265,68	295,06	324,45
30,61	1,23	28,15	57,53	86,91	116,3	145,68	175,06	204,45

La Figura 3.10. muestra la densidad espectral de potencia de la corriente de la fase donde se conecta el devanado sometido a corto circuito para una falla con severidad 1 (corto circuito en el 2 % del devanado) y el motor funcionando al 65% de plena carga.

Comparando los resultados de la Tabla 3.3 con las componentes de frecuencia obtenidas del espectro de potencia de la Figura 3.10, se encontró que solamente la componente de frecuencia en 57,53 Hz es relevante para este caso.

Figura 3.10. Espectro de cortocircuito severidad 1 carga 65 %.

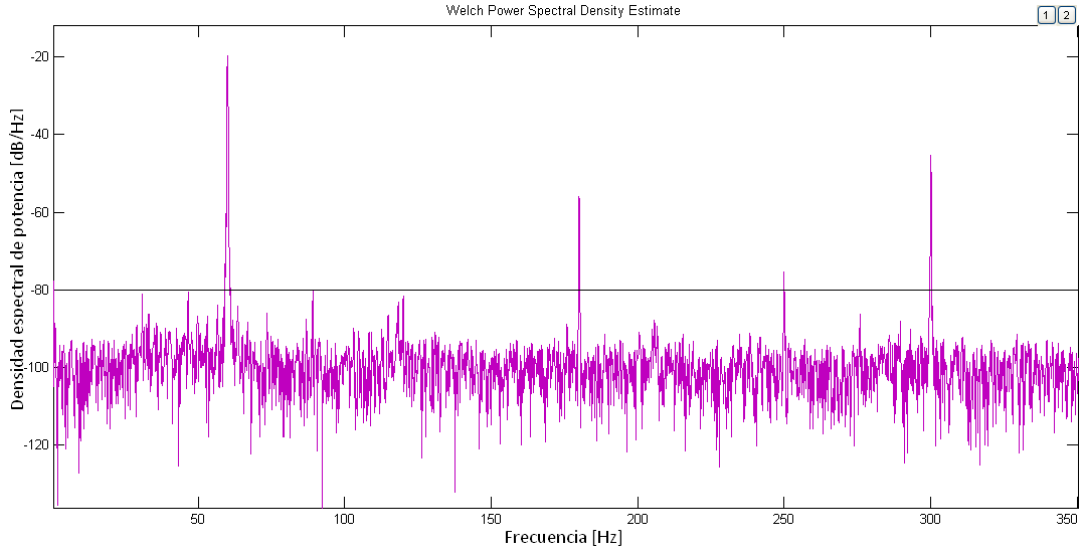


Fuente: Los autores.

La Figura 3.11. muestra la densidad espectral de potencia de la corriente de la fase donde se conecta el devanado sometido a corto circuito para una falla con severidad 2 (corto circuito en el 5 % del devanado) y el motor funcionando al 65% de plena carga.

Comparando los resultados de la Tabla 3.3. con las componentes de frecuencia obtenidas del espectro de potencia de la Figura 3.11, se encontró que ninguna de ellas es relevante.

Figura 3.11. Espectro de cortocircuito severidad 2 carga 65 %.

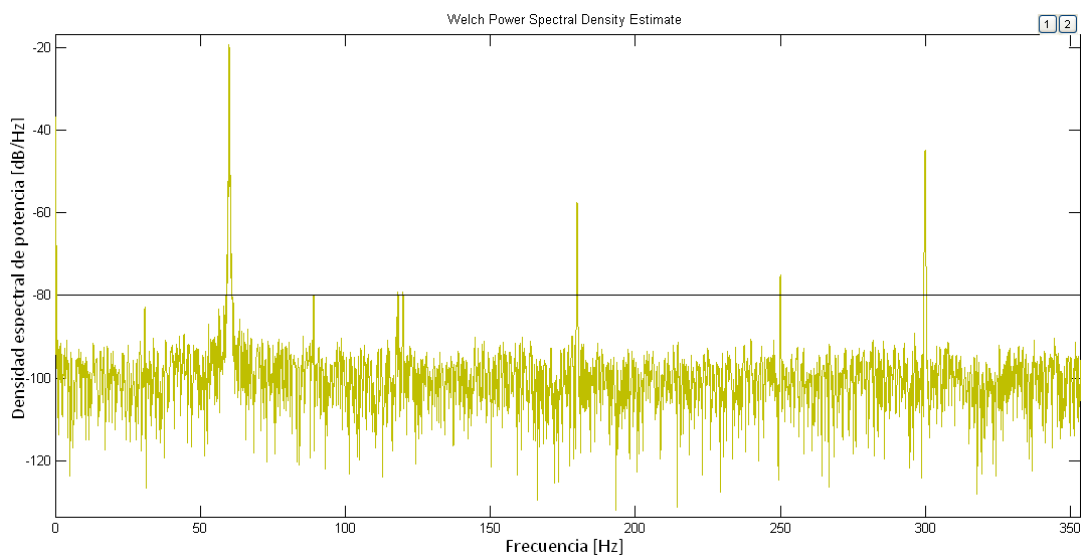


Fuente: Los autores.

La Figura 3.12. muestra la densidad espectral de potencia de la corriente de la fase donde se conecta el devanado sometido a corto circuito para una falla con severidad 3 (corto circuito en el 10 % del devanado) y el motor funcionando al 65% de plena carga.

Comparando los resultados de la Tabla 3.3 con las componentes de frecuencia obtenidas del espectro de potencia de la Figura 3.12, se encontró que solamente la componente de frecuencia en 118,76 Hz es relevante para este caso.

Figura 3.12. Espectro de cortocircuito severidad 3 carga 65 %.



Fuente: Los autores.

3.2.4.3. Análisis de los resultados de un cortocircuito en el estator con el motor en vacío.

La Tabla 3.4 presenta las frecuencias de las componentes que se esperan se generen en la corriente del motor cuando se presenta un corto circuito y el motor funcionando en vacío. De acuerdo con los datos de la Tabla 2.1 el deslizamiento del motor para esta condición de funcionamiento es: **$s=0,0039$** . Este valor **des** se reemplaza en la Ecuación 3.1 con el valor de **$p=2$** (dos pares de polos) obteniendo estos valores de frecuencia.

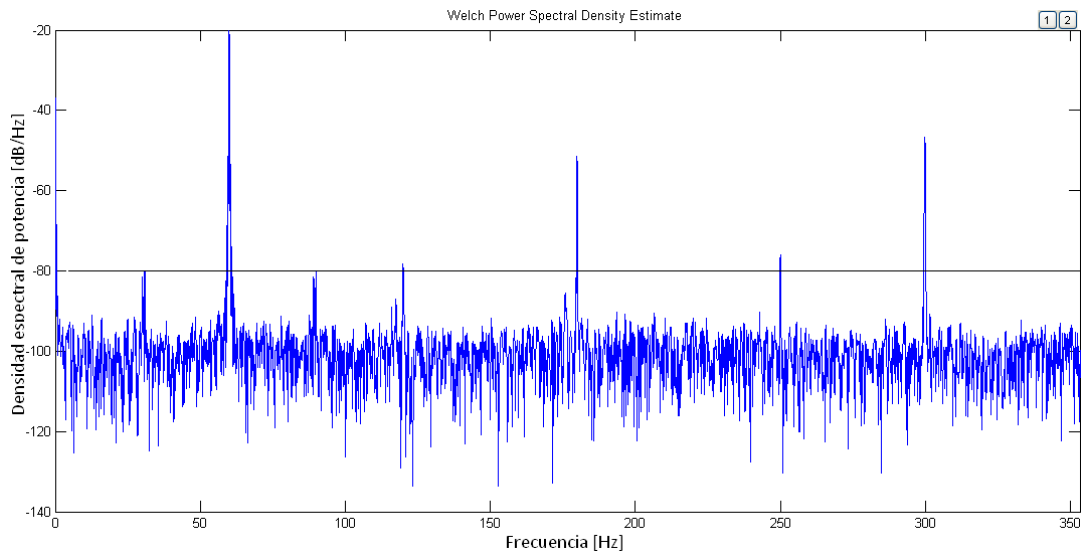
Tabla 3.4. Frecuencias generadas [Hz] en un corto circuito con el motor funcionando en vacío y frecuencia de la red 60 [Hz].

89,95	119,9	149,85	179,8	209,75	239,7	269,65	299,6	329,55
30,05	0,1	29,85	59,8	89,75	119,7	149,65	179,6	209,55

La Figura 3.13. muestra la densidad espectral de potencia de la corriente de la fase donde se conecta el devanado sometido a corto circuito para una falla con severidad 1 (corto circuito en el 2 % del devanado) y el motor funcionando en vacío.

Comparando los resultados de la Tabla 3.4 con las componentes de frecuencia obtenidas del espectro de potencia de la Figura 3.13, se encontró que las componentes de frecuencia en 30,05 Hz, 89,95 Hz, 119,9 Hz, 179,8 Hz y 299,6 Hz son relevantes para este caso.

Figura3.13. Espectro de cortocircuito severidad 1 sin carga.

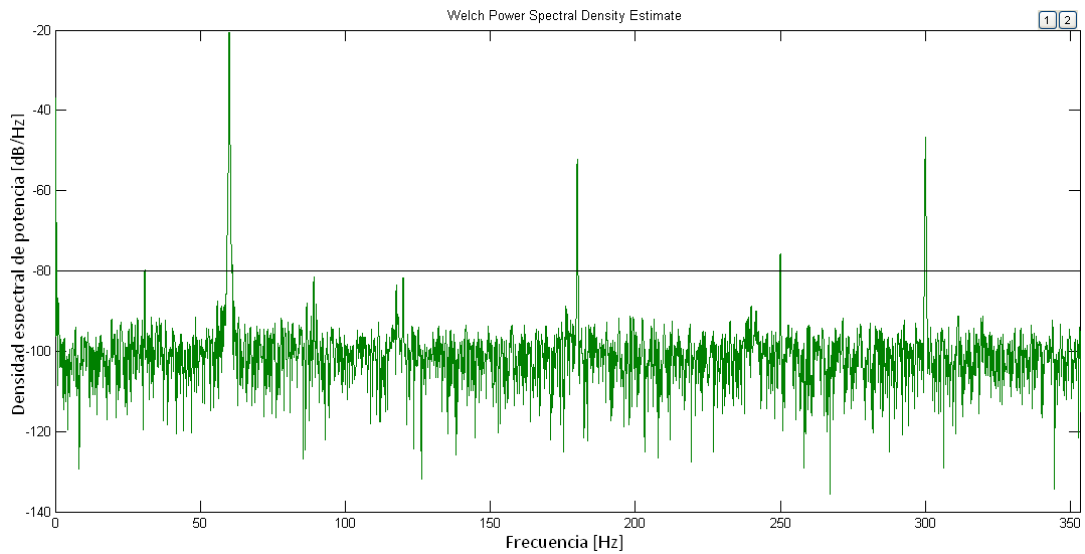


Fuente: Los autores.

La Figura 3.14. muestra la densidad espectral de potencia de la corriente de la fase donde se conecta el devanado sometido a corto circuito para una falla con severidad 2 (corto circuito en el 5 % del devanado) y el motor funcionando en vacío.

Comparando los resultados de la Tabla 3.4 con las componentes de frecuencia obtenidas del espectro de potencia de la Figura 3.14, se encontró que las componentes de frecuencia en 30,05 Hz, 179,8 Hz y 299,6 Hz son relevantes para este caso.

Figura3.14. Espectro de cortocircuito severidad 2 sin carga.

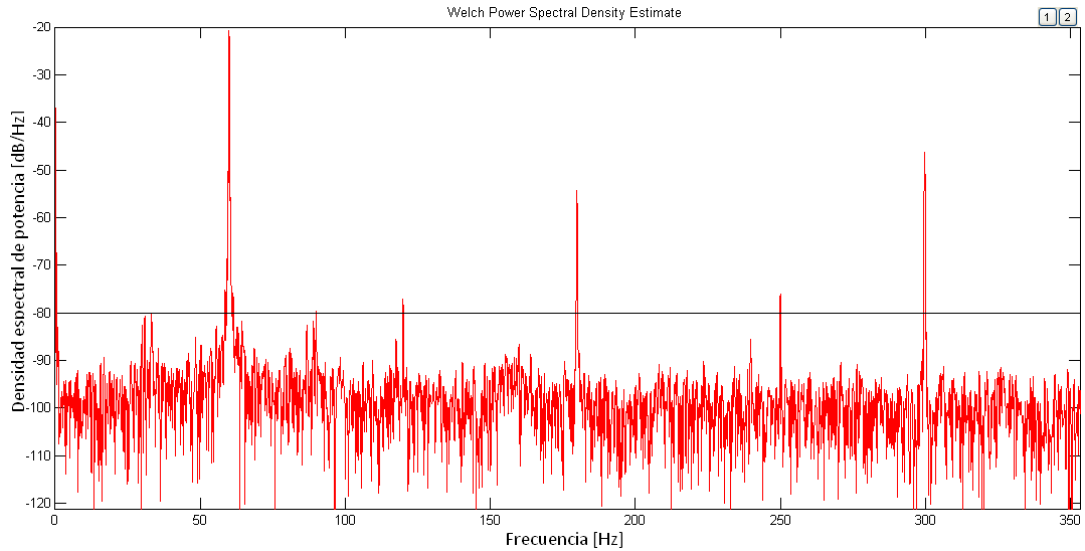


Fuente: Los autores.

La Figura 3.15. muestra la densidad espectral de potencia de la corriente de la fase donde se conecta el devanado sometido a corto circuito para una falla con severidad 3 (corto circuito en el 10 % del devanado) y el motor funcionando en vacío.

Comparando los resultados de la Tabla 3.4 con las componentes de frecuencia obtenidas del espectro de potencia de la Figura 3.15, se encontró que las componentes de frecuencia en 30,05 Hz, 89.95 Hz, 119,9 Hz, 179,8 Hz y 299,6 Hz son relevantes para este caso.

Figura3.15. Espectro de cortocircuito severidad 3 sin carga.



Fuente: Los autores.

Como se observa en los espectros de potencia de la corriente de la fase donde se conecta el devanado sometido a cortocircuito de las figuras 3.7a 3.15, los espectros correspondientes a la falla de cortocircuito presentan poca concordancia con las frecuencias establecidas de acuerdo con la Ecuación 3.1, siendo la concordancia mayor en las condiciones de funcionamiento en vacío del motor; por consiguiente el método MCSA resulta poco satisfactorio y no es recomendable analizar este tipo de falla en los motores por medio de éste mecanismo.

3.2.5. Análisis de los resultados experimentales de la falla de corto circuito entre espiras utilizando la componente de secuencia negativa.

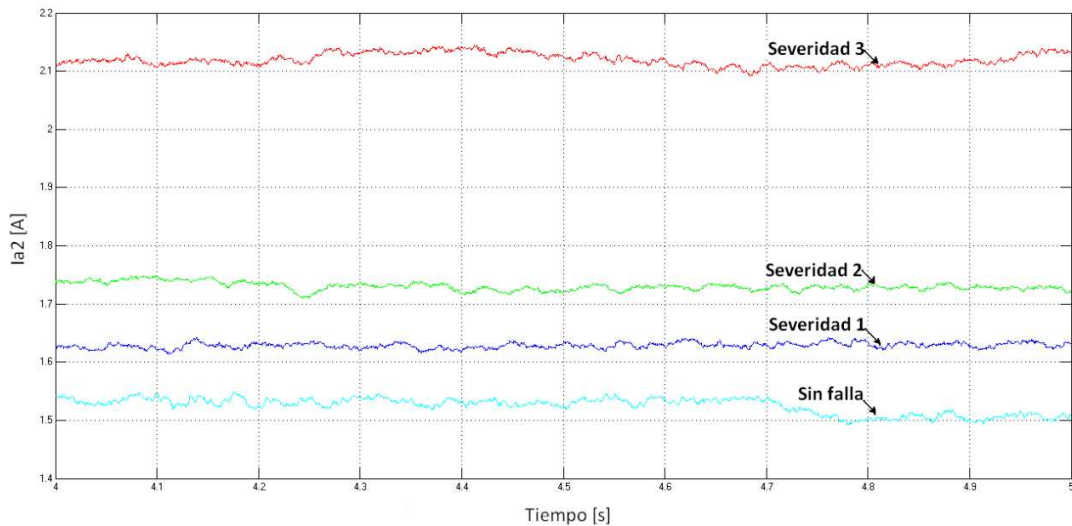
Dado que la mayoría de las fallas que se presentan en los motores trifásicos hacen que se presente un desbalance en las corrientes del sistema trifásico,

este desbalance se puede evidenciar en la componente de secuencia negativa de la componentes simétricas de las corrientes del sistema dado que el sistema por ser de tres hilos no tendrá componente de secuencia cero.

Por esta razón se decidió realizar un análisis del comportamiento de la componente de secuencia negativa a los diferentes tipos de fallas de corto circuito realizados experimentalmente.

En la Figura 3.16 se realiza una comparación del comportamiento en el tiempo (ver Ecuación 1.6) de la componente de secuencia negativa de las corrientes, para el motor en funcionamiento normal y considerando los tres grados de severidad de la falla de cortocircuito cuando no hay carga en el generador acoplado al motor. En esta figura se registra un incremento de la magnitud de la corriente de la componente de secuencia negativa de alrededor del 5% para la severidad 1, del 12% para la severidad 2 y del 36% para la severidad 3.

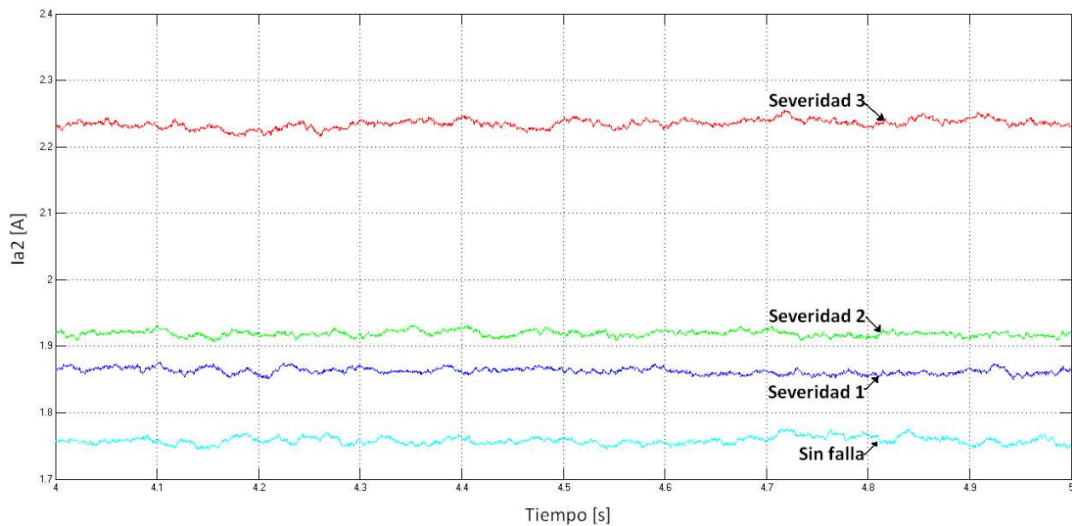
Figura3.16. Comparación del comportamiento de la componente de secuencia negativa cuando se presenta un corto circuito en el estator y el motor está en vacío.



Fuente: Los autores.

La comparación entre las componentes de secuencia negativa de las corrientes del sistema trifásico para la falla de corto circuito cuando la carga del motor es del 65% de la nominal se muestra en la Figura 3.17. En esta figura se registra un incremento de la magnitud de la corriente de la componente de secuencia negativa de alrededor del 5% para la severidad 1, del 9% para la severidad 2 y del 25% para la severidad 3.

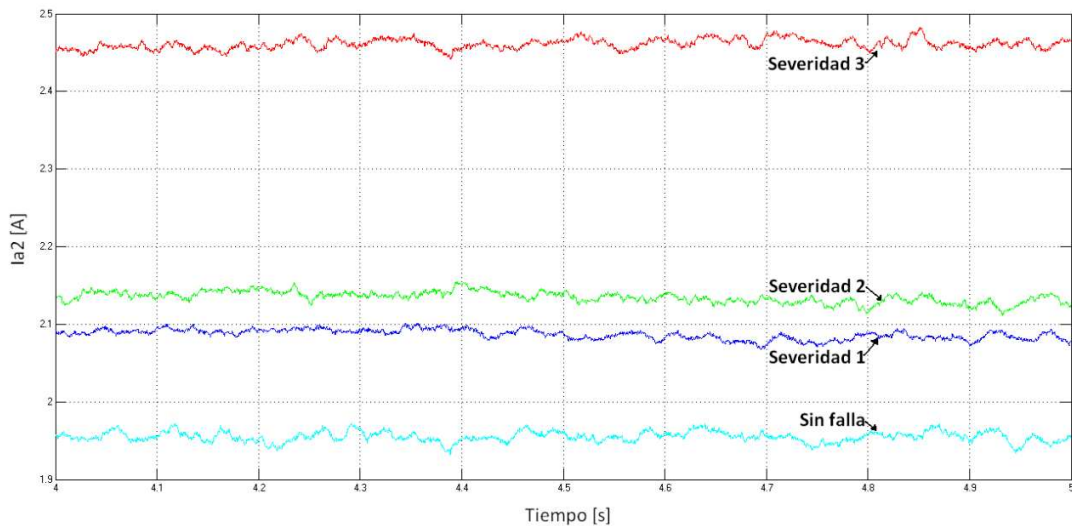
Figura 3.17. Comparación del comportamiento de la componente de secuencia negativa cuando se presenta un cortocircuito en el estator y el motor está funcionando al 65% de la carga nominal.



Fuente: Los autores.

La Figura 3.18 muestra la comparación del comportamiento en el tiempo (ver Ecuación 1.6) de la componente de secuencia negativa de las corrientes, para el motor en funcionamiento normal y considerando los tres grados de severidad de la falla de cortocircuito considerando que la carga del motor es del 85% de la nominal. En esta figura se registra un incremento de la magnitud de la corriente de la componente de secuencia negativa de alrededor del 6% para la severidad 1, del 8% para la severidad 2 y del 25% para la severidad 3.

Figura 3.18. Comparación del comportamiento de la componente de secuencia negativa cuando se presenta un cortocircuito en el estator y el motor está funcionando al 85% de la carga nominal.



Fuente: Los autores.

Los resultados plasmados en las figuras 3.16 a 3.18, muestran la importancia del análisis mediante la componente de secuencia negativa de las corrientes, ya que en la obtención de esta componente se tiene en cuenta el aporte de las tres corrientes en el desbalance que ocasiona cada cortocircuito en el sistema trifásico. En estas figuras se observa como la componente de secuencia negativa se va incrementando conforme aumenta el porcentaje de corto circuito, lo cual es de esperarse, ya que si existe un incremento en el porcentaje de espiras cortocircuitadas en una de las fases del estator, el desbalance en el sistema es mayor con respecto al motor funcionando en condiciones normales.

3.2.6. Análisis de las herramientas de diagnóstico.

Los resultados del análisis proporcionado por la herramienta MCSA para la falla de corto circuito son poco satisfactorios debido a que las componentes de frecuencia que se esperan como consecuencia de esta falla no son relevantes en el espectro y no se aprecia diferencias importantes con el espectro de la señal cuando no hay fallas en el motor. Por otra parte, la componente de secuencia negativa de la corriente presenta un incremento importante en su magnitud que depende del grado de severidad de la falla de corto circuito. Por lo tanto con esta herramienta se pueden definir indicadores que permitan diagnosticar la falla de cortocircuito que afecta al motor.

3.3. EXCENRICIDAD EN EL ENTREHIERRO.

La excentricidad del entrehierro es otra causa común del mal funcionamiento en una máquina de inducción[10]. La excentricidad se produce cuando la línea central del eje no es la misma que la línea central del rotor. Es decir, el centro de rotación verdadero difiere de la línea central geométrica. Existen 3 tipos de excentricidad en las máquinas:

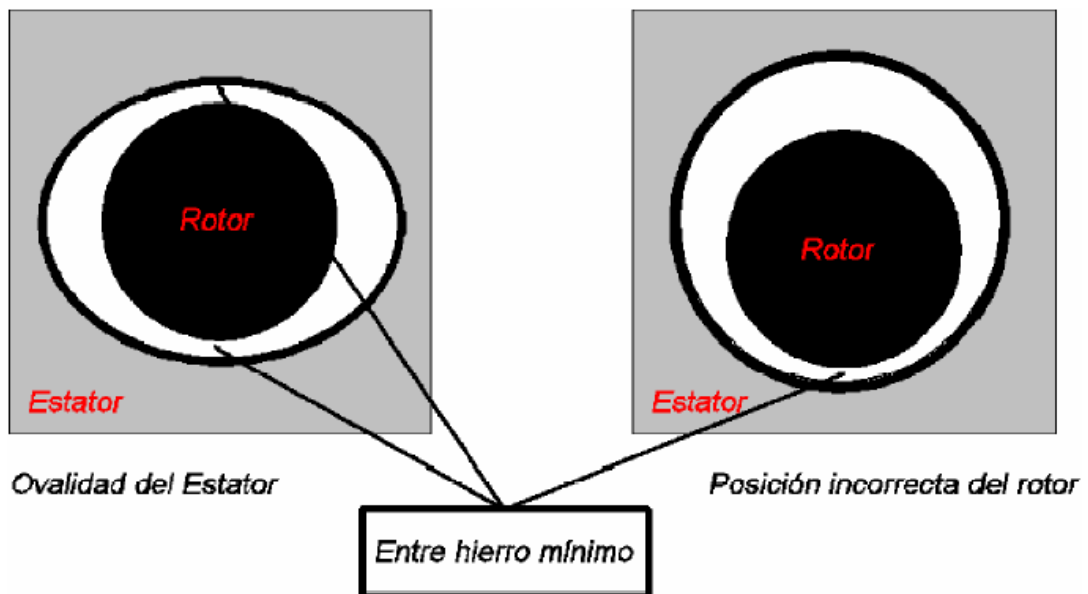
- Excentricidad de tipo estática.
- Excentricidad de tipo dinámica.
- Excentricidad combinada estática - dinámica.

3.3.1. Excentricidad estática.

La excentricidad estática se presenta cuando el entrehierro presenta un valor mínimo en una posición espacial fija, es decir, durante todo el giro del rotor

existe siempre un punto en el que el entrehierro es mínimo y otro en el que es máximo. Este tipo de excentricidad puede estar ocasionado por una forma oval del alojamiento estatórico o por una ubicación incorrecta del rotor dentro del estator (ver Figura 3.19).

Figura 3.19. Forma de producirse la excentricidad estática.

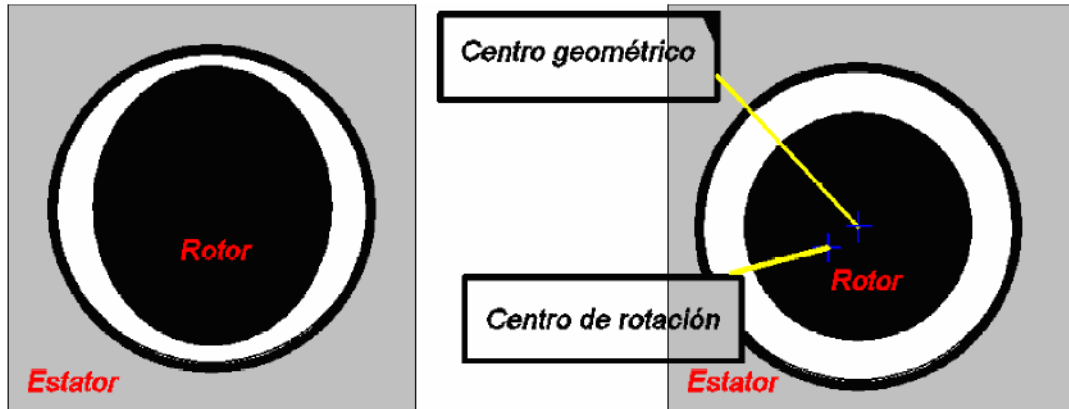


Fuente: <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/73/10/Capitulo2.pdf>.

3.3.2. Excentricidad dinámica.

Cuando el entrehierro presenta un valor mínimo que varía en el tiempo y en el espacio (considerando el giro de la máquina) la excentricidad se denomina dinámica. Este tipo de excentricidad puede estar causado por la rotación del eje alrededor de un punto que no es su centro geométrico o por la existencia de un rotor deformado que presente una sección ovalada (ver Figura 3.20).

Figura 3.20. Forma de producirse la excentricidad dinámica.



Ovalidad del Rotor

Centro de rotación incorrecto

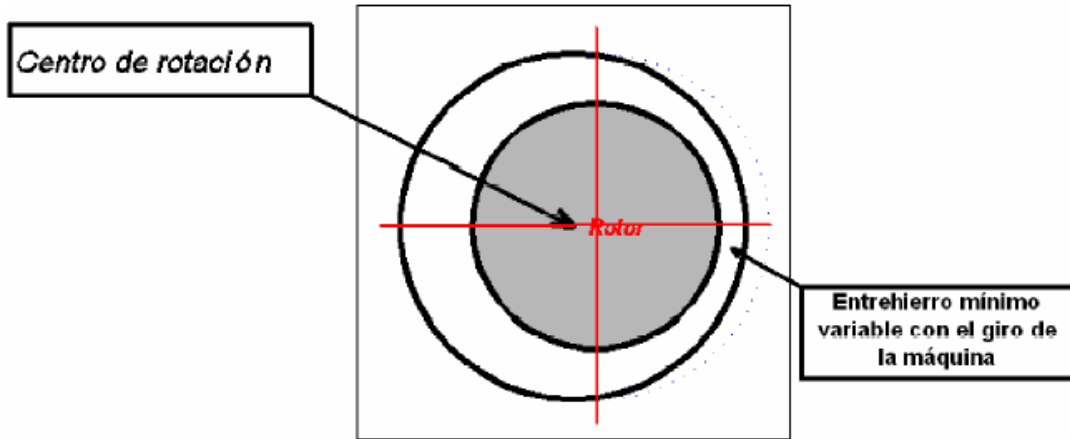
Fuente: <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/73/10/Capitulo2.pdf>.

3.3.3. Excentricidad combinada estática – dinámica.

En la práctica se presentan las dos excentricidades combinadas ya que es imposible fabricar rotores y estatores con una sección perfectamente circular, como lograr que el eje gire sin tolerancias en torno a su centro geométrico.

En la Figura 3.21 se observa cómo se consigue que el rotor presente una combinación de excentricidades superponiendo un desplazamiento hacia la derecha – excentricidad estática – con una rotación alrededor de un punto que no es el centro geométrico del rotor – excentricidad dinámica.

Figura 3.21. Forma de producirse la excentricidad estática – dinámica.



Fuente: <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/73/10/Capitulo2.pdf>.

La excentricidad puede causar daños en el motor debido al contacto que se produce entre el rotor y el estator, así como frecuencias inducidas por la combinación de excentricidades estática y dinámica en la corriente de alimentación de un motor de inducción.

3.3.4. Inducción de la falla de excentricidad en el entrehierro en los motores sometidos a prueba en el laboratorio.

Para inducir esta falla en el motor, se agregó un peso extra al rotor que se graduaba para tener una mayor severidad agregando más peso en el mismo punto; se utilizaron arandelas iguales de 4 gr cada una para inducir el peso extra.

Figura 3.22. Arandelas para inducir la falla.



Fuente: Los autores.

- Severidad 1 = 4 gr
- Severidad 2 = 8 gr
- Severidad 3 = 12 gr

3.3.5. Características de las componentes de frecuencias en la corriente cuando se presenta la falla de excentricidad en el entrehierro.

Las frecuencias de falla correspondientes a la excentricidad en el entrehierro de un motor se obtienen resolviendo la Ecuación 3.2, y dependen de la frecuencia de la fuente, del deslizamiento del motor y del número de polos del motor[1].

$$f = f_s \left(1 \pm k \left(\frac{1-s}{p} \right) \right) \quad (3.2)$$

Donde:

f : Frecuencia de falla.

f_s : Frecuencia de alimentación del motor.

s : Deslizamiento.

p : Pares de polos.

k : Valor entero (1, 2, 3...)

3.3.6. Análisis de los resultados experimentales de la falla de excentricidad en el entrehierro utilizando la herramienta MCSA.

Una vez realizado el montaje se procedió a adquirir los datos de las señales de corriente en el estator para posteriormente analizar la densidad espectral de potencia de los resultados obtenidos.

3.3.6.1. Análisis de los resultados de excentricidad en el entrehierro con una carga del 85% de la nominal.

La Tabla 3.5 presenta las frecuencias de las componentes que se esperan se generen en la corriente del motor cuando se presenta un excentricidad en el entrehierro y la condición de carga es del 85%. De acuerdo con los datos de la Tabla 2.1 el deslizamiento del motor para esta condición de funcionamiento es: $s=0,039$. Este valor de s se reemplaza en la Ecuación 3.2 con el valor de $p=2$ (dos pares de polos) obteniendo estos valores de frecuencia.

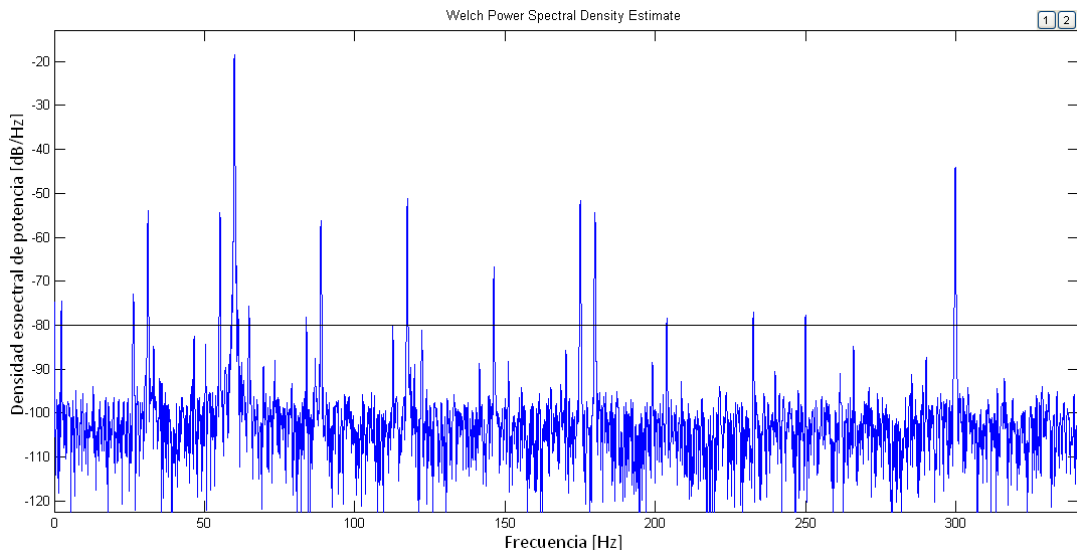
Tabla 3.5. Frecuencias generadas [Hz] por excentricidad en el entrehierro con una carga en el motor del 85% de la carga nominal y frecuencia de la red 60 [Hz].

88,78	117,56	146,35	175,13	203,9	232,7	261,48	290,26	319,05	31,2
2,43	26,35	55,13	83,91	112,7	141,4	170,26	199,05	227,83	256,6

La Figura 3.23 muestra la densidad espectral de potencia de la corriente de fase para un motor que presenta la severidad 1 de la falla de excentricidad en el entrehierro (4 gr de peso extra) y el motor funcionando al 85% de plena carga.

Comparando los resultados de la Tabla 3.5 con las componentes de frecuencia obtenidas del espectro de potencia de la Figura 3.23, se encontró que las componentes de frecuencia en 2,43Hz, 26,35 Hz, 31,2 Hz, 55,13 Hz, 83,91 Hz, 88,78 Hz, 117,56 Hz, 146,35 Hz, 175,13 Hz, 203,9 Hz y 232,7 Hz son relevantes para este caso.

**Figura 3.23. Espectro de excentricidad en el entrehierro severidad 1
carga 85 %.**



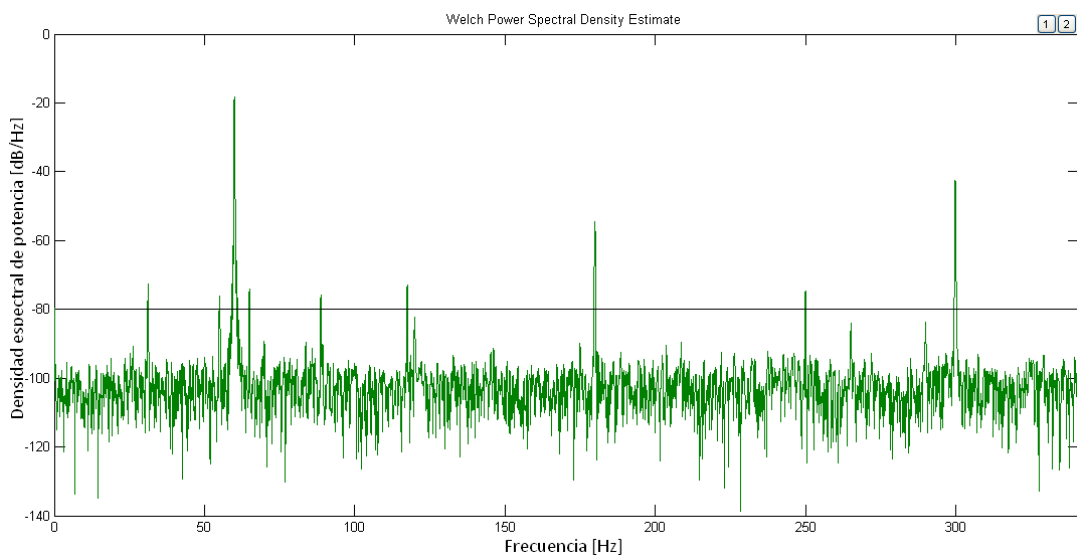
Fuente: Los autores.

La Figura 3.24 muestra la densidad espectral de potencia de la corriente de fase para un motor que presenta la severidad 2 de la falla de excentricidad

en el entrehierro (8 gr de peso extra) y el motor funcionando al 85% de plena carga.

Comparando los resultados de la Tabla 3.5 con las componentes de frecuencia obtenidas del espectro de potencia de la Figura 3.24, se encontró que las componentes de frecuencia en 2,43Hz, 31,21 Hz, 55,13 Hz, 88,78 Hz, 117,56 Hz, son relevantes para este caso.

**Figura 3.24. Espectro de excentricidad en el entrehierro severidad 2
carga 85 %.**

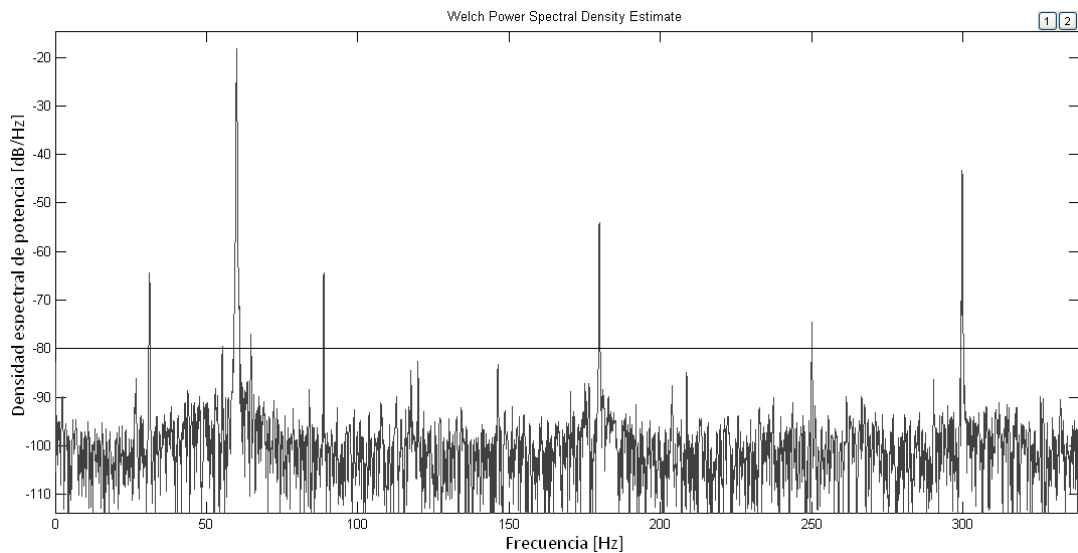


Fuente: Los autores.

La Figura 3.25 muestra la densidad espectral de potencia de la corriente de fase para un motor que presenta la severidad 3 de la falla de excentricidad en el entrehierro (12 gr de peso extra) y el motor funcionando al 85% de plena carga.

Comparando los resultados de la Tabla 3.5 con las componentes de frecuencia obtenidas del espectro de potencia de la Figura 3.25, se encontró que las componentes de frecuencia en 2,43Hz, 31,21 Hz, 55,13 Hz, 88,78 Hz, son relevantes para este caso.

**Figura 3.25. Espectro de excentricidad en el entrehierro severidad 3
carga 85 %.**



Fuente: Los autores.

3.3.6.2. Análisis de los resultados de excentricidad en el entrehierro con una carga del 65% de la nominal.

La Tabla 3.6 presenta las frecuencias de las componentes que se esperan se generen en la corriente del motor cuando se presenta un excentricidad en el entrehierro y la condición de carga es del 65%. De acuerdo con los datos de la Tabla 2.1 el deslizamiento del motor para esta condición de funcionamiento es: **$s=0,022$** . Este valor de **s** se reemplaza en la Ecuación

3.2 con el valor de $p=2$ (dos pares de polos) obteniendo estos valores de frecuencia.

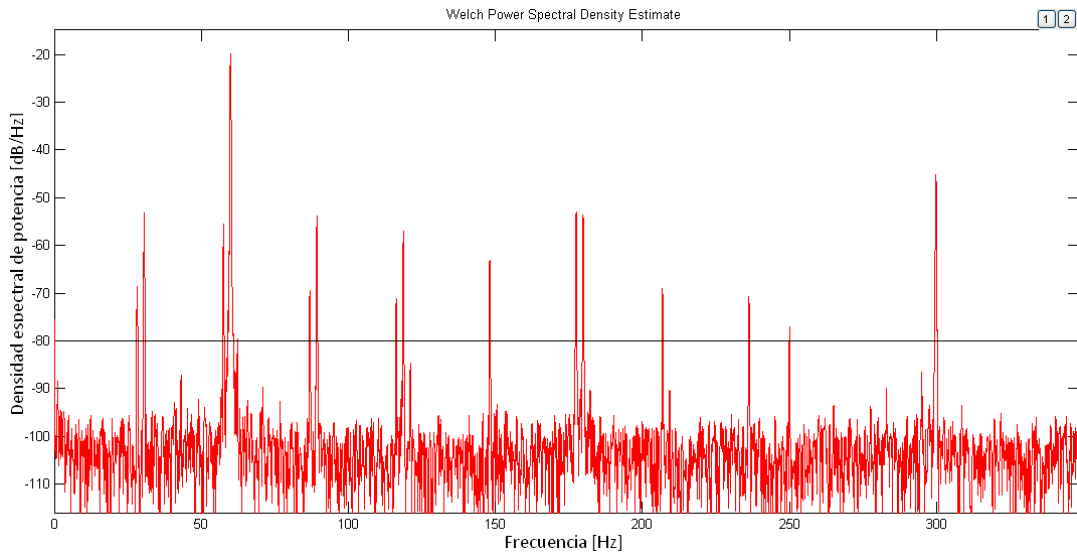
Tabla 3.6. Frecuencias generadas [Hz] por excentricidad en el entrehierro con una carga en el motor del 65% de la carga nominal y frecuencia de la red 60 [Hz].

89,38	118,76	148,15	177,53	206,9	236,3	265,68	295,06	324,4	30,61
1,23	28,15	57,53	86,91	116,3	145,6	175,06	204,45	233,8	263,21

La Figura 3.26 muestra la densidad espectral de potencia de la corriente de fase para un motor que presenta la severidad 1 de la falla de excentricidad en el entrehierro (4 gr de peso extra) y el motor funcionando al 65% de plena carga.

Comparando los resultados de la Tabla 3.6 con las componentes de frecuencia obtenidas del espectro de potencia de la Figura 3.26, se encontró que las componentes de frecuencia en 1,23Hz, 28,15 Hz, 30,61 Hz, 57,53 Hz, 86,91 Hz, 89,38 Hz, 116,3 Hz, 118,76 Hz, 148,15 Hz, 177,53 Hz, 206,9 Hz y 236,3 Hz son relevantes para este caso.

**Figura 3.26. Espectro de excentricidad en el entrehierro severidad 1
carga 65 %.**



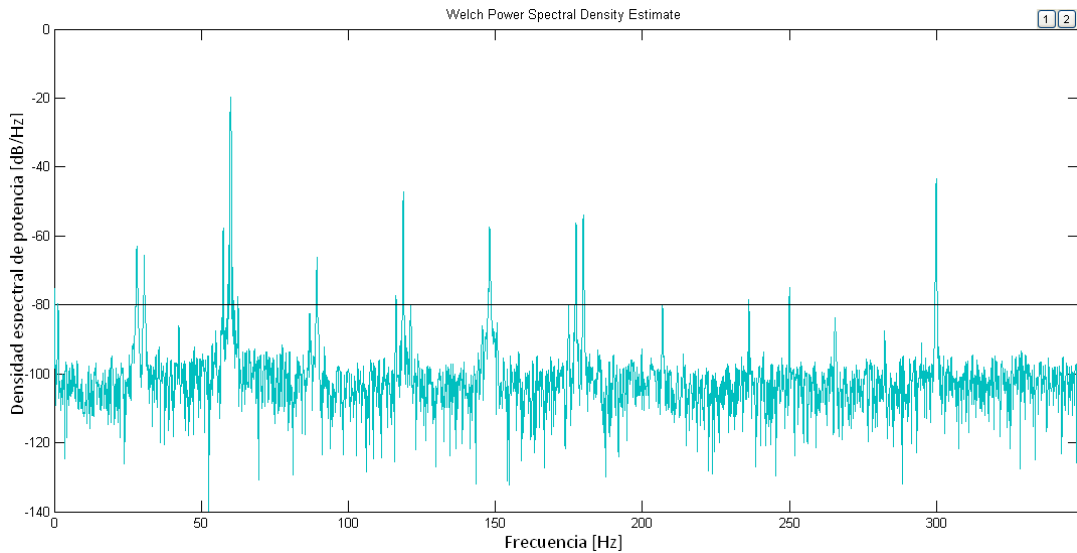
Fuente: Los autores.

La Figura 3.27 muestra la densidad espectral de potencia de la corriente de fase para un motor que presenta la severidad 2 de la falla de excentricidad en el entrehierro (8 gr de peso extra) y el motor funcionando al 65% de plena carga.

Comparando los resultados de la Tabla 3.6 con las componentes de frecuencia obtenidas del espectro de potencia de la Figura 3.27, se encontró que las componentes de frecuencia en 1,23Hz, 28,15 Hz, 30,61 Hz, 57,53 Hz, 89,38 Hz, 116,3 Hz, 118,76 Hz, 148,15 Hz, 177,53 Hz, 206,9 Hz y 236,3 Hz son relevantes para este caso.

Figura 3.27. Espectro de excentricidad en el entrehierro severidad 2

carga 65 %.



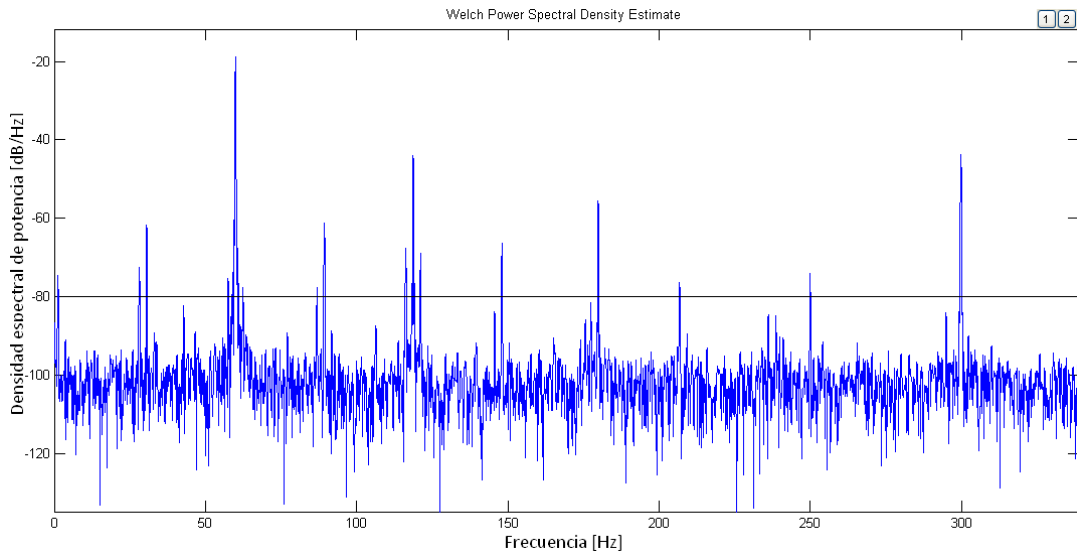
Fuente: Los autores.

La Figura 3.28 muestra la densidad espectral de potencia de la corriente de fase para un motor que presenta la severidad 3 de la falla de excentricidad en el entrehierro (12 gr de peso extra) y el motor funcionando al 65% de plena carga.

Comparando los resultados de la Tabla 3.6 con las componentes de frecuencia obtenidas del espectro de potencia de la Figura 3.28, se encontró que las componentes de frecuencia en 1,23Hz, 28,15 Hz, 30,61 Hz, 57,53 Hz, 86,91 Hz, 89,38 Hz, 116,3 Hz, 118,76 Hz, 148,15 Hz y 206,9 Hz son relevantes para este caso.

Figura 3.28. Espectro de excentricidad en el entrehierro severidad 3

carga 65 %.



Fuente: Los autores.

3.3.6.3. Análisis de los resultados de excentricidad en el entrehierro con el motor en vacío.

La Tabla 3.7 presenta las frecuencias de las componentes que se esperan se generen en la corriente del motor cuando se presenta un excentricidad en el entrehierro y el motor funcionando en vacío. De acuerdo con los datos de la Tabla 2.1 el deslizamiento del motor para esta condición de funcionamiento es: $s=0,0039$. Este valor de s se reemplaza en la Ecuación 3.2 con el valor de $p=2$ (dos pares de polos) obteniendo estos valores de frecuencia.

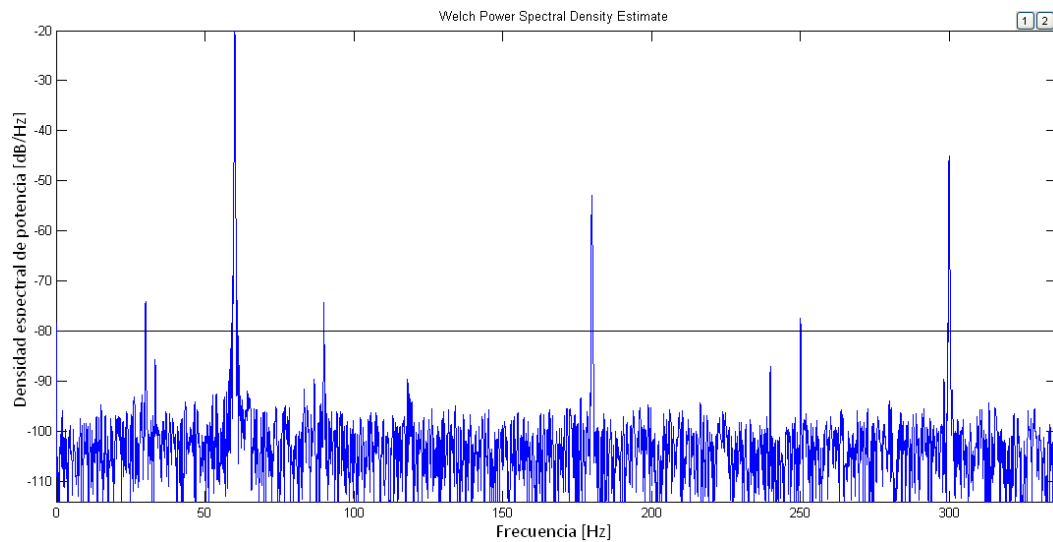
Tabla 3.7. Frecuencias generadas [Hz] por excentricidad en el entrehierro con el motor en vacío y frecuencia de la red 60 [Hz].

89,95	119,9	149,85	179,8	209,75	239,7	269,65	299,6	30,05	0,1
29,85	59,8	89,75	119,7	149,65	179,6	209,55	239,5	629,45	299,4

La Figura 3.29 muestra la densidad espectral de potencia de la corriente de fase para un motor que presenta la severidad 1 de la falla de excentricidad en el entrehierro (4 gr de peso extra) y el motor funcionando en vacío.

Comparando los resultados de la Tabla 3.7 con las componentes de frecuencia obtenidas del espectro de potencia de la Figura 3.29, se encontró que las componentes de frecuencia en 29,85 Hz, 30,05 Hz, 59,8 Hz, 89,75 Hz, 89,95 Hz, 179,6 Hz, 179,8 Hz, 299,4 Hz, 299,6 Hz y 629,45 Hz son relevantes para este caso.

Figura 3.29. Espectro de excentricidad en el entrehierro severidad 1 sin carga.

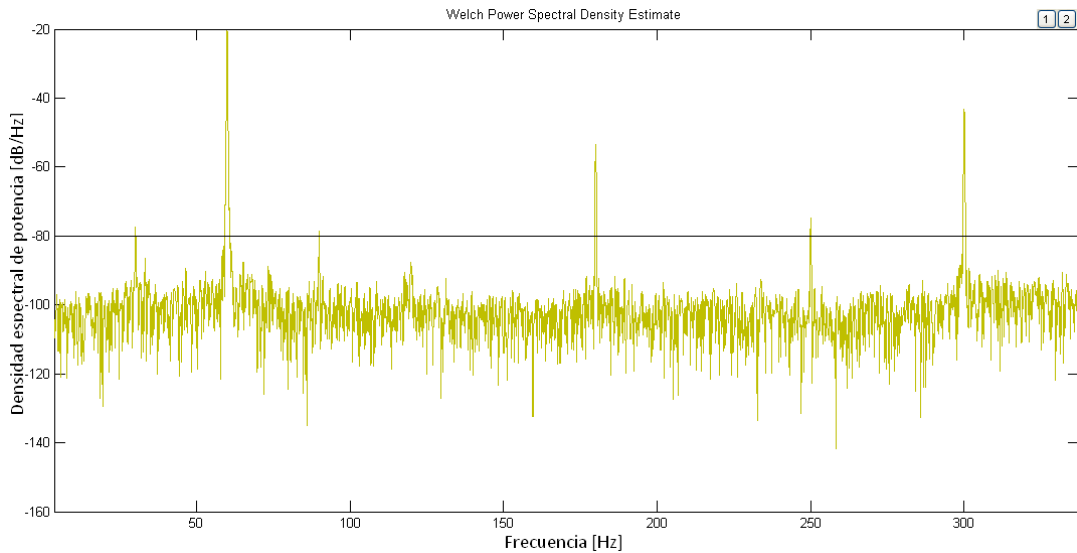


Fuente: Los autores.

La Figura 3.30 muestra la densidad espectral de potencia de la corriente de fase para un motor que presenta la severidad 2 de la falla de excentricidad en el entrehierro (8 gr de peso extra) y el motor funcionando en vacío.

Comparando los resultados de la Tabla 3.7 con las componentes de frecuencia obtenidas del espectro de potencia de la Figura 3.30, se encontró que las componentes de frecuencia en 0,1 Hz, 29,85 Hz, 30,05 Hz, 59,8 Hz, 89,75 Hz, 89,95 Hz, 179,6 Hz, 179,8 Hz, 299,4 Hz y 299,6 Hz son relevantes para este caso.

Figura 3.30. Espectro de excentricidad en el entrehierro severidad 2 sin carga.

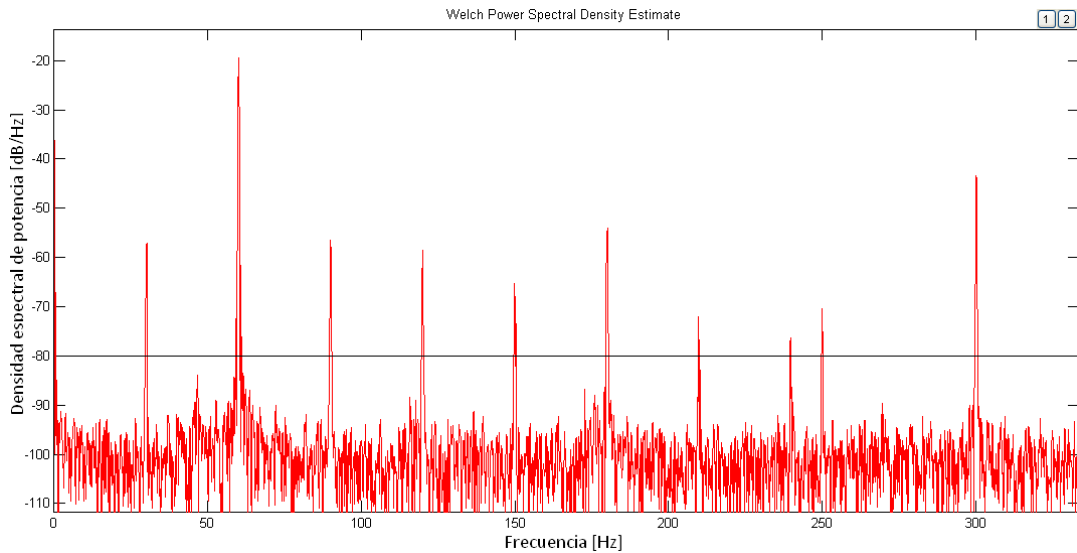


Fuente: Los autores.

La Figura 3.31 muestra la densidad espectral de potencia de la corriente de fase para un motor que presenta la severidad 3 de la falla de excentricidad en el entrehierro (12 gr de peso extra) y el motor funcionando en vacío.

Comparando los resultados de la Tabla 3.7 con las componentes de frecuencia obtenidas del espectro de potencia de la Figura 3.31, se encontró que las componentes de frecuencia en 29,85 Hz, 30,05 Hz, 89,75 Hz, 89,95 Hz, 119,7 Hz, 119,9 Hz, 149,65 Hz, 149,85 Hz, 179,6 Hz, 179,8 Hz, 209,55 Hz, 209,75 Hz, 239,5 Hz, 239,7 Hz, 299,4 Hz y 299,6 Hz son relevantes para este caso.

Figura 3.31. Espectro de excentricidad en el entrehierro severidad 3 sin carga.



Fuente: Los autores.

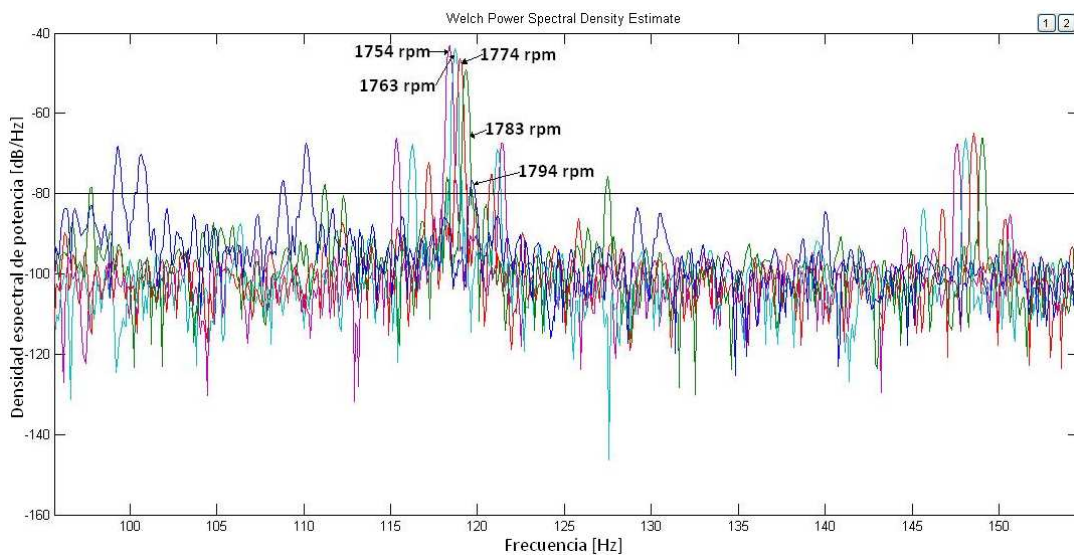
Para el tercer grado de severidad de la falla de excentricidad (12 gr) se realizó un barrido aumentando la carga del motor para observar la influencia del deslizamiento en la magnitud de las componentes, aplicándole una carga de modo que funcione a las velocidades mostradas en la Tabla 3.8. Se observaron dos tipos de comportamientos para las frecuencias cercanas a 120, uno creciente registrado en la Figura 3.32 y uno decreciente registrado en la Figura 3.33.

Tabla 3.8. Velocidad y deslizamiento del motor para barrido de carga severidad 3.

VELOCIDAD	DESLIZAMIENTO
1794	0,00333
1783	0,00944
1774	0,01444
1763	0,02055
1754	0,02555
1745	0,03055
1739	0,03388
1733	0,03722
1727	0,04055

La Figura 3.32 presenta el registro espectral de las componentes de frecuencia cercanas a 120 para a una variación de velocidad entre 1794 rpm y 1754 rpm, se observa como la magnitud de estas componentes aumentan a medida que disminuyen las rpm del motor de prueba.

Figura 3.32. Comportamiento creciente del barrido de carga severidad 3.

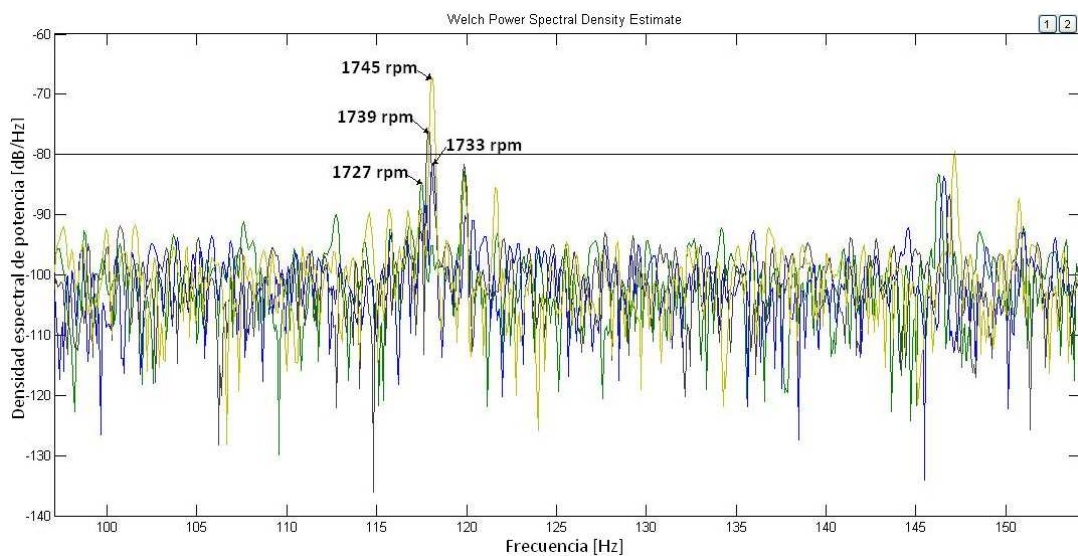


Fuente: Los autores.

La Figura 3.33 presenta el registro espectral de las componentes de frecuencia cercanas a 120 para a una variación de velocidad entre 1745 rpm y 1727 rpm, se observa como la magnitud de estas componentes disminuyen a medida que disminuyen las rpm del motor de prueba.

Figura 3.33. Comportamiento decreciente del barrido de carga severidad

3.



Fuente: Los autores.

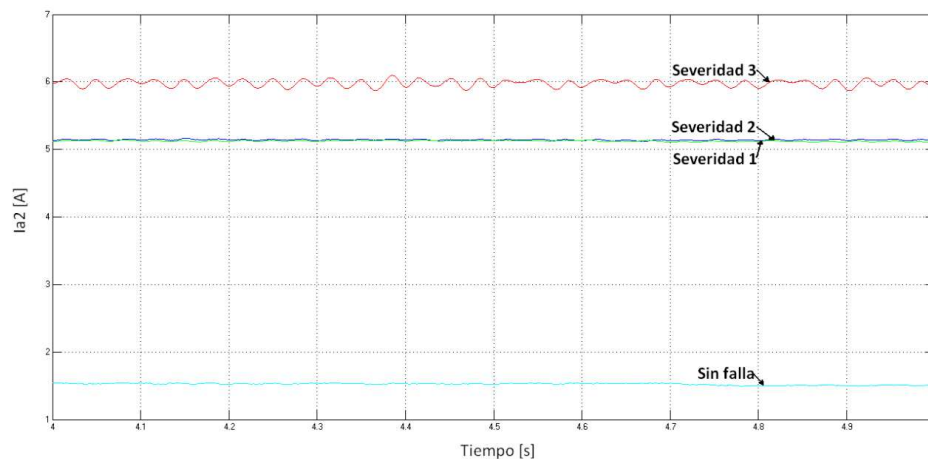
3.3.7. Análisis de los resultados experimentales de la falla de excentricidad en el entrehierro utilizando la componente de secuencia negativa.

Se decidió realizar un análisis de la componente de secuencia negativa con el fin de encontrar mejores resultados y sea posible determinar la diferenciación de la severidad de la falla para el comportamiento del motor funcionando en las diferentes condiciones de carga, ya que como se expresó

en la falla de corto circuito, la mayoría de fallas en los motores trifásicos hacen que se presenten un desbalance en las corrientes del sistema trifásico.

En la Figura 3.34 se realiza una comparación del comportamiento en el tiempo (ver Ecuación 1.6) de la componente de secuencia negativa de las corrientes, para el motor en funcionamiento normal y considerando los tres grados de severidad de la falla de excentricidad en el entrehierro cuando no hay carga en el generador acoplado al motor. En esta figura se registra un incremento de la magnitud de la corriente de la componente de secuencia negativa de alrededor del 232% para la severidad 1, del 232% para la severidad 2 y del 274% para la severidad 3.

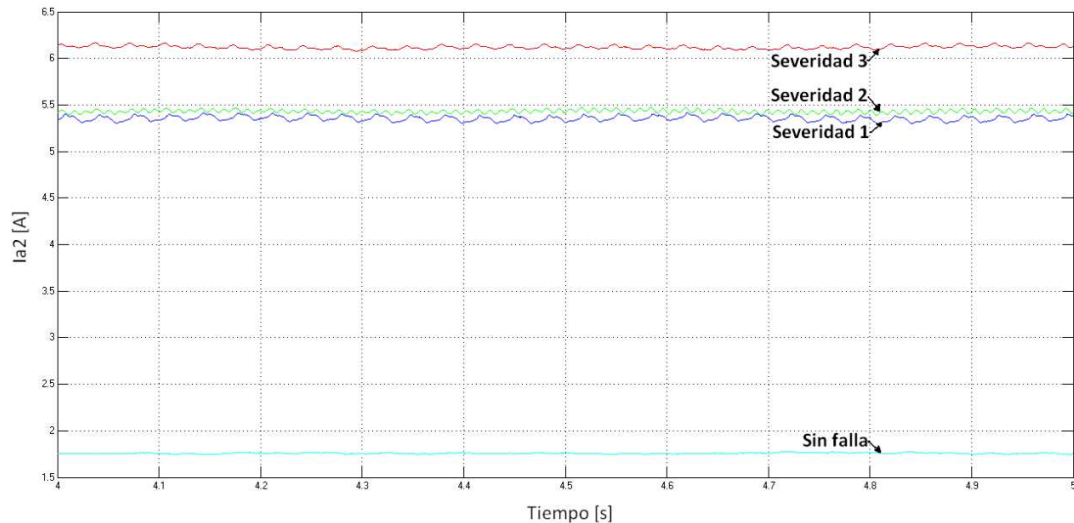
Figura 3.34. Comparación del comportamiento de la componente de secuencia negativa cuando se presenta excentricidad en el entrehierro y el motor está en vacío.



Fuente: Los autores.

En la Figura 3.35 se realiza una comparación del comportamiento en el tiempo (ver Ecuación 1.6) de la componente de secuencia negativa de las corrientes, para el motor en funcionamiento normal y considerando los tres grados de severidad de la falla de excentricidad en el entrehierro cuando la carga del motor es del 65% de la nominal. En esta figura se registra un incremento de la magnitud de la corriente de la componente de secuencia negativa de alrededor del 202% para la severidad 1, del 205% para la severidad 2 y del 247% para la severidad 3.

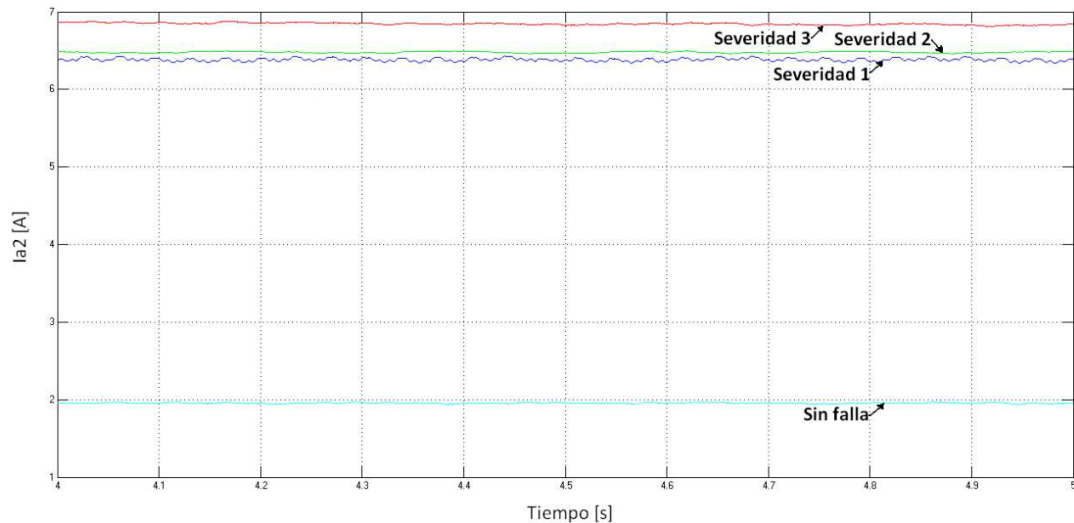
Figura 3.35. Comparación del comportamiento de la componente de secuencia negativa cuando se presenta excentricidad en el entrehierro y el motor está funcionando al 65% de la carga nominal.



Fuente: Los autores.

En la Figura 3.36 se realiza una comparación del comportamiento en el tiempo (ver Ecuación 1.6) de la componente de secuencia negativa de las corrientes, para el motor en funcionamiento normal y considerando los tres grados de severidad de la falla de excentricidad en el entrehierro cuando la carga del motor es del 85% de la nominal. En esta figura se registra un incremento de la magnitud de la corriente de la componente de secuencia negativa de alrededor del 223% para la severidad 1, del 226% para la severidad 2 y del 249% para la severidad 3.

Figura 3.36. Comparación del comportamiento de la componente de secuencia negativa cuando se presenta excentricidad en el entrehierro y el motor está funcionando al 85% de la carga nominal.



Fuente: Los autores.

3.3.8. Análisis de las herramientas de diagnóstico.

De los resultados del análisis proporcionado por la herramienta MCSA para la falla de excentricidad en el entrehierro se concluyó que resulta efectivo cuando se quiere diagnosticar la falla debido a que efectivamente se hacen considerables frecuencias correspondientes a la Ecuación 3.2 y que en algunos casos no concuerdan con armónicos de la fundamental; no se encontró una relación contundente entre la magnitud y cantidad de componentes correspondientes a la falla y el grado de excentricidad de entrehierro que sufría la máquina estudiada. Por otra parte la magnitud de la componente de secuencia negativa de la corriente presenta un incremento considerable entre un motor sin condiciones de falla y el primer grado de severidad, y aunque entre este y el segundo grado de severidad no hay grandes diferencias, para el tercer grado de excentricidad si se incrementa también, por lo que podría ser utilizada como un indicador de severidad de la falla; la forma de esta señal no tiene particularidades definidas así que analizando únicamente la componente no se lograría encontrar la falla específica.

Se lograría un diagnóstico efectivo de la excentricidad en el entrehierro de un motor identificando componentes correspondientes a la frecuencia de la falla en el espectro de la corriente del estator y analizando la magnitud de la componente secuencial negativa de la misma para tener una idea del grado de severidad de la falla.

3.4. RUPTURA DE BARRAS.

El encendido de un motor con barras rotas en el rotor, causa calor excesivo en los lugares cercanos a las barras deterioradas, esto puede propagarse a otras barras del rotor y destruir el aislante alrededor de las placas o laminaciones y además puede afectar otras partes del motor. En la Figura 3.37 se muestra la sección transversal del rotor donde se presenta esta avería.

La falla de barras rotas puede ser el resultado de esfuerzos térmicos, magnéticos o dinámicos (fuerzas centrífugas), abrasión debido a productos químicos o humedad, pulsaciones de carga, rodamientos y ciertos problemas de fabricación. Se ha hablado de la falla de barras rotas como la consecuencia de las altas corrientes de arranque que producen esfuerzos mecánicos y térmicos en el motor. Ciclos de trabajo pesados y largos tiempos de arranque aumentan la incidencia de las grietas en la región de la barra hasta terminar por juntarla con el anillo.

Si la falla no es detectada en etapas iniciales se incrementa progresivamente en severidad como consecuencia de la elevación de la temperatura alrededor de la grieta y la corriente adicional en las barras en buen estado, aumentando el esfuerzo térmico en el rotor durante el arranque.

Normalmente las barras rotas del rotor no se detectan fácilmente, se requiere de ayuda de la tecnología. Si no se identifica la ruptura de barras el proceso de mantenimiento podría sugerir el rebobinado del estator y un cambio de

rodamientos pero no en una reparación del rotor, de ser así, al volver a utilizar el motor se presentaría el mismo problema y los mismos síntomas junto con un daño en el aislamiento.

Figura 3.37. Sección transversal del rotor del motor.



Fuente: Los autores.

3.4.1. Inducción de la falla de ruptura de barras en el motor sometido a prueba en el laboratorio.

Para inducir esta falla se utilizó un taladro con broca de $\frac{1}{4}$ de pulgada (ver Figura 3.38), se hizo un agujero en la línea que demarca una barra lo suficientemente profundo para garantizar el rompimiento total de esta, posteriormente se hicieron más agujeros para establecer el grado de severidad de acuerdo al número de barras rotas (ver figuras 3.39, 3.40 y 3.41).

Figura 3.38. Rompimiento de las barras del motor.



Fuente: Los autores.

Figura 3.39. Rotor con una barra rota.



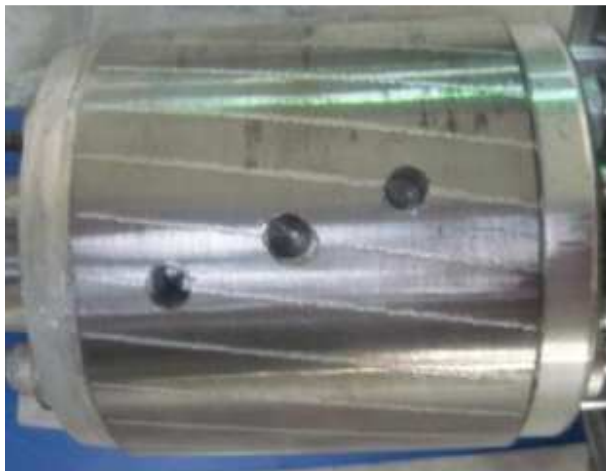
Fuente: Los autores.

Figura 3.40. Rotor con dos barras rotas.



Fuente: Los autores.

Figura 3.41. Rotor con tres barras rotas.



Fuente: Los autores.

3.4.2. Características de las componente de frecuencias en la corriente cuando se presenta la falla de ruptura de barras.

Es sabido que un bobinado trifásico simétrico de un estator alimentado con una fuente simétrica de frecuencia f_1 produce un campo magnético giratorio

a velocidad sincrónica[1]. Cualquier asimetría producirá un campo magnético que girará en sentido contrario. Si se aplican estos mismos fundamentos al rotor la primera diferencia que aparece es que la frecuencia de la fuerza electromotriz y corriente inducida en el rotor es la frecuencia de deslizamiento, o sea sf_1 .

Las corrientes en un rotor de jaula producen un campo magnético trifásico con el mismo número de polos del estator pero que gira a una frecuencia $f_2=sf_1$ respecto al estator. Si la jaula del rotor es simétrica existirá sólo un campo que gira en un sentido. Si hay asimetrías aparecerá otro campo que gira en sentido contrario a frecuencia de deslizamiento respecto al rotor.

Como resultado este campo induce una tensión y corriente en el estator a una frecuencia

$$f_{sb} = f_s(1 - 2s) \quad (3.3)$$

Ésta es la banda lateral inferior debida a barras rotas. Se produce una variación cíclica de la corriente que ocasiona una variación del par a $2sf_1$ y una oscilación en la velocidad correspondiente. Esta oscilación en la velocidad puede reducir la magnitud de la banda lateral inferior pero se induce una corriente en la banda lateral superior a una frecuencia $f_1(1 + 2s)$ en el estator debida a la oscilación del rotor.

La banda lateral superior es reforzada por el tercer armónico. Las barras rotas producen componentes de corriente inducidas en el estator a frecuencias proporcionadas por la solución de la ecuación 3.4.

$$f_{sb} = f_s(1 \pm 2ks) \quad (3.4)$$

Donde:

f_{sb} : Frecuencia de la falla.

f_s : Frecuencia de alimentación del motor.

s : Deslizamiento.

k : Valor entero (1, 2, 3...)

Estas son las componentes clásicas de frecuencia en el caso de barras rotas. La diferencia de amplitud entre los picos de la fundamental y estas bandas laterales es una indicación del buen estado del motor.

3.4.3. Análisis de los resultados experimentales de la falla ruptura de barras utilizando la herramienta MCSA.

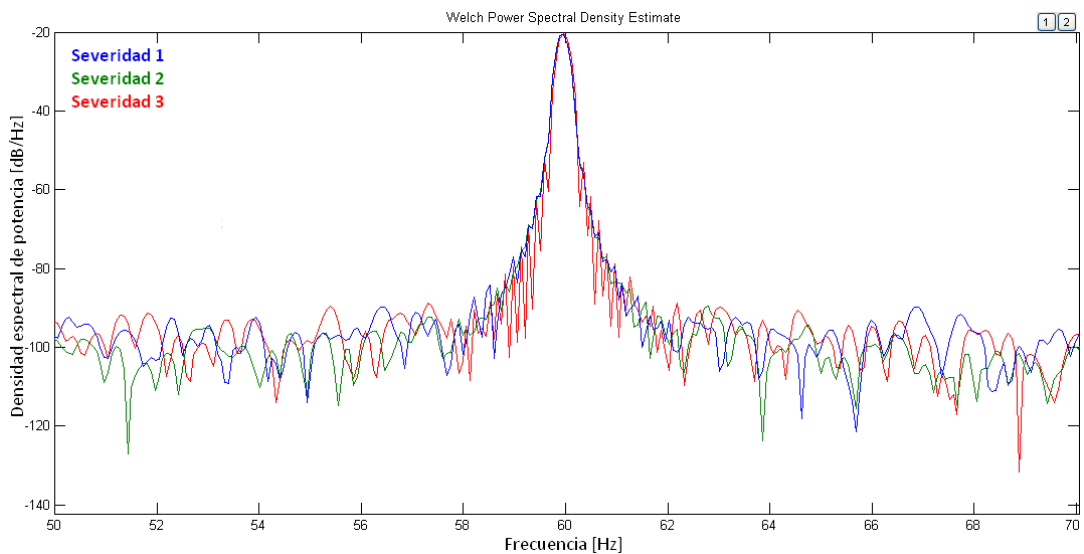
En la Tabla 3.9 se presentan los tres porcentajes de carga de motor con los que se realizaron las pruebas y para cada uno de estos los componentes resultantes en bandas laterales a la frecuencia de la fuente; las figuras 3.42, 3.43 y 3.44, corresponden a los espectros resultantes de las pruebas tomadas para un motor funcionando sin carga, al 65% y al 85% de la carga nominal respectivamente, se puede apreciar que a medida que aumenta el número de barras rotas, la magnitud de las componentes laterales a la frecuencia de la fuente se hacen mayores para el motor funcionando con carga.

Tabla 3.9. Características de la falla ruptura de barras con diferente carga.

CARGA	VELOCIDAD(rpm)	s	FRECUENCIAS CORRESPONDIENTES A BARRAS ROTAS (Hz)	
VACÍO	1797	0,0016	59,8	60,19
65% DE NOMINAL	1760	0,022	57,6	62,4
85% DE NOMINAL	1730	0,039	55,2	64,8

La Figura 3.42 corresponde a la prueba realizada con el motor funcionando al vacío; las frecuencias de falla reportadas en la Tabla 3.9 no pueden ser detectadas.

Figura 3.42. Comparación de espectros para funcionamiento sin carga.

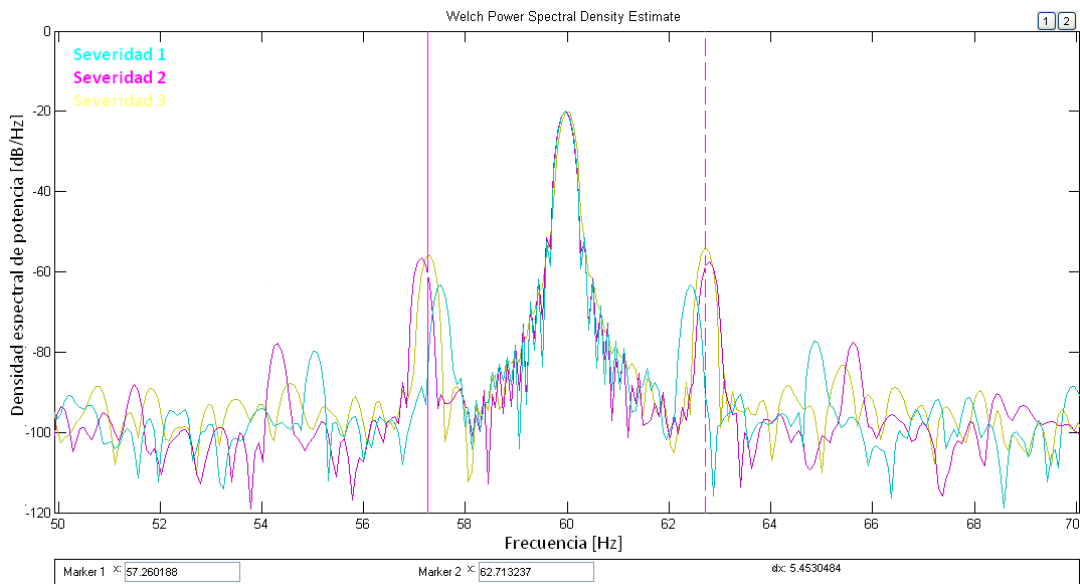


Fuente: Los autores.

La figura 3.43 muestra una comparación de la densidad espectral de potencia de la corriente de fase para los tres grados de severidad de la falla

con el motor funcionando al 65% de la carga nominal; la magnitud de las componentes de falla correspondientes a las bandas laterales (ver tabla 3.9) es de aproximadamente 44% de la frecuencia fundamental para una barra rota, 55% para dos barras y 57% para tres barras.

Figura 3.43. Comparación de espectros para funcionamiento con carga 65 %.

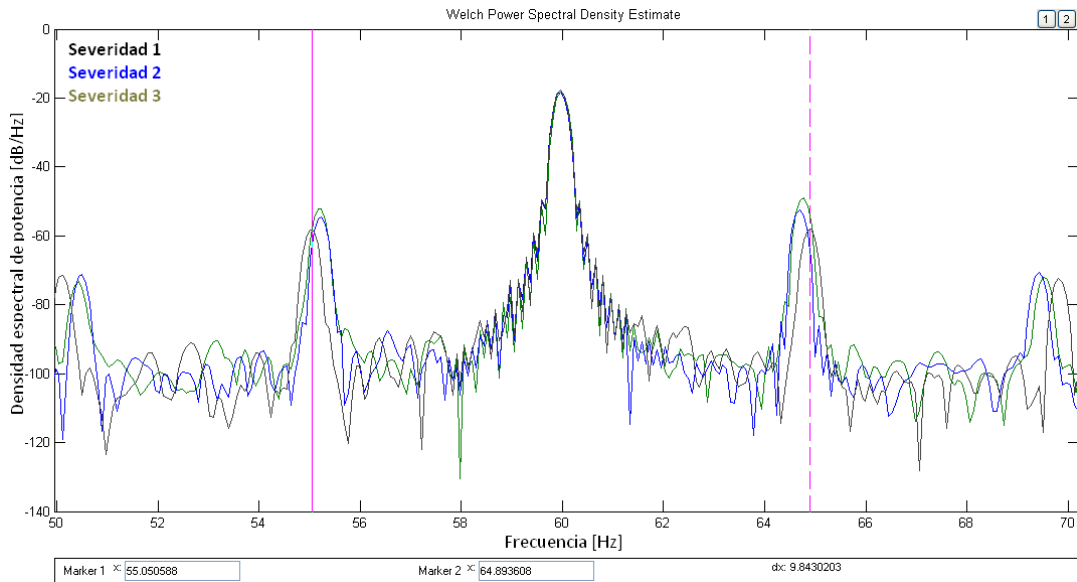


Fuente: Los autores.

La Figura 3.44 muestra una comparación de la densidad espectral de potencia de la corriente de fase para los tres grados de severidad de la falla con el motor funcionando al 85% de la carga nominal; la magnitud de las componentes de falla correspondientes a las bandas laterales (ver Tabla 3.9) es de aproximadamente 50% de la frecuencia fundamental para una barra rota, 56% para dos barras y 60% para tres barras.

Figura 3.44. Comparación de espectros para funcionamiento con carga

85 %.



Fuente: Los autores.

3.4.3.1. Análisis de los resultados de la falla ruptura de barras con una carga del 85% de la nominal.

La Tabla 3.10 presenta las frecuencias de las componentes que se esperan se generen en la corriente del motor cuando tiene barras rotas y la condición de carga es del 85%. De acuerdo con los datos de la Tabla 3.9 el deslizamiento del motor para esta condición de funcionamiento es: **$s=0,039$** . Este valor de **s** se reemplaza en la Ecuación 3.4 obteniendo estos valores de frecuencia.

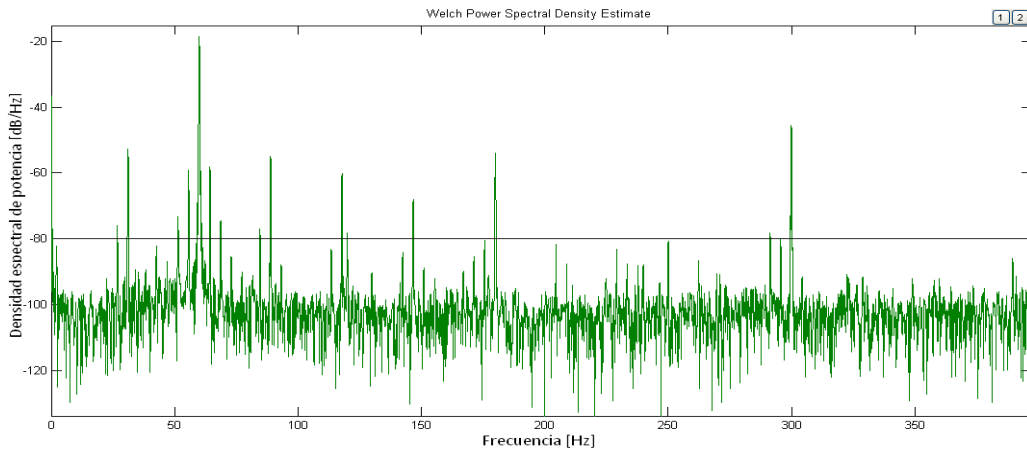
Tabla 3.10. Frecuencias generadas [Hz] en la falla de ruptura de barras con una carga en el motor del 85% de la carga nominal y frecuencia de la red 60 [Hz].

64,86	69,73	74,60	79,46	84,33	89,20	94,06	98,93	103,8	108,6
113,53	118,40	123,26	128,13	133,00	137,86	142,7	147,6	152,4	157,3
162,20	167,06	171,93	176,80	181,66	186,53	55,13	50,26	45,40	40,53
35,66	30,80	25,93							

La Figura 3.45 muestra la densidad espectral de potencia de la corriente de fase para un motor que presenta la severidad 1 de la falla de barras rotas (una barra rota) y el motor funcionando al 85% de plena carga.

Comparando los resultados de la Tabla 3.10 con las componentes de frecuencia obtenidas del espectro de potencia de la Figura 3.45, se encontró que las componentes de frecuencia en 25,93Hz, 30,8 Hz, 50,26 Hz, 55,13 Hz, 64,86 Hz, 69,73 Hz, 89,2 Hz, 118,4 Hz, 147,6 Hz, 181,66 Hz son relevantes para este caso.

Figura 3.45. Espectro de ruptura de barras severidad 1 carga 85 %.

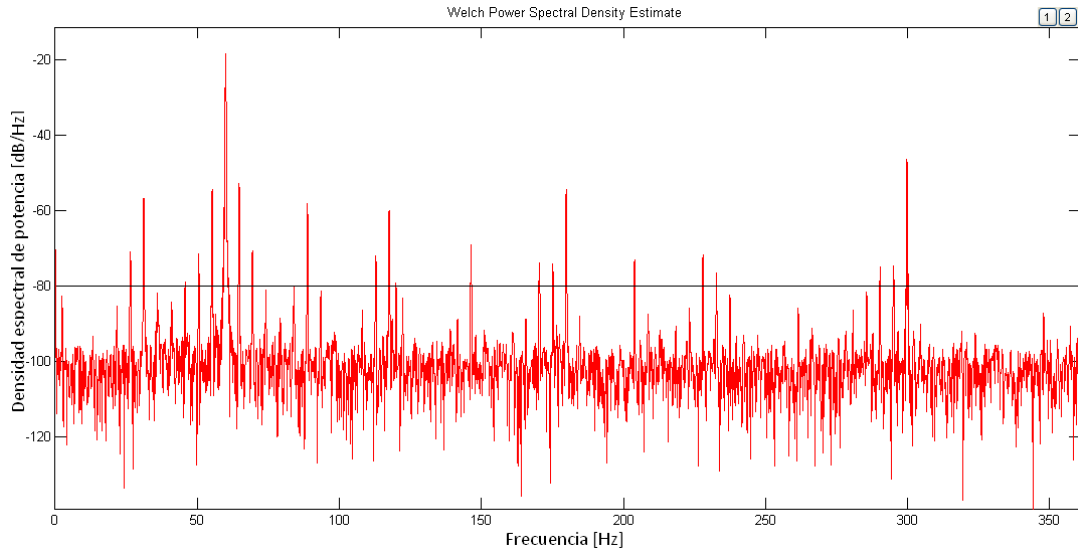


Fuente: Los autores.

La Figura 3.46 muestra la densidad espectral de potencia de la corriente de fase para un motor que presenta la severidad 2 de la falla de barras rotas (dos barras rotas) y el motor funcionando al 85% de plena carga.

Comparando los resultados de la Tabla 3.10 con las componentes de frecuencia obtenidas del espectro de potencia de la Figura 3.46, se encontró que las componentes de frecuencia en 25,93Hz, 30,8 Hz, 45,4 Hz, 50,26 Hz, 55,13 Hz, 64,86 Hz, 69,73 Hz, 89,2 Hz, 113,53 Hz, 118,4 Hz, 147,6 Hz, 171,93 Hz, 176,8 Hz y 181,66 Hz son relevantes para este caso.

Figura 3.46. Espectro de ruptura de barras severidad 2 carga 85 %.

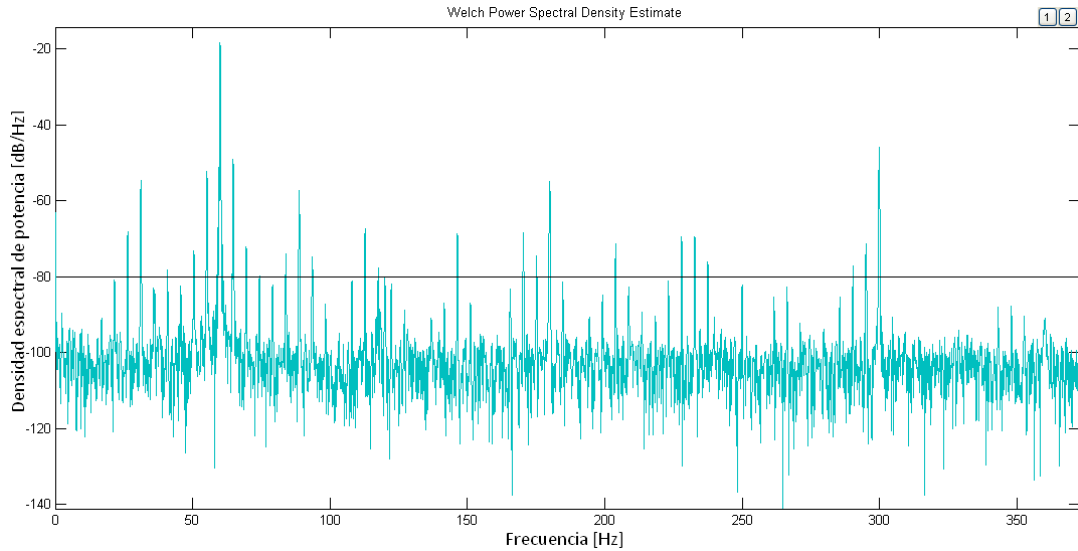


Fuente: Los autores.

La Figura 3.47 muestra la densidad espectral de potencia de la corriente de fase para un motor que presenta la severidad 3 de la falla de barras rotas (tres barras rotas) y el motor funcionando al 85% de plena carga.

Comparando los resultados de la Tabla 3.10 con las componentes de frecuencia obtenidas del espectro de potencia de la Figura 3.47, se encontró que las componentes de frecuencia en 25,93Hz, 30,8 Hz, 45,4 Hz, 50,26 Hz, 55,13 Hz, 64,86 Hz, 69,73 Hz, 74,6 Hz, 84,33 Hz, 89,2 Hz, 94,06 Hz, 113,53 Hz, 118,4 Hz, 147,6 Hz, 171,93 Hz, 176,8 Hz y 181,66 Hz son relevantes para este caso.

Figura 3.47. Espectro de ruptura de barras severidad 3 carga 85 %.



Fuente: Los autores.

3.4.3.2. Análisis de los resultados de la falla ruptura de barras con una carga del 65% de la nominal.

La Tabla 3.11 presenta las frecuencias de las componentes que se esperan se generen en la corriente del motor cuando tiene barras rotas y la condición de carga es del 65%. De acuerdo con los datos de la Tabla 3.9 el deslizamiento del motor para esta condición de funcionamiento es: **$s=0,022$** . Este valor de **s** se reemplaza en la Ecuación 3.4 obteniendo estos valores de frecuencia.

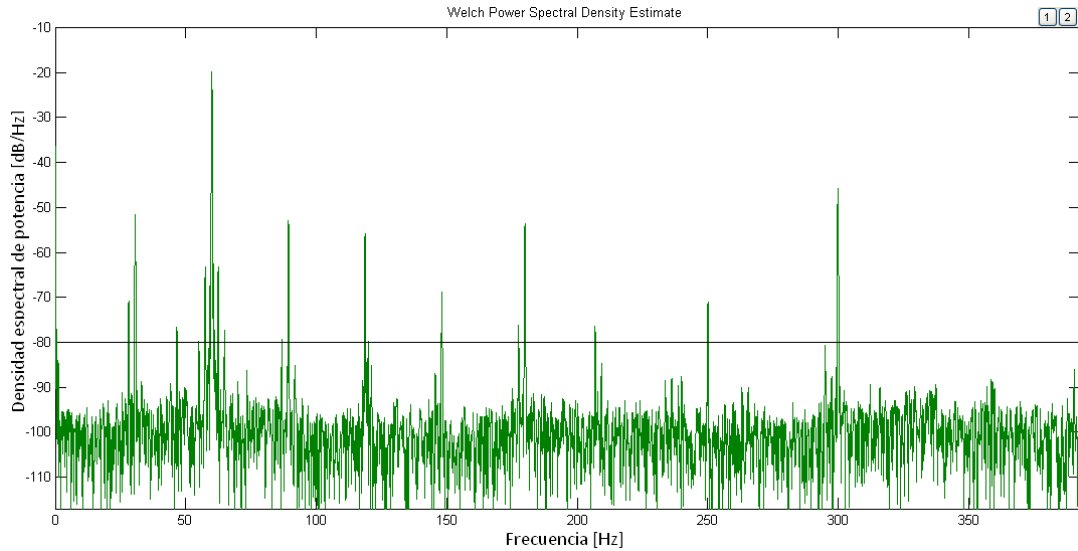
Tabla 3.11 Frecuencias generadas [Hz] en la falla de ruptura de barras con una carga en el motor del 65% de la carga nominal y frecuencia de la red 60 [Hz].

62,46	64,93	67,40	69,86	82,20	84,66	87,13	89,60	92,06	94,53
116,73	119,20	121,66	124,1	146,33	148,80	151,2	153,7	175,9	178,40
180,86	183,33	57,53	55,06	52,60	50,13	32,86	30,40	27,93	25,46

La Figura 3.48 muestra la densidad espectral de potencia de la corriente de fase para un motor que presenta la severidad 1 de la falla de barras rotas (una barra rota) y el motor funcionando al 65% de plena carga.

Comparando los resultados de la Tabla 3.11 con las componentes de frecuencia obtenidas del espectro de potencia de la Figura 3.48, se encontró que las componentes de frecuencia en 27,93Hz, 30,4 Hz, 57,53 Hz, 62,46 Hz, 87,13 Hz, 89,60 Hz, 119,2 Hz, 148,8 Hz y 178,4 Hz son relevantes para este caso.

Figura 3.48. Espectro de ruptura de barras severidad 1 carga 65 %.

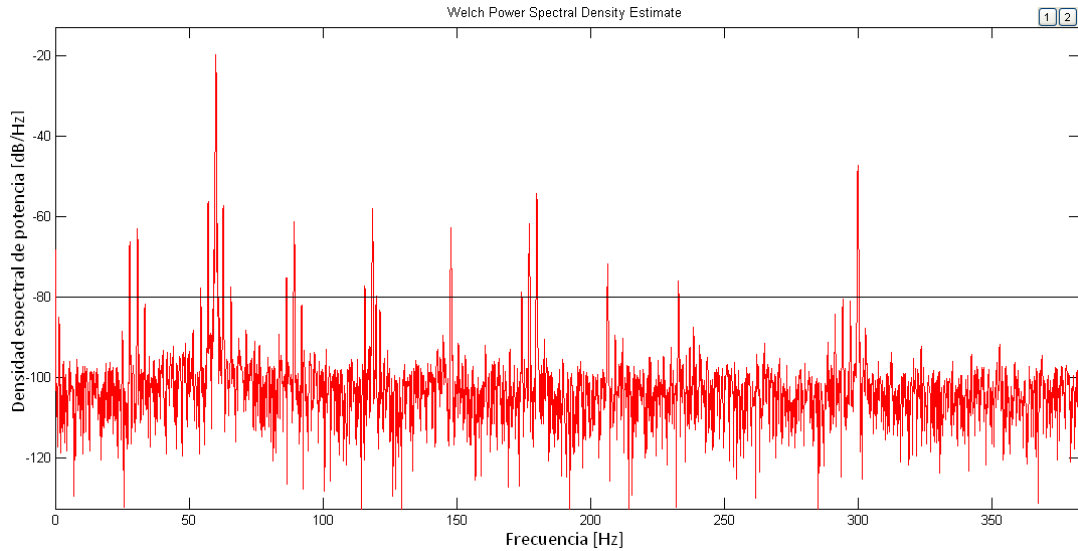


Fuente: Los autores.

La Figura 3.49 muestra la densidad espectral de potencia de la corriente de fase para un motor que presenta la severidad 2 de la falla de barras rotas (dos barras rotas) y el motor funcionando al 65% de plena carga.

Comparando los resultados de la Tabla 3.11 con las componentes de frecuencia obtenidas del espectro de potencia de la Figura 3.49, se encontró que las componentes de frecuencia en 27,93Hz, 30,4 Hz, 55,06 Hz, 57,53 Hz, 87,13 Hz, 89,60 Hz, 116,73 Hz, 119,2 Hz, 146,3 Hz, 175,9 Hz, 178,4 Hz y 180,86 Hz son relevantes para este caso,

Figura 3.49. Espectro de ruptura de barras severidad 2 carga 65 %.

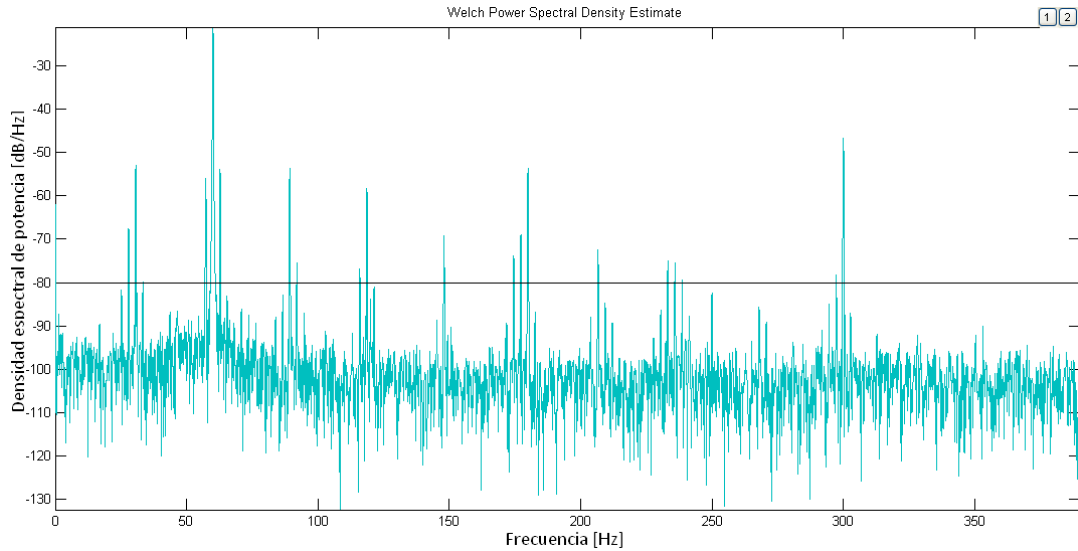


Fuente: Los autores.

La Figura 3.50 muestra la densidad espectral de potencia de la corriente de fase para un motor que presenta la severidad 3 de la falla de barras rotas (tres barras rotas) y el motor funcionando al 65% de plena carga.

Comparando los resultados de la Tabla 3.11 con las componentes de frecuencia obtenidas del espectro de potencia de la Figura 3.50, se encontró que las componentes de frecuencia en 27,93Hz, 30,4 Hz, 32,86 Hz, 57,53 Hz, 89,60 Hz, 92,06 Hz, 116,73 Hz, 119,2 Hz, 148,8 Hz, 175,9 Hz, 178,4 Hz y 180,86 Hz son relevantes para este caso.

Figura 3.50. Espectro de ruptura de barras severidad 3 carga 65 %.

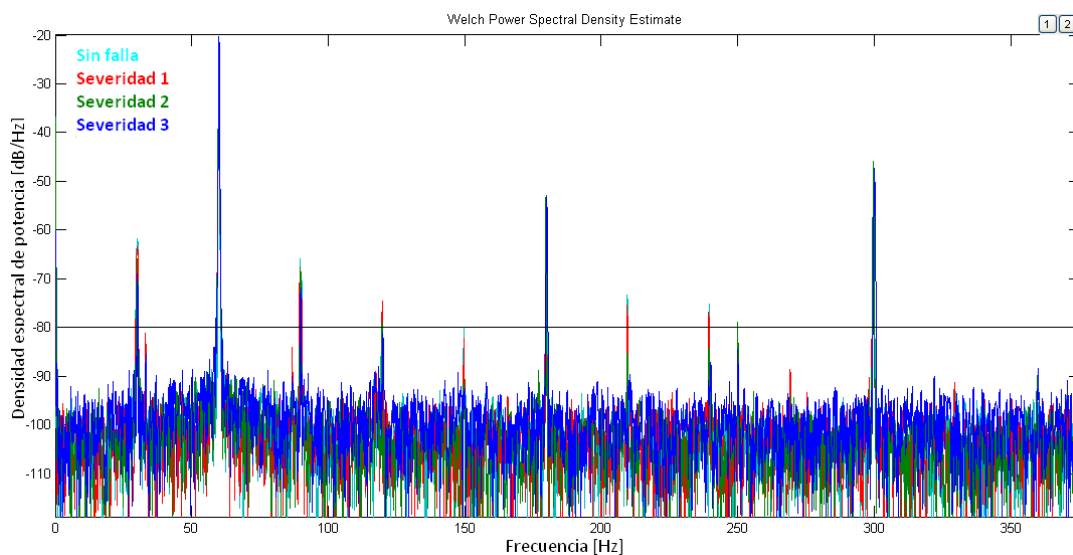


Fuente: Los autores.

3.4.3.3. Análisis de los resultados de la falla ruptura de barras con el motor en vacío.

Cuando el motor funciona al vacío las frecuencias de falla obtenidas mediante la solución de la Ecuación 3.4 para $s=0,0016$ son muy ajustadas y se ubican próximas a la componente fundamental por lo que resulta difícil su identificación; se observaron variaciones en las frecuencias de 30 Hz, 90 Hz, 120 Hz, 150 Hz y 210 Hz entre otras, que corresponden también a componentes apreciables en la densidad espectral de potencia de la corriente de fase de un motor sin falla, como se puede apreciar en la Figura 3.51.

Figura 3.51. Espectro de ruptura de barras prueba sin carga.



Fuente: Los autores.

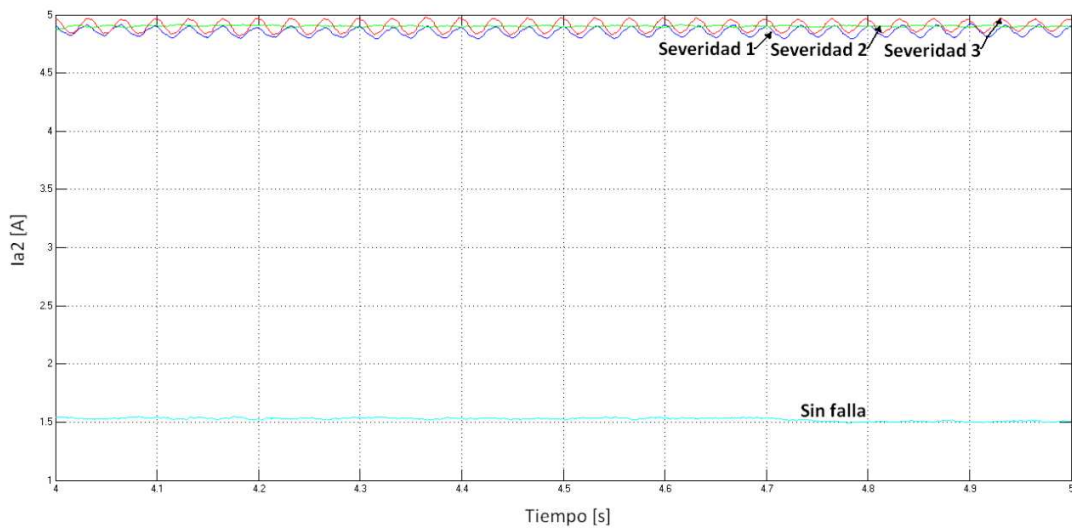
3.4.4. Análisis de los resultados experimentales de la falla ruptura de barras utilizando la componente de secuencia negativa.

Se decidió realizar un análisis de la componente secuencial negativa para las diferentes condiciones de carga con el fin de corroborar los datos obtenidos anteriormente y determinar si es posible la diferenciación de la severidad de la falla para el comportamiento del motor sin carga.

En la Figura 3.52 se realiza una comparación del comportamiento en el tiempo (ver Ecuación 1.6) de la componente de secuencia negativa de las corrientes, para el motor en funcionamiento normal y considerando los tres grados de severidad de la falla de barras rotas cuando no hay carga en el generador acoplado al motor. En esta figura se aprecia una forma ondulada en las señales y registra un incremento de la magnitud de la corriente de la

componente de secuencia negativa de alrededor de 212% para los tres grados de severidad.

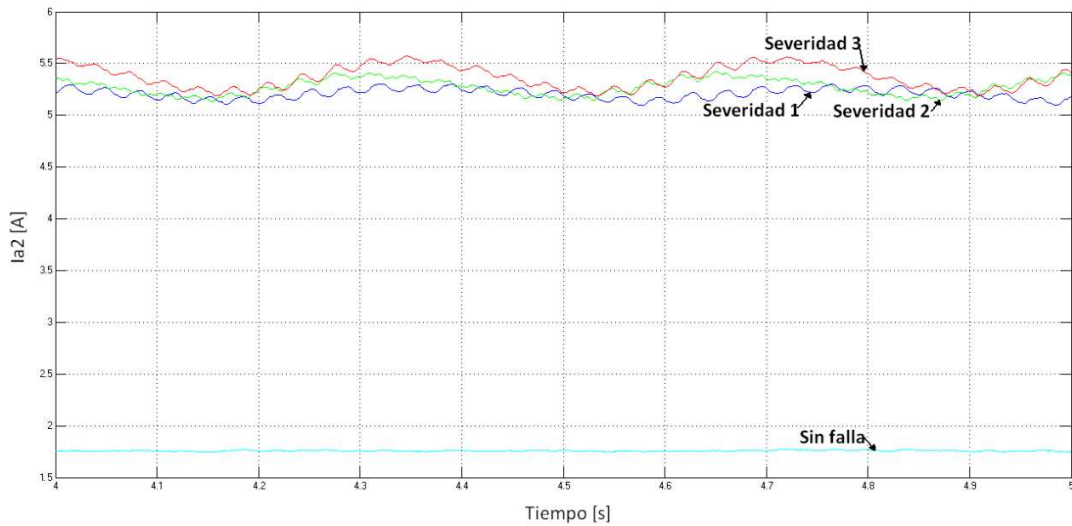
Figura 3.52. Comparación del comportamiento de la componente de secuencia negativa cuando se presenta la falla ruptura de barras y el motor está en vacío.



Fuente: los autores.

La comparación entre las componentes de secuencia negativa de las corrientes del sistema trifásico para la falla de barras rotas cuando la carga del motor es del 65% de la nominal se muestra en la Figura 3.53. En esta figura se aprecia una envolvente además de las ondulaciones en las señales y se registra un incremento de la magnitud de la corriente de la componente de secuencia negativa de alrededor 255% para los tres grados de severidad.

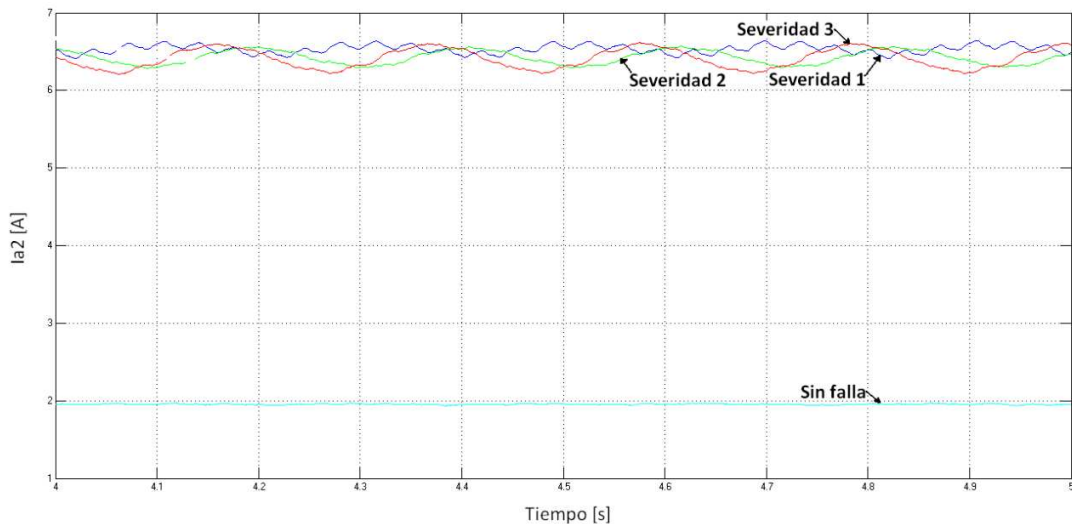
Figura 3.53. Comparación del comportamiento de la componente de secuencia negativa cuando se presenta la falla ruptura de barras y el motor está funcionando al 65 % de la carga nominal.



Fuente: los autores.

La Figura 3.54 muestra la comparación del comportamiento en el tiempo (ver Ecuación 1.6) de la componente de secuencia negativa de las corrientes, para el motor en funcionamiento normal y considerando los tres grados de severidad de la falla de barras rotas considerando que la carga del motor es del 85% de la nominal. En esta figura se aprecia una envolvente además de las ondulaciones en las señales y se registra un incremento de la magnitud de la corriente de la componente de secuencia negativa de alrededor de 170% para los tres grados de severidad.

Figura 3.54. Comparación del comportamiento de la componente de secuencia negativa cuando se presenta la falla ruptura de barras y el motor está funcionando al 85 % de la carga nominal.



Fuente: los autores.

En los resultados plasmados en las figuras 3.52 a 3.54 se registran variaciones en la forma de la componente de secuencia negativa de las corrientes presentándose formas onduladas que tienen relación con el porcentaje de carga a la que está operando el motor.

3.4.5. Análisis de las herramientas de diagnóstico.

Los resultados del análisis proporcionado por la herramienta MCSA para la falla de barras rotas son satisfactorios debido a que una cantidad considerable de componentes de frecuencia que se esperan como consecuencia de esta fallase hicieron relevantes en el espectro y se aprecian diferencias importantes con el espectro de la señal cuando no hay fallas en el

motor. De acuerdo a esto se podría diagnosticar el tipo de falla que presenta el motor; además a medida que aumenta la severidad de la falla (número de barras rotas), la cantidad de componentes se considerables aumentó, por lo que la cantidad de componentes apreciables se puede considerar como un indicador del grado de severidad; también se destacó que la magnitud de las componentes de falla que se encuentran continuas a la frecuencia fundamental aumenta a medida con relación al aumento del grado de severidad de la falla. Por otra parte, la forma de la magnitud de la componente de secuencia negativa presenta formas onduladas (con envolventes para las pruebas al motor en condiciones de carga) para la falla de barras rotas que no fueron observadas en el registro de otras fallas estudiadas por lo que se podría diagnosticar la falla con un análisis de esta.

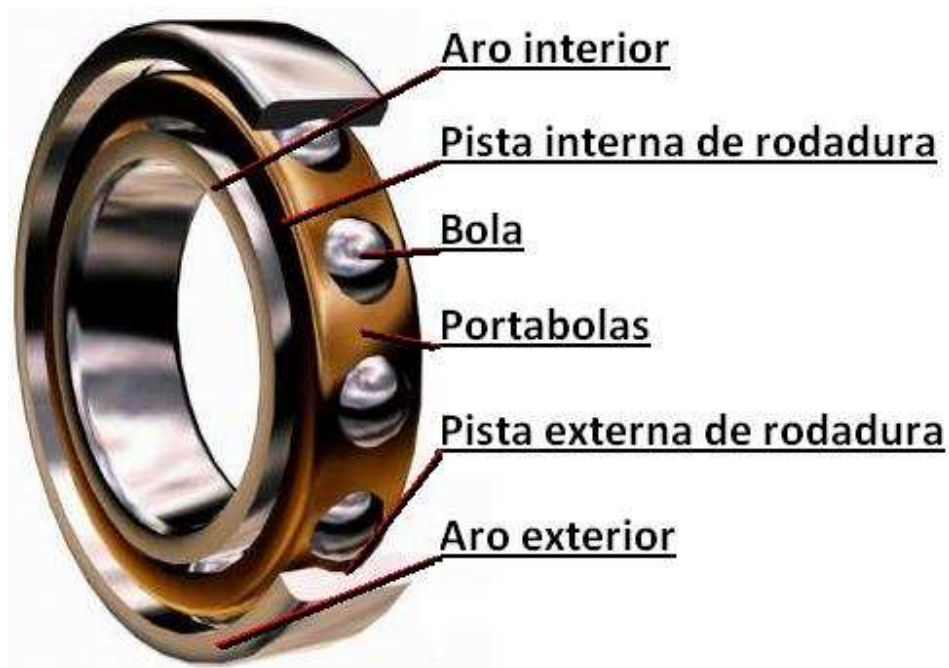
3.5. FALLA EN LA PISTA EXTERNA DEI RODAMIENTO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN.

El rodamiento es el conjunto de esferas que se encuentran unidas por un anillo interior y uno exterior, el rodamiento produce movimiento al objeto que se coloque sobre éste y se mueve sobre el cual se apoya[11].

Los rodamientos se denominan también cojinetes no hidrodinámicos. Teóricamente, estos cojinetes no necesitan lubricación, ya que las bolas o rodillos ruedan sin deslizamiento dentro de una pista. Sin embargo, como la velocidad de giro del eje no es nunca exactamente constante, las pequeñas

aceleraciones producidas por las fluctuaciones de velocidad producen un deslizamiento relativo entre bola y pista. Este deslizamiento genera calor. Para disminuir esta fricción se lubrica el rodamiento creando una película de lubricante entre las bolas y la pista de rodadura. Las bolas, en su trayectoria circular, están sometidas alternativamente a cargas y descargas, lo que produce deformaciones alternantes, que a su vez provocan un calor de histéresis que habrá que eliminar. Dependiendo de estas cargas, el cojinete se lubricará simplemente por grasa o por baño de aceite, que tiene mayor capacidad de disipación de calor.

Figura 3.55. Partes de un rodamiento de bolas.



Fuente: <http://spanish.alibaba.com/product-gs/skf-single-row-angular-contact-ball-bearing-329931522.html>.

Los rodamientos son elementos normalizados en dimensiones y tolerancias. Esta normalización facilita el intercambio, pudiendo disponer repuestos de diferentes fabricantes, asegurando un correcto montaje sin necesidad de un ajuste posterior de los mismos.

Los rodamientos como se muestra en la Figura 3.55 están constituidos por dos o más aros concéntricos, uno de los cuales va alojado en el soporte (aro exterior) y el otro va montado en el árbol (aro interior). Entre los dos aros se disponen los elementos rodantes (bolas, rodillos cilíndricos, rodillos cónicos, rodillos esféricos, etc.), los cuales ruedan sobre las pistas de rodadura practicadas en los aros, permitiendo la movilidad de la parte giratoria respecto a la fija.

Para conseguir que guarden la debida distancia entre sí, los elementos rodantes van alojados en una pieza de chapa estampada, denominada, jaula porta bolas o portar rodillos.

Los rodamientos se construyen en acero de adecuadas características de dureza y tenacidad, permitiendo soportar, con muy poco desgaste, millones de revoluciones, sometidos a cargas y esfuerzos, a veces, concentrados y localizados.

La lubricación varía con la velocidad y el tamaño de los rodamientos, efectuándose con aceite o grasa consistente.

3.5.1. Fallas comunes en rodamientos.

Existen un sin número de factores que pueden afectar la estructura física de los rodamientos y por consiguiente el funcionamiento que realizan dentro de la máquina de inducción, estas fallas se pueden dar en los elementos que giran, la pista interna y en el caso estudiado, en la pista externa, algunas fallas muy comunes en rodamientos [12] se describen a continuación.

3.5.1.1. Fatiga superficial.

Se desarrolla un agrietamiento en las superficies con posterior pérdida de material, el cual puede ser poco profundo (micropicado) o generar descascaramiento de áreas grandes y profundas (macropicado).

3.5.1.2. Descarga eléctrica.

Por paso de corriente eléctrica AC o DC a través del rodamiento se generan arcos eléctricos entre los elementos rodantes, las pistas y las jaulas, que erosionan las superficies debido a fusión a pequeña escala, se pueden generar patrones de estrías o cráteres profundos.

3.5.1.3. Desgaste abrasivo.

Se presenta en servicio la generación de un rayado abrasivo sobre las superficies de rodadura y también sobre las jaulas, indicando que se está perdiendo material por abrasión.

3.5.1.4. Desgaste adhesivo.

Se presenta en servicio pérdida de materia por contacto metal-metal entre las partes en rodamiento incluyendo las jaulas, producto de la pérdida parcial o

total de la película lubricante. Si la pérdida es total se eleva fuertemente la temperatura quemando el lubricante, oxidándose las partes o incluso fundiéndose.

3.5.1.5. Corrosión.

Se genera ataque corrosivo sobre las superficies de rodadura o las jaulas, por la acción del lubricante o de otro fluido que entra en contacto con el rodamiento, generándose daño superficial y depósitos.

3.5.1.6. Indentación.

Se trata de generación de cráteres o hendiduras sobre las superficies de rodadura, producto de la deformación plástica derivada de fuerzas de contacto excesivas entre los elementos del rodamiento y/o por presencia de partículas contaminantes entre ellos.

3.5.1.7. Fractura.

Las pistas o las jaulas presentan agrietamiento o fractura en montaje o servicio, llevando algunas veces a destrucción total del rodamiento.

3.5.1.8. Ludimiento.

Se presentan depósitos oscuros en las superficies de apoyo con el eje o su alojamiento, indicando que en servicio se dieron pequeños movimientos oscilantes entre las partes (desgaste y/o oxidación).

3.5.1.9. Rodadura irregular.

El rodamiento presenta un camino oblicuo en rodadura de sus elementos sobre las pistas.

3.5.2.Inducción de la falla en la pista externa del rodamiento del motor sometido a prueba en el laboratorio.

La falla que se estudia se indujo sobre la pista externa del rodamiento de la máquina de inducción tipo indentación, esta falla se generó usando una fresa odontológica diamantada 4138G, ISO 806 316 199 534 018, 450000 rpm Max, la cual está compuesta por diamante y acero inoxidable y su respectivo foredom serie Sr 1/6 HP 18000 rpm. Este elemento se escogió teniendo en cuenta la dureza que tiene el material del rodamiento, y se realizó un rayado más profundo cada vez que se requería un mayor grado de severidad. En la Figura 3.56 se muestra como se induce la falla en la pista externa del rodamiento.

Adicionalmente, en las figuras 3.57, 3.58 y 3.59 se muestran el rodamiento con rayado superficial, rayado moderado y rayado profundo, respectivamente, las cuales equivalen a los grados de severidad con los que se trabajaron para realizar las pruebas experimentales:

- Severidad 1: rayado superficial.
- Severidad 2: rayado moderado.
- Severidad 3: rayado profundo.

Figura 3.56. Inducción de la falla en la pista externa del rodamiento.



Fuente: Los autores.

Figura 3.57. Falla rayado superficial.



Fuente: Los autores.

Figura 3.58. Falla rayado moderado.



Fuente: Los autores.

Figura 3.59. Falla rayado profundo.



Fuente: Los autores.

3.5.3. Características de las componente de frecuencias en la corriente cuando se presenta la falla en la pista externa del rodamiento.

Las investigaciones realizadas (Silva, Marquez Cardoso, 2005); SIEMENS A&D SD CS ServiceCooperation, 1995; FAG SOUTH EAST ASIA PTE LTD, 2002) permiten caracterizar a las fallas en los rodamientos conociendo el estado de cuatro de sus elementos componentes[13]. Para ello se emplean cuatro ecuaciones, cada una de las cuales dan como resultado una frecuencia característica cuya amplitud se incrementa con el incremento de la magnitud de una falla presente en dichos elementos.

Estas ecuaciones dependen de la geometría del rodamiento, el número de bolas o rodillos y la velocidad de rotación del rodamiento. Cabe destacar que estas ecuaciones se pueden aplicar tanto a rodamientos con elementos cilíndricos (rodillos) como a bolas.

A continuación se presentan las ecuaciones correspondientes a las frecuencias características de cada uno de los elementos del rodamiento y la zona a la que se asocian (ver Figura 3.60).

- Pista interna $F_{fpi} = \frac{N_b}{2} n \left(1 + \frac{D_b \cos(\beta)}{D_c}\right)$ (3.5)

- Pista externa $F_{fpe} = \frac{N_b}{2} n \left(1 - \frac{D_b \cos(\beta)}{D_c}\right)$ (3.6)

- Bola $F_{fb} = \frac{D_c}{D_b^2} n \left(1 - \left(\frac{D_b \cos(\beta)}{D_c}\right)^2\right)$ (3.7)

- Jaula $F_{fpe} = \frac{n}{2} \left(1 - \frac{D_b \cos(\beta)}{D_c}\right)$ (3.8)

Donde:

N_b : Numero de bolas o rodillos.

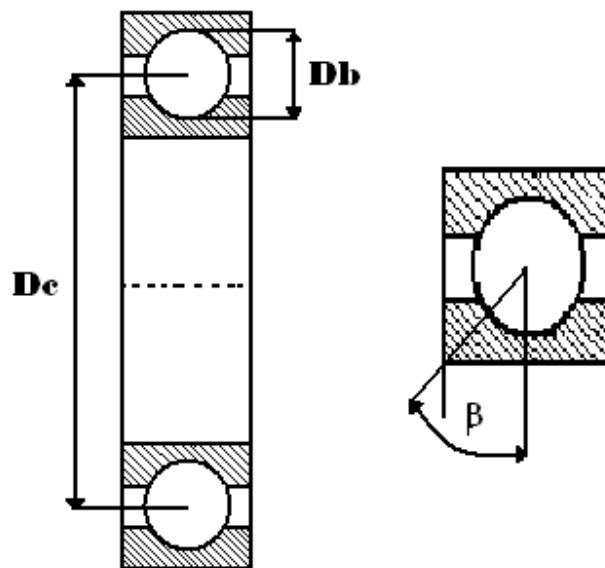
D_b : Diametro de bola o rodillo [mm].

D_c : Diametro medio entre las pistas [mm].

β : Angulo de contacto (Angulo entre la línea que une los puntos de contacto de las bolas de acero con los anillos interior y exterior con la línea que define la dirección radial).

n : Velocidad mecánica del rotor [Hz].

Figura3.60. Esquema del rodamiento de bolas.



Fuente: los autores.

Se considera que la presencia de ciertas excentricidades o defectos en los rodamientos de la máquina, producen, durante la rotación de la misma, cambios en las impedancias características de la máquina con la

consecuente aparición en el espectro de corriente, de señales a frecuencias dadas por:

$$F = f_s \pm (k f_n) \quad (3.9)$$

Donde:

f_s : Frecuencia de alimentación del motor [Hz]

f_n : Frecuencia dada por las ecuaciones 8.1 a 8.4 [Hz]

k : Valor entero (1, 2, 3...)

3.5.4. Análisis de los resultados experimentales de la falla en la pista externa del rodamiento utilizando la herramienta MCSA.

Para el caso particular de este proyecto, se escogió inducir la falla en la pista externa del rodamiento, esto debido a la comodidad para la realización de la falla, por ello se trabajó con la Ecuación 3.6 aplicada a la ecuación 3.9, para el caso de los motores usados en las pruebas se tienen las siguientes especificaciones de los rodamientos:

N_b : 9.

D_b : 7.938 [mm].

D_c : 38.5 [mm].

β : 0.

n : 28.83 Hz, 29.33 Hz, 29.83 Hz, para motor con carga del 85 %, 65 % y en vacío respectivamente.

Estos valores de n son las velocidades expresadas en la Tabla 2.1

3.5.4.1. Análisis de los resultados de la falla en la pista externa de rodamiento con una carga del 85 % de la nominal.

La Tabla 3.12 presenta las frecuencias correspondientes a la falla en la pista externa de rodamientos para un motor operando al 85% de plena carga. Estas frecuencias se encuentran reemplazando los valores del rodamiento del motor usado en las ecuaciones 3.6 y 3.9 cuando n es 28,83 Hz.

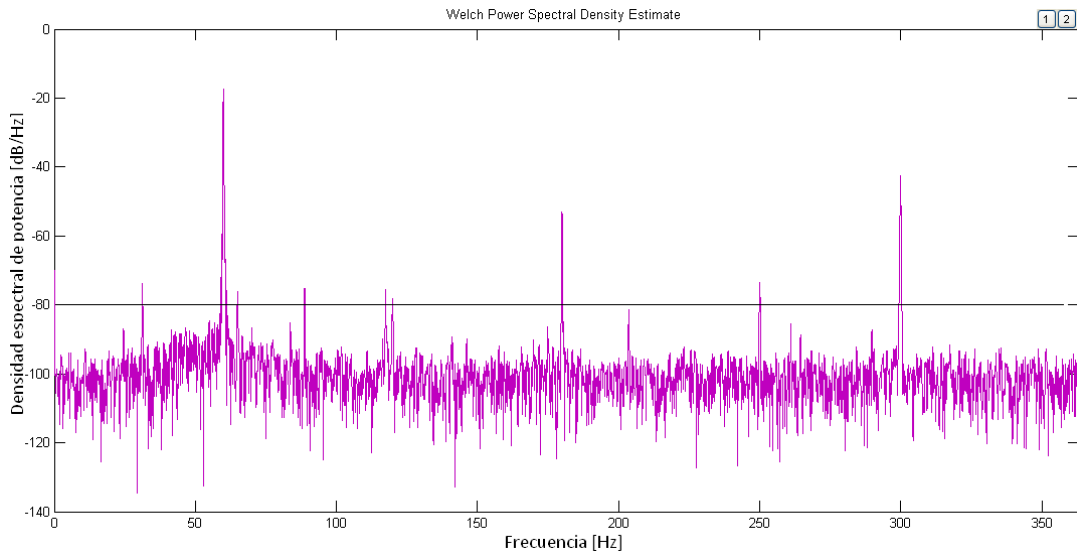
Tabla 3.12. Frecuencias generadas [Hz] en una falla de pista externa de rodamientos con una carga en el motor del 85% de la carga nominal y frecuencia de la red 60 [Hz].

762,45	659,65	556,84	454,03	351,22	248,42	145,61	42,80
882,45	779,65	676,84	574,03	471,22	368,42	265,61	162,80

La Figura 3.61 corresponde a la densidad espectral de potencia de la corriente de un motor que presenta la severidad 1 de la falla en la pista externa de rodamientos (rayado superficial) y opera al 85% de plena carga. Comparando los resultados de la Tabla 3.12 con las componentes de frecuencia obtenidas del espectro de potencia de la Figura 3.61, se encuentra que ninguna de ellas es relevante. Esta misma situación se presenta para los grados de severidad 2 (ver Figura 3.62) y severidad 3 (ver Figura 3.63).

Figura 3.61. Espectro de falla en la pista externa de rodamiento

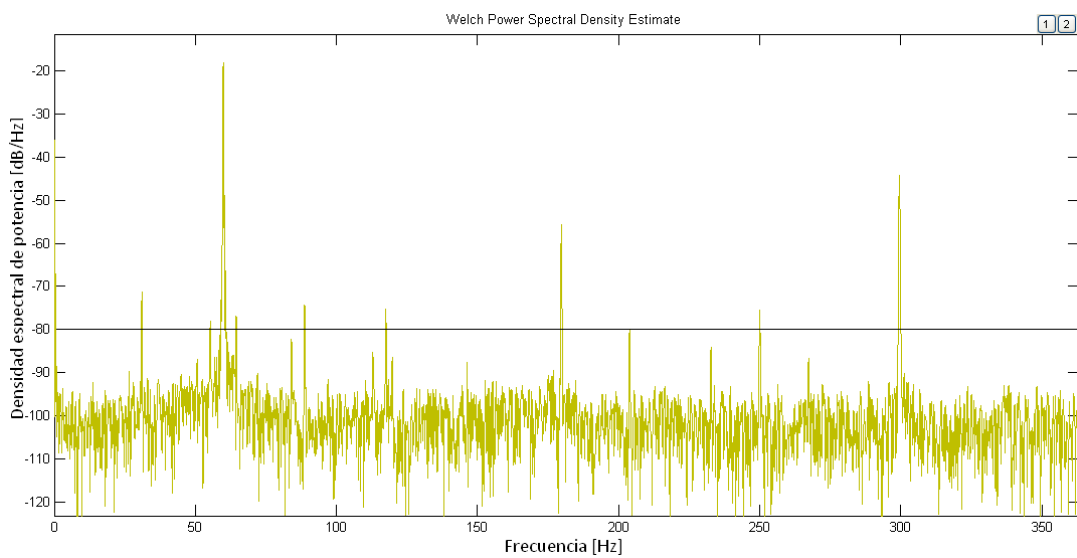
severidad 1 carga 85 %.



Fuente: Los autores.

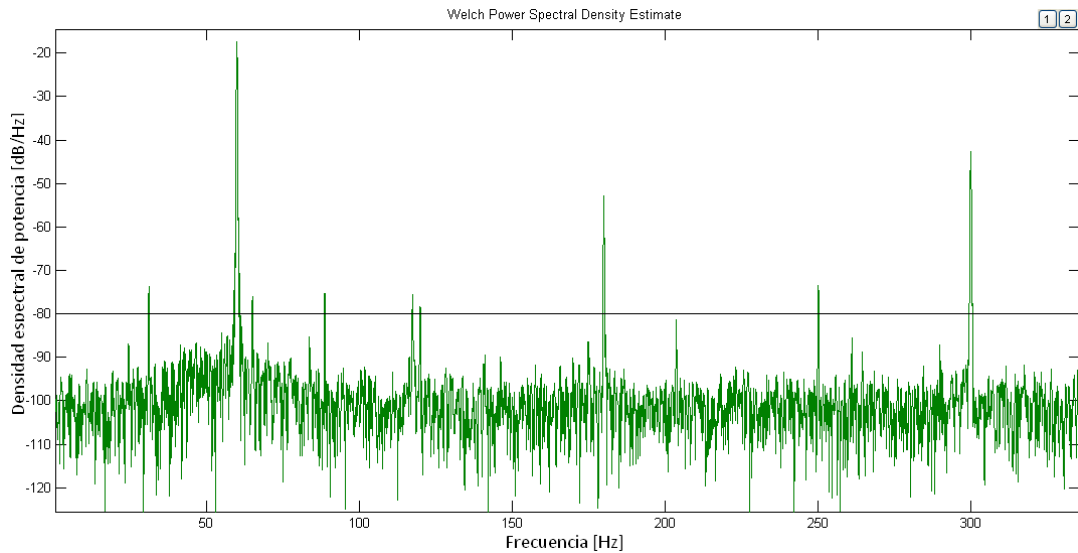
Figura 3.62. Espectro de falla en la pista externa de rodamiento

severidad 2 carga 85 %.



Fuente Los autores.

**Figura 3.63. Espectro de falla en la pista externa de rodamiento
severidad 3 carga 85 %.**



Fuente: Los autores.

3.5.4.2. Análisis de los resultados de la falla en la pista externa de rodamiento con una carga del 65 % de la nominal.

La Tabla 3.13 presenta las frecuencias correspondientes a la falla en la pista externa de rodamientos para un motor operando al 65% de plena carga. Estas frecuencias se encuentran reemplazando los valores del rodamiento del motor usado en las ecuaciones 3.6 y 3.9 cuando n es 29,33 Hz.

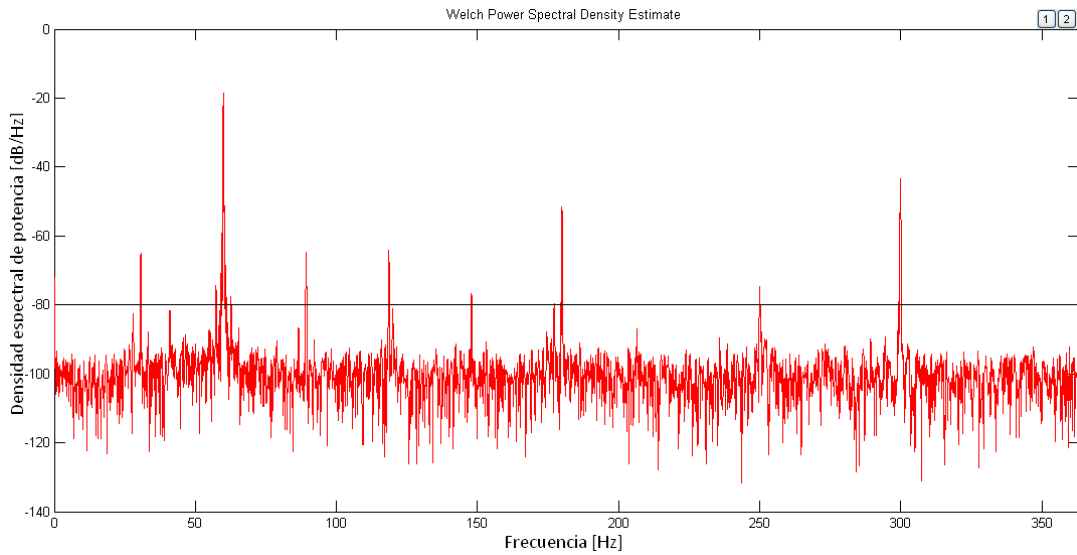
Tabla 3.13. Frecuencias generadas [Hz] en una falla de pista externa de rodamientos con una carga en el motor del 65% de la carga nominal y frecuencia de la red 60 [Hz].

779,31	674,40	569,48	464,57	359,65	254,74	149,82	44,91
899,31	794,40	689,48	584,57	479,65	374,74	269,82	164,91

La Figura 3.64 corresponde a la densidad espectral de potencia de la corriente de un motor que presenta la severidad 1 de la falla en la pista externa de rodamientos (rayado superficial) y opera al 65% de plena carga. Comparando los resultados de la Tabla 3.13 con las componentes de frecuencia obtenidas del espectro de potencia de la Figura 3.64, se encuentra que ninguna de ellas es relevante. Esta misma situación se presenta para los grados de severidad 2 (ver Figura 3.65) y severidad 3 (ver Figura 3.66).

Figura 3.64. Espectro de falla en la pista externa de rodamiento

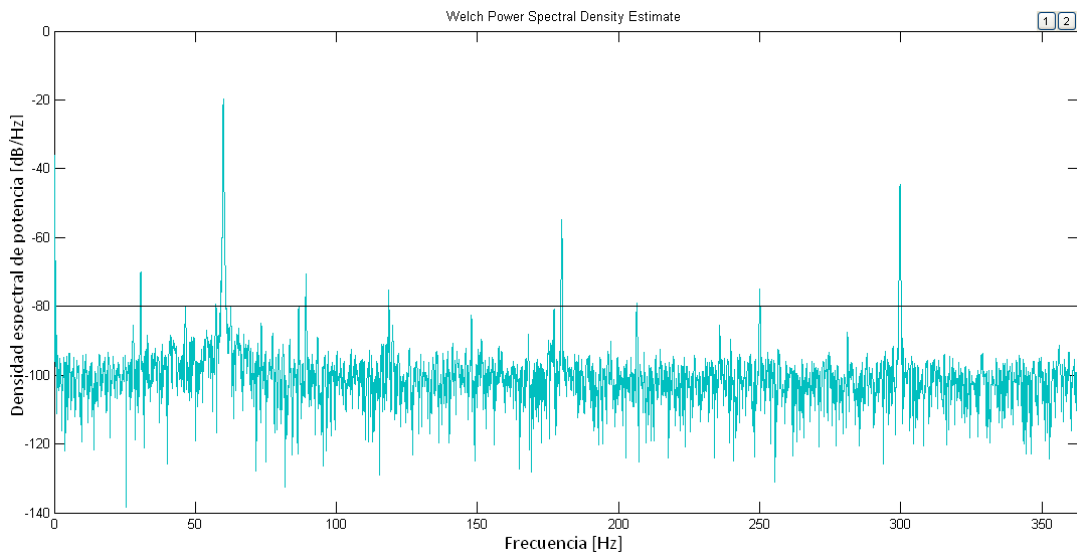
severidad 1 carga 65 %.



Fuente: Los autores.

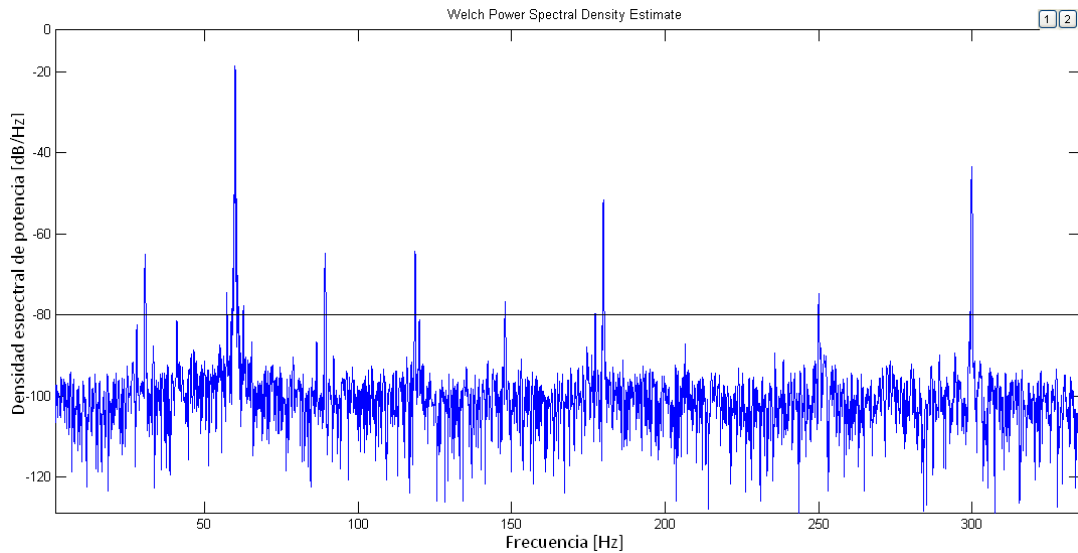
Figura 3.65. Espectro de falla en la pista externa de rodamiento

severidad 2 carga 65 %.



Fuente: Los autores.

**Figura 3.66. Espectro de falla en la pista externa de rodamiento
severidad 3 carga 65 %.**



Fuente: Los autores.

3.5.4.3. Análisis de los resultados de la falla en la pista externa de rodamiento con el motor en vacío.

La Tabla 3.14 presenta las frecuencias correspondientes a la falla en la pista externa de rodamientos para un motor operando sin carga. Estas frecuencias se encuentran reemplazando los valores del rodamiento del motor usado en las ecuaciones 3.6 y 3.9 cuando n es 29,83 Hz..

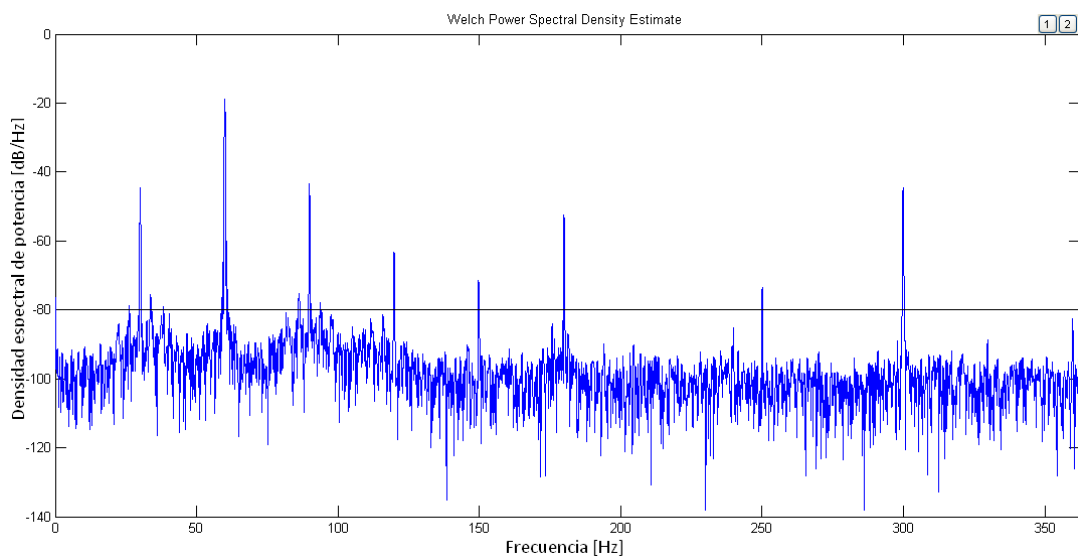
Tabla 3.14. Frecuencias generadas [Hz] en una falla de pista externa de rodamientos con el motor en vacío y frecuencia de la red 60 [Hz].

796,83	689,73	582,62	475,52	368,41	261,31	154,20	47,10
916,83	809,73	702,62	595,52	488,41	381,31	274,20	167,10

La Figura 3.67 corresponde a la densidad espectral de potencia de la corriente de un motor que presenta la severidad 1 de la falla en la pista externa de rodamientos (rayado superficial) y opera en vacío.

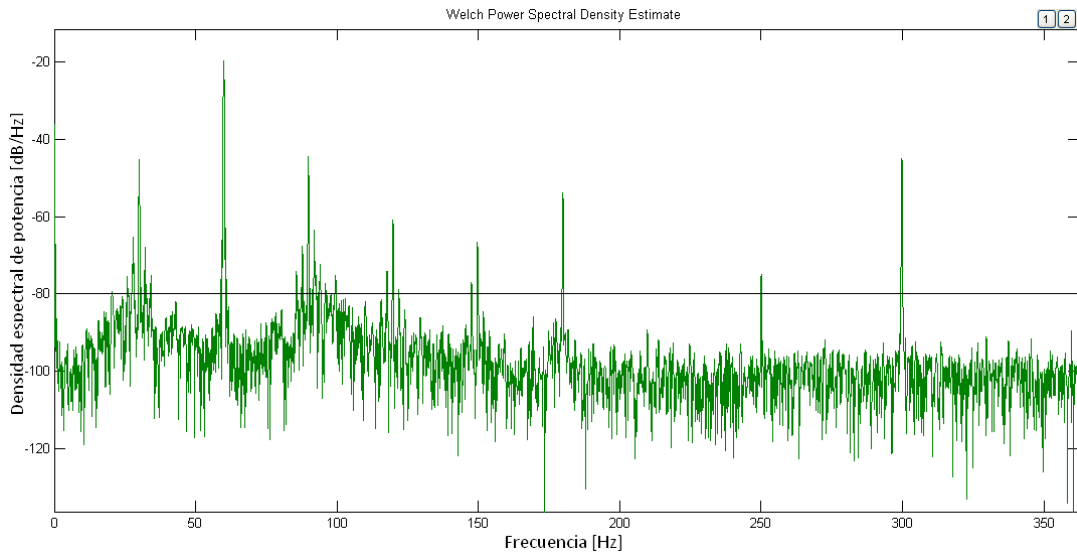
Comparando los resultados de la Tabla 3.14 con las componentes de frecuencia obtenidas del espectro de potencia de la Figura 3.67, se encuentra que ninguna de ellas es relevante. Esta misma situación se presenta para los grados de severidad 2 (ver Figura 3.68) y 3 (ver Figura 3.69).

Figura 3.67. Espectro de falla en la pista externa de rodamiento severidad 1 sin carga.



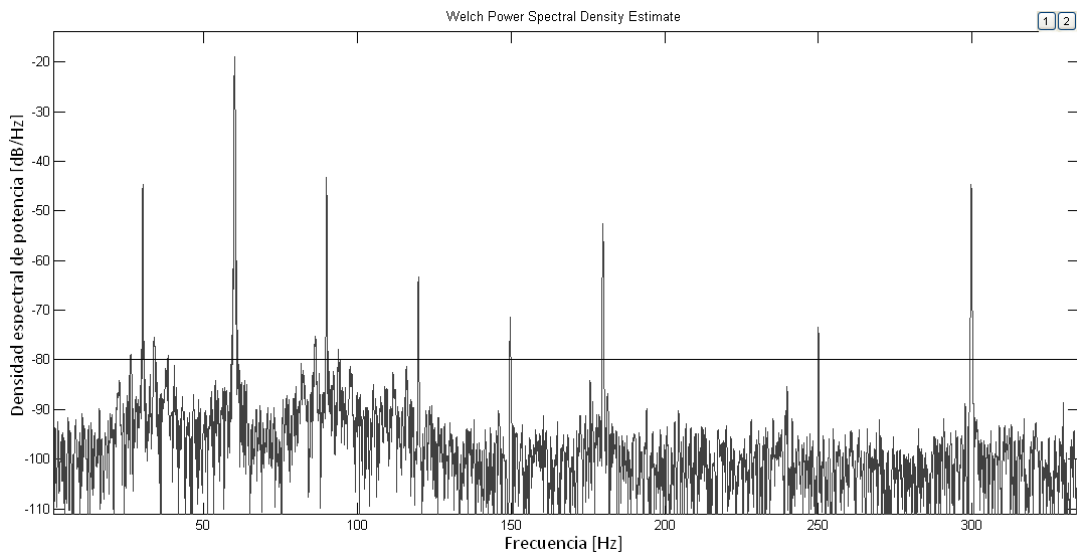
Fuente: Los autores.

**Figura 3.68. Espectro de falla en la pista externa de rodamiento
severidad 2 sin carga.**



Fuente: Los autores.

**Figura 3.69. Espectro de falla en la pista externa de rodamiento
severidad 3 sin carga.**



Fuente: Los autores.

Como se observa en los espectros de potencia de la corriente de las figuras 3.61 a 3.69, los resultados no presentan un comportamiento que se pueda estandarizar ni tomar como una verdadera condición de falla en el rodamiento de acuerdo a las ecuaciones 3.6 y 3.9, en primer lugar porque en las frecuencias especificadas para esta falla no se encuentran componentes espectrales de considerable amplitud en las frecuencias correspondientes a la falla y en segundo lugar porque estas pequeñas componentes espectrales no muestran comportamiento acorde al aumento de la severidad de la falla.

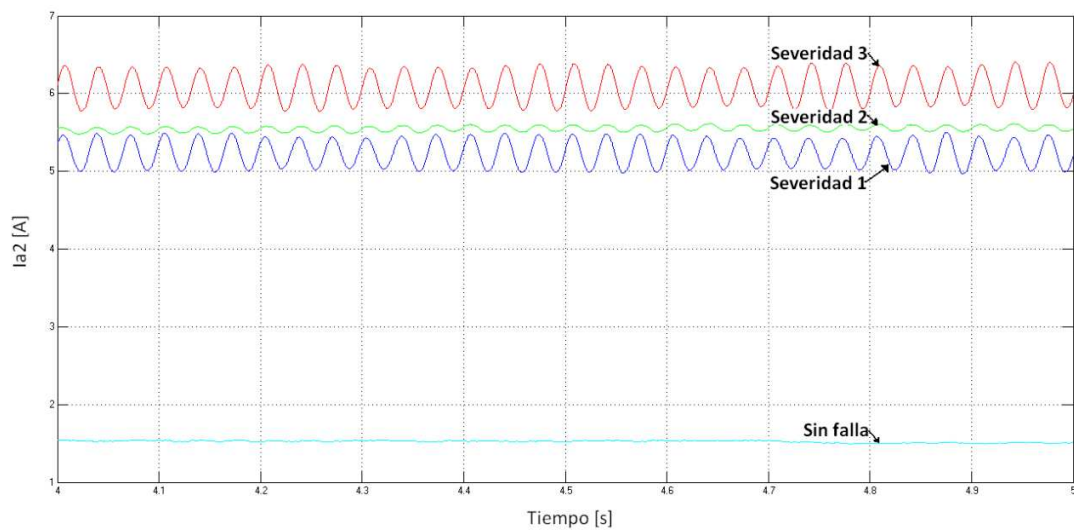
3.5.5. Análisis de los resultados experimentales de la falla en la pista externa del rodamiento utilizando la componente de secuencia negativa.

Los resultados obtenidos usando MCSA no fueron para nada satisfactorios, ya que no se encontraron componentes de frecuencia relevantes en las frecuencias establecidas por las ecuaciones 3.6 y 3.9, por ello y teniendo en cuenta que las fallas producen un desbalance en las corrientes del sistema trifásico, se procedió a realizar un análisis de la componente de secuencia negativa de este sistema.

En la Figura 3.70 se realiza una comparación del comportamiento en el tiempo (ver Ecuación 1.6) de la componente de secuencia negativa de las corrientes, para el motor en funcionamiento normal y considerando los tres grados de severidad de la falla en la pista externa del rodamiento cuando no hay carga en el generador acoplado al motor. En esta figura se aprecian unas ondulaciones en las señales y se registra un aumento de cerca de

241% para la severidad 1, 261% para la severidad 2 y 293% para la severidad 3.

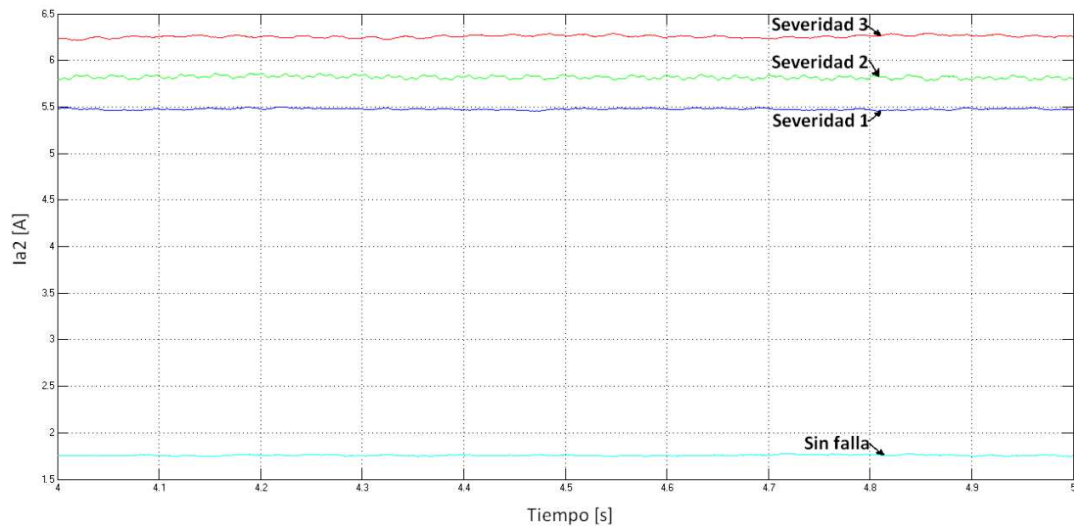
Figura 3.70. Comparación del comportamiento de la componente de secuencia negativa cuando se presenta una falla en la pista externa del rodamiento y el motor está en vacío.



Fuente: Los autores.

En la Figura 3.71 se realiza una comparación del comportamiento en el tiempo (ver Ecuación 1.6) de la componente de secuencia negativa de las corrientes, para el motor en funcionamiento normal y considerando los tres grados de severidad de la falla en la pista externa del rodamiento cuando la carga del motor es de 65% de la nominal. En esta figura se registra un aumento de cerca de 210% para la severidad 1, 230% para la severidad 2 y 253% para la severidad 3.

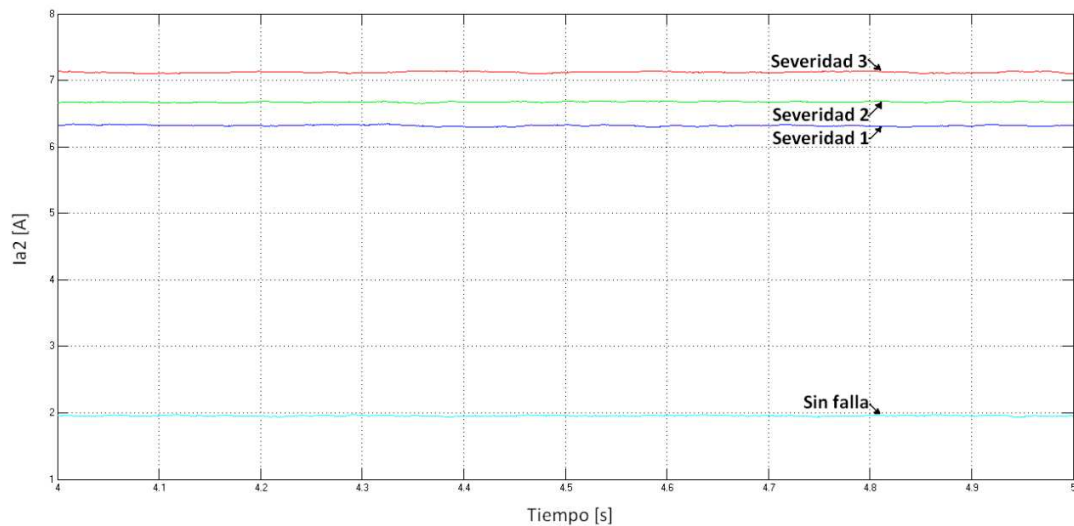
Figura 3.71. Comparación del comportamiento de la componente de secuencia negativa cuando se presenta una falla en la pista externa del rodamiento y el motor está funcionando al 65% de la carga nominal.



Fuente: Los autores.

En la Figura 3.72 se realiza una comparación del comportamiento en el tiempo (ver Ecuación 1.6) de la componente de secuencia negativa de las corrientes, para el motor en funcionamiento normal y considerando los tres grados de severidad de la falla en la pista externa del rodamiento cuando la carga del motor es de 85% de la nominal. En esta figura se registra un aumento de cerca de 223% para la severidad 1, 239% para la severidad 2 y 264% para la severidad 3.

Figura 3.72. Comparación del comportamiento de la componente de secuencia negativa cuando se presenta una falla en la pista externa del rodamiento y el motor está funcionando al 85% de la carga nominal.



Fuente: los autores.

3.5.6. Análisis de las herramientas de diagnóstico.

Los resultados del análisis proporcionado por la herramienta MCSA para la falla en la pista externa del rodamiento son poco satisfactorios debido a que no se detectaron componentes de frecuencia relevantes que se esperaban como consecuencia de esta falla, por lo que se concluyó que no es posible diagnosticar la falla mediante este método; además no se encontraron componentes de frecuencia particulares para las pruebas realizadas. Por otra parte la forma de la magnitud de la corriente de la componente secuencial negativa presentó una particularidad para las pruebas sin carga del motor con falla en la pista externa de rodamientos comparada con los resultados de

las otras fallas estudiadas; se presentó una forma ondulatoria que puede ser utilizada como un indicador de la falla que presenta el motor; además que los cambios registrados en la amplitud de la magnitud son acordes con los grados de severidad de la falla.

CONCLUSIONES

Una vez realizado el trabajo de grado, en este apartado se hace un listado de las conclusiones más relevantes:

- La magnitud de la componente de secuencia negativa es un indicador para la detección de desbalances eléctricos producto de anomalías en el funcionamiento de un motor de inducción; en algunos casos, como en el de la falla de barras rotas y fallas en la pista externa de rodamientos cuando el motor no está sometido a carga alguna, la forma de la señal muestra particularidades con las que se puede diagnosticar el tipo de falla que presenta la máquina.
- El diagnóstico para la detección de falla de corto circuito no es completo; mediante el método de MCSA la falla resulta casi imposible de detectar de acuerdo a resultantes de la solución de la Ecuación 3.1, debido a que las componentes espectrales de corriente que coinciden con frecuencias correspondientes a la falla son escasas o no se aprecian. Además, la magnitud de la componente secuencial negativa registra aumentos con respecto a la de un motor en condiciones normales para cada grado de severidad de la falla y evidencian la anomalía en la máquina, pero no presenta particularidades con las que se pueda concluir que son debido a un corto circuito.
- La presencia de excentricidad en el entrehierro de un motor puede ser diagnosticada utilizando el método de MCSA buscando concordancias entre

la frecuencia de las componentes significativas características de la falla y las resultantes de la solución de la Ecuación 3.2. Aunque no es posible determinar en forma confiable el grado de severidad de la falla con las componentes espectrales, comparar la magnitud de la componente secuencial negativa respecto a la de un motor sin falla puede ayudar a estimarlo.

- El método de MCSA resulta satisfactorio para diagnosticar la falla de barras rotas en un motor cuando opera en presencia carga. Esto se debe hacer comparando las frecuencias de las componentes significativas con las resultantes de la Ecuación 3.4, que corresponden a la falla y además se puede tener idea del grado de severidad con el número de componentes de falla adicionales que son considerables con respecto al espectro de la condición normal.
- El uso del método MCSA para detectar fallas en la pista externa de rodamientos resulta ineficaz debido a que los resultados de las pruebas no mostraron componentes espectrales considerables propias de la falla, comparando el espectro de la corriente de un motor que presentaba la falla con la de un motor en condiciones normales; no se encontraron componentes espectrales considerables en un amplio rango de las frecuencias resultantes de la solución de la ecuaciones 3.6 y 3.9.

OBSERVACIONES

Los autores consideran importante realizar las siguientes observaciones:

- De acuerdo a los resultados experimentales la forma de la magnitud de la componente de secuencia negativa podría utilizarse para diagnosticar fallas en la pista externa de rodamientos, debido a que presenta como particularidad una forma ondulada cuando la máquina opera sin carga y una forma con tendencia constante cuando la máquina opera con carga.
- Durante la realización de las pruebas se observó y concluyó que factores como un desacople entre el motor y la carga podrían generar excentricidad en el entrehierro de la máquina al observar que se hicieron notables algunos componentes correspondientes a esta falla en el espectro de la corriente.
- La magnitud de la componente de la secuencia negativa tiene una forma característica para la falla de barras rotas; presenta una envolvente que depende del deslizamiento cuando el motor está operando con carga y es una particularidad que no se detectó en las señales correspondientes a otras fallas, con lo que podría diagnosticarse el tipo de falla que afecta la máquina.
- La magnitud de la corriente de secuencia negativa para un motor sin falla debe ser muy pequeña, idealmente cero; para las muestras de corrientes tomadas a los motores nuevos se obtuvieron valores considerables para esta componente, esto se atribuye a impurezas en la fuente y a la calibración de los dispositivos de sensado (pinzas para sensado de corriente de la tarjeta DAQ) y a posibles pequeños desbalances de fábrica de los motores.

RECOMENDACIONES

A continuación los autores proponen algunas recomendaciones a tener en cuenta para desarrollos futuros:

- Para algunas fallas como la de excentricidad es muy importante encontrar un lugar y los elementos necesarios para que el acople del motor con el generador se mantenga lo más estable posible.
- Establecer las pruebas en torno a la velocidad de funcionamiento del motor, debido a que las frecuencias de las componentes de falla se determinan en base al deslizamiento, que depende directamente de esta característica de operación.
- Establecer una monitorización continua de las corrientes de las tres fases del motor bajo operación, ya que al inducirse las fallas la máquina no presentará la misma demanda de corriente con respecto a las diferentes cargas a las que es sometida.
- El análisis de MCSA mediante el método de estimación de densidad espectral de potencia Welch resulta conveniente ya que teniendo una buena resolución se pueden diferenciar los aportes correspondientes a las frecuencias.

TRABAJOS FUTUROS

Se proponen los siguientes trabajos:

- Hacer un análisis detallado del comportamiento de la componente de secuencia negativa de las señales para cada falla, ya que al parecer podría contener información de las características y condición de carga del motor, de la falla que pueda presentar y del grado de severidad de la misma.
- Analizar otras fallas que se pueden inducir en un rodamiento para ver si es posible detectarla mediante el análisis de la señal de corriente, con la densidad espectral de potencia.
- Realizar un trabajo semejante para motores de inducción con otras características y establecer una comparación con los resultados obtenidos para determinar si es posible generalizar las conclusiones.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Ing. Jorge Fernández Dahermiembro IEEE especialista mantenimiento eléctrico, Mantenimiento predictivo en motores eléctricos, Revista técnica Electromagazine, Edición # 13. 2005, ElectroMagazine Montevideo, Uruguay, <http://www.electromagazine.com.uy/antecedentes/numero13/predictivo13.htm>.

Consultado en Marzo 2010.

[2] El motor eléctrico,

http://www.portalplanetasedna.com.ar/motor_electrico.htm. Consultado en Noviembre 2010.

[3] Motor asíncrono, http://es.wikipedia.org/wiki/Motor_as%C3%ADncrono.

Consultado en Marzo 2010.

[4] Jaula de ardilla, http://es.wikipedia.org/wiki/Jaula_de_ardilla. Consultado en Marzo 2010.

[5] Asistente para Resolución de Problemas - LabWindows/CVI, Transformada de Fourier y Análisis de Frecuencias, <http://www.ni.com/support/esa/cvi/analysis/analy3.htm>. Consultado en Marzo 2010.

[6] Alan V Oppenheim, Ronald W. Schafer y John R. Buck, Tratamiento de señales en tiempo discreto (2a edición), Prentice Hall, 1998. Consultado en Marzo 2010.

[7] Welch's method, http://en.wikipedia.org/wiki/Welch's_method, Consultado en Marzo 2010.

Periodograma,

<http://physionet.cps.unizar.es/~eduardo/docencia/tds/librohtml/per1.htm>.

Consultado en Marzo 2010.

[8] Quiroga, Jabid E. Detección de cortocircuito en el devanado de un motor síncrono de imanes permanentes usando corriente de secuencia negativa en dominio tiempo, Ingeniería e Investigación, Vol 29, Num 2, agosto-sin mes. 2009, pp. 48-52, Universidad Nacional Colombia,

<http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=64311752008>.

Consultado en junio 2010.

[9] Darío Díaz; Rodrigo Díaz; Martha Cecilia Amaya; Jairo Palacios, Análisis del cortocircuito entre espiras de un motor de inducción tipo jaula de ardilla mediante la aplicación del método de elementos finitos (MEF) Revista facultad de ingeniería, universidad de Antioquia, N.º 51 pp. 16-23. Febrero 2010.

[10] Fallas en un motor de inducción,

<http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/73/10/Capitulo2.pdf>.

Consultado en Marzo 2010.

[11] Rodamientos, <http://www.monografias.com/trabajos10/roda/roda.shtml>.

Consultado en noviembre 2010.

[12] Edgar Espejo Mora y Jim Gonzalo García, Modos de falla comunes en rodamientos. Grupo de investigación AFIS (Análisis de fallas, integridad y

superficies), Departamento de ingeniería mecánica y mecatronica – Bogotá, Universidad Nacional de Colombia,
http://www.docentes.unal.edu.co/eespejom/docs/Afiches_Modos_de_Falla/Modos_Falla_Rodamientos_E_Espejo_UN.pdf. Consultado en noviembre 2010.

[13] Silva, Marquez Cardoso, 2005, SIEMENS A&D SD CS Service Cooperation, 1995; FAG SOUTH EAST ASIA PTE LTD, 2002

[14]Bollen, M., Yu-Hua, I., Signal Processing of Power Quality Disturbances., Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. John Wiley & Sons, Sweden, 2006.

[15]Datasheet DATAQ® INSTRUMENTS DI – 720/DI – 722/DI – 730/ Series, USER's Manual, Manuel revisión AJ.

- CASTELLI, Marcelo. Metodología de monitoreo, detección y diagnóstico de fallos en motores asíncronos de inducción. [En línea] Montevideo: Universidad de Montevideo, [ca 2007] ,
http://www.uruman.org/3er_congreso_docs/trabajos_tecnicos/TT%20Castelli%20Andrade.pdf, Consultado en Junio 2010.