

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA
MECÁNICA Y ELÉCTRICA**

**SECCIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

**ANÁLISIS DEL ESPECTRO EN FRECUENCIA
DE LAS CORRIENTES DE LÍNEA PARA EL
DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN MOTORES
TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS
CON ESPECIALIDAD EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

PRESENTA

JOSÉ ANTONIO ÁLVAREZ SALAS.



MÉXICO D. F.

2001

RESUMEN

Hoy en día, considerar un rotor jaula de ardilla con barras rotas es una situación raramente conocida. Sin embargo alrededor del 10 % de las fallas en el motor de inducción son en la jaula. Este tipo de fallas resulta de porosidades por un mal proceso de fabricación en rotores fundidos y resistencia elevada entre la barra y el anillo de cortocircuito, debido a una débil unión o degradación de la soldadura en rotores fabricados. Bajo tales circunstancias los esfuerzos en las barras no se distribuyen uniformemente. Usualmente la falla en el rotor ocurre por la fractura de la barra debido a la fatiga. Esto es común en máquinas donde los ciclos de trabajo son pesados y los periodos de arranque consecutivos.

En esta tesis se utiliza una técnica de monitoreo en línea para estimar la condición del rotor jaula de ardilla. Mediante un análisis de fuerzas magnetomotrices se inspeccionan las frecuencias que se generan debido a la asimetría en la jaula. Una vez identificadas las frecuencias presentes en el espectro de las corrientes del estator, se realiza un estudio experimental en laboratorio de dos motores de inducción tipo jaula de ardilla bajo condiciones de falla en el rotor previamente establecidas. La variación de la carga y el grado de severidad de la falla en el motor, fueron condiciones que permitieron establecer la magnitud de las componentes que aparecen en el espectro de corriente.

Los resultados obtenidos en laboratorio se validaron a través del análisis de un motor trabajando en línea con una barra fracturada. La presencia de las bandas laterales y su referencia en magnitud con respecto a la frecuencia fundamental es el principal indicativo en el espectro de corriente.

ABSTRACT

Squirrel-cage rotors with broken bars are rarely met with nowadays. Nevertheless around 10 % of the faults in cage induction motor is on the rotor. Problems result from defective casting in die-cast rotors, or from high resistance joints as result of poor welding or brazing in fabricated cages. In such cases uneven bar stress is then unavoidable. Often, however failure occurs due to fracture of bars caused by fatigue. This is common in machines with uneven and heavy-duty cycles, which consequently are subject to high stress in the cage during periods of rapid braking and starting.

This thesis presents an on-line monitoring technique to approach the squirrel-cage rotor condition. An analysis in magnetomotive force produces the frequencies due to the asymmetry in the cage. Once identified the frequencies in the current signature, two motors of squirrel-cage rotor were tested in laboratory under the rotor failure condition previously established. The load variation and the rotor fault severity, were signals to set the magnitude of the components that appear in the current spectra.

The results obtained in laboratory were validated through the analysis on induction motor working on-line with a broken rotor bar. The magnitude of the sidebands around the fundamental frequency is the main indicative of this technique.

CONTENIDO

RESUMEN.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	iii
LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE TABLAS.....	viii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	ix

CAPÍTULO 1 **Introducción**

1.1 Introducción.....	1
1.2 Antecedentes.....	2
1.3 Descripción del Problema.....	3
1.4 Objetivo.....	4
1.5 Justificación.....	4
1.6 Alcances del Trabajo.....	4
1.7 Organización de la Tesis.....	5

CAPÍTULO 2 **Mecanismos de Falla en el Rotor Jaula de Ardilla**

2.1 Introducción.....	6
2.2 Tipos de Rotores en Motores de Inducción.....	6
2.2.1 Rotor Devanado.....	6
2.2.2 Rotor Jaula de Ardilla.....	7
2.2.2.1 Rotor Fundido.....	7
2.2.2.2 Rotor Fabricado.....	9
2.2.3 Rotor Barra Profunda y Doble Jaula de Ardilla.....	11
2.3 Tipos de Fallas en el Rotor Jaula de Ardilla.....	11
2.3.1 Esfuerzos Térmicos.....	13
2.3.1.1 Sobrecarga Térmica.....	13
2.3.1.2 Desbalances Térmicos.....	13
2.3.1.3 Puntos Calientes y Pérdidas Excesivas.....	14
2.3.1.4 Arqueo en el Rotor.....	14
2.3.2 Esfuerzos Magnéticos.....	15
2.3.2.1 Efecto Electromagnético.....	15
2.3.2.2 Fuerza de Desbalance Magnético.....	15
2.3.2.3 Ruido Electromagnético y Vibración.....	16
2.3.3 Esfuerzos Residuales.....	17
2.3.4 Esfuerzos Dinámicos.....	17

2.3.5 Esfuerzos Ambientales.....	17
2.3.6 Esfuerzos Mecánicos.....	17
2.4 Secuencia de Falla en Barras.....	18
2.5 Redistribución de Corriente en la Jaula debido a la Fractura.....	20
CAPÍTULO 3 Técnicas Eléctricas Aplicadas a Motores de Inducción	
3.1 Introducción.....	25
3.2 Elementos de un Sistema de Monitoreo.....	25
3.2.1 Transducción.....	25
3.2.2 Adquisición de Datos.....	25
3.2.3 Procesamiento.....	26
3.2.4 Diagnóstico.....	27
3.3 Tipos de Mantenimiento.....	27
3.4 Técnicas Eléctricas.....	28
3.5 Esquemas de Prueba.....	31
CAPÍTULO 4 Análisis de las Fuerzas Magnetomotrices con Asimetría en el Rotor	
4.1 Introducción.....	33
4.2 Fuerzas Magnetomotrices actuando en el Entrehierro.....	33
4.2.1 Armónicos Temporales.....	34
4.2.2 Armónicos Espaciales.....	35
4.3 Campos Rotatorios en el Entrehierro.....	36
4.3.1 Condiciones Simétricas.....	36
4.3.2 Condiciones Asimétricas.....	37
4.4 Fuerzas Magnetomotrices con Asimetría en el Rotor.....	37
4.5 Efectos de la Modulación en una Señal	43
4.6 Método de Deleroi para la Redistribución de Corrientes.....	45
CAPÍTULO 5 Desarrollo de Pruebas y Análisis de Resultados	
5.1 Introducción.....	52
5.2 Desarrollo de Pruebas en Laboratorio.....	52
5.2.1 Primer Motor de Prueba.....	52
5.2.2 Segundo Motor de Prueba.....	73
5.3 Evaluación de Motores Trabajando en Línea.....	79
CAPÍTULO 6 Conclusiones	
6.1 Conclusiones.....	89
6.2 Aportaciones.....	90
6.3 Recomendaciones.....	90

Referencias y Bibliografía	91
Apéndice	95
A.1 Rotores Utilizados en Laboratorio.....	95
A.2 Rotores Dañados en Motores de Capacidad Mayor.....	97

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Corte transversal de un rotor jaula de ardilla del tipo fundido.....	7
Figura 2.2	Corte transversal de un rotor jaula de ardilla del tipo fabricado.....	9
Figura 2.3	Unión básica.....	9
Figura 2.4	Esquema mejorado de la unión básica.....	10
Figura 2.5	Unión con cavidad en el anillo para recibir soldadura.....	10
Figura 2.6	Unión en ranuras internas al anillo de cortocircuito.....	10
Figura 2.7	Rotor jaula de ardilla.....	12
Figura 2.8	Esfuerzos generados en la barra.....	13
Figura 2.9	Deflexión de la barra.....	15
Figura 2.10	Desbalance magnético.....	16
Figura 2.11	Área de falla en el rotor jaula de ardilla.....	18
Figura 2.12	Área de falla en el rotor jaula de ardilla fundido.....	19
Figura 2.13	Desarrollo de la falla en el circuito de la jaula.....	19
Figura 2.14	Corriente en la jaula del rotor en condiciones simétricas	20
Figura 2.15	Lazos de corriente.....	21
Figura 2.16	Lazos de corriente con una barra fracturada.....	21
Figura 2.17	Lazos de corriente, considerando la sección del anillo de cortocircuito..	21
Figura 2.18	Distribución de corriente en la jaula.....	22
Figura 2.19	Corriente en la jaula del rotor con una barra fallada.....	22
Figura 2.20	Corriente en la jaula del rotor con dos barras falladas.....	23
Figura 2.21	Corriente en la jaula del rotor con tres barras falladas.....	23
Figura 2.22	Corriente en la jaula del rotor con dos barras falladas, opuestas.....	24
Figura 3.1	Sistema básico de monitoreo.....	26
Figura 3.2	Diagrama simplificado de las principales técnicas de monitoreo.....	27
Figura 3.3	Ubicación de las bobinas para la medición del flujo axial.....	31
Figura 3.4	Circuito de prueba en laboratorio.....	31
Figura 3.5	Circuito de prueba en línea.....	32
Figura 4.1	Campos rotatorios en condiciones simétricas.....	36
Figura 4.2	Campos rotatorios en condiciones asimétricas.....	37
Figura 4.3	Marcos de referencia rotor y estator.....	38
Figura 4.4	Modulación de la señal por frecuencia.....	43
Figura 4.5	Espectro de la señal modulada por frecuencia.....	44
Figura 4.6	Modulación de la señal por amplitud.....	49
Figura 4.7	Espectro de la señal modulada por amplitud.....	45
Figura 4.8	Circuito equivalente de la jaula con una barra fallada.....	46
Figura 4.9	Magnitud de los armónicos, con una redistribución de corriente d=0.016.....	48
Figura 4.10	Magnitud de los armónicos, con una redistribución de corriente d=0.80	48
Figura 4.11	Magnitud de los armónicos, con una redistribución de corriente d=0.005	49
Figura 4.12	Magnitud de los armónicos, con una redistribución de corriente d=0.65	49
Figura 4.13	Magnitud de los armónicos, con una redistribución de corriente d=0.01	50
Figura 4.14	Magnitud de los armónicos, con una redistribución de corriente d=0.85	50
Figura 5.1	Condiciones simétricas, primer rotor jaula de ardilla.....	53
Figura 5.2	Condiciones simétricas, desplazamiento de las tres señales.....	54

Figura 5.3	Una barra desconectada del anillo de cortocircuito, 20 % carga.....	55
Figura 5.4	Una barra desconectada del anillo de cortocircuito, 30 % carga.....	56
Figura 5.5	Una barra desconectada del anillo de cortocircuito, 40 % carga.....	56
Figura 5.6	Una barra desconectada del anillo de cortocircuito, 50 % carga.....	57
Figura 5.7	Una barra desconectada del anillo de cortocircuito, 60 % carga.....	57
Figura 5.8	Una barra desconectada del anillo de cortocircuito, 70 % carga.....	58
Figura 5.9	Una barra desconectada del anillo de cortocircuito, 80 % carga.....	58
Figura 5.10	Una barra desconectada del anillo de cortocircuito, 90 % carga.....	59
Figura 5.11	Una barra desconectada del anillo de cortocircuito, 100 % carga.....	59
Figura 5.12	Una barra desconectada del anillo de cortocircuito, 110 % carga.....	60
Figura 5.13	Tres barras desconectadas del anillo de cortocircuito, 20 % carga.....	61
Figura 5.14	Tres barras desconectadas del anillo de cortocircuito, 30 % carga.....	61
Figura 5.15	Tres barras desconectadas del anillo de cortocircuito, 40 % carga.....	62
Figura 5.16	Tres barras desconectadas del anillo de cortocircuito, 50 % carga.....	62
Figura 5.17	Tres barras desconectadas del anillo de cortocircuito, 60 % carga.....	63
Figura 5.18	Tres barras desconectadas del anillo de cortocircuito, 70 % carga.....	63
Figura 5.19	Tres barras desconectadas del anillo de cortocircuito, 80 % carga.....	64
Figura 5.20	Tres barras desconectadas del anillo de cortocircuito, 90 % carga.....	64
Figura 5.21	Tres barras desconectadas del anillo de cortocircuito, 100 % carga.....	65
Figura 5.22	Tres barras desconectadas del anillo de cortocircuito, 110 % carga.....	65
Figura 5.23	Banda lateral referida al 5° armónico.....	66
Figura 5.24	Modulación de la banda lateral inferior.....	67
Figura 5.25	Relación en magnitud de la banda lateral a la fundamental (N).....	68
Figura 5.26	Modulación de la banda lateral sobre el 5° armónico.....	68
Figura 5.27	Relación en magnitud de la banda lateral al 5° armónico (N).....	69
Figura 5.28	Par del motor.....	70
Figura 5.29	Potencia en la flecha del motor.....	70
Figura 5.30	Rango de frecuencia para armónicos de ranura.....	71
Figura 5.31	Modulación sobre la componente de armónicos de ranura, condiciones simétricas.....	71
Figura 5.32	Modulación sobre la componente de armónicos de ranura, condiciones asimétricas.....	72
Figura 5.33	Condiciones simétricas del rotor, segundo rotor jaula de ardilla.....	74
Figura 5.34	Una barra desconectada del anillo de cortocircuito.....	74
Figura 5.35	Dos barras desconectadas a 90° mecánicos del anillo.....	75
Figura 5.36	Posición de la 1ª y 12ª barra en los cruces de la fmm.....	75
Figura 5.37	Posición de la 1ª y 12ª barra en el puntos máximo y mínimo de la fmm..	76
Figura 5.38	Incremento de la magnitud de las bandas laterales.....	77
Figura 5.39	Modulación de la banda lateral inferior 1ª parte.....	77
Figura 5.40	Modulación de una banda lateral inferior 2ª parte.....	78
Figura 5.41	Secuencia de pruebas en el segundo rotor.....	78
Figura 5.42	Secuencia de pruebas en el segundo rotor, para el 5° armónico.....	79
Figura 5.43	Espectro de corriente del motor 3500A.....	80
Figura 5.44	Espectro de corriente del motor 6800A.....	81
Figura 5.45	Espectro de corriente del motor 6800B.....	81
Figura 5.46	Espectro de corriente del motor 6800C.....	82
Figura 5.47	Espectro de corriente del motor 3500B.....	82

Figura 5.48	Comportamiento de N y frecuencia de los motores trabajando en línea...	83
Figura 5.49	Espectro de corriente del motor 3500B, sobre el 5° Armónico.....	84
Figura 5.50	Espectro de corriente del motor 6800B, sobre el 5° y 7° Armónico.....	84
Figura 5.51	Espectro de corriente del motor 3500B, sobre armónicos de ranura.....	85
Figura 5.52	Espectro modulado por la carga.....	85
Figura 5.53	Espectro modulado por la carga, en un ancho de banda mayor.....	86
Figura 5.54	Rangos en decibeles de N.....	87
Figura 5.55	Rotor jaula de ardilla con una barra fallada.....	87
Figura A1	Desconexión entre las barras y el anillo de cortocircuito.....	95
Figura A2	Una barra desconectada.....	95
Figura A3	Una barra desconectada de ambos anillos de cortocircuito.....	96
Figura A4	Barras desplazadas.....	96
Figura A5	Referencia de las barras desplazadas.....	96
Figura A6	Barras adyacentes.....	97
Figura A7	Jaula con barras agrietadas.....	97
Figura A8	Jaula con múltiples barras fracturadas.....	98
Figura A9	Rotor jaula de ardilla reparada.....	98

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1	Comparación en la construcción del rotor fundido.....	8
Tabla 2.2	Comparación en la construcción del rotor fabricado.....	10
Tabla 2.3	Fallas en motores de inducción.....	12
Tabla 2.4	Ciclos de falla en la barra.....	15
Tabla 4.1	Armónicos y sus respectivas bandas laterales.....	41
Tabla 4.2	Comparación de frecuencias.....	43
Tabla 5.1	Datos del primer motor de prueba.....	52
Tabla 5.2	Secuencia de pruebas motor 7.5 CP.....	52
Tabla 5.3	Una barra desconectada del anillo de cortocircuito.....	54
Tabla 5.4	Tres barras desconectadas del anillo de cortocircuito.....	60
Tabla 5.5	Modulación y su respectivo valor de N (dB).....	66
Tabla 5.6	Armónicos de ranura para las tres condiciones de prueba.....	72
Tabla 5.7	Datos del segundo motor de prueba.....	73
Tabla 5.8	Secuencia de pruebas para el motor de 5 CP.....	73
Tabla 5.9	Datos de motores evaluados en línea.....	80
Tabla 5.10	Modulación y magnitud de N.....	80
Tabla 5.11	Rangos en decibeles que establecen la condición del rotor.....	88

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>Símbolo</i>	<i>Descripción</i>
a_k	magnitud de los armónicos de flujo en el entrehierro
b_k	magnitud de los armónicos de flujo en el entrehierro
A	cantidad compleja
B_δ	densidad de flujo producida por la corriente en la barra rota
C_D	campo rotatorio en sentido directo
C_I	campo rotatorio en sentido inverso
d	factor de amortiguamiento
f	frecuencia de línea (Hz)
F_{osc}	frecuencia debida a oscilaciones en la carga
f_f	frecuencia de deslizamiento (Hz)
f_{ar}	frecuencia de armónicos de ranura (Hz)
F	amplitud instantánea de la fuerza magnetomotriz
F_C	fuerza centrífuga
F_{M1}	fuerzas magnéticas causadas por el flujo disperso en las ranuras
F_{M2}	fuerzas magnéticas causadas por excentricidad en el entrehierro
f_{mm}	fuerza magnetomotriz en el entrehierro
F_S	fuerza axial causada por la inclinación de la barra
F_{T1}	esfuerzos térmicos causados por el calentamiento del anillo de cortocircuito
F_{T2}	esfuerzos térmicos causados por el incremento de temperatura durante el arranque
F_{T3}	esfuerzos térmicos causados por el crecimiento axial de la barra
F_{UB}	fuerza dinámica de desbalance
F_W	par de trabajo
F_X	vibración torsional y par transitorio
g	gravedad
H	intensidad del campo magnético(ampères-vuelta)
i, n	enteros positivos
I_{bi}	inyección de corriente sobre la barra rota
I_{bi}	corriente en los anillos de cortocircuito
k	1,2,3...
k_{ar}	1,3,5...
n_s	velocidad síncrona en rev/seg
n_r	velocidad del rotor en rev/seg
N	diferencia en decibeles de la banda lateral a la fundamental
N_{5th}	diferencia en decibeles de la banda lateral al quinto armónico
N_R	diferencia en decibeles de la banda lateral al armónico de ranura
N_{pn}	velocidad del énesimo armónico
P	pares de polos
R	número de ranuras del rotor
R_b	resistencia de la barra
R_r	resistencia del anillo de cortocircuito en la malla
s	deslizamiento

U	potencial entre las terminales de la barra rota
W_a	peso del rotor
W	fuerza sobre el rotor
X_b	reactancia de la barra
X_g	reactancia de la malla asociada al entrehierro
X_r	reactancia del anillo de cortocircuito en la malla
Z_l	impedancia de la barra
δ	longitud radial del entrehierro
μ_0	permeabilidad en el entrehierro
θ	desplazamiento angular en la superficie del devanado (rad)
ϕ	desplazamiento angular entre marcos de referencia (rad)
$\omega.$	frecuencia angular del estator (rad/seg)
$\omega_r.$	frecuencia angular del rotor (rad/seg)

CAPÍTULO

1

Introducción

1.1 Introducción

Las máquinas eléctricas se encuentran en todas las áreas de la vida moderna. Existen en diferentes tamaños y con diferentes propósitos, ello ha contribuido a que su uso se haya incrementado dramáticamente con el paso del tiempo y no hay razón para pensar que ésta tendencia no continúe en las próximas décadas.

Dentro de las máquinas eléctricas rotatorias de uso más general se encuentran los motores de inducción. Se emplean en diversas áreas de la industria y en diferentes capacidades. La presencia de una falla imprevista, puede provocar pérdida de continuidad del sistema del cual forma parte el motor. La detección de cualquier tipo de falla en el motor, ha generado la necesidad de establecer programas de mantenimiento predictivo, que involucre un sistema de monitoreo en línea.

La relación costo-eficiencia de los sistemas de monitoreo en línea para motores de inducción, requiere una amplia comprensión de los problemas de confiabilidad en el mantenimiento y operación de los mismos. Para esto es necesario establecer si las partes no confiables, pueden ser examinadas sin interrumpir las operaciones normales. El conocimiento adquirido por experiencia directa en estos sistemas, se traslada al mejoramiento de especificaciones como procedimientos de prueba y técnicas modernas de medición.

El monitoreo se define como la continua evaluación del estado del equipo, a fin de que ofrezca una mayor continuidad en su operación. El monitoreo ofrece información relevante tanto al área operativa de planta como al área de mantenimiento. Con la información recopilada se construyen bases de datos que formulen un análisis -y consecuentemente un diagnóstico- de acuerdo a las tendencias de la maquinaria. Tal información es usada tanto por el personal de planta como por el de manufactura, el objetivo: mejorar la calidad del producto o servicio que se ofrezca.

En este trabajo se analiza un método de monitoreo en línea para estimar la condición del rotor jaula de ardilla en motores trifásicos de inducción. Tradicionalmente se aplican técnicas de monitoreo fuera de línea, ya que la ausencia de conexiones eléctricas en el rotor genera la necesidad de parar el motor para su inspección.

A pesar de que el rotor solo representa el 30 % del costo total del motor (de acuerdo a los fabricantes y reparadores de motores de inducción) y que la probabilidad de falla oscila entre un 10 y 15 % [28] del total de fallas que le ocurren al motor; la falla inesperada reduce la eficiencia de operación de la máquina.

1.2 Antecedentes

Cualquier asimetría en los devanados de una máquina eléctrica, conduce a una redistribución de corriente. Esto se debe al disturbio que sufre el campo magnético y por consiguiente al esfuerzo mecánico a que se somete la máquina. Cualquier disturbio en la máquina será detectable en la parte mecánica o eléctrica.

Se han desarrollado diversos trabajos que han permitido implementar métodos de monitoreo y diagnóstico. *Jufer*, 1978 [20] demostró matemáticamente cómo una asimetría en la jaula de ardilla de un motor de inducción conduce a la modulación de la corriente de entrada. Esto fue reafirmado por *Hargis*, 1980 [14]. En el mismo trabajo *Gaydon* [14] demostró que éste efecto guía a pequeñas fluctuaciones en la velocidad del rotor.

Williamson, 1982 [38] demostró que a través de la teoría de campos rotatorios, cualquier falla en las barras y en anillos de cortocircuito afecta las corrientes de rotor y estator en un motor de inducción operando a velocidad constante. Esta teoría removió algunas restricciones en lo que había propuesto *Jufer*. *Kohler*, 1989 [22] demostró que la asimetría debería ser detectable a través de las variaciones en la vibración del núcleo del estator.

Filippetti, 1994 [11] establece una comparación entre el espectro en corriente y la estimación paramétrica para la detección de barras rotas. A través de un modelo por fase que incluye la variación de la resistencia en el rotor fallado se establece un índice de sensibilidad de la estimación paramétrica. Sin embargo, este método depende de la compensación por variación térmica en la resistencia del rotor, lo que marca la desventaja con el análisis espectral de corriente.

Ninguno de los trabajos anteriores [14, 20, 22, 38] consideraron la existencia de corrientes interlaminares (a través del núcleo del rotor). *Walliser*, 1994 [37] demostró que un incremento sustancial de la corriente en las barras, incrementará si estas no se consideran como un circuito aislado. Las corrientes varían con el deslizamiento, además de incrementarse con el tamaño de la máquina.

En los motores de inducción generalmente la velocidad no es constante para una determinada carga mecánica. La velocidad puede variar de 1 a 2 revoluciones por minuto para una cierta posición de operación, por lo que el deslizamiento no es constante. Sin embargo esto representa un porcentaje de pulsaciones de baja frecuencia. Consecuentemente la corriente es modulada y el motor de inducción se comporta como un transductor, el cual responde a las perturbaciones mecánicas.

Cameron y Thomson, 1996 [6,36], presentan una alternativa de monitoreo al análisis de vibraciones mecánicas para detectar problemas de excentricidad a través del espectro en corriente. El método analizado en estos trabajos, presenta la desventaja que al analizar el ancho de banda, algunas componentes debidas a la asimetría se ocultan por componentes moduladas por la carga. *Legowski*, 1996 [26] presenta una alternativa a la modulación del espectro de corriente a través del análisis de la potencia instantánea.

Schoen, 1994 [31] propuso que a través del monitoreo de la corriente de estator podría detectarse problemas en rodamientos. En su trabajo describe el análisis espectral del flujo utilizando bobinas de inspección distribuidas en el devanado del estator. Esto le permitió establecer las posibles frecuencias que aparecerán en el espectro de corriente.

Henao, 1998 [15] desarrolla un modelo de circuito orientado para la simulación de fallas eléctricas que afectan el análisis de las corrientes del estator en el dominio del tiempo. La aproximación de este modelo se puede utilizar en métodos de estimación paramétrica y análisis espectral con mediciones eléctricas de entrada-salida.

Houdouin, 1998 [18] propone un modelo analítico para el cálculo de la densidad de flujo en el entrehierro cuando existe una falla en el rotor jaula de ardilla. Se realiza una comparación por un método analítico y por el método del elemento finito, para diferentes condiciones de asimetría en la jaula.

El par de un motor de inducción se genera a partir de la interacción de una serie de armónicos de estator y rotor. Algunos de estos armónicos interaccionan para la generación de un par total, el cual produce el giro de la máquina, mientras que otros lo hacen para producir pares pulsantes que simplemente producen ligeras oscilaciones en la velocidad y potencia mecánica suministradas por el motor. Considerando lo anterior *Cabanas*, 1999 [5] propuso la identificación de frecuencias de oscilación en los espectros del par mecánico o del par electromagnético, para la identificación de la asimetría -en el rotor- en su condición más incipiente.

Lazarevic, 2000 [25] presenta un método avanzado para el pre-procesamiento de la señal de corriente, con lo cual se reduce el nivel de ruido y la modulación de las componentes debidas al sistema mecánico acoplado al motor.

1.3 Descripción del Problema

Las condiciones de falla en los motores trabajando en línea, -que no pueden ser evaluadas adecuadamente por métodos tradicionales [28, 34, 40] como lo ha sido el análisis de vibraciones mecánicas- requieren de un método que pueda utilizar al estator como transductor del propio rotor e identifique la presencia de anomalías tanto eléctricas como mecánicas.

Este método se basa en el análisis del espectro de cada una de las corrientes que alimentan al motor en el dominio de la frecuencia. El espectro se obtiene de la adquisición de la señal de corriente -en tiempo real a través de puntas o transformadores de corriente- mediante la aplicación de la transformada rápida de Fourier. El análisis es realizado para detectar componentes cercanas a los armónicos de la señal que se atribuyen directamente a los mecanismos de falla.

El espectro en frecuencia de la corriente presenta la fundamental y una serie de armónicos, alrededor de cada uno de estos armónicos se modulan bandas laterales. Estas bandas se encuentran desplazadas de la frecuencia de línea por múltiplos de la frecuencia de deslizamiento en un valor que depende de la falla que presenta el rotor.

1.4 Objetivo

Interpretar los resultados del análisis en el espectro en frecuencia, de cada una de las corrientes de línea que alimentan al motor de inducción. Este análisis permite estimar la condición del rotor jaula de ardilla, mientras el motor se encuentra a su operación nominal.

1.5 Justificación

Las fallas en el rotor jaula de ardilla de motores de inducción no son fáciles de detectar. La ausencia de conexiones eléctricas en los devanados, dificulta la medición de las corrientes inducidas en el rotor. Aunque los devanados del rotor tipo jaula de ardilla son más robustos las fallas ocurren en máquinas de gran capacidad, donde estas se asocian con altas temperaturas en el rotor y fuerzas centrífugas en los anillos de cortocircuito, particularmente durante el arranque.

El análisis de la técnica de monitoreo utilizada en este trabajo, es factible de aplicación en sistemas industriales y de potencia, donde se encuentran unidades de gran capacidad, con rotores del tipo jaula de ardilla. Esta técnica se puede incluir como parte de un programa de mantenimiento predictivo.

1.6 Alcances del Trabajo

En este trabajo el análisis espectral de las corrientes de línea, representa una alternativa de inspección a motores trifásicos de inducción de gran capacidad. La estimación de la condición del rotor no depende de la compensación térmica de la resistencia del rotor.

El estator realiza la función de un transductor, sin la necesidad de colocar transductores internos en la máquina ó sacar de operación al motor, para estimar su condición.

La modulación -frecuencia y magnitud- de componentes (bandas laterales) alrededor de la fundamental es el principal indicativo de la asimetría en la jaula. Sin embargo se puede considerar la inspección alrededor de otros armónicos, 5^o 7^o ... entre otros.

Las bandas laterales debido a la asimetría se modulan en pares alrededor de la fundamental. En anchos de banda corto, las bandas laterales mantienen probabilidades de modularse por componentes debidas a la oscilación de la carga. Si esto llega a suceder su cercanía con la fundamental y el desplazamiento con respecto a la frecuencia de deslizamiento, permite identificarlas con respecto a las otras componentes, además de inspeccionar armónicos superiores a la fundamental.

El ancho de banda asociado a los armónicos debido al ranurado en el rotor y estator, es una alternativa, para confirmar la estimación que se realiza con las bandas laterales alrededor de la fundamental.

1.7 Organización de la Tesis

Esta tesis consta de seis capítulos, los cuales se describen a continuación.

En el capítulo uno se presenta la introducción al problema de investigación que se aborda en ésta tesis. Se hace una breve exposición de los antecedentes en el área de monitoreo y diagnóstico de motores de inducción. Adicionalmente se plantea la justificación y el objetivo de esta tesis.

En el capítulo dos se presentan algunos aspectos sobre el rotor jaula de ardilla: técnicas de construcción, materiales, mecanismos de falla que afectan al rotor. Incluye una descripción de la redistribución de corriente en la jaula del rotor una vez que se ha fracturado la unión barra-anillo de cortocircuito.

En el capítulo tres contiene una descripción de los tipos de mantenimiento que se practican actualmente. Las principales técnicas eléctricas aplicadas a motores de inducción. Algunas pruebas normalizadas para este tipo de motores. Por último se menciona el tipo de esquema empleado en las pruebas de laboratorio y en motores trabajando en línea.

En el capítulo cuatro presenta el desarrollo de la solución teórica del problema. Por medio de las fuerzas magnetomotrices en el entrehierro, se establecen a que frecuencias aparecerán las componentes en el espectro de corriente, así como el efecto de la modulación debido a la asimetría en la jaula.

En el capítulo cinco se muestra los resultados de las pruebas a motores en laboratorio y a motores trabajando en línea. Se hace una descripción del comportamiento de la asimetría en la jaula bajo diferentes condiciones de carga, bajo condiciones nominales y diferentes niveles de asimetría. Se analizan los espectros de corriente de algunos motores de gran capacidad y se anexa el diagrama del rotor jaula de ardilla fallado por la desconexión de una barra.

En el capítulo seis se localizan las conclusiones a las que se llega con el desarrollo de esta tesis. Se describen las aportaciones y se establecen las recomendaciones para trabajos futuros.

CAPÍTULO

2

Mecanismos de Falla en el Rotor Jaula de Ardilla.

2.1 Introducción

El rotor jaula de ardilla es considerado como el secundario de un motor de inducción. No tienen conexión eléctrica de la fuente de alimentación pero obtiene su potencia por inducción del flujo producido por los devanados del estator. El flujo en el entrehierro se asume como una distribución sinusoidal girando respecto al rotor.

La fuerza electromotriz (fem) inducida en cada barra del rotor, es determinada por la intensidad de flujo magnético del entrehierro que corta a las barras. Para un deslizamiento a valor nominal las corrientes en las barras están casi en fase con la fem inducida. Bajo esta consideración la corriente en cada barra es sinusoidal. La corriente en cada barra ejercerá una fuerza en esta, la cual produce un par rotatorio haciendo girar al rotor a una velocidad menor que la síncrona [12].

Generalmente las barras del rotor están sujetas a fuerzas de aceleración en los anillos de cortocircuito cuando existen cambios de velocidad. Si el motor es consecutivamente arrancado se experimenta fuerzas que conducen ciclos de fatiga en los devanados del rotor. Algunos indicadores de este tipo de falla son las pulsaciones de velocidad, el cambio en la corriente de suministro y el flujo disperso en la máquina.

En éste capítulo se describe los aspectos constructivos de los dos tipos de rotores jaula de ardilla, los principales mecanismos de falla que llevan a la generación de fisuras en la jaula del rotor durante los periodos transitorios, así como en condiciones normales de operación.

2.2 Tipos de Rotores en Motores de Inducción.

Los tipos de devanados del rotor en el motor de inducción se presentan a continuación [9]:

2.2.1 Rotor Devanado

2.2.2 Rotor Jaula de Ardilla

2.2.3 Rotor Barra Profunda y Doble Jaula de Ardilla

Aunque estos tipos de rotores difieren en construcción, funcionan de la misma manera en el motor de inducción.

2.2.1 Rotor Devanado

El rotor devanado se construye de un conjunto de bobinas de manera similar a los devanados del estator. Las tres fases del devanado usualmente se conecta en estrella, aunque algunas veces se conectan en delta. Las terminales de los devanados del rotor se conectan a unos anillos colectores o anillos rozantes, y reciben la alimentación a través de

unas escobillas estacionarias. Esto permite variar la resistencia del rotor externamente, e incrementar el par de arranque.

2.2.2 Rotor Jaula de Ardilla

El rotor jaula de ardilla consiste de barras axiales, unidas en ambos extremos por dos anillos en dirección radial. Los dos anillos tienen una doble función, complementar el circuito eléctrico del rotor y asistirlo mecánicamente. Existen dos tipos básicos de rotores usados en el motor jaula de ardilla:

2.2.2.1 Rotor Fundido

2.2.2.2 Rotor Fabricado o Ensamblado

2.2.2.1 Rotor Fundido

El rotor fundido normalmente es usado en motores pequeños que no necesitan ventilación. Sin embargo en la actualidad, la industria de motores ha realizado progresos significativos en esta área. Con la llegada de ductos en la fundición del rotor, algunos fabricantes están produciendo rotores fundidos para motores en capacidades de 4000 Caballos de Potencia (CP) [9].

El devanado del rotor se construye por técnicas de fundición, utilizando el núcleo, como parte del molde al momento del vaciado. Adicionalmente se utilizan moldes colocados al final del núcleo, para formar los dos anillos de cortocircuito. En la figura 2.1 se muestra un corte transversal del rotor fundido.

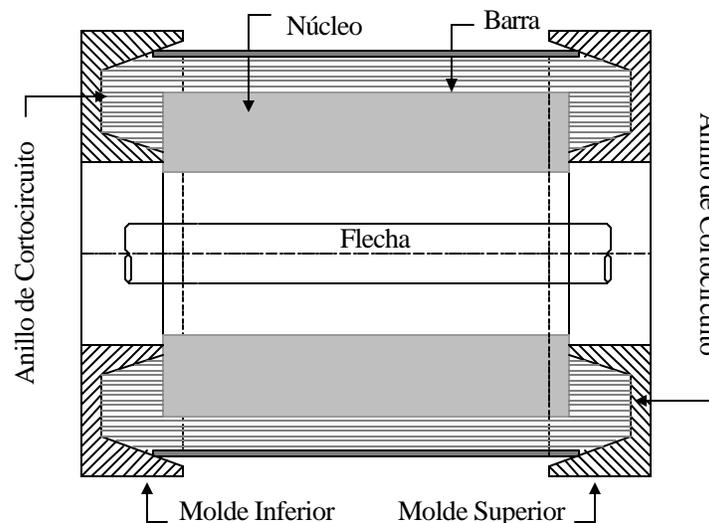


Figura 2.1. Corte transversal de un rotor jaula de ardilla del tipo fundido.

Aluminio o aleación de aluminio es el material utilizado en la fundición. El punto de fundición del aluminio es aproximadamente 660° C. Las laminaciones del núcleo en este tipo de rotor generalmente se construyen con acero al carbón o acero al silicio. El punto de fundición del acero depende de la cantidad de carbón, silicio y otros elementos, pero está próximo a los 1370° C. Por consiguiente se puede utilizar las laminaciones para que formen parte del molde.

La resistividad del aluminio es aproximadamente de $3.7 \times 10^{-8} \Omega/m$ a temperatura de operación. La resistividad del acero puede variar de 20×10^{-8} a $160 \times 10^{-8} \Omega/m$ a temperatura de operación, dependiendo de los elementos que contenga el acero. Por lo tanto la resistividad del núcleo será mayor que la del aluminio (con el núcleo de acero sólido). Adicionalmente, los núcleos se construyen de láminas de 0.5-0.6 mm de espesor, generando de esta manera una modificación en la resistividad total del rotor.

La superficie de las laminaciones se somete a diferentes tipos de tratamiento con lo cual también se modifica su resistividad. Considerando lo anterior, se establece que la resistividad a través de las laminaciones del núcleo son dos veces mayor que la resistividad a lo largo de la barra. Con esto se asegura que la corriente en el rotor fluirá en dirección axial en la barra, sin la necesidad de tener aislamiento entre la barra y el núcleo [1].

Los métodos de fabricación más usados son por gravedad, baja y alta presión y vaciado rápido. La distribución del aluminio se realiza con el núcleo y los moldes del anillo de cortocircuito girando, de tal forma que la fuerza centrífuga permita acomodar el aluminio en todo el núcleo del rotor.

En la tabla 2.1 se presenta una comparación de las ventajas y desventajas, en la construcción de este tipo de rotor [2].

Tabla 2.1 Comparación en la construcción del rotor fundido.

Ventajas	Desventajas
Usualmente el más bajo costo en el método de construcción	Inversión inicial elevada para el equipo de fundición
Bajo costo en el aluminio o aleación de aluminio para la jaula	Disponibilidad limitada en la aleación (no materiales de baja conductividad)
Flexibilidad en la forma de la barra; esto permite generar un alto par de arranque en el diseño del motor	El tamaño del equipo restringe el diámetro y longitud en el diseño del rotor
Conexión homogénea entre la barra y el anillo de cortocircuito	Porosidad en la fundición
Bajo ciclo de esfuerzos	Dificultad de reparar la jaula de ardilla

Los factores que influyen en la elección del proceso de fundición son: la sección transversal de la ranura, el área del anillo de cortocircuito, la longitud del núcleo, el volumen total de aluminio, la temperatura del núcleo y el costo total del proceso. La simplicidad del devanado fundido, hace que se pueda elegir en el diseño de rotores jaula de ardilla, para incorporarlos a motores de mayor capacidad como se mencionó en párrafos anteriores [9].

2.2.2.2 Rotor Fabricado

El segundo tipo de rotor es el fabricado o ensamblado. En la figura 2.2 se muestra un corte transversal de la configuración más simple del ensamblado. Este tipo normalmente es usado en máquinas grandes o aplicaciones especiales, y frecuentemente incluye ductos de aire. En forma y función un rotor fabricado es similar a un rotor fundido, excepto que este se ensambla en lugar de fundirlo en una sola pieza.

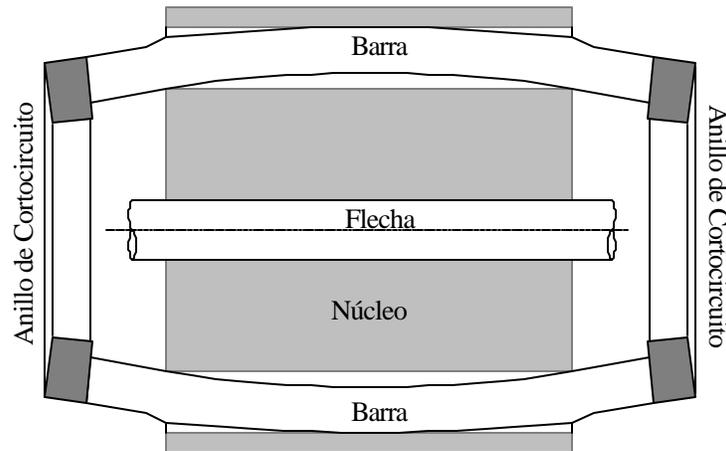


Figura 2.2. Corte transversal de un rotor jaula de ardilla fabricado.

Las barras del rotor y el anillo de cortocircuito se fabrican de cobre y aleación de cobre ó de aluminio y aleación de aluminio. Las ranuras pueden ser cerradas ó semicerradas en la cercanía del entrehierro del rotor. El anillo de cortocircuito se puede fabricar por separado, en varillas de metal ó por fundición.

El anillo de cortocircuito se coloca en contra de la barra en varias formas, dependiendo de la preparación para el metal de unión. El anillo de cortocircuito puede o no tener ranuras axiales en el diámetro exterior para recibir la barra. En la figura 2.3 se muestra la unión en la cual, la superficie de conducción eléctrica y la unión mecánica se ubica entre el final de la barra y el canto del diámetro exterior del anillo de cortocircuito [9].

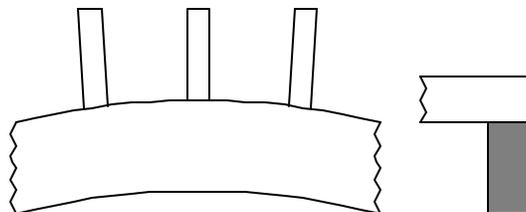


Figura 2.3. Unión básica.

En la figura 2.4 se muestra una configuración mejorada de la anterior. Las barras se ubican en ranuras axiales, que han sido maquinadas en la parte superior del anillo de cortocircuito. La superficie de conducción eléctrica se localiza en tres lados de la barra. En ésta unión se utiliza principalmente cobre o aleación de cobre en las barras y anillos de cortocircuito. La unión es a través de soldadura.

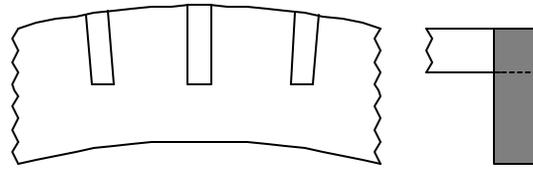


Figura 2.4. Esquema mejorado de la unión básica.

En la figura 2.5 se muestra la unión en la cual el anillo de cortocircuito tiene una ranura axial en la parte superior y una cavidad próxima al diámetro exterior del anillo. Esta cavidad permite recibir la soldadura de tungsteno para uso con aluminio ó aleación de aluminio.

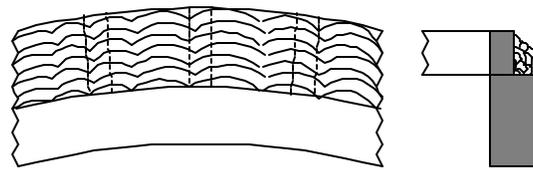


Figura 2.5. Unión con cavidad en el anillo para recibir soldadura.

El anillo puede ser fabricado por torneado y maquinado de barras rectangulares. Para este tipo de construcción, la parte interna del anillo se coloca en contra de la parte externa del núcleo, de tal manera que sirva para retener el laminado en dirección axial.

En la figura 2.6 se muestra la unión en la cual, la ranura se encuentra en la parte interna del anillo de cortocircuito. Esta ranura tiene una profundidad radial para recibir las barras. Este tipo de unión tiene una doble función, mantener mecánicamente al anillo con respecto de las barras y recibir la soldadura en las dos partes que se unen [9].

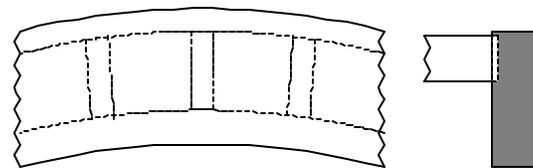


Figura 2.6. Unión en ranuras internas al anillo de cortocircuito.

En la tabla 2.2 se presenta una comparación de las ventajas y desventajas, en la construcción de este tipo de rotor [2].

Tabla 2.2 Comparación en la construcción del rotor fabricado.

Ventajas	Desventajas
Inversión inicial mínima	Costo de construcción
No hay límite en el tamaño (CP)	Disponibilidad limitada en la característica par-velocidad, por la forma de la barra
Aleación para un amplio rango de materiales	Su duración es reducida, se presentan fallas subsecuentes.

2.2.3 Rotor Barra Profunda y Doble Jaula de Ardilla

El propósito de este tipo de rotores es producir un rotor de resistencia variable que combine las características de alto par de arranque y baja corriente, con las características de alta eficiencia y bajo deslizamiento en condiciones normales [24].

En el rotor de barra profunda las secciones de la barra están en paralelo. La barra equivale a varios circuitos eléctricos en paralelo. Los superiores de pequeña inductancia; y los inferiores de inductancia grande. A deslizamientos bajos, la frecuencia del rotor es muy pequeña y las reactancias en paralelo son pequeñas en comparación a las resistencias. A deslizamientos altos (condiciones de arranque) las reactancias son grandes comparadas con las resistencias y toda la corriente circula por la parte de la barra cercana al estator.

El rotor doble jaula de ardilla consta de un grupo de barras grandes y profundas de resistencia baja y otro de barras pequeñas y más superficiales de resistencia elevada. En conjunto resulta similar al rotor de barra profunda. En condiciones de arranque trabajan únicamente las barras pequeñas y la resistencia del rotor es considerablemente alta. Esta resistencia alta produce un par de arranque grande. Además, a velocidades de operación normal ambas barras trabajan simultáneamente y la resistencia es casi tan pequeña como la de un rotor de barra profunda.

2.3 Tipos de Fallas en el Rotor Jaula de Ardilla

Generalmente las fallas en los motores ocurren porque son incorrectamente especificados para la aplicación que fueron designados. Las especificaciones de un motor reflejan las condiciones mecánicas, eléctricas y ambientales en las cuales el motor puede trabajar. Estas consideraciones son importantes porque soportan las causas que llevan al mecanismo a la falla.

A continuación se enuncia los principales mecanismos de falla que ocurren en el motor de inducción:

1. Desgaste mecánico en los devanados del estator, así como fallas en el aislamiento
2. Excentricidad en el entrehierro, produce aproximación de rotor a estator lo cual se manifiesta en desgaste en el núcleo del estator y devanados.
3. Degradación en el aislamiento debido a picos de voltaje, contaminación, envejecimiento, vibración en el núcleo puede generar fallas en el aislamiento.
4. Problemas mecánicos como desgaste en rodamientos, rotor desbalanceado, flecha mal acoplada, entre otros.
5. Barras rotas o anillos de cortocircuito fallados en el rotor, pueden causar calentamiento o arqueos en la falla.

Los porcentajes de las fallas en este tipo de motores de acuerdo a lo que se describe en [28], pueden agruparse tal y como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 2.3. Fallas en motores de inducción.

Causa	Ocurrencia en % del total.
Devanados del estator.	70 %.
Devanados del rotor.	10 %
Cojinetes.	10 %
Otros.	10 %

En el rotor, la mayoría de las fallas son debido a una combinación de varios esfuerzos. En la figura 2.7. se presenta el diagrama de un rotor jaula de ardilla con algunos esfuerzos y pares aplicados a este. En términos generales los esfuerzos se pueden clasificar como siguen: Térmicos, Electromagnéticos, Residuales, Dinámicos, Ambientales y Mecánicos [2].

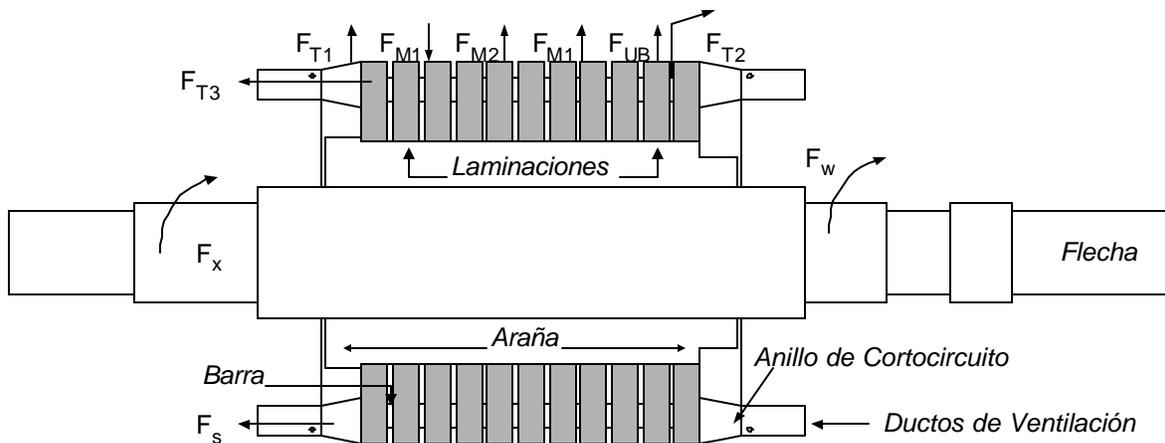


Figura 2.7. Rotor jaula de ardilla

Si el motor es diseñado, construido, aplicado, instalado, operado y revisado apropiadamente, estos esfuerzos en el rotor se pueden mantener bajo control y el motor funcionará sin problemas por varios años [1].

Excluyendo condiciones de fabricación y operación deficientes, existen tres principales causas que generan una falla en el rotor:

1. Fuerza magnética
2. Fuerza centrífuga
3. Expansión y contracción térmica en los anillos de cortocircuito

En la figura 2.8 se muestra como la fuerza centrífuga tiene dos componentes: F_C sobre toda la longitud de la barra, y F_{C2} que provoca una deflexión radial en los anillos. La fuerza magnética F_M producida por la corriente de la barra hacia la flecha sobre la porción de la barra dentro del núcleo. El incremento de temperatura ΔT a lo largo de la barra (debido a la profundidad de la barra).

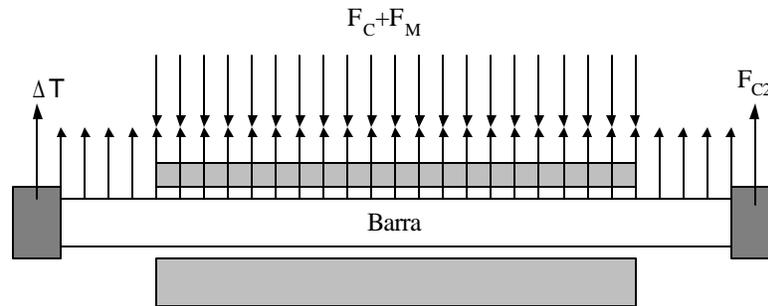


Figura 2.8. Esfuerzos generados en la barra.

En las siguientes apartados se discute la relación entre cada uno de los esfuerzos y cómo afectan en el rotor al contribuir a la falla prematura [1, 2, 5, 9, 33].

2.3.1 Esfuerzos Térmicos

2.3.1.1 Sobrecarga Térmica. La sobrecarga térmica puede ocurrir durante el periodo de aceleración, operación normal o condiciones de bloqueo. Se debe considerar que algunos motores desde el punto de vista térmico están limitados tanto en el estator como en el rotor. La condición de bloqueo representa un daño potencial para el rotor en un periodo de tiempo muy corto. Las causas más comunes de sobrecargas térmicas son [1]:

1. Arranques consecutivos que provocan elevación de temperatura en barras o anillos de cortocircuito.
2. Rotor bloqueado, debido al arranque con carga pesada.
3. Rozamiento entre rotor y estator, debido a fallas en rodamientos, tirones magnéticos o elevada vibración.
4. Barras rotas causadas por movimiento de la barra o expansión térmica del anillo de cortocircuito
5. Ventilación insuficiente, debido a filtros tapados y/o ductos dañados.
6. Desbalance de voltajes de fase, que provocan corrientes de secuencia negativa y generan calentamiento en la superficie del rotor.

Las fallas en el rotor debido a la sobrecarga térmica pueden ser detectadas por una inspección visual de la jaula (barras y anillos de cortocircuito).

2.3.1.2 Desbalances Térmicos. Los desbalances térmicos pueden ser causados por el efecto de cualquier arranque o condiciones de aceleración. El desbalance puede ser inherente al diseño en el rotor o puede ocurrir por trabajar al rotor fuera de los límites de su diseño. Las causas más comunes en desbalances térmicos son [2]:

1. Arranques consecutivos, provocan una temperatura diferencial en las barras del rotor.
2. Transferencia de calor inadecuada entre las barras y el núcleo del rotor

3. Pérdida en el ajuste entre el núcleo del rotor y la flecha, esto debido a la expansión térmica que sufre durante la puesta en marcha.
4. Incrementos de temperatura debido a una inadecuada circulación de las corrientes, las cuales pueden ser generadas por ruptura y/o variación en el ajuste en las barras del rotor.

2.3.1.3 Puntos Calientes y Pérdidas Excesivas. Existen causas durante la fabricación, diseño o reparación del rotor que provocan pérdidas y puntos calientes. Algunas de estas causas son las siguientes [40]:

1. Variación de la tensión de ajuste entre la barra del rotor y la laminación.
2. Degradación de aislamiento entre laminaciones ó falta de asimetría.
3. Mal diseño de laminaciones.
4. Conexiones deficientes en barras y anillos de cortocircuito.

Monitoreando el motor bajo carga, en vibraciones, y parámetros como temperatura, corriente, potencia y deslizamiento, se verifica que el rotor este libre de estos defectos.

2.3.1.4 Arqueo en el Rotor. Existen diversas causas de arqueo o chisporroteo en los rotores fabricados. Algunas causas no tienen naturaleza destructiva y otras pueden conducir a fallas en el rotor. En condiciones de estado estable la fuerza centrífuga es mayor (a velocidad nominal), con respecto a la fuerza electromagnética actuando en la barra.

Debido a los niveles de corriente, esta fuerza desplaza la barra radialmente. La frecuencia del circuito del rotor durante esta etapa es muy baja (igual a la frecuencia de deslizamiento), por lo que su impedancia será baja. Esta condición confina toda la corriente a la jaula y no permite que se observe en operación normal.

Durante el arranque, la corriente en la jaula del rotor es 5 a 6 veces el valor nominal. La corriente elevada combinada con la impedancia grande en la jaula (la frecuencia en un inicio es de 60 Hz a condiciones de bloqueo), provocan que la corriente busque un circuito paralelo a través de las laminaciones del núcleo.

Las fuerzas magnéticas generadas por la elevada corriente durante el arranque causan vibraciones en las barras a una frecuencia que decae a partir de 60 Hz, lo cual produce una fuerza de 120 vibraciones por segundo. Los efectos de vibraciones radiales en las ranuras causan interrupciones del flujo de corriente entre las barras y algunas laminaciones, esto genera un arqueo visible.

El nivel de arqueo destructivo puede ocurrir bajo diversas circunstancias, la más común inicia con una barra rota o problemas de conexión entre la barra y el anillo de cortocircuito. La ruptura es precedida por fisuras radiales en la parte superior o inferior de la barra. Es muy difícil poder observar este fenómeno, ya que la mayoría de los motores son totalmente cerrados [1].

2.3.2 Esfuerzos Magnéticos

2.3.2.1 *Efecto Electromagnético*. La acción del flujo disperso en las ranuras, genera fuerzas electrodinámicas. Estas fuerzas son proporcionales al cuadrado de la corriente que las produce y son en una dirección. Las corrientes tienden a desplazar la barra entre la parte superior e inferior de la ranura, como se muestra en la figura 2.9.

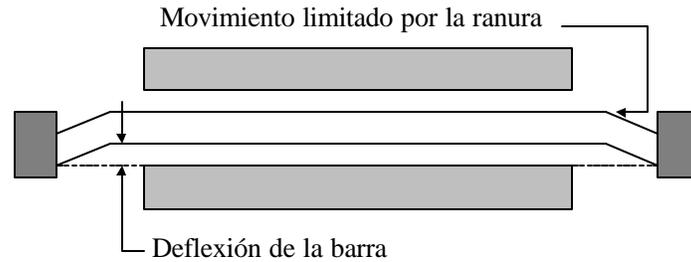


Figura 2.9. Deflexión de la barra.

La vibración de la barra se produce al doble de la frecuencia de deslizamiento en la corriente del rotor. Si la deflexión es suficientemente alta producirá una falla por fatiga. En la siguiente ecuación se presenta la fuerza magnética producida por el flujo disperso en las ranuras.

$$F_{M1} = 2 f_r \tag{2.1}$$

Si la fuerza radial durante el arranque produce diferentes ciclos de falla (estos dependen del material de la barra y el tipo de soldadura empleado en la unión como se muestra en la tabla 2.4), únicamente serán limitados por el confinamiento de la ranura. En rotores fundidos, se previene este tipo de falla y han demostrado soportar de 50,000 a 100,000 arranques sin tener problemas para motores de 500 CP ó potencias mayores [2, 9].

Tabla 2.4. Ciclos de falla en la barra.

Tipo de Unión	Material de Barra	Vibración	Área de Falla
Soldadura en borde	Aleación de cobre	4.0 X 10 ⁶	Barra en unión
Soldadura en ranura	Aleación de cobre	2.6 X 10 ⁶	Barra en unión
Soldadura en cavidad	Aleación de aluminio	3.5 X 10 ⁶	Barra en soldadura

2.3.2.2 *Fuerzas de Desbalance Magnético*. Generalmente el rotor no se encuentra perfectamente centrado en el entrehierro debido a problemas de diseño. Elementos como la excentricidad, peso del rotor, defecto en rodamientos, alineación de la máquina, mantienen fuera de su centro al rotor en el rango de milésimas de pulgada. En la siguiente ecuación se describe la fuerza de desbalance magnético.

$$F_{UB} = \frac{W_a}{gRW^2} \tag{2.2}$$

¿ Qué pasa en el entrehierro cuando entre el rotor y estator se reduce la distancia; mientras se incrementa en el otro lado?. En un campo magnético alternante, el resultado de la reducción en el entrehierro representa mayor fuerza de atracción (tirón magnético) a través de este espacio. La reluctancia se reduce al paso del flujo magnético, por consiguiente la corriente de magnetización puede generar mas flujo a través del espacio reducido consiguiendo mayor estiramiento. Al mismo tiempo el entrehierro se incrementa en el lado opuesto de la máquina. La mayor fuerza de estiramiento se ejerce en el lado con menor entrehierro, hasta que el rotor llegue a tener contacto con el estator. Este movimiento se representa en la figura 2.10.

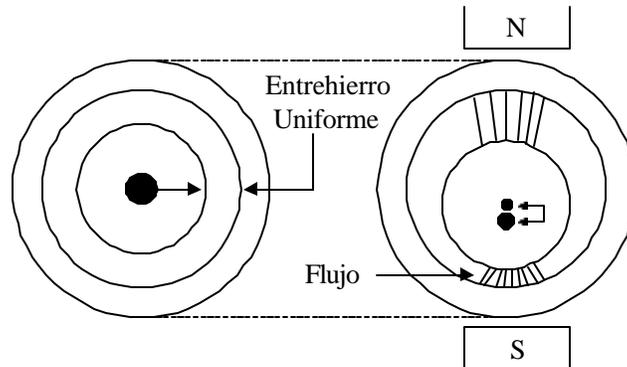


Figura 2.10. Desbalance magnético.

El desbalance magnético es limitado por el espesor de la flecha. Entre mayor sea el movimiento, la flecha tiende a resistir la deflexión. Los diseñadores de motores establecen límites de excentricidad en el entrehierro. Es usual un rango de 10-20 % dependiendo del tamaño de la máquina [6, 36].

2.3.2.3 Ruido Electromagnético y Vibración: La excentricidad en el entrehierro puede causar ruido o problemas de vibración. La fuerza radial producida por los armónicos del estator combinado con los armónicos del rotor generan ruido electromagnético y/o vibración.

Existen por diseño mecánico de la máquina diferentes tipos de excentricidad en el entrehierro:

1. El rotor es excéntrico al eje de rotación
2. El núcleo del estator es excéntrico
3. El rotor y estator son redondos pero no tienen el mismo eje de rotación
4. El rotor y la flecha no tienen el mismo eje de rotación.
5. Cualquier combinación de lo anterior

Estas condiciones pueden o no causar una significativa cantidad de ruido electromagnético o vibración. El ruido a plena carga es mayor que en vacío [6].

2.3.3 Esfuerzos Residuales

Estos esfuerzos se pueden presentar en cualquier plano (radial ó axial), y generalmente no dañan al rotor mientras no existan cambios significativos en su geometría. Este tipo de esfuerzos es el resultado del proceso, durante la fundición, soldadura, compresión y operación de maquinado. Si cualquiera de estos esfuerzos provocan cambios en la geometría de la máquina, estos se reflejan en vibraciones [40].

2.3.4 Esfuerzos Dinámicos

Algunos de estos esfuerzos son resultado del procedimiento de operación y pueden salir fuera de los límites de diseño de la máquina. Existen diversas fuerzas que actúan dinámicamente sobre el rotor. Sin embargo, la fuerza centrífuga genera mayor daño que cualquier otro tipo.

Normalmente los rotores están diseñados para soportar sobrevelocidades de acuerdo a los límites de NEMA (20 % dos polos y 25% velocidades mas bajas), para motores de mediana capacidad. Esta consideración se debe a que el ajuste entre el núcleo y la flecha del rotor, no logra soportar tanto la fuerza centrífuga como los esfuerzos térmicos. Los dos esfuerzos producen niveles de vibración elevados, los cuales pueden dañar o destruir el rotor.

La fuerza centrífuga causa daños en anillos de cortocircuito, esfuerzos en laminaciones, pesos de balanceo, aletas de enfriamiento, así como el movimiento de las barras de su correspondiente ranura. Pares en la flecha (dependen de la carga acoplada al motor) así como esfuerzos cíclicos. [1, 9, 33].

2.3.5 Esfuerzos Ambientales

Cualquier condición externa que afecte la vida del motor se considera como un efecto ambiental. Por ejemplo, materiales externos que causan abrasión, humedad, desgaste y/o obstrucción en los conductos de ventilación, se constituyen como un esfuerzo de tipo ambiental.

Motores con entrehierros pequeños han tenido problemas de oxidación en rotores y laminaciones del estator en presencia de humedad. Problemas de corrosión han causado daños en los contrapesos de balanceo, inclusive que se introduzcan en los devanados del estator con resultados destructivos.

Algunos fabricantes recubren los rotores con un barniz que le ofrece una protección adicional. Sin embargo, depende del fabricante especificar el tipo de cubierta de acuerdo al ambiente donde operará el motor [2].

2.3.6 Esfuerzos Mecánicos

La causa de este tipo de esfuerzos en algunas ocasiones es difícil de identificar porque la apariencia de la falla es muy similar a otros tipos de esfuerzos (esfuerzos dinámicos, térmicos, etc.). Existe una clasificación de esfuerzos mecánicos que se presenta a continuación [1, 33]:

1. Desgaste en laminaciones
2. Partes fatigadas o fracturadas
3. Ajuste incorrecto entre la flecha y el núcleo
4. Reducción del entrehierro
5. Falla en rodamientos y desalineación
6. Materiales de fabricación deficientes

2.4 Secuencia de Falla en Barras.

Como se mencionó anteriormente los rotores de motores de inducción de gran capacidad, son construidos en aluminio o cobre. Es importante mencionar que los fabricantes presentan ciertas preferencias por uno de estos materiales. Sin embargo la construcción del rotor es la que determina la vida del mismo.

Existen fabricantes que prefieren utilizar cobre, debido a que el punto de fundición del aluminio es de 660°C , en comparación al cobre que es 1100°C . Esto le permite al rotor mayor capacidad para soportar las condiciones de bloqueo. Una vez que la temperatura ha fundido el metal, los resultados en el motor debido al bloqueo no son menos fatales con cualquier tipo de material.

La mayoría de las fallas en los rotores son debido a rupturas en las barras, esto se encuentra más en función de las técnicas de construcción, que del material utilizado. Dos tipos de rotores se muestran las figuras 2.11 y 2.12. La mayoría de las fracturas en las barras ocurren entre el anillo de cortocircuito y el conector final de la barra. El ciclo de esfuerzos a que se somete el rotor, mueve a la barra y/o provoca una expansión térmica del conector final [2].

La figura 2.11 representa un tipo de construcción utilizado con barras de cobre. El conector final tiene la función de acortamiento, y en algunos otros tipos una sujeción en dirección axial del núcleo. La razón para esto es la capacidad de unión entre el anillo y la barra del rotor. En la figura 2.12 se representa el tipo de construcción normalmente empleado con rotores de aluminio. El conector final tiene la doble función de acortamiento y sujeción axial.

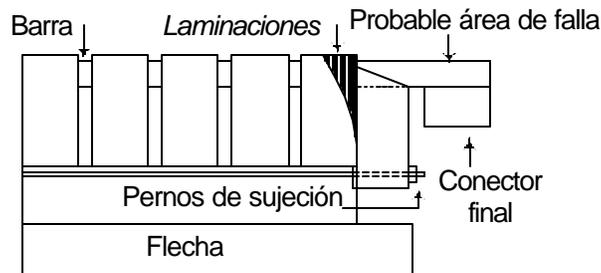


Figura 2.11. Área de falla en el rotor jaula de ardilla.

Una diferencia importante entre los dos tipos de construcción, es que durante el arranque y bloqueo, el rotor mostrado en la figura 2.11 permite la deflexión ó movimiento de la barra debido al ciclo térmico que experimenta el conector final. En el conector final crece su diámetro, lo cual no puede ser eliminado. Sin embargo esto se evita cuando se utiliza el tipo de rotor de la figura 2.12. Esta configuración se requiere en ciclos de trabajo pesados [1].

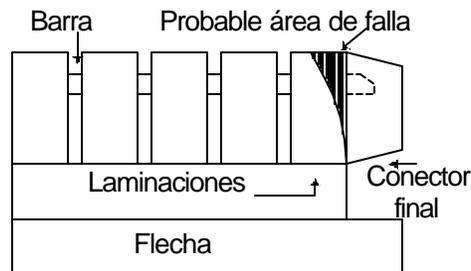


Figura 2.12. Área de falla en el rotor jaula de ardilla fundido

Una descripción sobre el desarrollo de la falla en la barra después de la fisura, presenta la siguiente secuencia [21]:

1. Sobrecalentamiento alrededor del área donde ocurre la falla
2. Fisura en la barra: arqueado y flujo de corriente en las barras cercanas a la falla, consecuentemente el calentamiento de las laminaciones.
3. En la figura 2.13 se muestra el circuito de la jaula. En la figura 2.13 (a) la distribución de la corriente es en cada barra y sección del anillo de cortocircuito. En la figura 2.13 (b), una vez que se ha incrementado la fisura (próxima a la fractura), se tiene una redistribución hacia las barras adyacentes. Si las barras adyacentes portan más corriente, se someten a mayores esfuerzos térmicos y mecánicos. Desconectada la barra del anillo de cortocircuito, se observan ligeras elevaciones de su correspondiente ranura, esto debido a la fuerza centrífuga que experimenta. La probabilidad de daño en el estator es una consecuencia de lo anterior.

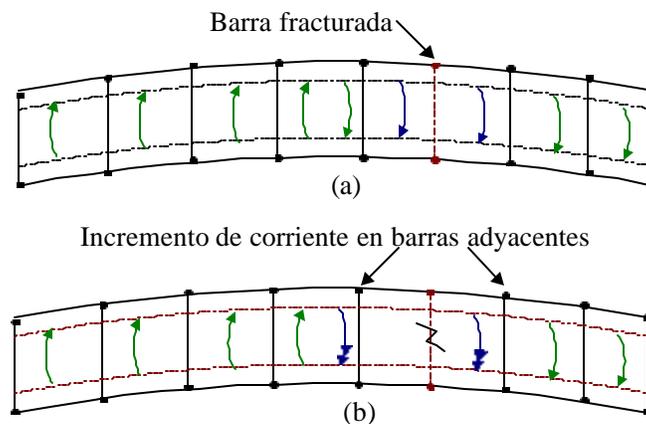


Figura 2.13. Desarrollo de la falla en el circuito de la jaula.

2.5 Redistribución de Corriente en la Jaula debido a la Fractura.

En una jaula en condiciones simétricas, la distribución de fuerzas magnetomotrices en el estator y el rotor se representan con suficiente exactitud por la fundamental. Se puede asumir una distribución espacial sinusoidal de la corriente de barras en el rotor, como se muestra en la figura 2.14 [21].

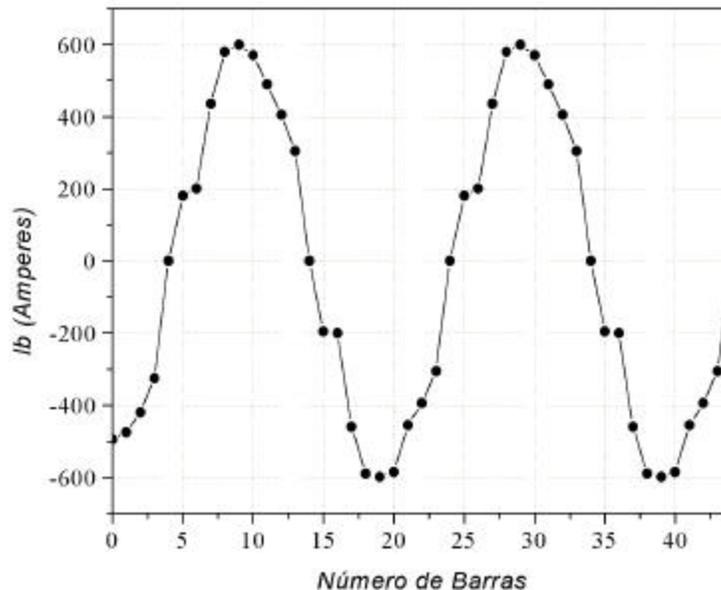


Figura 2.14 Corriente en la jaula del rotor en condiciones simétricas.

En las figuras 2.15 y 2.16 se representa el circuito que forman las barras con el anillo de cortocircuito, cada una de estas secciones constituye una malla. En [38] se desarrolló un análisis teórico-experimental sobre la fractura en barra o en alguna de las secciones del anillo de cortocircuito.

Generalmente la redistribución de corriente mantiene una relación directa con la impedancia de la jaula. Por ejemplo una vez que se ha generado la fractura en la barra, la redistribución de corriente dependerá de la relación de la impedancia de la barra al anillo de cortocircuito. Si en los anillos la impedancia es relativamente baja, entonces la corriente se redistribuirá en todo el rotor. Por el contrario si la impedancia en los anillos es relativamente alta, la corriente se redistribuye en barras adyacentes a la falla.

En el capítulo 4 se presenta un análisis por medio del Método de Deleroi [10] en el cual se gráfica la magnitud de los armónicos del entrehierro una vez que existe la redistribución de corriente en la jaula.

En la figura 2.15a se muestra dos mallas adyacentes, asimismo se considera la trayectoria de las corrientes de malla y una corriente de anillo de cortocircuito común para ambas mallas. En la figura 2.15b se genera la correspondiente distribución de corriente en cada barra y sección del anillo de cortocircuito (de acuerdo a las Leyes de Kirchhoff).

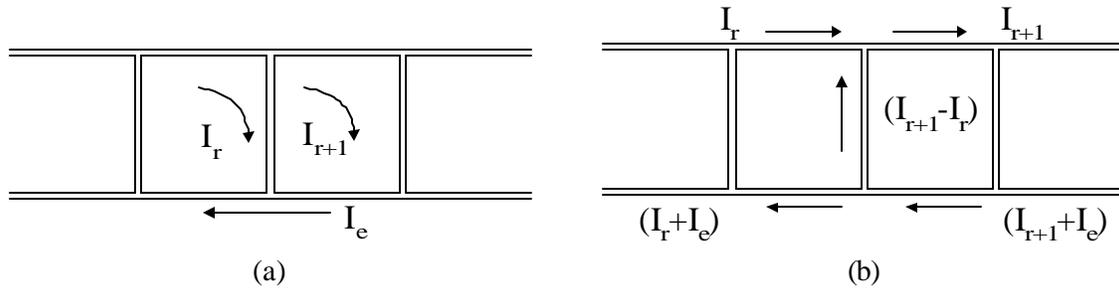


Figura 2.15 Lazos de corriente

En la figura 2.16a si la barra entre estas dos mallas es un circuito abierto, entonces se requiere $I_{r+1} = I_r$, de tal manera que se genera una sola malla entre las barras adyacentes y las secciones del anillo de cortocircuito. Las dos mallas y sus correspondientes corrientes I_r e I_{r+1} de la figura 2.15a son reemplazadas por la corriente I_r fluyendo en la malla de la figura 2.16b. La condición $I_{r+1} = I_r$ modifica la relación impedancia anillo-barra [38].

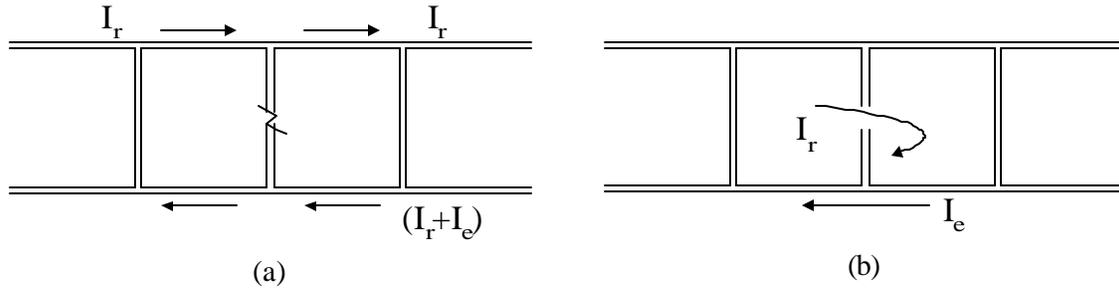


Figura 2.16. Lazos de corriente con una barra fracturada.

En la figura 2.17 se muestra la trayectoria de la corriente, cuando se considera abierta alguna sección del anillo de cortocircuito. Topológicamente se considera su análisis, debido a la redistribución de corriente entre barras y secciones del anillo de cortocircuito. Sin embargo dentro de los mecanismos de falla que afectan al rotor, los esfuerzos térmicos no logran dañar exclusivamente al anillo. Una sección del anillo porta ambos lazos de corriente de tal manera que se tenga $I_r = -I_e$ como se muestra en la figura 2.17b.

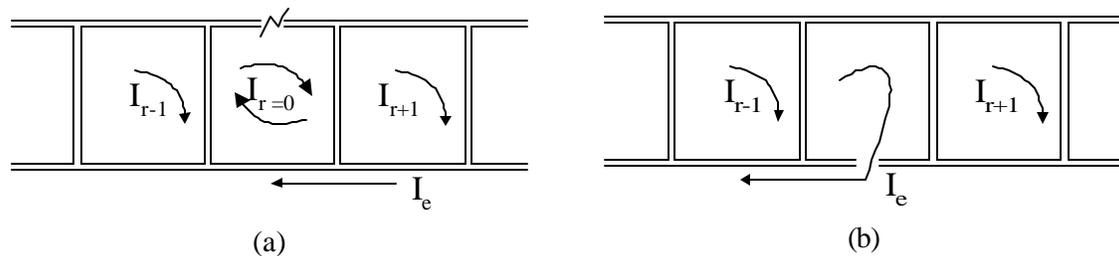


Figura 2.17. Lazos de corriente, considerando la sección del anillo de cortocircuito.

Como un caso particular se considera la figura 2.18. Si en algún instante de tiempo la fisura en la barra se encuentra en los puntos mínimos de la corriente sinusoidal, la distribución en

la jaula del rotor no crea ninguna perturbación en barras adyacentes. Por el contrario si la barra se ubica en el punto máximo, la corriente tiene que ser redistribuida hacia otras barras. Bajo estas circunstancias no solo la resistencia del rotor tiende a ser mayor si no que la inductancia del rotor, se modifica como resultado de la redistribución de la corriente. Debido a la redistribución de corriente, se produce una modificación en la densidad de flujo en el entrehierro [29].

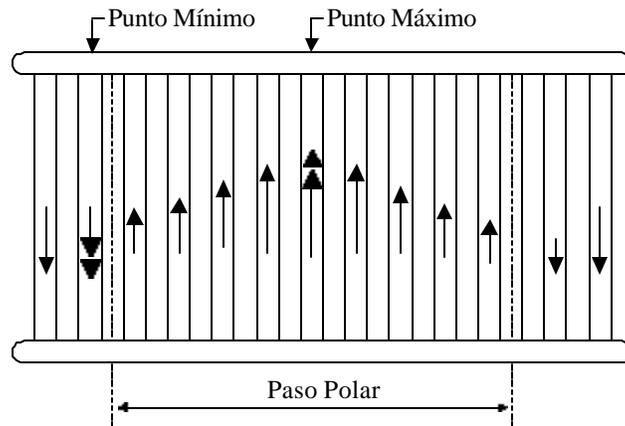


Figura 2.18. Distribución de corriente en la jaula.

En las siguientes figuras se presenta un análisis gráfico sobre la distribución de corriente, cuando existen barras desconectadas del anillo. Como referencia, en la figura 2.14 se observan condiciones simétricas (una distribución lo más aproximadamente sinusoidal) y valores nominales en el deslizamiento.

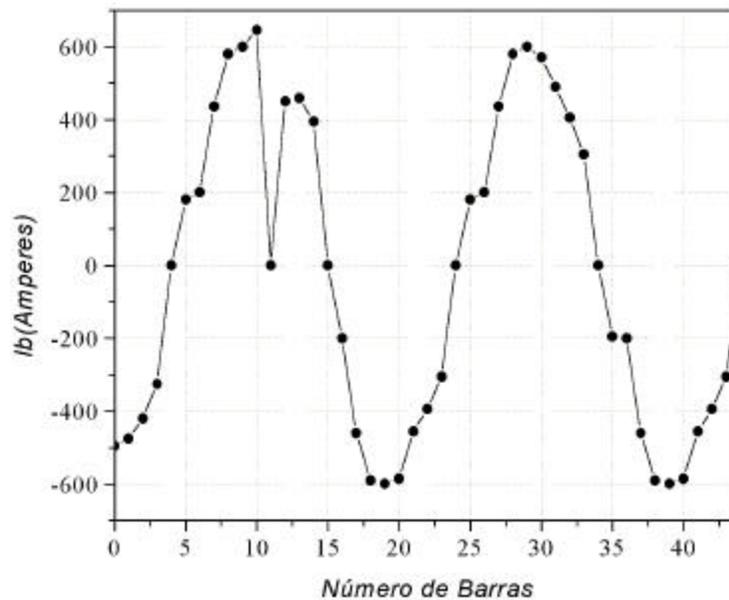


Figura 2.19. Corriente en la jaula del rotor con una barra fallada.

En la figura 2.19 se muestra la redistribución de corriente cuando se tiene una barra desconectada. Si la barra 11 sufrió la fractura, las barras 10 y 12 son susceptibles a portar mas corriente. Bajo esta consideración cualquiera de estas barras se somete a mayores esfuerzo térmicos y mecánicos durante el arranque o cualquier transitorio de corriente.

En la figura 2.20 se tienen dos barras desconectadas del anillo, las barras 10 y 11. Las barras 9 y 12 pasan a ser contiguas a la fractura y con probabilidad de falla. En esta figura se observa como la barra 9 porta un nivel de corriente mayor con respecto de la barra 12.

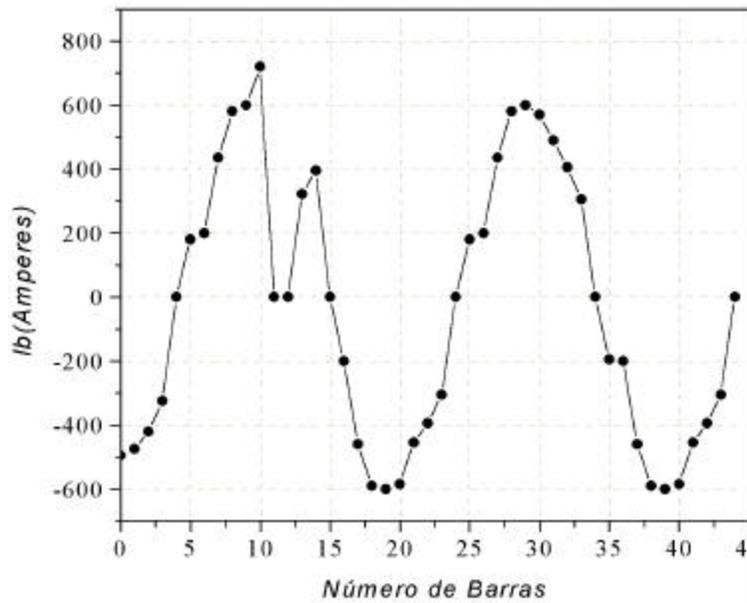


Figura 2.20. Corriente en la jaula del rotor con dos barras falladas.

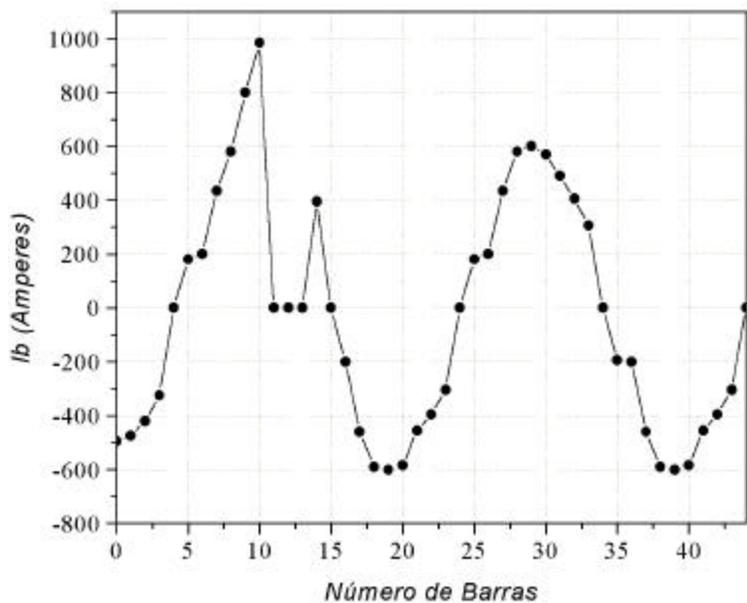


Figura 2.21. Corriente en la jaula del rotor con tres barras falladas.

En la figura 2.21 se muestra que si las barras adyacentes siguen portando más corriente, serán factibles de fractura. Las barras 9, 10 y 11 se desconectaron, el nivel de corriente que portan las adyacentes es mucho mayor que cuando se tenían solo dos barras. La barra 8 será la próxima en fallar y dependerá del ciclo de trabajo a que se somete el motor.

En motores en capacidades grandes, es suficiente con el daño en una barra fisurada, para que el motor pueda alterar su operación. Los niveles de corriente que circulan por la jaula determinan el daño en el rotor. Sin embargo no se han desarrollado trabajos que establezcan la relación de la capacidad del motor al número de barras desconectadas en el rotor, sin que este pueda fallar [27].

En la figura 2.22 se muestra un caso específico en el cual se inhibieron barras opuestas a los máximos de corriente. Las barras 10 y 20 se desconectaron de tal manera que se considera la redistribución de corriente en barras adyacentes a estas. Los niveles de corriente que portan las barras adyacentes a la falla son mucho menores que cuando se presenta el caso de desconexiones múltiples (figura 2.21).

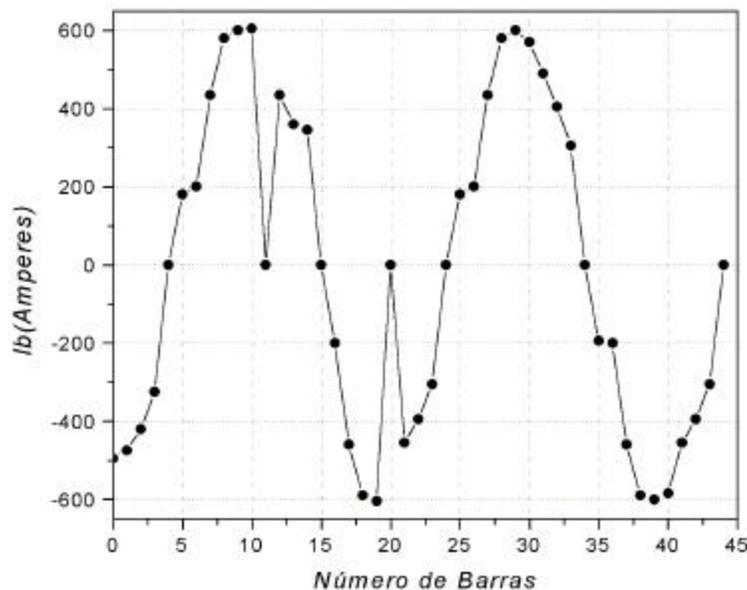


Figura 2.22. Corriente en la jaula del rotor con dos barras falladas, opuestas.

En este capítulo se presentó los principales mecanismos de falla que afectan al rotor jaula de ardilla. Durante el diseño y la manufactura de motores de gran capacidad, los fabricantes minimizan algunos de los mecanismos que afectan al rotor. Sin embargo si el usuario final no opera dentro de los límites establecidos al motor, estos pueden provocar la falla en el rotor. La redistribución de corriente es consecuencia del mecanismo de falla desde su condición más incipiente hasta la fractura.

CAPÍTULO 3 **Técnicas Eléctricas Aplicadas a Motores de Inducción.**

3.1 Introducción

En las máquinas eléctricas, los parámetros a monitorear son aquellos que le dan al operador suficientes detalles, para tomar la decisión adecuada en el manejo y mantenimiento de la máquina. Tradicionalmente cantidades, como corrientes y voltajes de línea, temperatura del núcleo, velocidad en la flecha, niveles de vibración en rodamientos han sido evaluadas. Sin embargo por métodos más específicos, se puede obtener la medición de flujos dispersos, estado del aislamiento, niveles de contaminación en lubricantes de rodamientos, entre otros.

La disponibilidad de instrumentación digital ha permitido incorporar sistemas más eficientes al monitoreo, las cuales se describen a continuación. Esta sección no tiene como objetivo profundizar en cada uno de los sistemas de monitoreo, sino principalmente presenta las ideas más importantes que se involucran en el monitoreo aplicado a los motores de inducción.

3.2 Elementos de un Sistema de Monitoreo

Las cuatro operaciones básicas del monitoreo son [33]:

1. Transducción
2. Adquisición de Datos
3. Procesamiento
4. Diagnóstico

3.2.1 Transducción

Los transductores son dispositivos que extraen pequeñas cantidades de energía de un sistema de la planta y lo transmiten a otro sistema para su subsecuente interpretación. La mayoría de los sensores que son usados en el monitoreo de máquinas eléctricas, suministran salidas en forma de corriente o voltaje. Sin embargo la aplicación específica, determina la señal de salida del sensor.

3.2.2 Adquisición de Datos.

La adquisición de datos corresponde a la manipulación de la información procedente del proceso de transducción. En muchos casos estas dos etapas no se pueden separar. En sistemas complejos de monitoreo se pueden tener varias entradas procedentes de la transducción debido a que en plantas grandes es necesario tener registro remoto. En tales casos se colocan sistemas locales de conversión de datos.

En la figura 3.1 se muestra el diagrama de un sistema básico de monitoreo aplicado a un sistema electromecánico. En este sistema se pueden extraer señales a través de los transductores que determinen la condición eléctrica y mecánica [33].

- El primer transductor ofrecerá información sobre las condiciones de las variables eléctricas en el motor.
- El segundo transductor ofrecerá información sobre las condiciones de acoplamiento del sistema, además de las condiciones mecánicas del motor y la influencia de la carga acoplada sobre este.
- El tercer transductor permitirá conocer el estado de la carga a través de sus variables mecánicas. Algunos sistemas generan influencia del sistema mecánico al sistema eléctrico o del sistema eléctrico al sistema mecánico.

Por medio de condiciones eléctricas o mecánicas convertidas a señales eléctricas, se adquieren y se procesan cada una de ellas para ofrecer un diagnóstico. Por la configuración que se tiene en la figura 3.1 se puede ofrecer un diagnóstico de la parte mecánica, analizando los resultados del sistema eléctrico o de la parte eléctrica analizando los resultados del sistema mecánico.

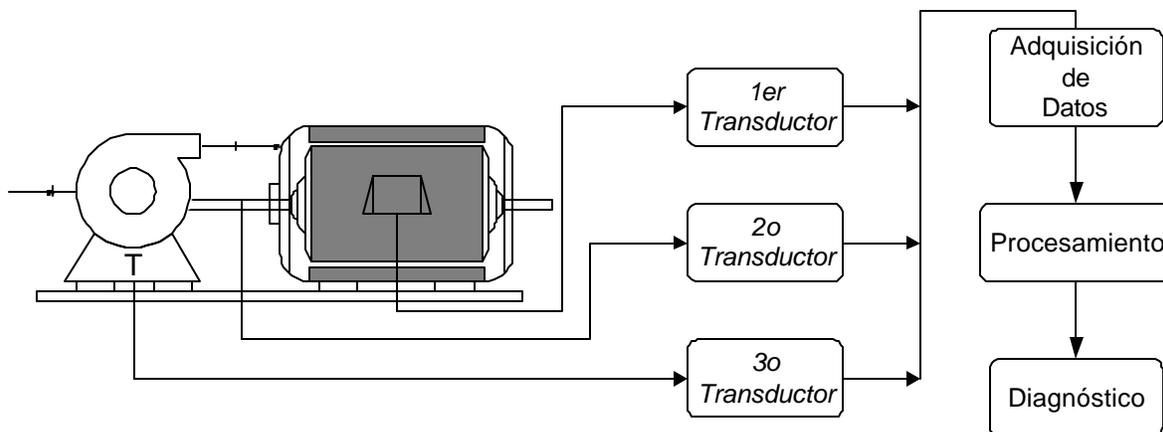


Figura 3.1 Sistema básico de monitoreo

3.2.3 Procesamiento.

Esta etapa del monitoreo es donde se colecciona y se da formato a la información de tal manera que el diagnóstico de la planta sea más fácil. El procesamiento se puede llevar a cabo en línea o fuera de línea, esto depende si sobre el sistema de monitoreo en el cual se trabaja es continuo o no. Por ejemplo, usualmente los monitores pueden procesar datos en línea. Otros equipos como los analizadores de señales se utilizan fuera de línea.

La forma más simple del procesamiento es aquella en la que la magnitud de la señal de entrada es evaluada en una base regular como una función del tiempo. Esta es la base de todas las técnicas de inspección visual, que involucran la colección de datos por el personal. El procesamiento en tal caso puede consistir de la comparación de un registro actual, con valores anteriores.

Actualmente se puede automatizar este procedimiento cuando existe un considerable número de entradas a monitorear. Los datos adquiridos son almacenados en sistemas de memoria para construir tendencias del comportamiento del monitoreo. Es fácil acumular grandes volúmenes de datos pero sobre todo, es deseable contar con sistemas automáticos de actualización

3.2.4 Diagnóstico

La operación de diagnóstico completa las actividades del monitoreo, de tal manera que la toma de decisión final involucra las áreas de mantenimiento y operación de planta. En esta etapa las decisiones por el personal incluyen costos de operación y mantenimiento de la máquina monitoreada. Actualmente han aparecido sistemas expertos que permiten al operador tener una perspectiva de las fallas en máquinas eléctricas y de esta forma tomar la decisión más adecuada.

3.3 Tipos de Mantenimiento

En el diagrama de la figura 3.2 se presentan las principales técnicas de monitoreo. Entre las técnicas mencionadas, en este trabajo se hace referencia principalmente a las técnicas eléctricas aplicadas al motor de inducción.

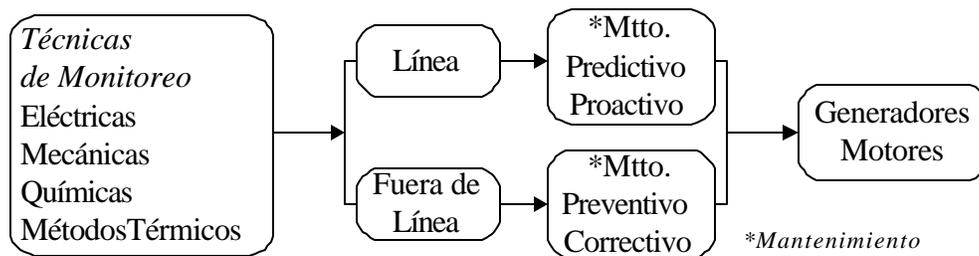


Figura 3.2 Diagrama simplificado de las principales técnicas de monitoreo

Estas técnicas pueden ser aplicadas a las máquinas eléctricas, durante su operación y fuera de ella. Si la evaluación es en línea se practica el tipo de mantenimiento predictivo, basado en la determinación del estado de la máquina en operación. Este tipo de mantenimiento se basa en el hecho que la mayoría de las partes de la máquina generan señales antes de la falla. Para percibir los síntomas con que la máquina nos está advirtiendo, se requieren varias pruebas no destructivas.

La última innovación en el campo del mantenimiento predictivo, es el mantenimiento pro activo que usa gran cantidad de técnicas para alargar la duración de operación de la maquinaria. La parte fundamental de un programa pro activo es el análisis de las causas fundamentales de las fallas en máquinas. Esas causas se pueden remediar y los mecanismos de falla se pueden eliminar gradualmente en cada máquina [5, 33, 40].

Si la evaluación es fuera de línea, el mantenimiento que se practica es del tipo correctivo o mantenimiento de crisis. Por mucho tiempo este fue la forma dominante del mantenimiento y sus costos son relativamente elevados, debido a los tiempos de inactividad no programados, maquinaria dañada y gastos de tiempo extra.

El otro tipo de mantenimiento fuera de línea, o que simplemente puede alterar la operación de la máquina para su aplicación, es el mantenimiento preventivo. En este tipo se analizan las historias de cada máquina y se programan reacondicionamientos periódicos antes de que ocurran los problemas que estadísticamente se pueden esperar [40].

Cualquiera de las condiciones antes mencionadas se aplica tanto a motores como a generadores. En la siguiente sección se mencionan algunas técnicas eléctricas aplicadas al monitoreo de motores de inducción.

3.4 Técnicas Eléctricas

En las máquinas rotatorias, existen un flujo magnético y un campo eléctrico, los cuales varían a lo largo del entrehierro, periódica y espacialmente (para una máquina de corriente alterna periódicamente con el tiempo). Bajo condiciones ideales, el flujo magnético y el campo eléctrico tienen formas de onda simétricas, pero cuando existe algún disturbio estas señales se deforman.

Cualquier daño en el rotor podría ser detectado por transductores colocados en el estator, cualquier daño en el estator podría ser detectado por transductores colocados en el rotor ó en el estator.

La asimetría en rotor y estator causa cambios en la máquina que pueden ser detectables fuera de ella. Estas modificaciones alteran los parámetros tales como corriente, voltaje frecuencia, entre otros; los cuales pueden ser medidos para dar una indicación de la condición de la máquina.

El propósito de esta sección es mencionar algunas pruebas normalizadas que se aplican al motor de inducción y algunas que aun no lo están. Se indican las referencias para profundizar en esta información.

Algunos procedimientos para la evaluación de motores de inducción en línea o fuera de línea, se describen en NEMA MG 1-1993 [19]. Las pruebas recomendadas incluyen lo siguiente:

1. Medición en vacío de la corriente de cada fase
2. Medición en vacío de la velocidad y la potencia
3. Determinación (usualmente por cálculo) de la corriente de rotor bloqueado
4. Evaluación de alto potencial
5. Evaluación del aislamiento por megohmetro

6. Medición de la resistencia del devanado por medio del puente de Wheatstone
7. Medición del aislamiento en rodamientos.
8. Medición de voltaje inducido en la flecha para máquinas sin aislamiento en rodamientos
9. Determinación de la eficiencia a 100 %, 75 % y 50 % de plena carga
10. Medición de la corriente de rotor bloqueado, factor de potencia y par
11. Determinación de la corriente a plena carga y deslizamiento.
12. Determinación del par de desenganche
13. Evaluación de temperatura en operación continua y a diferentes porcentajes del factor de servicio.

Las mediciones de corriente en vacío, velocidad y potencia son realizadas a un cierto porcentaje del voltaje y la frecuencia [13].

La prueba de alto potencial se recomienda realizarla después de que todas las pruebas se han llevado a cabo, como se describe en IEEE 112, 9.2.1. Durante un minuto el nivel de voltaje utilizado en la prueba es al doble del voltaje línea-línea más 1000 volts. Cada fase se evalúa por separado. Los apartarrayos y capacitores se deben desconectar durante la prueba.

El nivel de 2500 volts corriente directa para la prueba de resistencia de aislamiento como se describe en IEEE 112, 9.3, se recomienda para todas las máquinas de inducción arriba de los 600 CP. El índice de polarización de cada fase se determina utilizando el megohmetro por 10 minutos. Las lecturas se llevan a cada minuto durante el intervalo de tiempo establecido. Estos datos se deben mantenerse como registros de mantenimiento de la máquina.

La resistencia del devanado se mide con un puente de Wheatstone. Los valores obtenidos se corrigen a la temperatura de operación, como se especifica en IEEE 112, 5.1. Esta prueba se utiliza para medir las pérdidas I^2R , utilizadas en la determinación de la eficiencia.

El aislamiento en rodamientos se usa para prevenir voltajes inducidos al final de la flecha, debido al flujo de corriente entre la flecha y el rodamiento. El voltaje puede ser inducido en los contactos desplazados en la flecha de la máquina. Este desplazamiento de contactos puede ser debido al rozamiento en los rodamientos o desgaste en los sellos.

Cualquier asimetría en la máquina produce una distorsión del campo en el plano radial y axial, entonces un voltaje pulsante se genera en la flecha. Si la asimetría produce modificaciones en la dirección axial, se generan elevaciones en el flujo homopolar, lo que produce voltajes de corriente directa en la flecha [33].

Los métodos de monitoreo del voltaje inducido en la flecha incluyen mediciones de voltaje en corriente directa y alterna y algunas veces análisis del contenido armónico de la forma de onda. En IEEE 112, 9.4 se describen los procedimientos de evaluación.

En IEEE 112, 6.2 describe diversos métodos para determinar la eficiencia. En general el método entrada-salida (método A) es recomendado aplicarlo a motores fraccionarios. Para motores horizontales de inducción en rangos de 1 a 250 CP se recomienda aplicar el método entrada salida con segregación de pérdidas (método B). Para motores verticales en el mismo rango de potencias se recomienda aplicar este método. Sin embargo cuando las condiciones en los rodamientos no lo permiten, se recomienda aplicar los métodos E, E1, F ó F1. En motores polifásicos de capacidad mayor a 250 CP pueden ser evaluados por los métodos B, C, E, E1, F ó F1 dependiendo de los requerimientos de la prueba.

El monitoreo del rotor se realiza con termopares durante la prueba de baja frecuencia. La corrección de la resistencia en esta prueba se realiza a la temperatura de operación del motor. La resistencia del rotor se utiliza para calcular las pérdidas I^2R . En el método F de IEEE 112, 6.7 se dan los procedimientos de cálculo.

La corriente de rotor bloqueado, el factor de potencia y la prueba del par dependen de la potencia de entrada. La medición de estos parámetros es recomendable como parte de las pruebas durante el proceso de fabricación. Durante la prueba de bloqueo se recomienda utilizar un sistema de sujeción en la flecha del motor de tal manera que no permitan el mínimo movimiento [19].

Las pruebas de temperatura que se recomiendan son: acoplado el motor a un dinamómetro, conectando dos máquinas en configuración motor-generator y el método de la doble frecuencia. Un método modificado del dinamómetro, emplea la reducción del voltaje del estator, de tal manera que la corriente se ajuste con la carga [19].

El flujo disperso axial se genera en todas las máquinas eléctricas debido a que éstas no son construidas simétricamente. Esto se debe a la diferencia en la reluctancia del circuito magnético y a la variación del espesor en la estructura de la máquina [33].

La existencia de las asimetrías citadas anteriormente dará lugar a que aparezca una diferencia neta, entre las corrientes que circulan en una determinada zona de los cabezales y las que circulan por los cabezales diametralmente opuestos. Este desbalance conduce a que se genere una componente de flujo axial neto.

Fallas tales como cortocircuito en el devanado, voltajes desbalanceados y barras rotas en el rotor, representan severos daños en la simetría interna de la máquina; por lo que el efecto de la producción del flujo axial, será observable.

Esta técnica de monitoreo registra una señal de flujo axial a través de bobinas de inspección. La ubicación de la bobina generalmente es en el interior del motor y concéntrica con el eje, de tal manera que permita el paso del flujo a través de ella. Sin embargo, para emplear este método en instalaciones industriales es necesario medir desde el exterior. En [5] han realizado la medición del flujo desde el exterior de la carcasa: la bobina consiste en un arrollamiento de cobre, situado en la parte posterior del motor debajo del ventilador. En la figura 3.3 se muestra la posición de las bobinas en la parte interna y la parte externa.

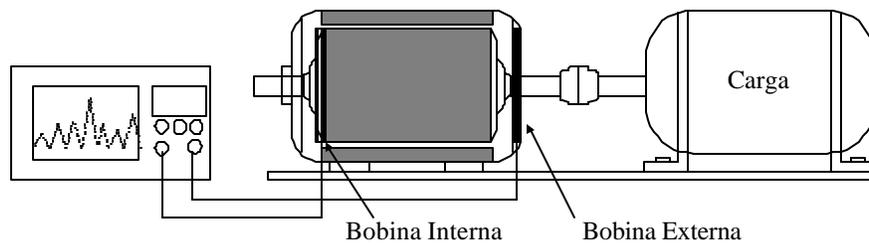


Figura 3.3 Ubicación de las bobinas para la medición del flujo axial.

La señal del flujo axial se analiza espectralmente. La aparición de ciertas armónicas determina la condición de la máquina. Este método puede ser completamente no invasivo y un solo sensor sirve para identificar diversos tipos de fallas. Sin embargo, es una técnica que no se encuentra normalizada. [19].

3.5 Esquemas de Prueba

En la figura 3.4 se presenta el circuito de prueba utilizado en este trabajo. Se empleó un dinamómetro para establecer las variaciones de carga aplicadas al motor. Las mediciones se realizaron a través de un osciloscopio Tektronix TDS680B 4 canales, 5 gigamuestras/seg y una impedancia de entrada de 1 Megaohm. El osciloscopio puede recibir la señal en tiempo y transformarla al dominio de la frecuencia.

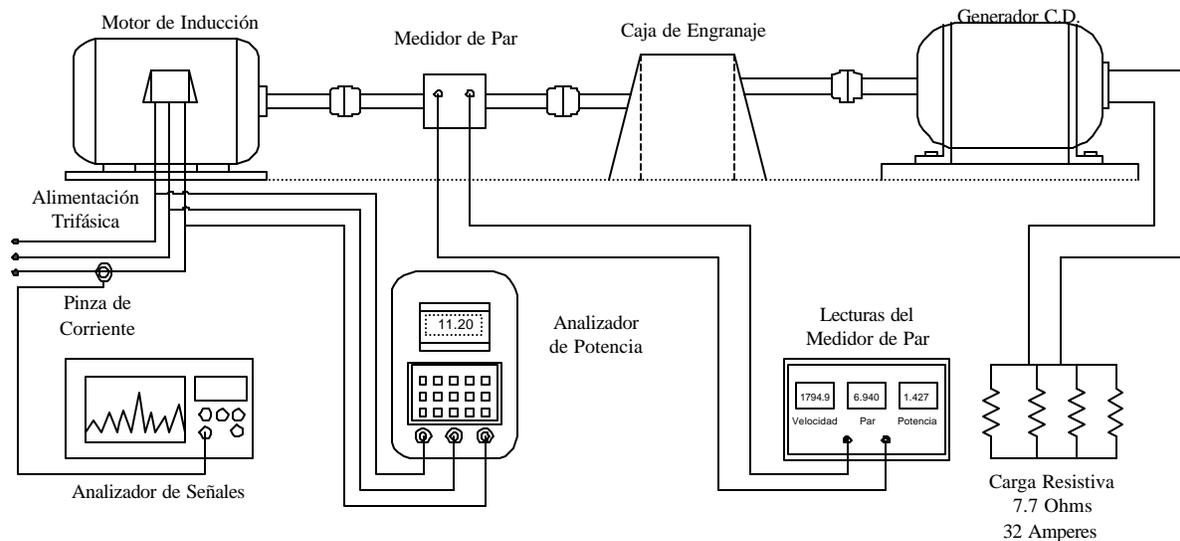


Figura 3.4. Circuito de prueba en laboratorio.

La señal analizada fue adquirida por medio de puntas de corriente. Estos transductores son transformadores de intensidad cuyo núcleo magnético puede ser abierto de forma que se coloque alrededor del conductor al que se desea medir la corriente. Este tipo de punta está habitualmente diseñado para su empleo con osciloscopios y otros instrumentos de medida.

Por este motivo, disponen de pequeños interruptores que permiten seleccionar el rango de corriente que se va a medir. Su precisión es elevada y su ancho de banda suele ser suficiente para analizar armónicos a 20 veces la frecuencia de la red. El ancho de banda de la punta de corriente que se utilizó en la figura 3.4 fue de 4 kHz.

Los parámetros: voltaje, corriente y potencia consumidos por el motor fueron monitoreados a través del analizador de potencia. Por medio del medidor de par, se obtienen la velocidad, par y potencia en la flecha del motor. Dentro de estos parámetros, la velocidad es importante porque permite calcular la frecuencia de deslizamiento a la que se ubican las bandas laterales.

El diagrama presentado en la figura 3.4 es un esquema implementado para monitorear la mayor cantidad de variables en el motor de prueba. Los resultados que se obtuvieron en laboratorio permitieron establecer las condiciones que se debería seguir al momento de realizar pruebas en motores trabajando en línea.

En la figura 3.5 se muestra el circuito de prueba empleado en la evaluación de motores trabajando en línea. El sistema consta de un analizador de señales, un acondicionador de señal y el transductor de corriente. En esta caso se utilizó una pinza de corriente con una relación de transformación de 10 a 1, su ancho de banda es de 20 MHz. El acondicionador de señales puede o no incluirse en el sistema. Sin embargo es una forma de evitar que la adquisición sea contaminada por componentes que se encuentran en la red de alimentación.

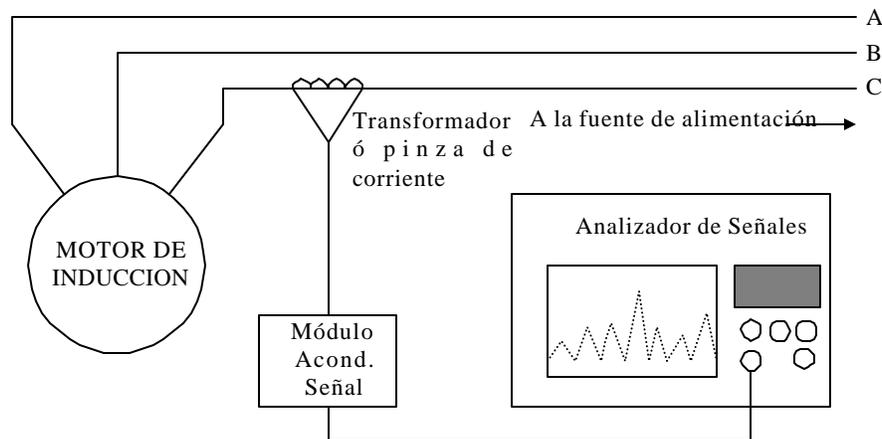


Figura 3.5. Circuito de prueba en línea.

Actualmente se han reportado trabajos [4,25] en donde se aplican técnicas de procesamiento digital de señales para mejorar las variables a diagnosticar. El sistema auxiliar permite crear un registro permanente sobre las condiciones no sólo eléctricas del rotor sino de las condiciones electromecánicas de todo el motor

CAPÍTULO 4

Análisis de las Fuerzas Magnetomotrices con Asimetría en el Rotor

4.1 Introducción

Bajo condiciones normales de operación del motor, se aplica un voltaje de secuencia positiva al devanado del estator. Esto produce campos rotatorios en sentido directo en el entrehierro. El campo induce corrientes a la frecuencia de deslizamiento en el rotor. Estas corrientes inducidas en el rotor, producen un campo magnético sobre el entrehierro, el cual se forma por dos componentes: en sentido directo e inverso. Si el rotor es simétrico los campos directos se adicionan, mientras que los de sentido inverso se cancelan. Sin embargo bajo condiciones de asimetría del rotor, los campos en sentido inverso no se cancelan. El efecto de modulación del campo rotatorio inverso en la señal de corriente, es la base de una de las técnicas de monitoreo en línea. En esta técnica de monitoreo la barra dañada, forma un circuito abierto en la jaula del rotor.

4.2 Fuerzas Magnetomotrices actuando en el Entrehierro

Un devanado trifásico de dos polos en un motor de inducción, puede ser representado por bobinas desplazadas a 120° espaciales. Estas son excitadas por un sistema trifásico de corrientes en función del tiempo. En operación normal, cada bobina conduce una corriente sinusoidal la cual establece una fuerza magnetomotriz (o campo magnético pulsante). Se asume que en cada fase se establece la fuerza magnetomotriz (*fmm*), independiente de las otras fases. Si las fases de los devanados están distribuidos en un cierto número de ranuras en la superficie del núcleo, la distribución espacial de la *fmm* es no sinusoidal [12].

Sobre una aproximación de la fuerza magnetomotriz se puede resolver para la componente fundamental y una serie de armónicos espaciales impares de orden “n”. En el siguiente análisis solo la componente fundamental se considera, y consecuentemente el entrehierro tiene tres *fmm*s sinusoidales distribuidas 120° espaciales. Como cada corriente de fase varía con el tiempo, la correspondiente *fmm* varía en magnitud pero mantiene una distribución espacial sinusoidal.

Denotando fmm_1 la fuerza magnetomotriz de la bobina 1 en algún instante será:

$$fmm_1 = F_1 \cos \theta \quad (4.1)$$

donde θ representa el desplazamiento angular en la superficie del devanado en radianes, con el origen en el eje de la bobina 1. Como la corriente de la bobina 1 varía sinusoidalmente con la frecuencia angular ω , la amplitud de F_1 varía proporcionalmente. La amplitud instantánea F_1 se encuentra determinada por la siguiente ecuación:

$$F_1 = H_1 \text{ sen } \mathbf{w} \quad (4.2)$$

donde H_1 es el valor máximo de F_1 correspondiente al pico de corriente de la bobina 1, el origen en el tiempo es tomado en el instante cuando su valor es cero. Combinado las ecuaciones 4.1 y 4.2 en función del tiempo se obtiene la siguiente ecuación:

$$fmm_1 = H_1 \cos \mathbf{q} \text{ sen } \mathbf{w} \quad (4.3)$$

La fuerza magnetomotriz de la bobina 2 es desplazada a 120° en espacio y tiempo relativos a la fuerza fmm_1 :

$$fmm_2 = H_1 \cos(\mathbf{q} - 2\mathbf{p}/3) \text{ sen}(\mathbf{w} - 2\mathbf{p}/3) \quad (4.4)$$

similarmente para la bobina 3 se tiene:

$$fmm_3 = H_1 \cos(\mathbf{q} - 4\mathbf{p}/3) \text{ sen}(\mathbf{w} - 4\mathbf{p}/3) \quad (4.5)$$

La resultante de las tres fuerzas magnetomotrices es:

$$fmm_{total} = f_1 + f_2 + f_3 \quad (4.6)$$

$$fmm = H_1 [\cos \mathbf{q} \text{ sen } \mathbf{w} + \cos(\mathbf{q} - 2\mathbf{p}/3) \text{ sen}(\mathbf{w} - 2\mathbf{p}/3) + \cos(\mathbf{q} - 4\mathbf{p}/3) \text{ sen}(\mathbf{w} - 4\mathbf{p}/3)] \quad (4.7)$$

Así aplicando la relación trigonométrica $\cos \mathbf{a} \text{ sen } \mathbf{b} = 1/2 \text{ sen}(\mathbf{a} + \mathbf{b}) - 1/2 \text{ sen}(\mathbf{a} - \mathbf{b})$ a la ecuación 4.7, se obtiene la siguiente ecuación:

$$fmm = \frac{3}{2} H_1 \text{ sen}(\mathbf{w} - \mathbf{q}) \quad (4.8)$$

Esta expresión representa una distribución sinusoidal de la fuerza magnetomotriz con amplitud constante, la cual se mueve a una velocidad angular uniforme ω , en la dirección del incremento θ . Este movimiento describe como la forma sinusoidal viaja a través de una distancia ωt en un tiempo t , y por lo tanto el incremento del desplazamiento es uniforme en el tiempo [24].

4.2.1 Armónicos Temporales.

Los armónicos de tiempo de la fmm son producidos por corrientes armónicas en cada una de las fases del devanado. Asumiendo, por ejemplo que las corrientes de cada fase tienen una componente de 5º armónico, y consecuentemente cada fase establece una fmm estacionaria, la cual tiene la misma distribución espacial que la fundamental (varía cinco veces la frecuencia de entrada). El 5º armónico de la fmm en la bobina 1 se refiere por la siguiente ecuación:

$$fmm_1 = H_{1,5} \cos \mathbf{q} \text{sen } 5\mathbf{w} \quad (4.9)$$

donde $H_{1,5}$ es la amplitud máxima de la fundamental, correspondiente a la fmm espacial debido al 5° armónico de corriente. Similarmente se tiene para fmm_2 y fmm_3 :

$$fmm_2 = H_{1,5} \cos(\mathbf{q} - 2\mathbf{p}/3) \text{sen } 5(\mathbf{w} - 2\mathbf{p}/3) \quad (4.10)$$

$$fmm_3 = H_{1,5} \cos(\mathbf{q} - 4\mathbf{p}/3) \text{sen } 5(\mathbf{w} - 4\mathbf{p}/3) \quad (4.11)$$

La resultante es obtenida por la siguiente ecuación:

$$fmm = \frac{3}{2} H_{1,5} \text{sen}(5\mathbf{w} + \mathbf{q}) \quad (4.12)$$

4.2.2 Armónicos Espaciales

En el análisis anterior se asume que cada corriente de fase establece una fmm espacial fundamental, y que la presencia de armónicos espaciales impares de mayor orden pueden ser ignorados. En efecto, cuando un devanado polifásico es excitado por una corriente sinusoidal, los armónicos espaciales de la fmm debido a las diferentes combinaciones de fase producen armónicos rotatorios de las fmm . Por lo tanto, los quintos armónicos espaciales debido a la corriente fundamental se pueden definir como:

$$fmm_1 = H_{5,1} \cos 5\mathbf{q} \text{sen } \mathbf{w} \quad (4.13)$$

$$fmm_2 = H_{5,1} \cos 5(\mathbf{q} - 2\mathbf{p}/3) \text{sen}(\mathbf{w} - 2\mathbf{p}/3) \quad (4.14)$$

$$fmm_3 = H_{5,1} \cos 5(\mathbf{q} - 4\mathbf{p}/3) \text{sen}(\mathbf{w} - 4\mathbf{p}/3) \quad (4.15)$$

y la fuerza magnetomotriz resultante es:

$$fmm = \frac{3}{2} H_{5,1} \text{sen}(\mathbf{w} + 5\mathbf{q}) \quad (4.16)$$

Este resultado confirma la existencia de un armónico espacial de quinto orden rotando en dirección contraria a 1/5 de la velocidad síncrona. Similarmente el séptimo armónico espacial puede mostrar que gira en sentido inverso a 1/7 de la velocidad síncrona. Éstos son conocidos como armónicos espaciales o armónicos de campo de la fmm producidos por el devanado del estator y alimentado por corrientes sinusoidales. Cuando los armónicos de corriente están presentes en las fases del devanado, los armónicos espaciales y temporales, aparecen simultáneamente. A cada armónico espacial de orden n le corresponde un número de polos, el cual es determinado por la siguiente ecuación:

$$N_{pn} = nP \tag{4.17}$$

Si P es el número de polos, esta relación establece que el n ésimo armónico experimenta n ciclos completos a lo largo del entrehierro, por un ciclo completo experimentado por la fundamental a lo largo de 2π radianes en la escala de la fundamental.

4.3 Campos Rotatorios en el Entrehierro

A principios de la década de los 70's la teoría generalizada de campos rotatorios, se utilizó para demostrar que la asimetría de rotor ó estator en un motor de inducción jaula de ardilla, conduce a una sucesión infinita de frecuencias. A continuación se considera el análisis por medio de los campos rotatorios, en dos condiciones del rotor: simétrica y asimétrica. En este análisis se considera una máquina de 2 polos, devanado trifásico distribuido en el estator y rotor jaula de ardilla.

4.3.1 Condiciones Simétricas

1. El campo magnético del estator gira a ω (rad/seg). Con el rotor girando a ω_r , abajo de la velocidad síncrona ω , el deslizamiento se define por la siguiente ecuación:

$$s = \frac{\omega - \omega_r}{\omega} \tag{4.18}$$

2. El campo del estator corta la superficie del rotor a $(\omega - \omega_r)$ (rad/seg) ó $s\omega$ (rad/seg). Un voltaje de secuencia positiva en el estator produce un campo en sentido directo en el entrehierro, que por el movimiento relativo se inducen voltajes a $s\omega$ en los devanados del rotor. Estos voltajes producen corrientes en el circuito del rotor.
3. Estas corrientes en el rotor, producen campos directos e inversos sobre el entrehierro. Si el rotor es simétrico, los voltajes y corrientes en el rotor son balanceados y con una frecuencia $s\omega$ (relativo al rotor). Consecuentemente el campo magnético del rotor gira a ω relativo al estator, es decir, a la misma velocidad que el campo magnético del estator, como se muestra en la figura 4.1.

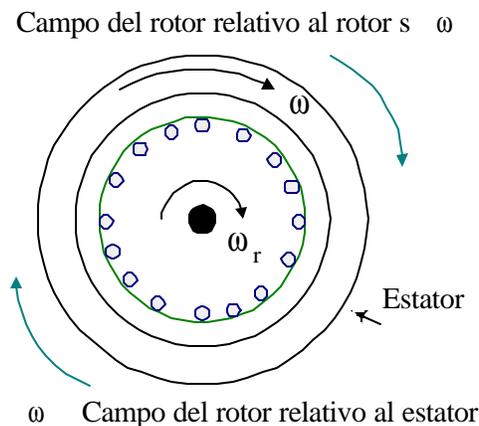


Figura 4.1. Campos rotatorios en condiciones simétricas.

4. En condiciones simétricas del rotor, los campos directos se adicionan, mientras que los de sentido inverso se cancelan [9].

4.3.2 Condiciones Asimétricas.

1. Cuando existe una asimetría en el rotor se produce una componente pulsante del campo alrededor donde se encuentra la falla Para el análisis de los efectos que el campo produce sobre otras variables de la máquina como las corrientes de alimentación o el par, es necesario descomponerlos en armónicos de campo giratorio cuyas fuerzas electromotrices sobre los devanados de la máquina pueden ser estudiadas. Esta descomposición se puede realizar a partir del Teorema de Leblanc. En la figura 4.2 aparecen dos campos magnéticos que se oponen.

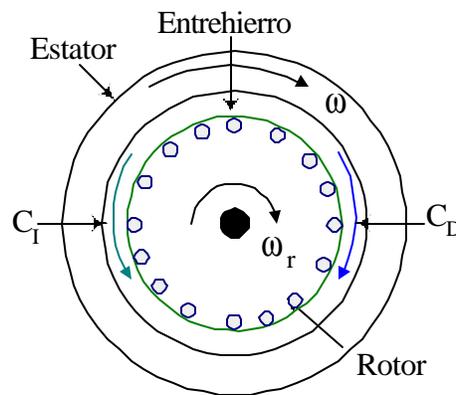


Figura 4.2. Campos rotatorios en condiciones asimétricas.

2. El teorema de Leblanc [5] establece que cualquier armónico de un campo magnético pulsante creado por una corriente de variación angular ω , se puede descomponer en dos campos giratorios de sentidos opuestos, amplitud a la mitad del campo original y velocidad angular ω igual a la pulsación de la corriente.
3. Como el rotor tiene una frecuencia angular ω_r ó $\omega(1-s)$, los dos campos magnéticos que se oponen están rotando a una frecuencia angular $s\omega$ con respecto al rotor.
4. El campo en sentido directo C_D gira a $[(1-s)+s]\omega$ ó ω , con respecto al estator. Es decir, el campo directo corta los devanados del estator a la velocidad síncrona, e induce un voltaje a una frecuencia fundamental f (Hz).
5. El campo en sentido inverso C_I gira a una velocidad $s\omega$ con respecto al rotor, ó $[s-(1-s)]\omega$ con respecto al estator. El campo inverso induce un voltaje en el estator a una frecuencia de $(1-2s)f$ (Hz) [16].

4.4 Fuerzas Magnetomotrices con Asimetría en el Rotor.

En el motor de inducción las fallas pueden ser divididas en dos categorías, las que son afectadas por la permeancia en el entrehierro y aquellas que afectan las fuerzas magnetomotrices en el entrehierro. La variación en cualquiera de estas dos categorías,

modifica las inductancias mutua y propia del motor, generando cambios en el espectro de corriente del estator.

En el siguiente análisis sólo se considera la fundamental para un motor con “P” pares de polos y una frecuencia angular ω . Esto produce una fuerza magnetomotriz de estator fmm_s que varía con el ángulo mecánico θ .

$$fmm_s = \hat{H}_s \text{sen}(\mathbf{w} - P\mathbf{q}) \quad (4.19)$$

El ángulo de fase ϕ se encuentra determinado por $\phi = (\theta - \omega_r t)$, como se muestra en la figura 4.3.

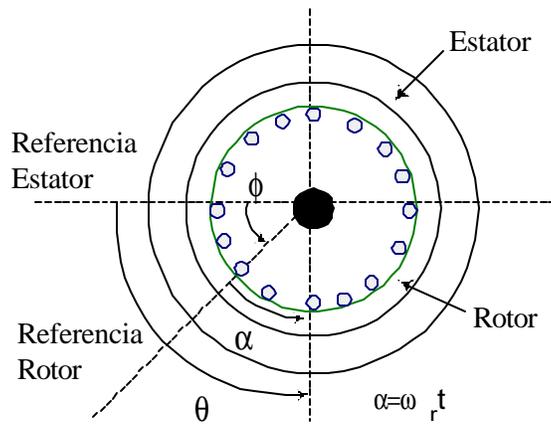


Figura 4.3. Marcos de referencia rotor y estator.

En el rotor se forman dos polos por la fuerza magnetomotriz del entrehierro. Si el ángulo se determina por $\theta = (\phi + \omega_r t)$, la ecuación 4.19 se modifica:

$$fmm_s = \hat{H}_s \text{sen}[\mathbf{w} - P\mathbf{f} + \mathbf{w}_r t] \quad (4.20)$$

considerando para $P=1$ la ecuación 4.20 se modifica:

$$fmm_s = \hat{H}_s \text{sen}[(\mathbf{w} - \mathbf{w}_r)t - \mathbf{f}] \quad (4.21)$$

Esta fuerza magnetomotriz gira en sentido directo con respecto al rotor, a la velocidad de deslizamiento. En condiciones simétricas en el rotor se inducen corrientes, que a su vez producen una fuerza magnetomotriz en el entrehierro fmm_R , como se muestra en la siguiente ecuación:

$$fmm_R = \hat{H}_R \text{sen}[(\mathbf{w} - \mathbf{w}_r)t - \mathbf{f}] \quad (4.22)$$

Si el rotor presenta alguna asimetría, tal como barras rotas, la fuerza magnetomotriz debida a la corriente del rotor se modula por $\text{sen } 2\phi$ [32], teniendo entonces la ecuación:

$$fmm_r = \hat{H}_R \text{sen}[(\mathbf{w} - \mathbf{w}_r)t - \mathbf{f}] \text{sen } 2\mathbf{f} \quad (4.23)$$

Utilizando la identidad trigonométrica $\text{sen } \mathbf{a} \text{sen } \mathbf{b} = 1/2 [\cos(\mathbf{a} - \mathbf{b}) - \cos(\mathbf{a} + \mathbf{b})]$, en la ecuación 4.23 se tiene la siguiente expresión:

$$\text{sen}[(\mathbf{w} - \mathbf{w}_r) - \mathbf{f}] \text{sen } 2\mathbf{f} = 1/2 \{ \cos[(\mathbf{w} - \mathbf{w}_r)t - 3\mathbf{f}] - \cos[(\mathbf{w} - \mathbf{w}_r)t + 3\mathbf{f}] \}$$

que permite obtener la ecuación 4.24:

$$fmm_r = \frac{\hat{H}_R}{2} \{ \cos[(\mathbf{w} - \mathbf{w}_r)t - 3\mathbf{f}] - \cos[(\mathbf{w} - \mathbf{w}_r)t + \mathbf{f}] \} \quad (4.24)$$

Refiriendo esta fuerza magnetomotriz al marco de referencia del estator $\phi = (\theta - \omega_r t)$, se obtiene la siguiente ecuación:

$$fmm_s = \frac{\hat{H}_R}{2} \{ \cos[(\mathbf{w} + 2\mathbf{w}_r)t - 3\mathbf{q}] - \cos[(\mathbf{w} - 2\mathbf{w}_r)t + \mathbf{q}] \} \quad (4.25)$$

Empleando la ecuación 4.18 en la ecuación 4.25 se tiene lo siguiente:

$$fmm_s = \frac{\hat{H}_R}{2} \{ \cos[(3 - 2s)\mathbf{w} - 3\mathbf{q}] - \cos[(-1 + 2s)\mathbf{w} + \mathbf{q}] \} \quad (4.26)$$

Finalmente, aplicando la identidad $\cos(\mathbf{b}) = \cos(-\mathbf{b})$ a la ecuación 4.26, se obtiene la siguiente ecuación:

$$fmm_s = \frac{\hat{H}_R}{2} \{ \cos[(3 - 2s)\mathbf{w} - 3\mathbf{q}] - \cos[(1 - 2s)\mathbf{w} - \mathbf{q}] \} \quad (4.27)$$

La primera componente de la fuerza magnetomotriz, contiene los términos 3ω y 3θ , los cuales inducen fuerzas electromotrices de secuencia cero en los devanados del estator. Esto no contribuye a la modificación de la corriente de entrada. La segunda componente de la fuerza magnetomotriz induce un conjunto trifásico de corrientes a la frecuencia de entrada, además de que contiene una componente a $2s\omega$ (rad/seg) debajo de la fundamental.

La modulación al doble de la frecuencia de deslizamiento $2s\omega$ produce una modificación de la corriente de entrada. Esta modificación de la corriente reacciona con algunas oscilaciones en el par. Si el motor no presenta una inercia infinita estas oscilaciones del par,

produce variaciones en la velocidad a $2sf$ (Hz). El efecto de variación en la velocidad genera modificación en la corriente a $(1-2s)f$ (Hz) y produce una banda lateral superior a $(1+2s)f$ (Hz), debido a la modificación del tercer armónico del flujo en el estator [32].

En el análisis anterior sólo se considera el efecto de la asimetría alrededor de la fundamental. Sin embargo para considerar todas las posibles frecuencias debidas a la asimetría se realiza el siguiente análisis. Aplicando el teorema de Leblanc se obtendrán dos series de armónicos de sentidos contrarios que giran respecto al rotor a una velocidad igual a la frecuencia de pulsación del campo magnético. Si se considera la fundamental de una serie de armónicos, su velocidad relativa respecto al rotor será:

$$n_s - n_r \quad (4.28)$$

La velocidad relativa al rotor de la fundamental en sentido directo será:

$$P(n_s - n_r) \quad (4.29)$$

El campo alrededor de la fractura en barras del rotor crea dos polos [5], el número de polos del armónico coincidirá con su orden, entonces, la velocidad del rotor asociado al armónico de orden k será:

$$\frac{P(n_s - n_r)}{k} \quad (4.30)$$

Refiriendo la velocidad del rotor al estator:

$$\frac{P(n_s - n_r)}{k} + n_r \quad (4.31)$$

Por lo tanto la velocidad respecto del estator del armónico directo de orden “ k ” por la fractura de la barra será:

$$Pn_s + n_r(k - P) \quad (4.32)$$

Así las frecuencias inducidas en el estator por este armónico serán:

$$f + n_r(k - P) = f + n_s(1 - s)(k - P) = f \left[\frac{k}{P}(1 - s) + s \right] \quad (4.33)$$

Si en vez de considerar el armónico de sentido directo, se considera el armónico inverso, se obtendrá una ecuación equivalente a la ecuación anterior. Sin embargo en este caso aparecerán dos signos cambiados debido a que dicho armónico presenta un sentido de giro contrario al del rotor.

$$-\frac{P(n_s - n_r)}{k} + n_r = -\frac{Pn_s}{k} + n_r\left(1 + \frac{P}{k}\right) \quad (4.34)$$

Por lo tanto la velocidad del armónico en sentido inverso y orden k respecto al estator será:

$$-Pn_s + n_r(k + P) \quad (4.35)$$

Así las frecuencias inducidas en el estator por este armónico serán:

$$-f + n_r(k - P) = f + n_s(1 - s)(k + P) = f \left[\frac{k}{P}(1 - s) - s \right] \quad (4.36)$$

El conjunto de las frecuencias –debido a la presencia de los armónicos de sentido directo e inverso- que aparecen en el espectro de corriente se definen por la siguiente ecuación:

$$f_r = f \left[\frac{k}{P}(1 - s) \pm s \right] \quad (4.37)$$

La naturaleza de la distribución del campo magnético en el entrehierro, se representa por una serie de armónicos espaciales. De acuerdo a la ecuación 4.17 para un valor de “n” impar debido a la estructura del devanado trifásico existen armónicos de orden P, 5P, 7P, 11P, 13P... los cuales influirán en el espectro de corriente [9].

Las frecuencias de la componente espectral contenidas en el flujo del entrehierro las determinan los armónicos espaciales, las magnitudes de estas componentes se encuentran determinadas por los armónicos temporales. Los campos en sentido directo e inverso debido a la asimetría en el rotor se encuentran constituidos por armónicos temporales y espaciales, por lo que se modulan las componentes, tanto en frecuencia como en magnitud.

En la tabla 4.1 se presentan tres posibles componentes que se identifican en el espectro de corriente. La amplitud decrece con el orden del armónico, solo aquellos armónicos más cercanos por el paso del polo tienen amplitud significativa. La detección de estas componentes depende del rango dinámico del instrumento de medición [21].

Tabla 4.1. Armónicos y sus respectivas bandas laterales.

Componente	Frecuencia (Hz)	Amplitud (% del armónico)
<i>Fundamental</i>	60	1
Inferior	60(1-2s)	0.5 (sobre la fundamental)
Superior	60(1+2s)	0.5 (sobre la fundamental)
<i>5º Armónico</i>	300	0.5
Inferior	300(1-4s)	0.025 (sobre el 5º armónico)
Superior	300(1+4s)	0.025 (sobre el 5º armónico)
<i>7º Armónico</i>	420	0.025
Inferior	420(1-6s)	0.0125 (sobre el 7º armónico)
Superior	420(1+6s)	0.0125 (sobre el 7º armónico)

Aunque los devanados distribuidos presentan ventajas sobre los devanados concentrados en términos de resistencia del estator, la utilización y facilidad de construcción en el uso de devanados distribuidos, introduce un problema adicional en el diseño de las máquinas. La presencia continua de ranuras en el estator y rotor, producen variaciones en la reluctancia y en el flujo en la superficie del estator. Estas variaciones producen componentes llamados armónicos de dientes o de ranuras.

En la sección 4.1 se estableció que todos los armónicos (incluyendo la fundamental) provenientes del entrehierro, inducen voltajes y sus correspondientes corrientes en el devanado del rotor.

La asimetría en el rotor jaula de ardilla se puede identificar en un rango de frecuencia fuera de la fundamental o en componentes cercanas a esta. El ranurado tanto en el estator como en el rotor, generan armónicos de frecuencia (mayores a 1000 Hz) Debido a la asimetría existe componentes que se modulan a $\pm 2sf$. Al considerar la identificación de los armónicos de ranura se debe conocer el número de ranuras del rotor, lo que representa una dificultad si no se tiene acceso a este dato de la máquina. Los armónicos de ranura quedan determinados por la siguiente expresión [35]:

$$f_{ar} = f \left[\frac{R}{P}(1-s) \pm k_{ar} \right] \quad (4.38)$$

Las oscilaciones en la velocidad o perturbaciones en la carga mecánica pueden producir posibles modulaciones en el ancho de banda en el espectro de corriente cercano a $\pm 2sf_1$ (alrededor de la frecuencia fundamental). Esto puede guiar a un diagnóstico incorrecto, si las oscilaciones mecánicas no son consideradas al verificar el rotor con devanado asimétrico. Sin embargo es factible diagnosticar problemas mecánicos en sistemas que ocupen motores trifásicos de inducción, a través del espectro de corriente. La modulación del espectro de corriente debido a las oscilaciones en el sistema electromecánico se identifica por componentes que aparecen en el ancho de banda dependiendo del tipo de carga acoplada al motor [36].

Cualquier oscilación en el par de carga (como múltiplo de la velocidad del rotor kf_r), producirá corrientes en el estator a una frecuencia de [31]:

$$f_{osc} = f \pm kf_r = f \left[1 \pm k \left(\frac{1-s}{P} \right) \right] \quad (4.39)$$

El motor de inducción trabaja como modulador en la amplitud, con la frecuencia de la línea como la portadora, y la velocidad de la flecha como la señal modulante.

Si el par de carga varía con la velocidad, entonces los armónicos de corriente producidos se sobreponen a los armónicos causados por las condiciones de falla. En la tabla 4.2 se presenta una comparación para un motor de dos polos, entre las posibles frecuencias que se sobreponen a la condición de falla y las debidas a las oscilaciones. Las frecuencias debidas

a la falla se establecieron de acuerdo a la ecuación 4.37. Las componentes debidas a la oscilación decreentan en función de la frecuencia y están en sincronismo a la flecha de acuerdo a la ecuación 4.39.

Tabla 4.2. Comparación de frecuencias.

k	Barras Fisuradas		Oscilaciones en la velocidad	
	2 Polos		2 Polos	
1	f	$(1-2s)f$	sf	$(2-s)f$
2	$(2-s)f/2$	$(2-3s)f$	$(2s-1)f$	$(3-2s)f$
3	$(3-2s)f$	$(3-4s)f$	$(2-3s)f$	$(4-3s)f$
4	$(2-s)f/2$	$(4-5s)f$	$(3-4s)f/2$	$(5-4s)f$

Las condiciones para establecer la magnitud de las frecuencias de oscilación dependen del sistema acoplado al motor. Estas componentes pueden llegar a modularse de tal forma que ofrezcan confusión en el diagnóstico. Bajo estas circunstancias se inspeccionará el ancho de banda de armónicos superiores a la fundamental y armónicos de ranura. Esta verificación debe comprobar si existen problemas de falla en el rotor. En la parte final del capítulo 5 se presentan algunos espectros de corriente modulados por frecuencias de oscilación, las componentes que aparecen no alcanzaron a sobreponerse a las bandas laterales [21].

4.5 Efectos de la Modulación en una Señal

La modulación es un efecto no lineal en el cual varias señales tienen una interacción unas con otras, para producir nuevas señales con frecuencias que no estaban presentes en las señales originales. Existen diferentes formas de modulación, incluyendo la modulación de frecuencia y de amplitud.

La modulación de frecuencia es la variación en frecuencia de una señal debido a la influencia de otra señal, generalmente de frecuencia más baja. La frecuencia que se está modulando, se llama portadora. En la figura 4.4 aparece una señal modulada por frecuencia.

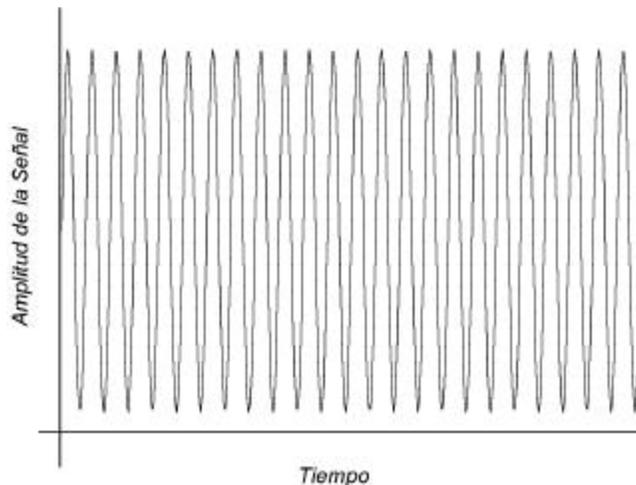


Figura 4.4. Modulación de la señal por frecuencia

En el espectro mostrado en la figura 4.5, la componente más importante es la portadora, y las otras componentes que parecen armónicos se llaman bandas laterales. Estas bandas laterales se ubican simétricamente de cada lado de la portadora y su distancia es igual a la frecuencia moduladora.

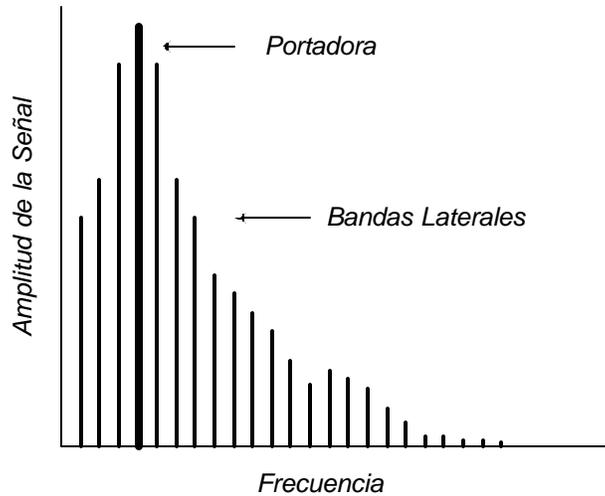


Figura 4.5. Espectro de la señal modulada por frecuencia.

En la figura 4.6 se muestra una modulación de amplitud, aproximadamente del 50% de la modulación total. Se nota que la frecuencia de la forma de onda parece constante y que el nivel está fluctuando en proporción constante. El espectro tiene un pico central en la frecuencia portadora, y dos componentes a cada lado. Estas componentes suplementarias son bandas laterales. En la figura 4.7 solo hay dos bandas laterales, en comparación con la gran cantidad producida por la modulación de frecuencia en la figura 4.5. Las bandas de frecuencia están a una distancia de la portadora, igual a la frecuencia de la señal moduladora [28].

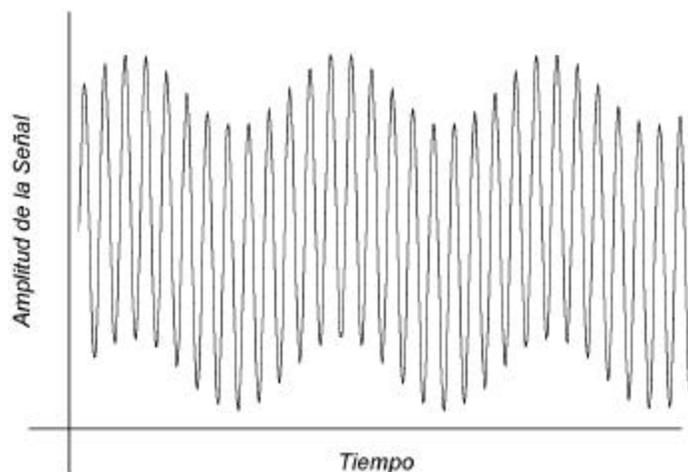


Figura 4.6. Modulación de la señal por amplitud.

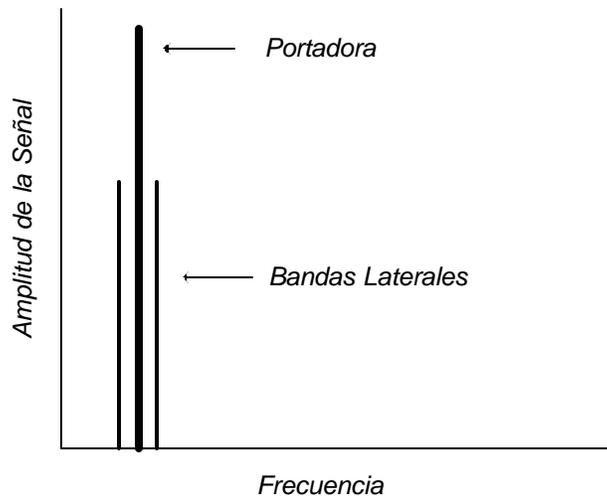


Figura 4.7 Espectro de la señal modulada por amplitud.

4.6 Método de Deleroi para la Redistribución de Corrientes en la Jaula del Rotor.

Los parámetros del circuito eléctrico que forman la jaula del rotor en condiciones simétricas, forman campos magnéticos iguales en el entrehierro. Sin embargo, cuando existe una falla en la jaula se produce una redistribución de corriente. Uno de los métodos que analiza la redistribución de corriente en el circuito de la jaula debido a la falla, es el método de Deleroi [10]. El rotor se modela por un conjunto de N mallas, cada una con impedancia idéntica tal, que se asume una condición simétrica alrededor de la barra rota.

Cada malla incluye la resistencia y reactancia de dispersión de la barra rota y la parte correspondiente al anillo de cortocircuito. Además, se incluye una reactancia que es producto del flujo producido por la corriente de malla en el rotor, la cual cruza el entrehierro para retornar por el núcleo del estator.

En el análisis del disturbio se considera una corriente I_{bb} que se inyecta sobre la barra fracturada. También se consideran las corrientes del anillo de dos mallas adyacentes a la falla, como se muestra en la figura 4.8.

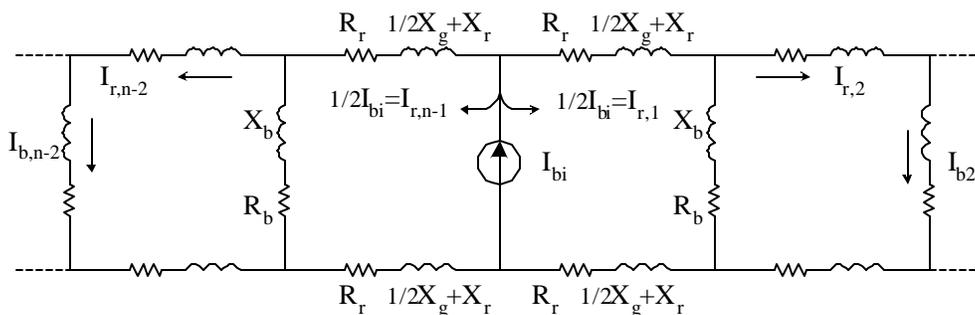


Figura 4.8 Circuito equivalente de la jaula con una barra fallada

Las corrientes del anillo de cortocircuito en dos mallas adyacentes a la falla se encuentran determinadas por la siguiente ecuación:

$$I_{r,1} = \frac{1}{2} I_{bi} \quad I_{r,n-1} = -\frac{1}{2} I_{bi} \quad (4.40)$$

Los campos producidos por la falla del rotor, en ambos lados de la malla son iguales pero de signos opuestos, por lo que se considera sólo un lado en el análisis. Aplicando las leyes de Kirchhoff a cada malla, se considera que cada malla contiene la inductancia del entrehierro L_m .

Los flujos de corrientes en esas mallas se encuentran afectados por un factor de amortiguamiento “ d ” (su valor se define posteriormente), el cual determina la diferencia en magnitud y ángulo de fase de las corrientes de malla adyacentes. Usando la barra rota como referencia y con rotación en sentido horario, la corriente en la i_{th} malla se encuentra determinada por la siguiente ecuación:

$$I_{r,i} = I_{r,1} d^{i-1} \quad (4.41)$$

Los parámetros del circuito se pueden generar sobre una cantidad compleja “ A ” dependiente del deslizamiento “ s ”, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\bar{A} = \frac{R_r + js(X_r + 1/2X_g)}{R_b + jsX_b} \quad (4.42)$$

Asociando la cantidad compleja “ A ” se generan un conjunto de ecuaciones donde se relacionan los parámetros de cada malla con las respectivas corrientes:

$$\begin{bmatrix} 2(1+A)-1 & -1 & 0 & \dots & \dots \\ -1 & 2(1+A) & -1 & \dots & \dots \\ 0 & & 2(1+A) & -1 & \dots \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \ddots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{r_1} \\ I_{r_2} \\ I_{r_3} \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U/Z_1 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (4.43)$$

En esta matriz la ecuación de la primera fila contiene la corriente I_{r1} , de la sección del anillo de cortocircuito, este valor se considera como conocido, mientras que el voltaje “ U ” entre las terminales de la barra rota se considera como una cantidad secundaria.

Las ecuaciones anteriores se resuelven restando la primera con respecto a las demás, de tal manera que se genera el factor “ d ” como se muestra en la siguiente ecuación:

$$I_r = (1, d, d^2, d^3 \dots d^{\frac{n-1}{2}})^t I_{r1} \quad (4.44)$$

Por lo que se obtiene la ecuación:

$$d^{i-2} - 2(1+A)d^{i-1} + d^i = 0 \quad (4.45)$$

Para valores de $i=2$ (lo que corresponde a las dos primeras ecuaciones) se genera una ecuación cuadrática:

$$d^2 - 2(1+A)d + 1 = 0 \quad (4.46)$$

La solución de esta ecuación se define por:

$$\bar{d}_{12} = (1 + \bar{A}) \pm \sqrt{(1 + \bar{A})^2 - 1} \quad (4.47)$$

el producto de estos valores debe ser:

$$\bar{d}_1 \times \bar{d}_2 = 1 \quad (4.48)$$

La densidad del flujo producido por la barra fallada, se determina por la ecuación:

$$B_{\delta_1} = \frac{\mu_0 I_{r,1}}{\delta} \quad (4.49)$$

La relación entre las corrientes de dos mallas contiguas es constante e independientes del número de barras del rotor:

$$\frac{I_{r_{i+1}}}{I_r} = d \quad \frac{I_{b_{i+1}}}{I_b} = d \quad \frac{B_{\delta_{i+1}}}{B_\delta} = d \quad (4.50)$$

En la solución de la ecuación 4.43 comprende dos componentes: una que se decrementa y otra que se incrementa con el número de mallas. Con respecto al flujo en el entrehierro en una máquina de rotor cilíndrico, significa que la anomalía produce dos campos de la misma naturaleza viajando sobre el entrehierro en dirección opuesta. Más allá de la barra rota las amplitudes de las corrientes de barras y los voltajes de malla se van decrementando.

En el método de Deleroi [10] los coeficientes a_k y b_k de la serie de Fourier para calcular la redistribución de corriente se determina por la ecuación 4.51. Debido a que las fuerzas magnetomotrices generan señales simétricas, la evaluación de los coeficientes b_k son cero:

$$a_k = \frac{2}{\pi} \left[\sum_{i=2}^{R/2} \int_{\frac{2\pi(i-1)}{R}}^{\frac{2\pi i}{R}} A [d^{(i-2)}] (1-d) \cos k \omega_r d \omega_r + \int_0^{\frac{2\pi}{R}} -A \cos k \omega_r d \omega_r \right] \quad (4.51)$$

La variación de los coeficientes a_k depende del factor de amortiguamiento “d” y del número de ranuras del rotor. En la figura 4.9 se muestra la gráfica de los coeficientes a_k para un valor de $R= 32$ y factor $d= 0.016$. Este valor significa que la corriente se redistribuye en barras adyacentes a la barra fallada [29].

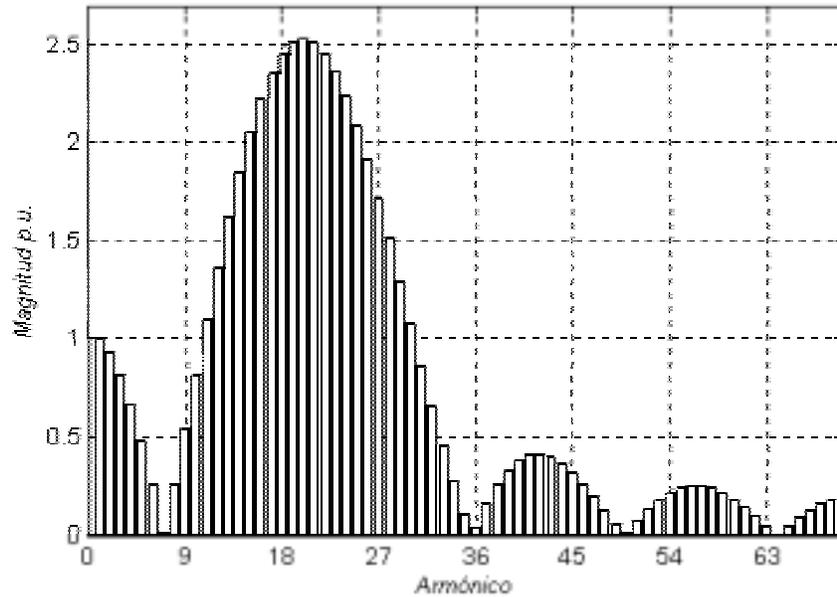


Figura 4.9 Magnitud de los armónicos, con una redistribución de corriente $d=0.016$

En la figura 4.10 se muestran los coeficientes para $R=32$ y factor $d= 0.8$, por lo que la corriente se redistribuirá mas allá de las barras adyacentes a la falla. La magnitud de los armónicos se encuentra normalizada en las figuras 4.9 y 4.10. Para esta condición la impedancia entre la barra y el anillo de cortocircuito es relativamente baja.

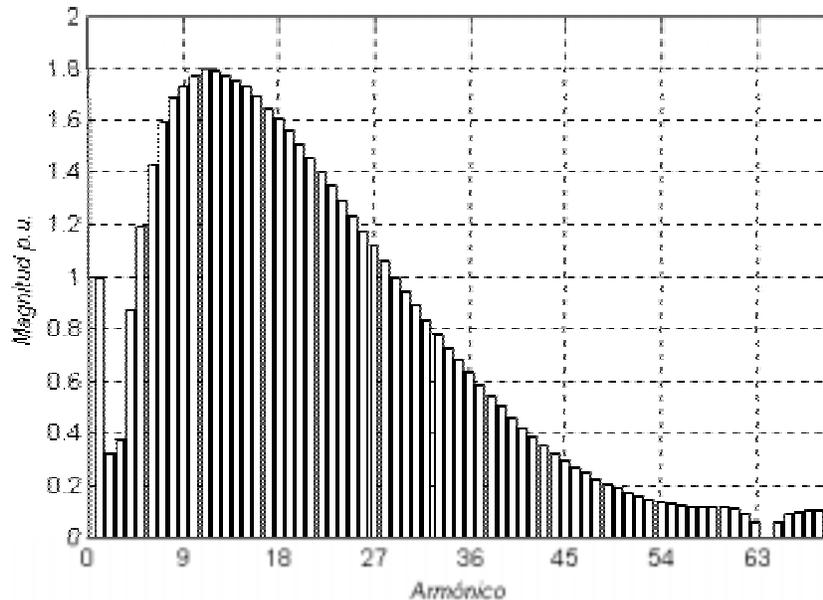


Figura 4.10 Magnitud de los armónicos, con una redistribución de corriente $d=0.8$

En el capítulo 5 se presentan los resultados experimentales en laboratorio. Dos motores fueron evaluados bajo diferentes condiciones de asimetría. En el primer motor de 7.5 CP 220/440 volts, 22/11 amps, 3 fases, 4 polos, 60 Hz, 36 ranuras en el estator y 44 ranuras en el rotor, se consideró el análisis de los coeficientes para las dos condiciones de redistribución de corriente. Esto se puede observar en las figuras 4.11 y 4.12.

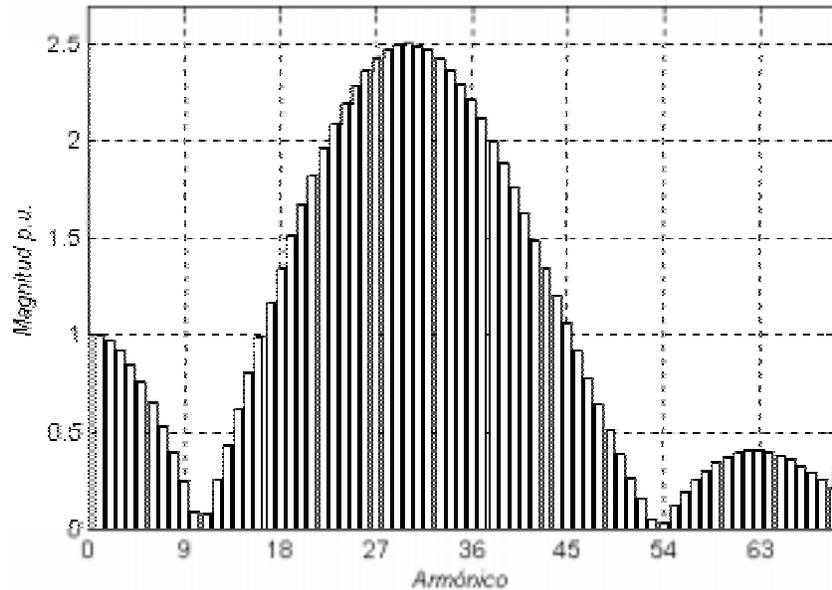


Figura 4.11 Magnitud de los armónicos, con una redistribución de corriente $d=0.005$

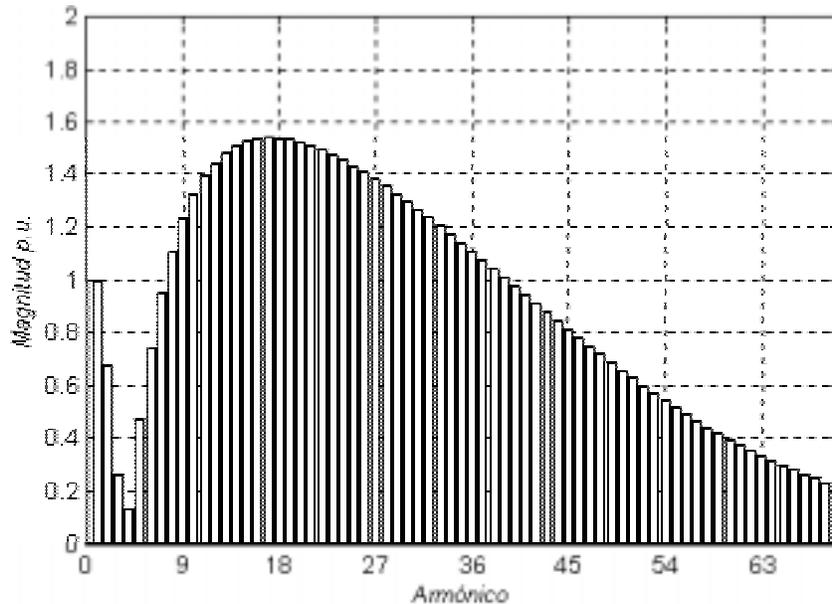


Figura 4.12 Magnitud de los armónicos, con una redistribución de corriente $d=0.65$

En el segundo motor de 5 CP 220/440 volts, 15/8 amps, 3 fases, 4 polos, 60 Hz, 36 ranuras en el estator y 48 ranuras, se realizó el mismo procedimiento de evaluación de los coeficientes como se muestran en las figuras 4.13 y 4.14.

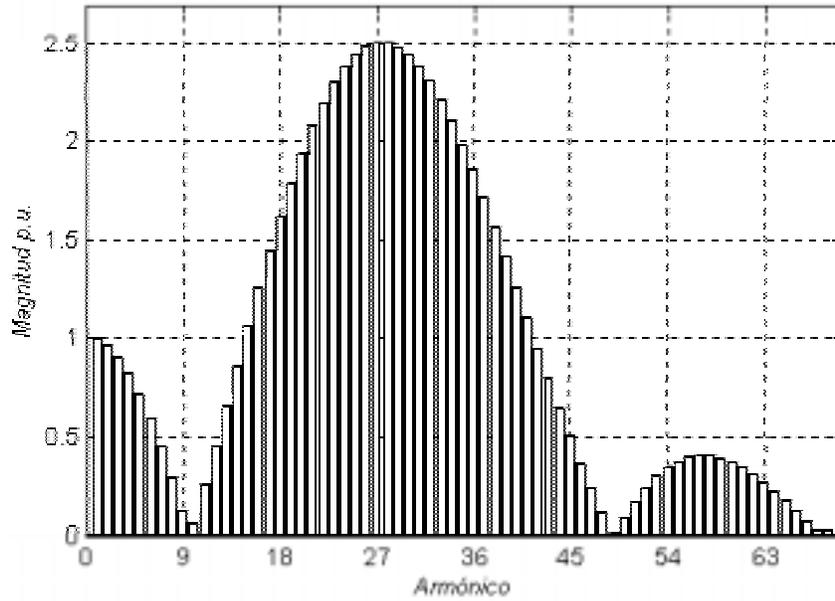


Figura 4.13 Magnitud de los armónicos, con una redistribución de corriente $d=0.01$

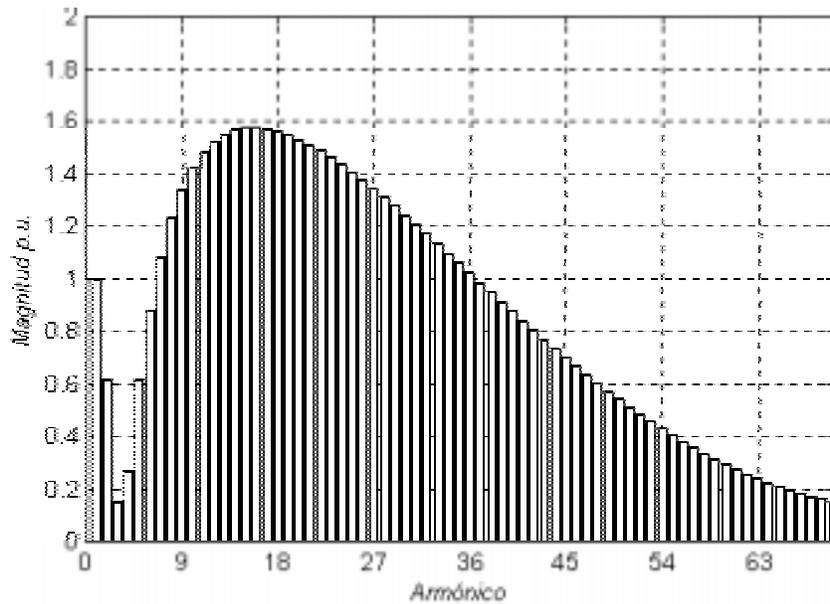


Figura 4.14 Magnitud de los armónicos, con una redistribución de corriente $d=0.85$

Una comparación entre las figuras 4.11 y 4.13, se observa como en ambas figuras se obtuvo la misma disposición de los coeficientes. Sin embargo, para el primer motor se tiene un factor de amortiguamiento $d=0.005$, y para el segundo motor un factor $d= 0.01$. Prácticamente el primer motor, con la mitad del valor del segundo factor de amortiguamiento, logra redistribuir la corriente hacia barras adyacentes.

Una comparación entre las figuras 4.12 y 4.14, observa una condición semejante en la disposición de los coeficientes. En este caso la figura 4.12 tiene aproximadamente un 20 % menor el valor del factor de amortiguamiento con respecto al segundo motor. Esto significa que el primer motor podrá modular más sus componentes del espectro de corriente, con respecto al segundo motor.

En este capítulo se presentó el análisis de las posibles frecuencias que se ubican en el espectro de corriente debido a la asimetría en la jaula. En el capítulo siguiente se desarrolla la metodología experimental para el análisis de estas frecuencias y su relación con la severidad de la falla.

CAPÍTULO 5

Desarrollo de Pruebas y Análisis de Resultados.

5.1 Introducción

La discusión y análisis de la técnica de monitoreo en línea para estimar la condición del rotor jaula de ardilla se presentan en este trabajo. Un conjunto de resultados experimentales permiten demostrar la utilidad del monitoreo de las corrientes que alimentan al motor.

En el análisis teórico del capítulo 4 fueron presentados los efectos de la modulación en el entrehierro, por la asimetría en la jaula. Esto permite establecer que la presencia de las componentes a $(1 \pm 2s)f$ en el espectro de corriente estima la condición del rotor. En una primera etapa se observa el comportamiento del espectro con diferentes porcentajes de carga y tres condiciones de asimetría en la jaula. En la siguiente etapa se presenta una evaluación a corriente nominal y diferentes condiciones de asimetría. En la parte final se presenta la fisura de una barra en un rotor de mayor capacidad a los motores utilizados en laboratorio.

5.2 Desarrollo de Pruebas en Laboratorio

5.2.1 *Primer motor de prueba*: los datos del primer motor se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 5.1 Datos del primer motor de prueba.

DATOS	VALOR
Potencia	7.5 CP
Tensión	220/440 Volts
Corriente de Línea	22/11 Amps.
Fases	3
Polos	4
Velocidad	1725 rpm
Frecuencia	60 Hz
Ranuras del Estator	36
Ranuras del Rotor	44
Factor de Servicio	1.0

La secuencia de pruebas fue en incrementos de 10% de la carga de acuerdo a la tabla 5.2.

Tabla 5.2. Secuencia de pruebas motor de 7.5 CP

Secuencia de Prueba	Desconexión
1	Sin daños
2	1 barra del anillo de cortocircuito
3	3 barras del anillo de cortocircuito

En la figura 5.1 aparecen los tres espectros de corriente de cada una de las líneas de alimentación al motor. En estos espectros, se observa que existe la presencia de componentes a $\pm 2sf$. Estas componentes son debidas a una tolerancia normal en la variación de la resistencia en las barras y en uniones de los anillos de cortocircuito.

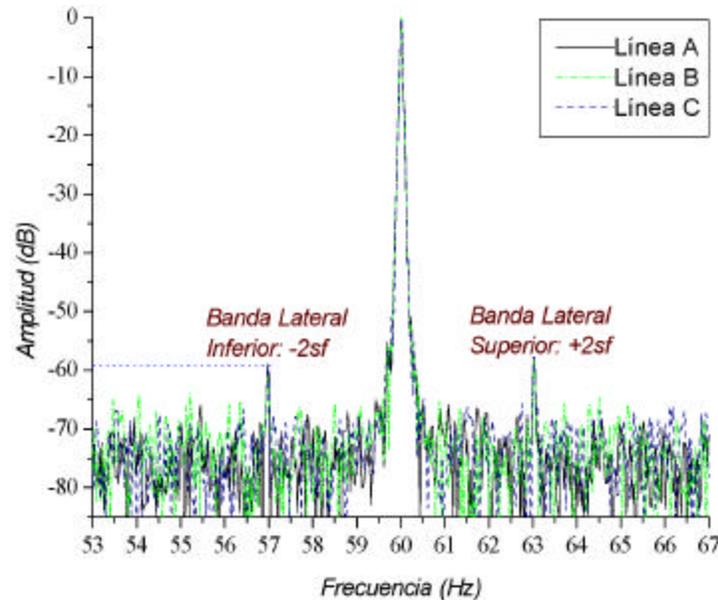


Figura 5.1 Condiciones simétricas, primer rotor jaula de ardilla.

El campo creado en el motor de inducción en condiciones simétricas, no es totalmente senoidal (presenta una distribución escalonada), además los devandos (rotor-estator) no se construyen simétricamente. Bajo estas condiciones es evidente que la presencia de bandas laterales en el espectro de un rotor sin daños existan alrededor de cada armónico de la señal de corriente.

En la etapa de prueba se compara la figura 5.1 con respecto a las condiciones asimétricas del rotor en los siguientes espectros. Para esto se consideró que al desconectar una barra entre la sección del anillo de cortocircuito y la barra produce el mismo efecto en el espectro de corriente, que si se abre en otra sección de la barra. En el capítulo 2 se presentó una revisión sobre el área de fractura en la jaula del rotor.

En la figura 5.2 se muestra el desplazamiento de los tres espectros que aparecen en la figura 5.1. En esta figura cada espectro corresponde a cada una de las señales de corriente que alimentan al motor. Si los patrones de flujo en el entrehierro giran más rápido que la jaula del rotor, se considera que cualquier barra pasa por todos los polos magnéticos del estator en un ciclo a la frecuencia de deslizamiento. Este hecho permite estimar la condición de la jaula por cada línea de alimentación al motor, e independiente de la conexión del devanado del estator [12].

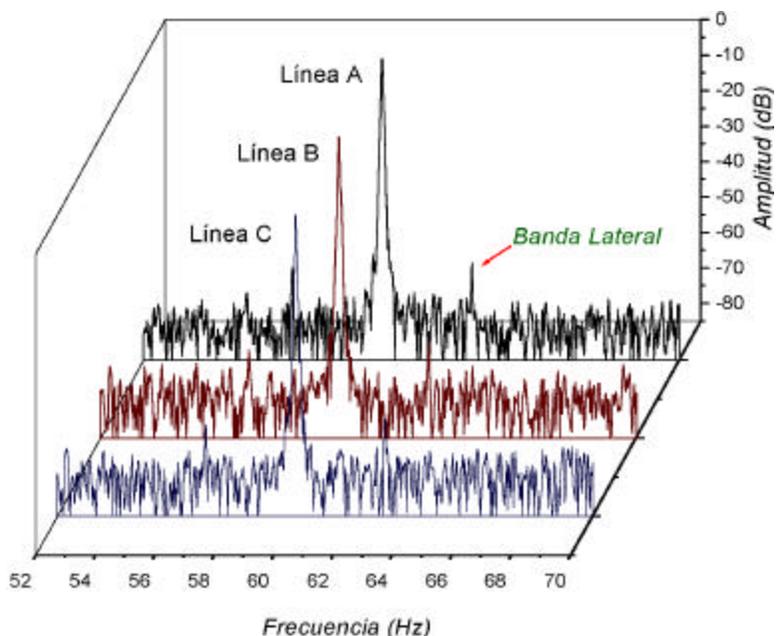


Figura 5.2 Condiciones simétricas, desplazamiento de las tres señales.

En la siguiente etapa se realizó la desconexión de una barra del anillo de cortocircuito. En la tabla 5.3 se presenta los resultados de las mediciones del motor a diferentes condiciones de carga, para una barra desconectada del anillo de cortocircuito. Los porcentajes de ajuste de la carga fueron en 10 %, con el valor mínimo de 20 % y un 10 % más del valor nominal.

Tabla 5.3. Una barra desconectada del anillo de cortocircuito.

Resultados de Pruebas										
Parámetro	Porcentaje de carga									
	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	110%
Tensión (V)	127.1	127.0	130.5	130.9	127.3	128.0	128.0	127.8	131.2	132.1
Corriente (A)	10.27	10.59	12.51	13.28	13.81	15.33	16.35	17.87	19.51	20.9
Velocidad rpm	1795	1790	1787	1784	1779	1772	1768	1762	1759	1755
Par (N-m)	6.78	7.02	11.95	14.7	17.71	21.26	23.58	26.88	30.87	32.91
Potencia (C.P.)	1.275	1.313	2.237	2.741	3.274	3.954	4.374	4.962	5.678	6.039

Los armónicos de la corriente son función de la carga aplicada al motor; por tanto es imposible definir una amplitud para las bandas laterales que indique la frontera entre un rotor sin daños y uno con asimetría.

Una solución a este problema es la normalización de las amplitudes, es decir encontrar un método que permita medir la evolución de los armónicos independientemente de la carga y del motor que se someta a estudio. Este método deberá ser algo parecido al empleo de valores por unidad mediante los cuales las variables eléctricas de máquinas muy diferentes pueden ser fácilmente comparadas.

La solución consiste en medir la diferencia de amplitudes entre el armónico fundamental y las bandas laterales sobre una escala logarítmica: si se mide la diferencia de amplitud en un espectro en decibeles o logarítmica, en realidad se estará trabajando con un cociente entre la amplitud del armónico fundamental y la banda lateral (N), es decir se habrá normalizado los resultados respecto al valor del armónico fundamental.

De la figura 5.3, a la 5.12, corresponden a los espectros de corriente con diferentes condiciones de carga y una barra desconectada del anillo de cortocircuito. En estas figuras se especifican tres datos:

1. Velocidad del rotor (revoluciones por minuto),
2. Frecuencia de modulación de la primera banda lateral (-2sf Hertz)
3. Diferencia en magnitud de la banda lateral inferior a la fundamental (N dB).

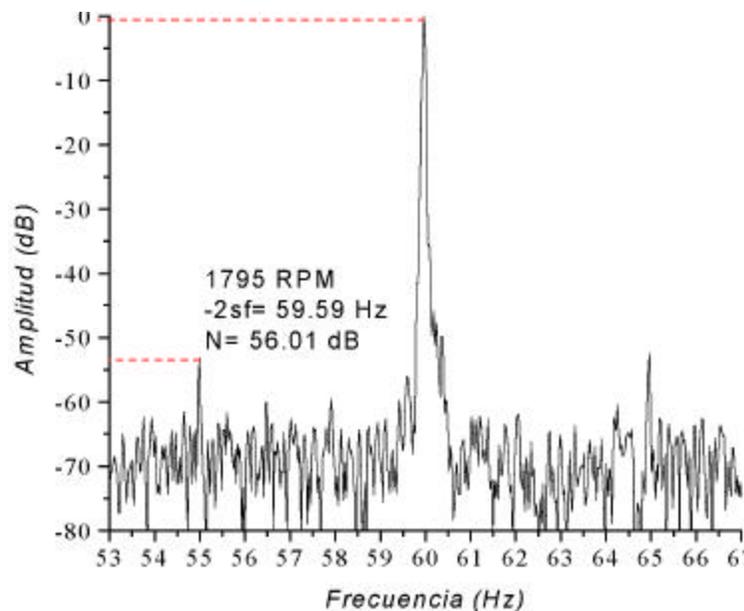


Figura 5.3 Una barra desconectada del anillo de cortocircuito, 20% de carga.

Estos espectros corresponden a una de las líneas de alimentación del motor. Se consideran condiciones simétricas en el estator. La banda lateral inferior (-2sf) y la banda lateral superior (+2sf) se modulan con el incremento de carga. Por cada porcentaje de carga que se le aplique al motor, estas bandas laterales se incrementan. Como el punto de referencia para la medición de la amplitud se encuentra normalizado a la fundamental, la diferencia en dB N disminuye.

Una comparación entre el espectro de la figura 5.1 y el espectro de la figura 5.11, con respecto a la banda lateral inferior es aproximadamente de 5 dB. Si la barra no se encuentra totalmente desconectada existe modulación, esto debido a la variación de la impedancia en el circuito de la jaula.

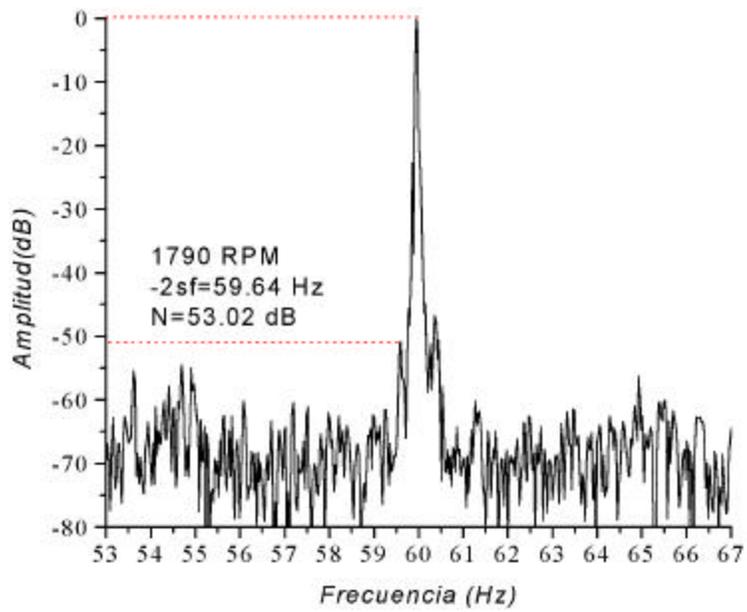


Figura 5.4 Una barra desconectada del anillo de cortocircuito, 30% de carga.

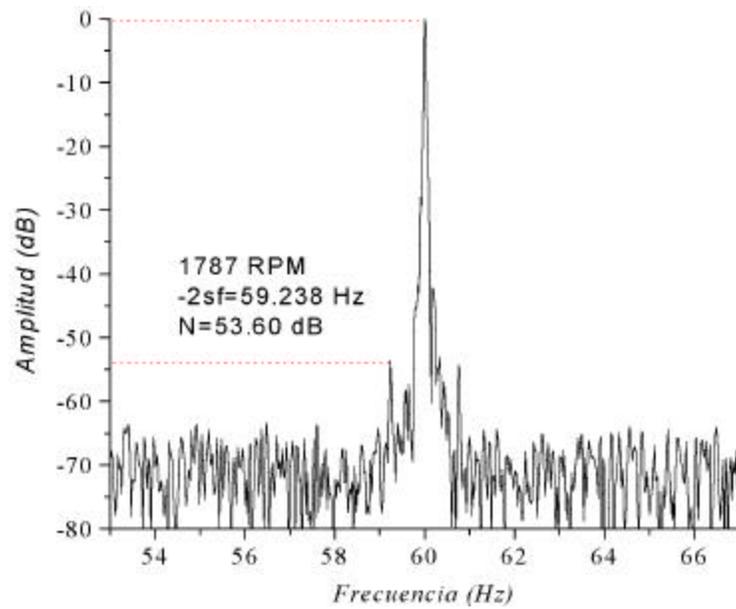


Figura 5.5 Una barra desconectada del anillo de cortocircuito, 40% de carga.

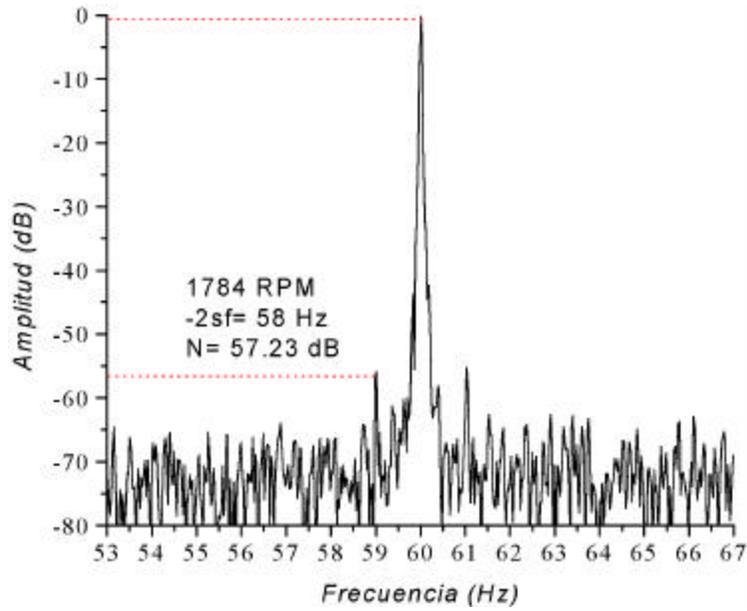


Figura 5.6 Una barra desconectada del anillo de cortocircuito, 50% de carga.

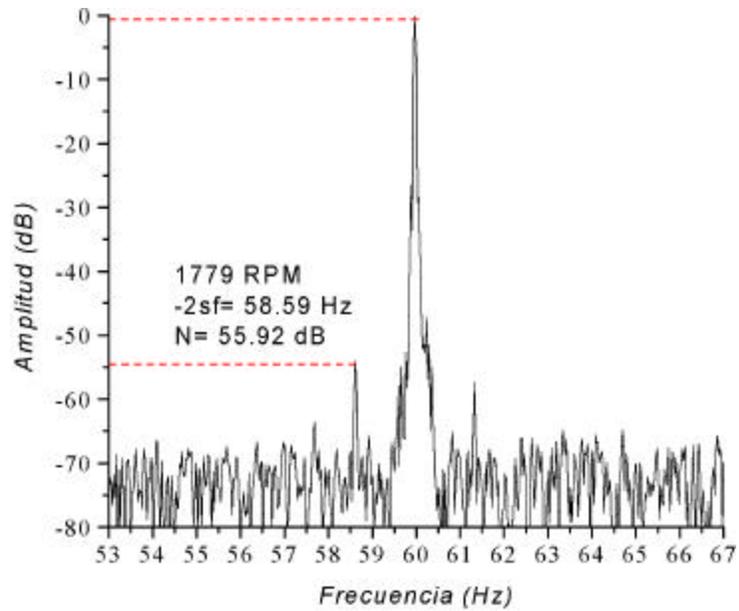


Figura 5.7 Una barra desconectada del anillo de cortocircuito, 60% de carga.

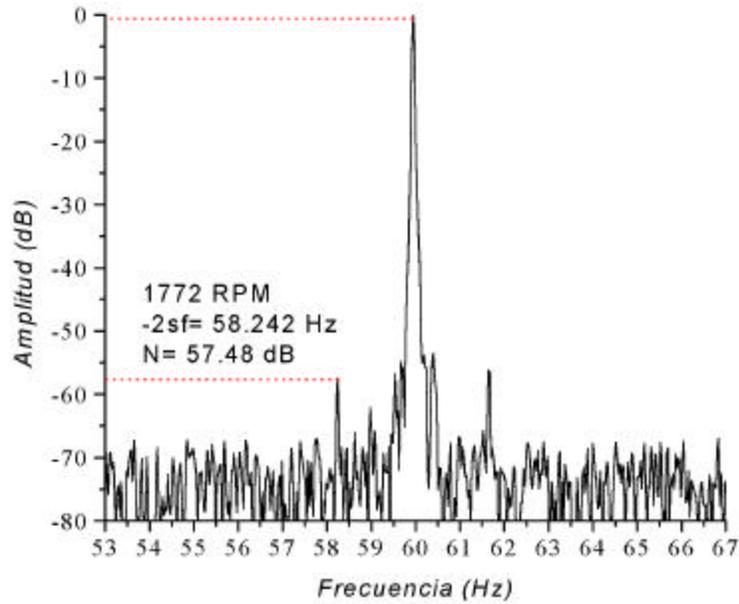


Figura 5.8 Una barra desconectada del anillo de cortocircuito, 70% de carga.

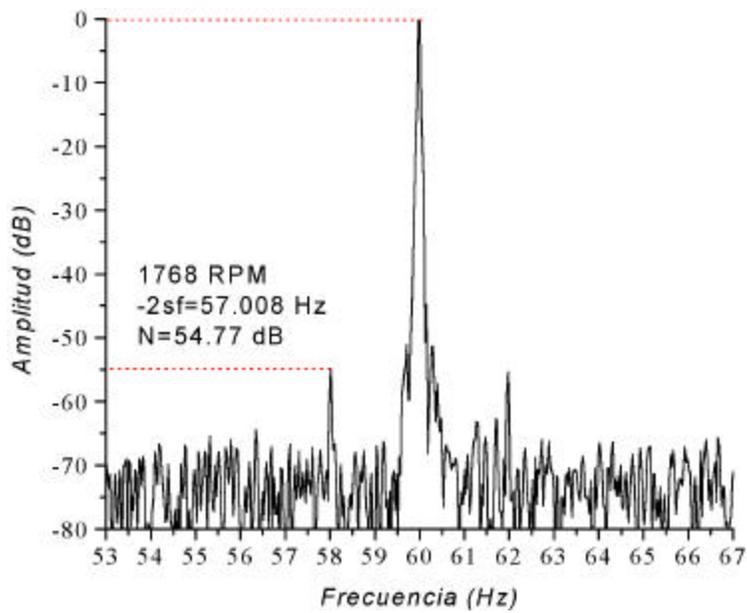


Figura 5.9 Una barra desconectada del anillo de cortocircuito, 80% de carga.

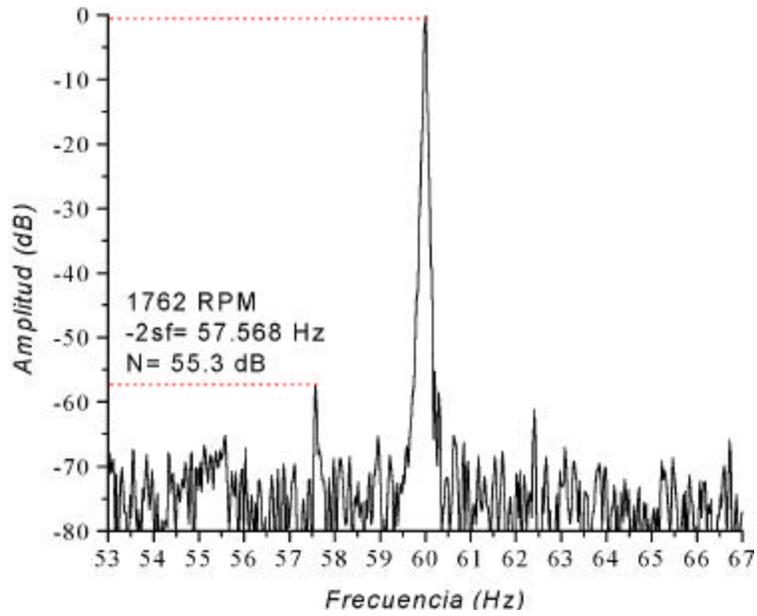


Figura 5.10 Una barra desconectada del anillo de cortocircuito, 90% de carga.

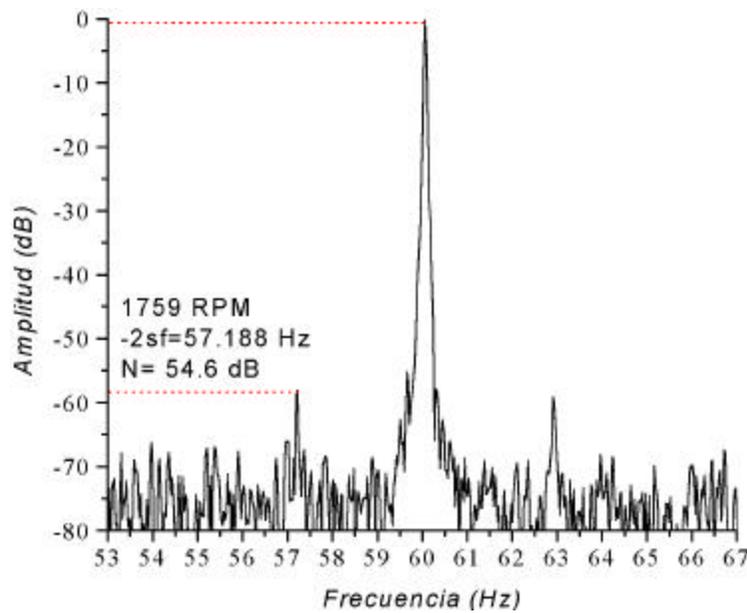


Figura 5.11 Una barra desconectada del anillo de cortocircuito, 100% de carga.

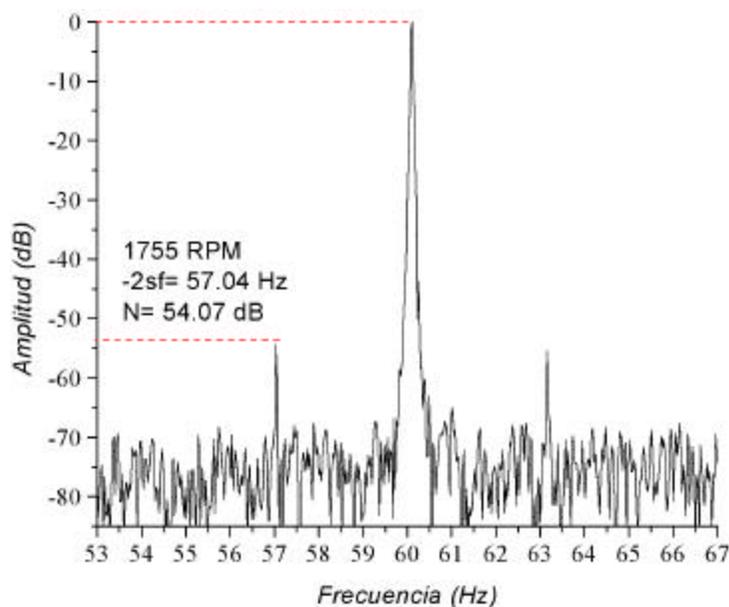


Figura 5.12 Una barra desconectada del anillo de cortocircuito 110% de carga.

La aproximación que tiene el espectro para estimar la presencia de una barra desconectada del anillo de cortocircuito, también depende de la capacidad de la máquina. Las máquinas pequeñas son construidas generalmente de rotor fundido en aluminio donde la desconexión parcial o la presencia de alguna porosidad permite que el circuito de la jaula mantenga continuidad.

En máquinas de mayor capacidad (construidas en rotor fabricado o fundido) la corriente que circula por el circuito de la jaula es muy grande; con la presencia de alguna fisura quedará en función del ciclo de operación a que se encuentre trabajando el motor [5].

En la tabla 5.4 se presentan los resultados a diferentes condiciones de carga, para tres barras desconectadas del anillo de cortocircuito. El propósito de esta etapa de pruebas fue establecer el comportamiento de las bandas laterales, con una mayor asimetría, ya que con dos barras la modulación no fue tan evidente.

Tabla 5.4. Tres barras desconectadas del anillo de cortocircuito.

Resultados de Pruebas										
Parámetro	% de Carga									
	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	110%
Tensión (V)	127.6	128.1	128.5	128.5	128.7	129.1	129.0	128.5	128.3	129.0
Corriente (A)	10.72	10.85	12.07	13.17	13.94	15.91	16.92	18.47	19.91	20.99
Velocidad rpm	1794	1793	1787	1785	1776	1773	1766	1759	1757	1756
Par (N-m)	6.75	6.95	12.18	14.75	18.20	21.33	24.55	27.72	29.46	32.11
Potencia (C.P.)	1.270	1.305	2.273	2.748	3.382	3.964	4.533	5.101	5.426	5.915

En la figura 5.13 se presenta el espectro a menor condición de carga. Para el porcentaje de carga inicial la modulación no es evidente, no así de la figura 5.15 a la figura 5.21. Generalmente por encima del 50% de la corriente nominal del motor, se puede comenzar a emitir un diagnóstico aceptable. Al incrementar la carga aplicada al motor, la corriente circulante por el rotor aumenta, con lo que la distorsión causada por la falla se hace más apreciable y las bandas laterales incrementan su magnitud.

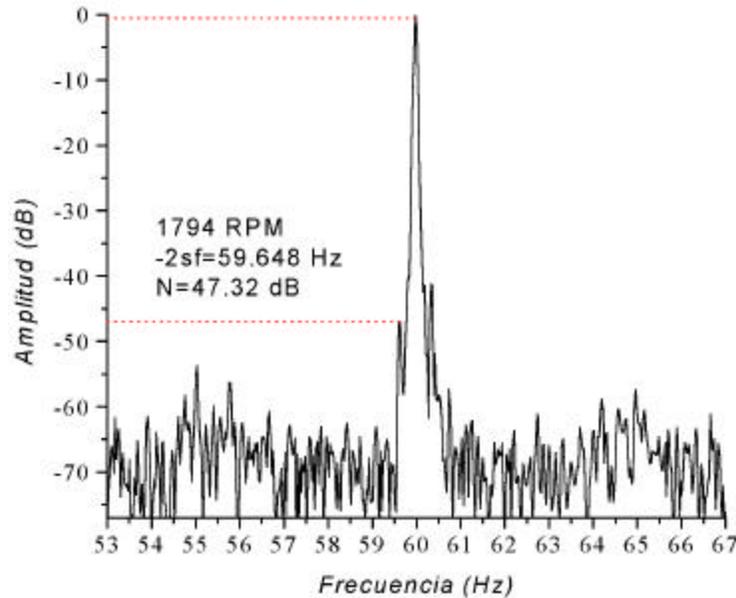


Figura 5.13 Tres barras desconectadas del anillo de cortocircuito, 20 % de carga.

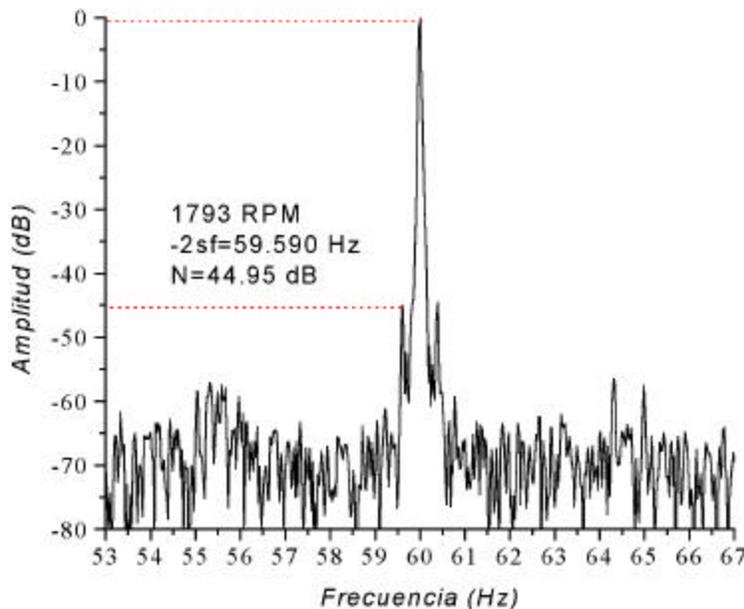


Figura 5.14 Tres barras desconectadas del anillo de cortocircuito, 30 % de carga.

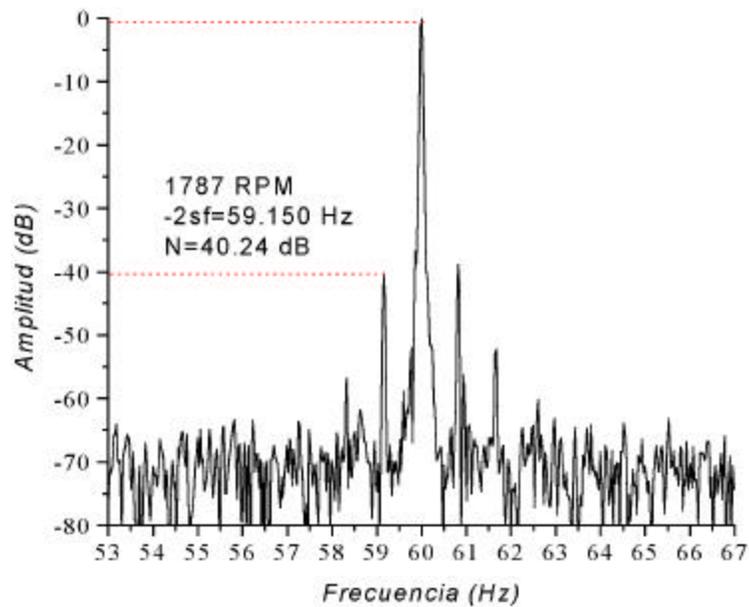


Figura 5.15 Tres barras desconectadas del anillo de cortocircuito, 40 % de carga.

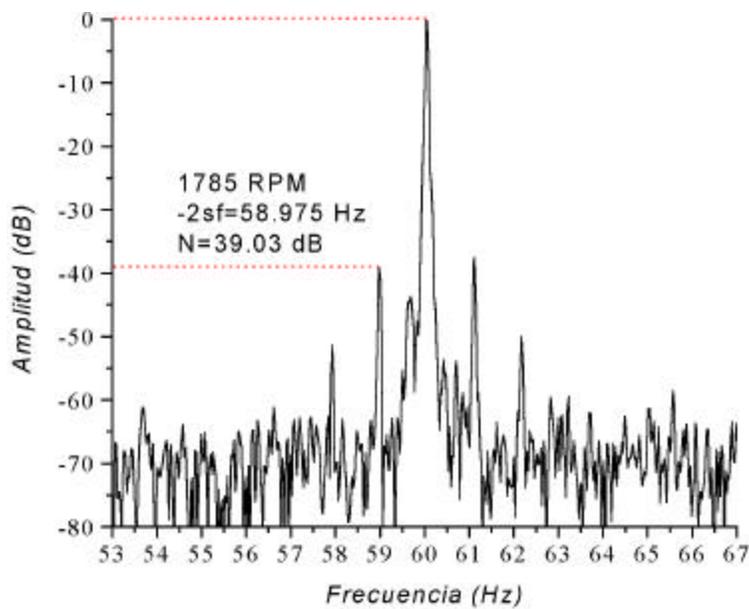


Figura 5.16 Tres barras desconectadas del anillo de cortocircuito, 50 % de carga.

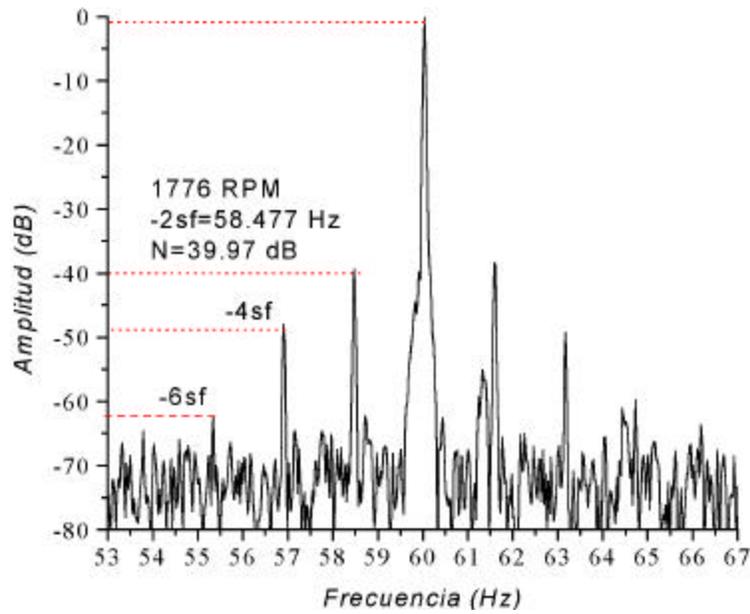


Figura 5.17 Tres barras desconectadas del anillo de cortocircuito, 60 % de carga.

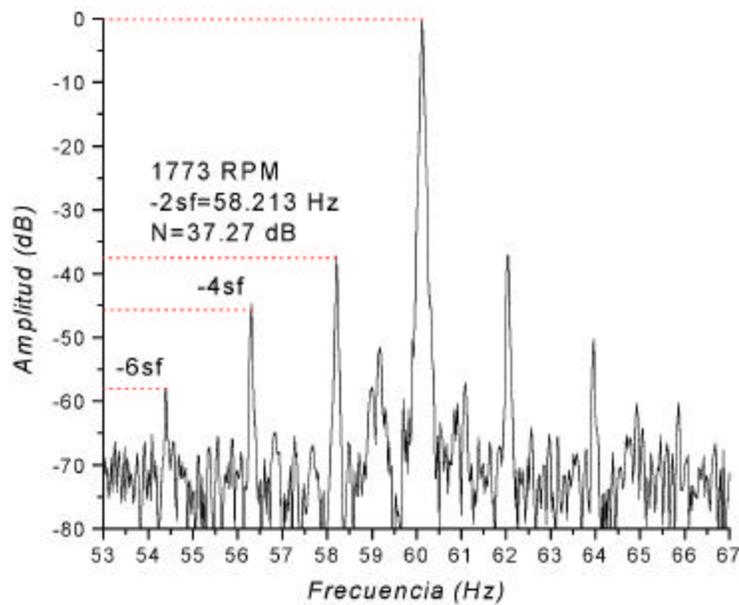


Figura 5.18 Tres barras desconectadas del anillo de cortocircuito, 70 % de carga.

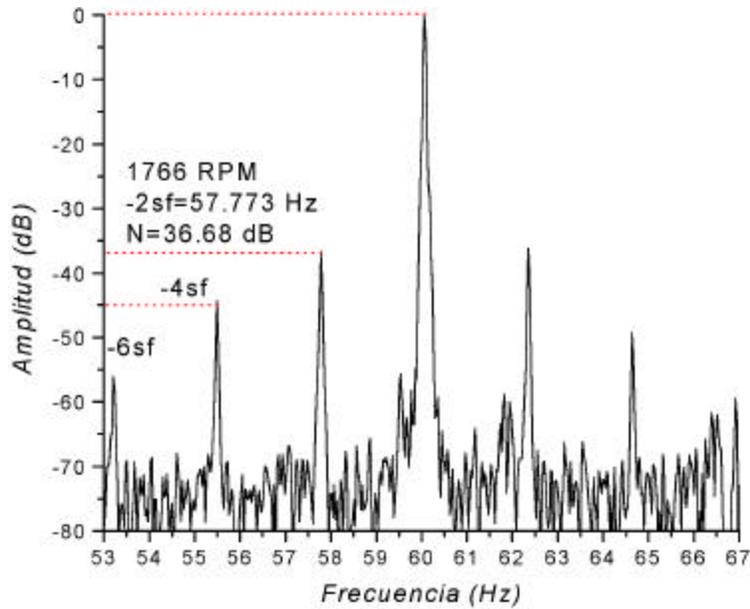


Figura 5.19 Tres barras desconectadas del anillo de cortocircuito, 80 % de carga.

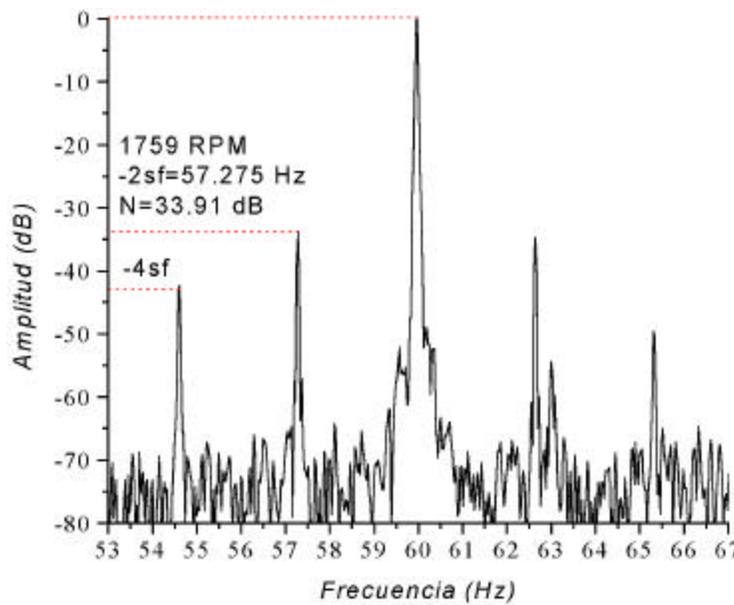


Figura 5.20 Tres barras desconectadas del anillo de cortocircuito, 90 % de carga.

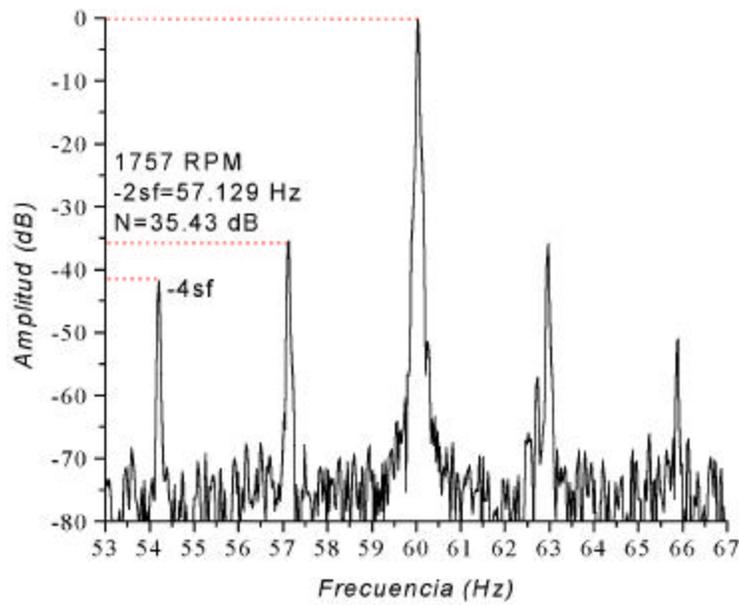


Figura 5.21 Tres barras desconectadas del anillo de cortocircuito, 100 % de carga.

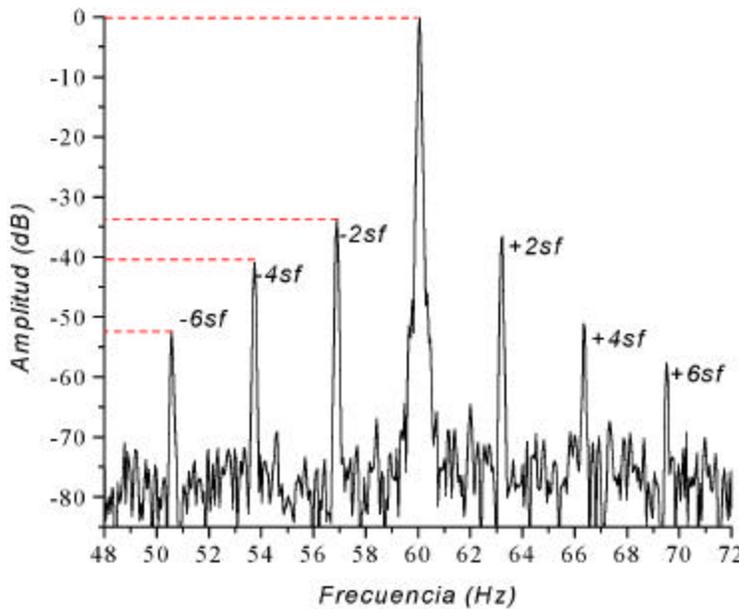


Figura 5.22 Tres barras desconectadas del anillo de cortocircuito, 110% de carga.

En la tabla 5.5 se presenta la recopilación de los tres primeros valores modulados alrededor de la fundamental en 50% y 110% de carga, de las figuras 5.17 a 5.22. Se puede observar que, con mayor porcentaje el valor de la frecuencia de la modulación disminuye, mientras el valor de N se incrementa (considerando que la medición de N es de la banda lateral inferior a la fundamental).

Tabla 5.5 Modulación y su respectivo valor de N (dB)

Porcentaje de Carga	Modulación (hz.)	N (dB)
50%	-2sf =58.45	39.97
	-4sf=56.87	48.79
	-6sf=55.36	62.21
110%	-2sf=56.82	33.89
	-4sf=53.60	40.60
	-6sf=50.65	52.24

La presencia de una sucesión de bandas laterales se debe a que, en la primera modulación $(1-2s)f$, interactúa con el tercer armónico de flujo en el entrehierro en un valor $\pm 3sf$, lo que produce la segunda modulación a $(1+2s)f$ y $(1-4s)f$. La modulación de $(1-4s)f$ interactúa con el quinto armónico de flujo en el entrehierro a $\pm 5sf$, lo que produce la tercera modulación a $(1+4s)f$ y $(1-6s)f$. Es una sucesión de bandas laterales que se van modulando de acuerdo a la interacción de los flujos en el entrehierro con el valor impar de la frecuencia de deslizamiento [21].

La figura 5.23 corresponde al 5° armónico de corriente. De acuerdo con la ecuación 4.37 existe una modulación cercana a este armónico. Si el cambio (magnitud) en las bandas laterales cercanas a la fundamental, no es significativo para una y otra condición, se examinan los armónicos superiores, 5°, 7°, 11°, 13° ... Sin embargo la magnitud de estos armónicos decrece con el orden, haciendo más difícil la ubicación de las bandas laterales con respecto a cada uno de ellos.

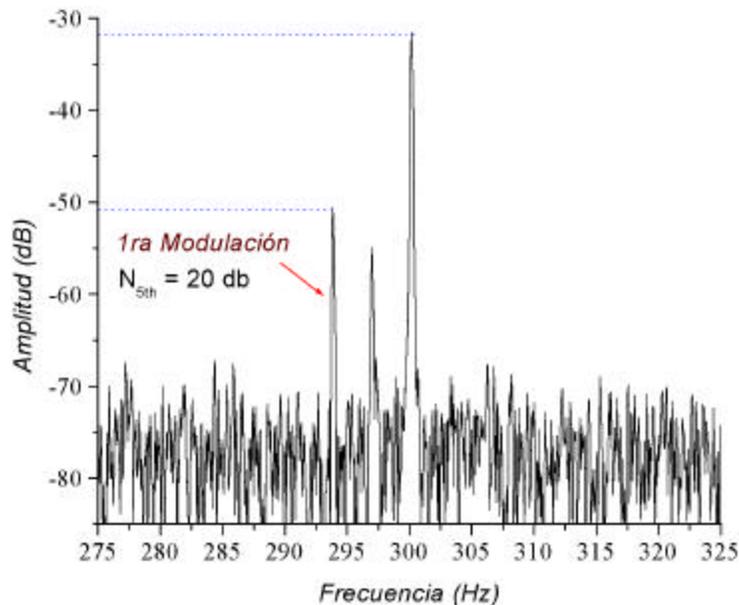


Figura 5.23 Banda lateral referida al 5° armónico.

Como se mencionó en el capítulo 4, no en todos los armónicos de la señal de corriente y sus bandas laterales creadas por la falla serán capaces de inducir fuerzas electromotrices y por tanto corrientes en el estator. Debido a la simetría del campo y al factor de devanado, sólo algunos armónicos serán capaces de afectar las corrientes del estator.

Si la banda lateral se ha modificado en 20 dB con respecto a su armónico (N_{5th}), el efecto de asimetría es de barras rotas. De otra manera indicaría que otro tipo de asimetría está presente en la máquina (por ejemplo modulación por carga).

Para la figura 5.23 la modulación está presente a 293.75 Hz con una diferencia con respecto al 5° armónico de 21.05 dB. Aparece una segunda componente a 297.5 Hz, generada por la condición asimétrica de las tres barras desconectadas del anillo de cortocircuito.

En la figura 5.24 se realiza una comparación en las tres condiciones en que se estimó el motor. La modulación de las bandas laterales es dependiente del deslizamiento. Para valores pequeños de deslizamiento, las bandas laterales están muy cercanas a la fundamental. A medida que el deslizamiento se aproxima a la velocidad nominal los valores se desplazan de 3 a 5 Hz. Este comportamiento tiende a ser casi lineal e independiente de la asimetría del rotor.

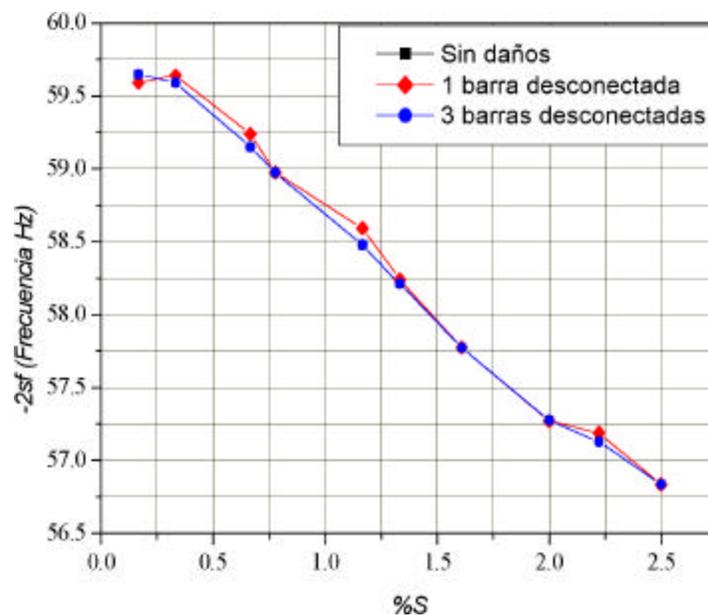


Figura 5.24 Modulación de la banda lateral inferior.

En la figura 5.25 se observa la comparación de la magnitud de la banda lateral inferior en las tres condiciones en que se estimó al rotor. La comparación se realiza a través de la modificación de la amplitud en decibeles (dB) con respecto a la fundamental.

En la primera etapa, durante el incremento de carga, la magnitud no decae con respecto al deslizamiento. Su variación se encuentra en el rango de 60 a 67 dB o valores mayores. Esto significa que el rotor se encuentra en buenas condiciones.

En la segunda etapa, la variación se ubica en un rango de 57 a 47 dB, lo que significa que la condición del rotor es moderada. En este rango se estima apertura de la barra y/o alguna fractura en desarrollo [5].

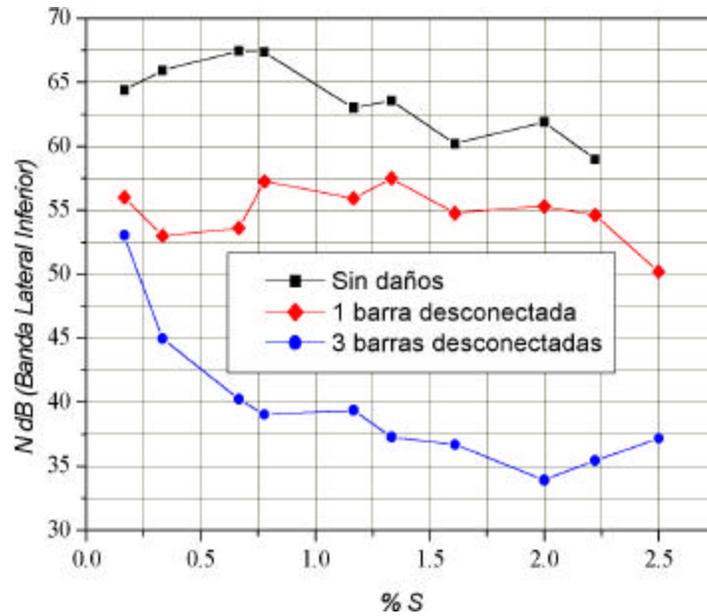


Figura 5.25 Relación en magnitud de la banda lateral a la fundamental (N).

En la tercera etapa el valor de N decae rápidamente. El rango varía de 52 a 32 dB. En la parte final, cuando se acerca al valor nominal de la velocidad, este rango se reduce de 37.5 a 32.5 dB. Este valor indica que la máquina no permanecerá trabajando en condiciones normales de operación. Uno de los principales efectos en el rotor con asimetría es el calentamiento excesivo en el motor.

En la figura 5.26 se presenta la modulación de la banda lateral alrededor del quinto armónico. A medida que se inspecciona el espectro fuera de la fundamental, las modulaciones aparecen sobre otros armónicos cuyos valores son menos significativos.

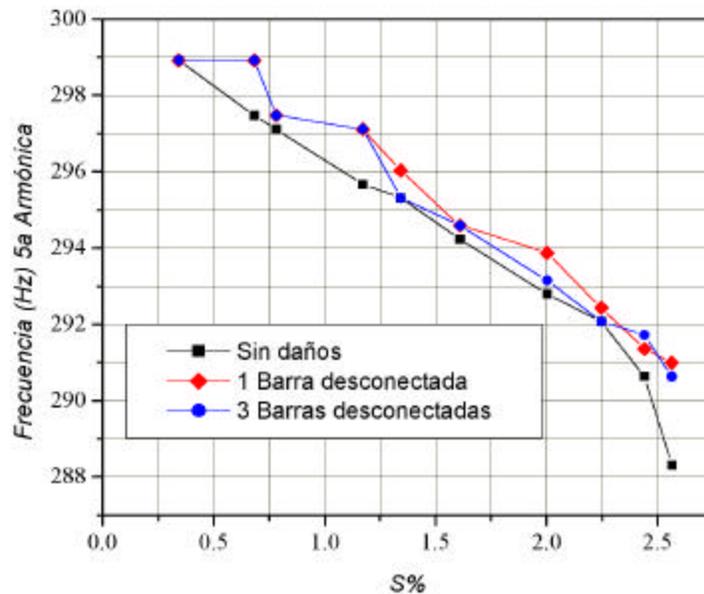


Figura 5.26 Modulación de la banda lateral sobre el 5° armónico.

En la figura 5.27, se presenta la diferencia entre la banda lateral debida a la asimetría y el 5° armónico. Se puede observar que mantiene una relación inversa con las gráficas de la figura 5.25. A medida que crece el deslizamiento el valor de N_{5th} también se incrementa.

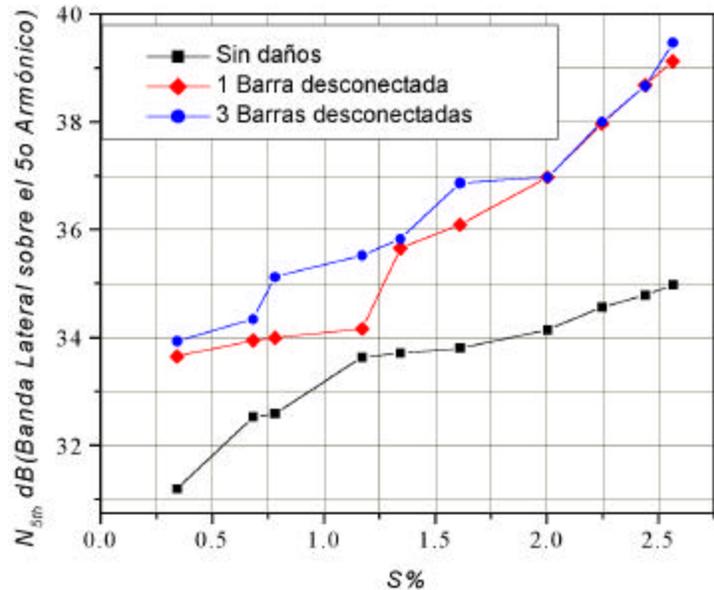


Figura 5.27 Relación en magnitud de la banda lateral al 5º armónico (N)

Se mencionó con respecto a la figura 5.23, que la diferencia de N_{5th} debe alcanzar un valor mayor a 20 dB para que se pueda considerar como problemas en barras del rotor. En la figura 5.27 en valores de deslizamiento bajo, la modulación es difícil ubicarla debido a que la magnitud de la banda lateral es muy pequeña, y se mezcla con el nivel de ruido en el espectro.

Como se había mencionado anteriormente, la condición constructiva de la máquina y el tipo de la misma, no permiten que la modulación de las componentes debidas a la asimetría se identifique en el espectro. Considerando lo anterior, este ancho de banda no permite dar un diagnóstico adecuado.

En la figura 5.28 y 5.29 se muestra la variación del par y la potencia que entrega el motor. Por la capacidad del motor empleado en las pruebas, tanto la potencia como el par no oscilaron en las tres condiciones de evaluación. La máquina trató de compensar la deshabilitación de las barras al seguir moviendo la carga acoplada. Esta condición, se reflejó en el calentamiento excesivo de los devanados de estator y rotor.

En la figura 5.29 se observa que cuando se tiene una barra desconectada del anillo de cortocircuito, aparentemente se consume mayor potencia que la condición de rotor sin daños. Aquí se debe considerar el efecto de error en la adquisición de las lecturas. En la figura 3.4 se presentó el circuito de pruebas empleado en el laboratorio, a través del medidor de par se obtuvieron los datos de velocidad, par y potencia a -medida que se aumentaba la carga- y los posibles errores en las lecturas de datos.

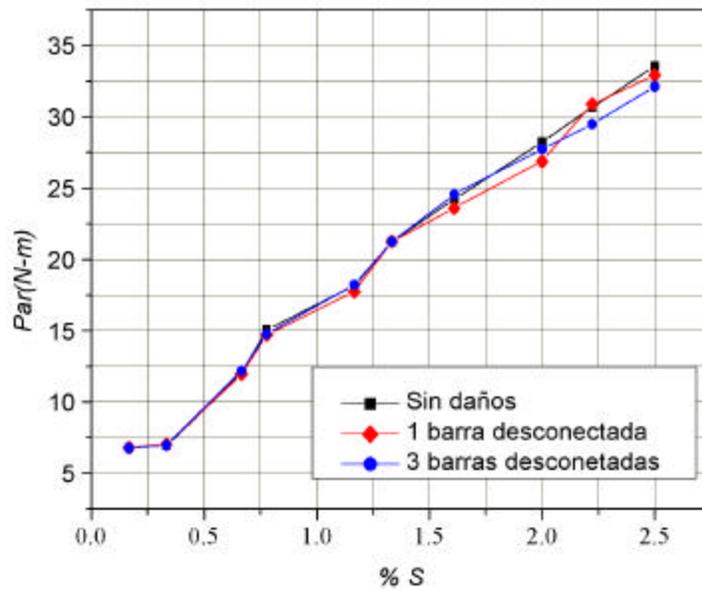


Figura 5.28 Par del motor.

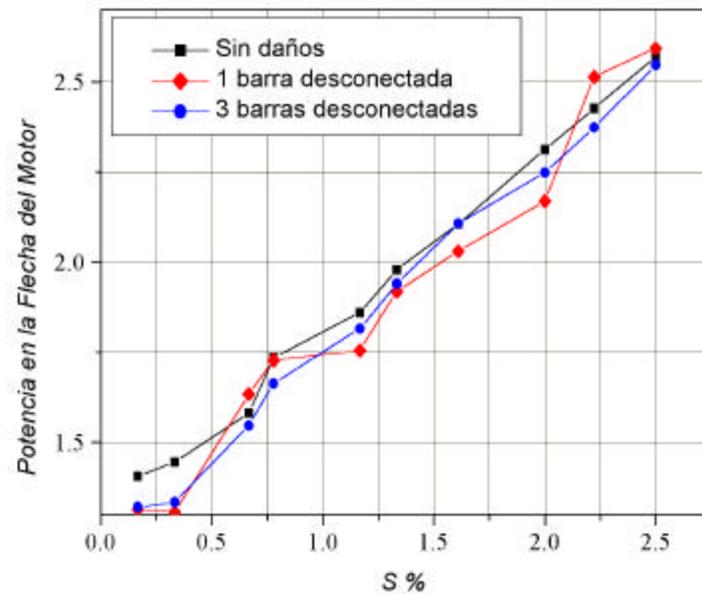


Figura 5.29 Potencia en la flecha del motor.

En la figura 5.30 se muestra una aproximación del espectro de corriente, en donde se pueden identificar los armónicos de ranura. El factor k_{ar} de la ecuación 4.38, determina la sucesión de componentes que aparecen en el espectro de frecuencia. A medida que el factor aumenta, las componentes se atenúan hasta el nivel de ruido. La escala vertical se reduce en 50 dB, debido a que la magnitud de los armónicos de ranura es muy pequeña, con respecto a la fundamental.

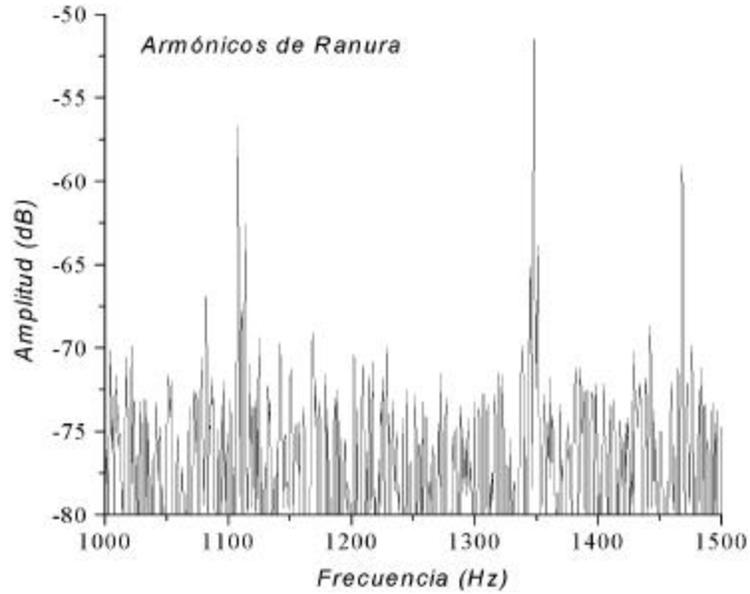


Figura 5.30 Rango de frecuencia para armónicos de ranura.

En la figura 5.31 se muestra una de las componentes de armónicos de ranura. Sobre la componente de 1350 Hz se modulan las dos bandas laterales. Estas componentes se encuentran referidas al armónico de ranura en 23-24 dB (N_R), cuyo valor corresponde a condiciones simétricas. Se observa que estas componentes se encuentran muy cercanas al armónico de ranura. A medida que se aproxima al valor nominal, las bandas laterales se van acercando más al armónico de ranura, como se muestra en los datos de la tabla 5.6

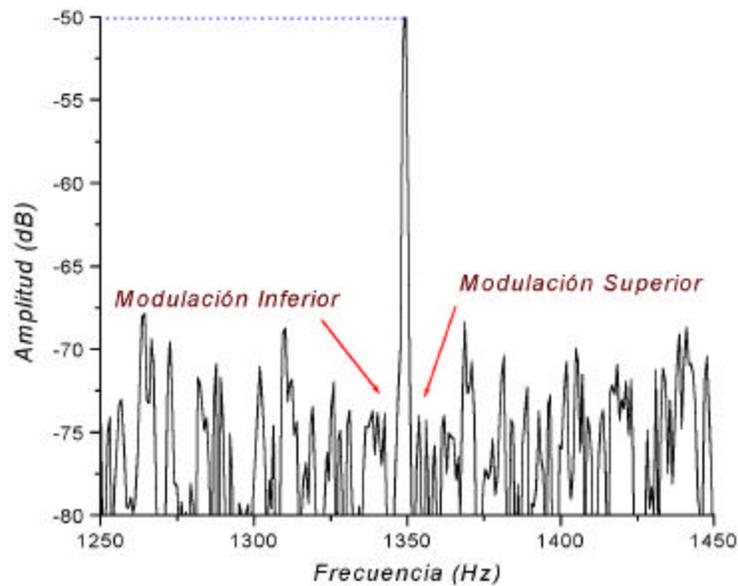


Figura 5.31 Modulación sobre la componente de armónicos de ranura, condiciones simétricas.

Tabla 5.6 Armónicos de ranura para las tres condiciones de prueba.

<i>Condición</i>		Simétrica	1 barra	3 barras
s%	-2sf (Hz)	N (dB)	N(dB)	N(dB)
0.293	1375.78	*	*	*
0.341	1375.08	*	*	*
0.663	1370.44	*	*	*
0.830	1368.04	*	*	*
1.123	1363.83	21.05	18.50	13.08
1.514	1358.20	21.08	18.63	13.46
1.733	1355.04	21.17	18.72	13.67
2.075	1350.11	21.07	19.15	13.85
2.441	1344.84	22.55	19.39	14.92
2.466	1344.49	23.59	19.62	14.88

* Los valores no son observables.

En la figura 5.32 se muestra el incremento de las bandas laterales alrededor del armónico de ranura. La magnitud N_R decreció aproximadamente en 10 dB, debido a que corresponde a la desconexión de tres barras del anillo de cortocircuito.

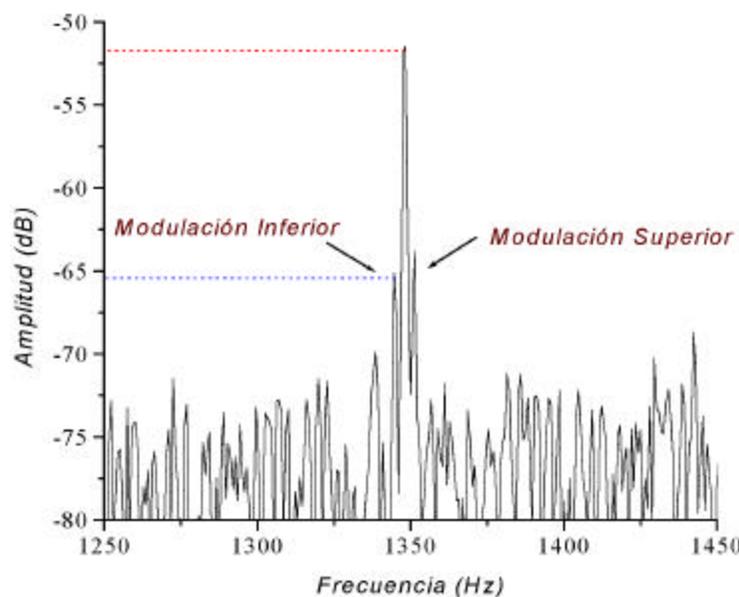


Figura 5.32 Modulación sobre la componente de armónicos de ranura, condiciones asimétricas.

La modulación de las bandas laterales son función de la velocidad y la corriente en el motor. En esta área del espectro se observó que la diferencia en dB con respecto al armónico de ranura, es casi constante en diferentes condiciones de operación. En la tabla 5.6 se muestran las tres condiciones en que se evaluó al rotor.

Para cada condición existen valores que difieren en 1 a 1.5 dB la magnitud de N_R , por lo que se puede considerar que esta modulación no depende de las condiciones de operación de la máquina. Abajo del 50 % del valor de deslizamiento (s), las bandas laterales son muy pequeñas. Esto no permite obtener un valor observable de N_R .

5.2.2 Segundo motor de prueba.

Los datos del segundo motor se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 5.7 Datos del segundo motor de prueba.

DATOS	VALOR
Potencia	5 CP
Tensión	220/440 Volts
Corriente de Línea	15/8 Amps.
Fases	3
Polos	4
Velocidad	1725 rpm
Frecuencia	60 Hz
Ranuras del Estator	36
Ranuras del Rotor	48
Factor de Servicio	1.0

En el motor de 5 CP la estimación de la condición del rotor se realizó bajo la secuencia de pruebas de la siguiente tabla:

Tabla 5.8 Secuencia de pruebas para el motor de 5 CP.

Secuencia de Prueba	Desconexión
1	Sin daños
2	1 Barra del anillo del cortocircuito
3	2 Barras adyacentes del anillo de cc
4	2 Barras a 90° mecánicos, del anillo de cc
5	3 Barras adyacentes del anillo de cc
6	4 Barras adyacentes del anillo de cc

En esta etapa del laboratorio, se analizó el espectro de corriente cuando el incremento de la asimetría es en barras múltiples, además se analizó como el comportamiento da el incremento en magnitud de las bandas laterales, cuando existe un desplazamiento entre barras dañadas de 90° grados mecánicos. Todas las mediciones se realizaron a condiciones nominales.

En la figura 5.33 se muestra el espectro en condiciones simétricas. En este caso la modulación de las bandas laterales se estima en 54.75 y 65.2 Hz. En las figuras 5.33 y 5.34 se realiza una comparación de ambos espectros, para diferentes condiciones de asimetría. En una primera etapa se desconectó una barra del anillo de cortocircuito. Esta desconexión modifico la banda lateral inferior a 43.23 dB.

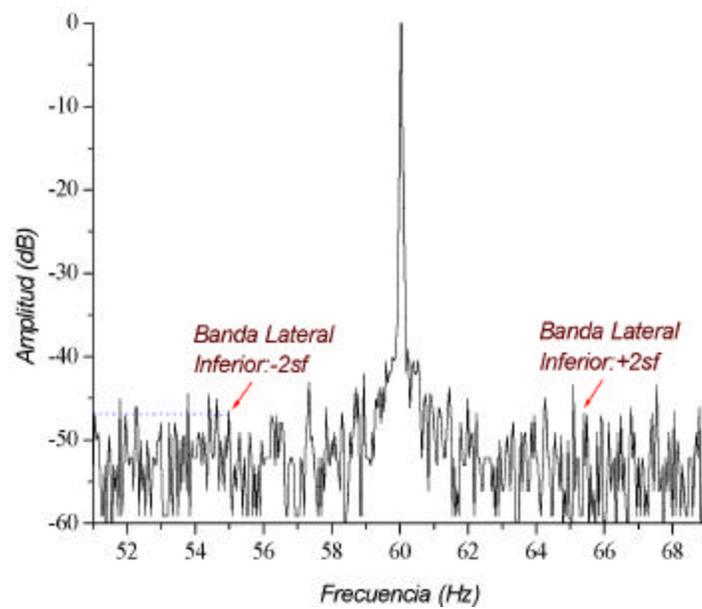


Figura 5.33 Condiciones simétricas, segundo rotor jaula de ardilla.

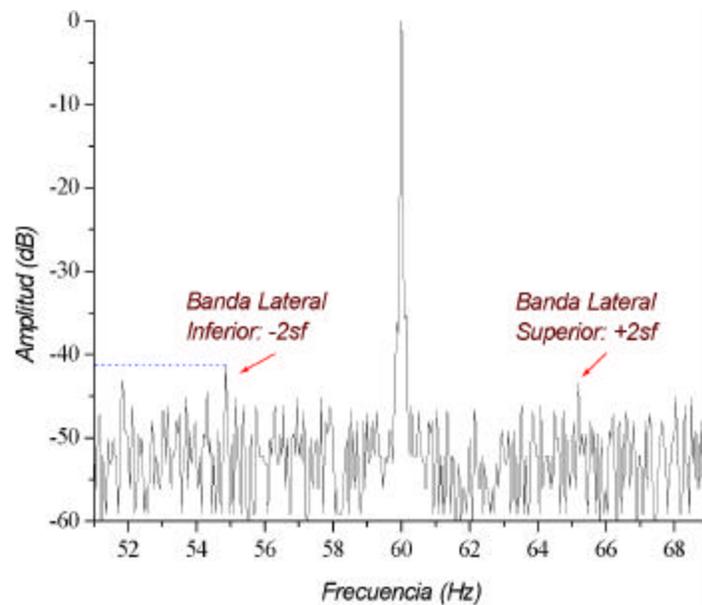


Figura 5.34 Una barra desconectada del anillo de cortocircuito.

Posteriormente se desconectó otra barra de la anterior a 90° grados mecánicos, (equivale a 180° grados eléctricos) N se fijó a 43.21 dB en el segundo espectro, como se muestra en la figura 5.35.

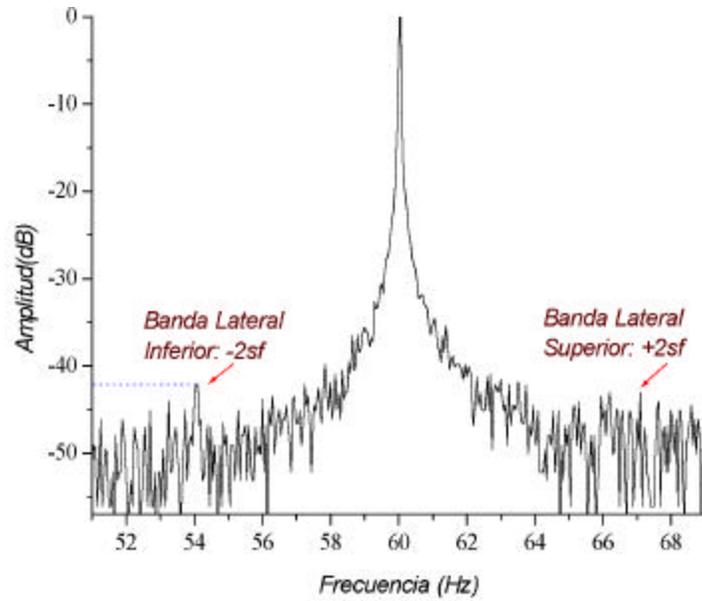


Figura 5.35 Dos barras desconectadas a 90° mecánicos del anillo de cortocircuito.

Las barras con respecto a la fuerza magnetomotriz fundamental, se muestran en la figura 5.36 y figura 5.37. En estas figuras se considera la posición de 24 de las 48 barras que forman el rotor de prueba.

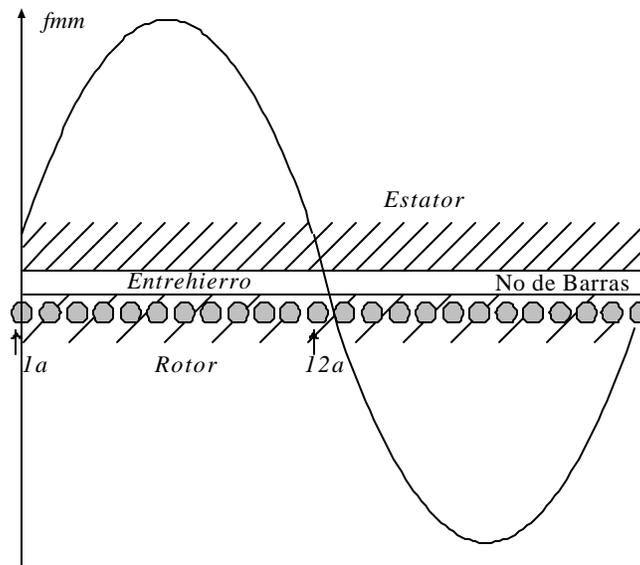


Figura 5.36 Posición de la 1ª y 12ª barra en los cruces de la fmm.

Existen dos condiciones por las cuales la fuerza magnetomotriz del entrehierro no genera incremento en la amplitud de las bandas laterales. La componente fundamental de la fuerza magnetomotriz cubre a doce barras por polo en un instante determinado, como en la figura 5.36. En esta posición las dos barras se encuentran en los puntos de cruce de la fmm lo cual no genera ningún incremento en la magnitud de las bandas laterales [21].

En la figura 5.37 se muestra la segunda condición. La 1ª barra se encuentra cubierta por el punto máximo y la 12ª barra por el punto mínimo. Durante una revolución completa todas las barras del rotor participan en la formación de los polos del mismo (en varios puntos de la revolución). El número de barras empleadas y la tolerancia normal en el ensamble generan algunas variaciones de este proceso como función de la posición angular de la jaula relativa a los patrones del polo del rotor. Más allá de la variación en la capacidad de corriente de una barra, se tendrá un efecto marcado en los esfuerzos instantáneos en la secuencia de todos los polos del rotor.

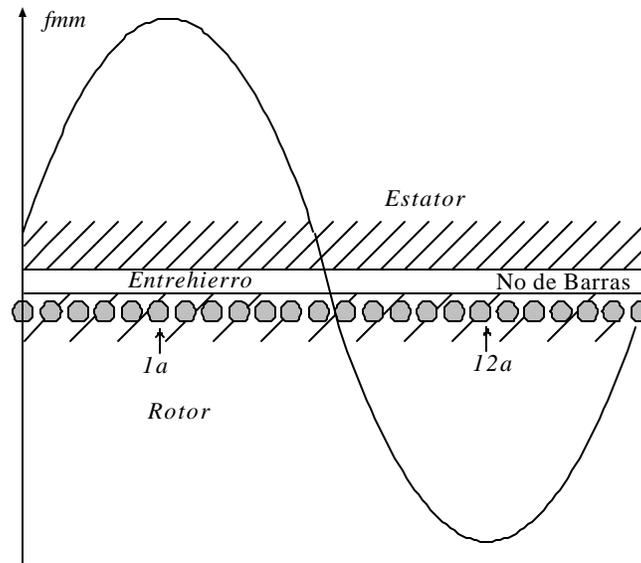


Figura 5.37 Posición de la 1ª y 12ª barra en los puntos máximo y mínimo fmm.

Las fluctuaciones del campo son reflejadas sobre las corrientes del estator como modulación en la frecuencia de línea. Sin embargo cuando la 1ª barra desconectada se encuentra opuesta a la 2ª barra desconectada, las fluctuaciones del campo se cancelan, de tal manera que no lo modifica y simplemente se reduce a la modulación debida a la tolerancia normal en el ensamble.

La distribución de las barras falladas es aleatoria alrededor del núcleo. Sin embargo no se ha desarrollado un análisis más completo de este tipo de falla, ya que es una situación que no es común dentro de las asimetrías del rotor jaula de ardilla, pero tampoco se debe descartar. En la referencia [21] se menciona como parte de un trabajo complementario a la fractura en barras adyacentes.

En la figura 5.38 se presenta el espectro con un incremento de las bandas laterales debido a la presencia de la asimetría en el rotor. En este caso se desconectaron 4 barras del anillo de cortocircuito. La modulación aparece y el incremento de la banda lateral inferior se mantiene en 6 dB. La relación de la banda lateral inferior a la fundamental reduce su valor y representa el indicativo en la severidad de la falla.

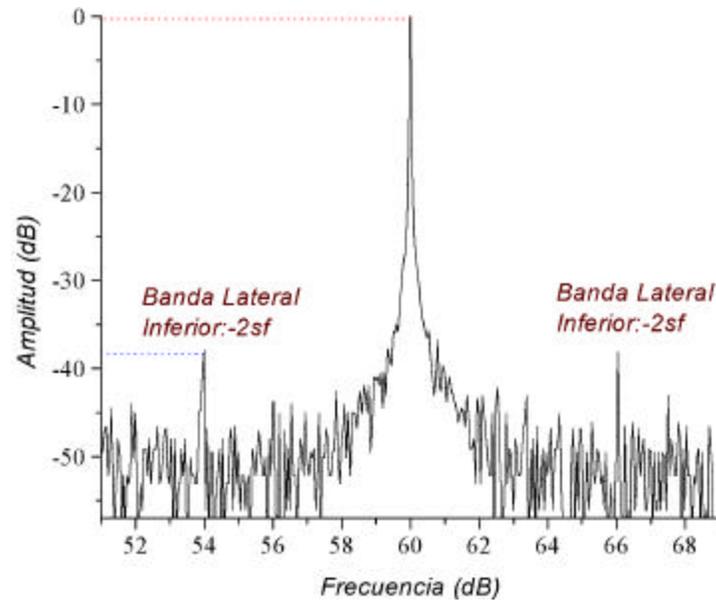


Figura 5.38 Incremento en la magnitud de las bandas laterales.

En las figuras 5.39 y 5.40 aparecen dos condiciones específicas de la modulación del espectro de corriente. En este caso la primera componente (banda lateral inferior) se ha incrementado más significativamente que el componente superior (banda lateral superior). Este efecto es debido a que el tercer armónico de flujo en el entrehierro no alcanza a modular la siguiente componente. Un exceso de asimetría en el rotor ó problemas de vibraciones mecánicas modifican la modulación y el incremento de las bandas laterales. Mientras la primera componente aparezca al doble de la frecuencia de deslizamiento, puede significar un punto de evaluación para el motor [37].

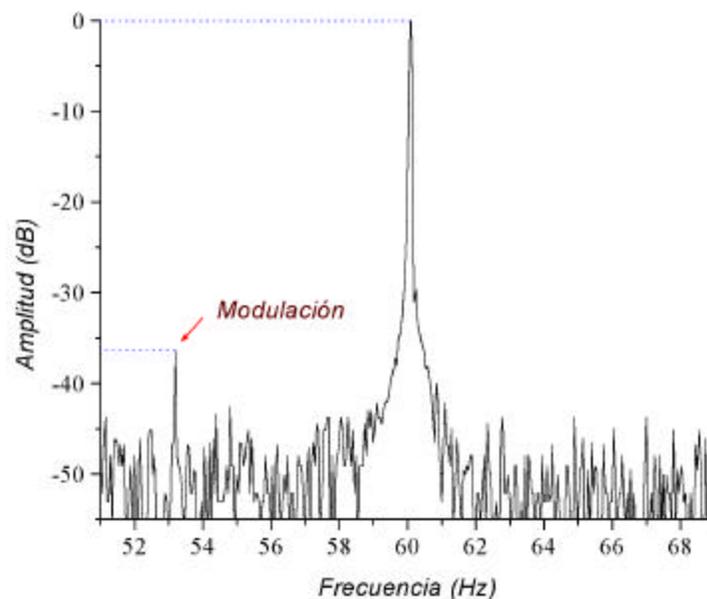


Figura 5.39 Modulación de la banda lateral inferior. 1ª Parte.

La modulación de la figura 5.40 aparece como una componente muy pronunciada, ya que fue la última adquisición de la corriente que alimenta al motor. La condición del rotor fue totalmente asimétrica al momento de realizar la medición. El incremento de la banda lateral inferior es aproximadamente de 8 dB con respecto a la figura 5.40. La relación entre esta componente y la fundamental se incrementa en valores de 30 a 35 dB.

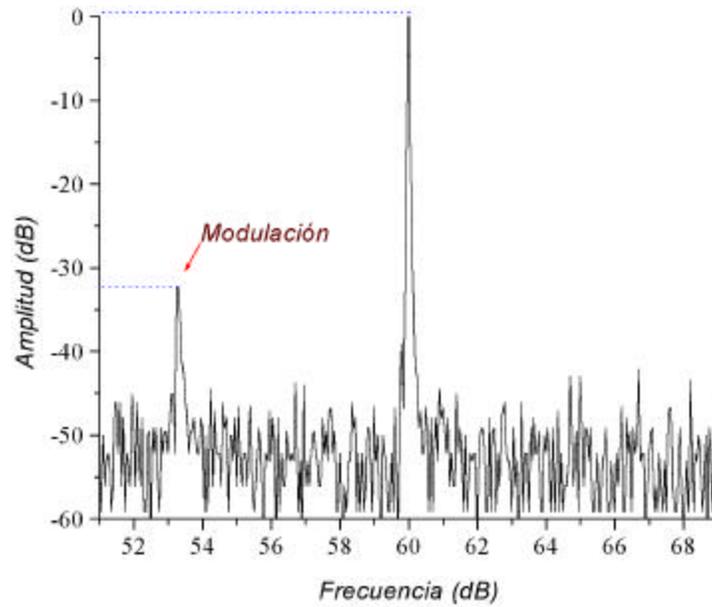


Figura 5.40 Modulación de la banda lateral inferior. 2ª Parte.

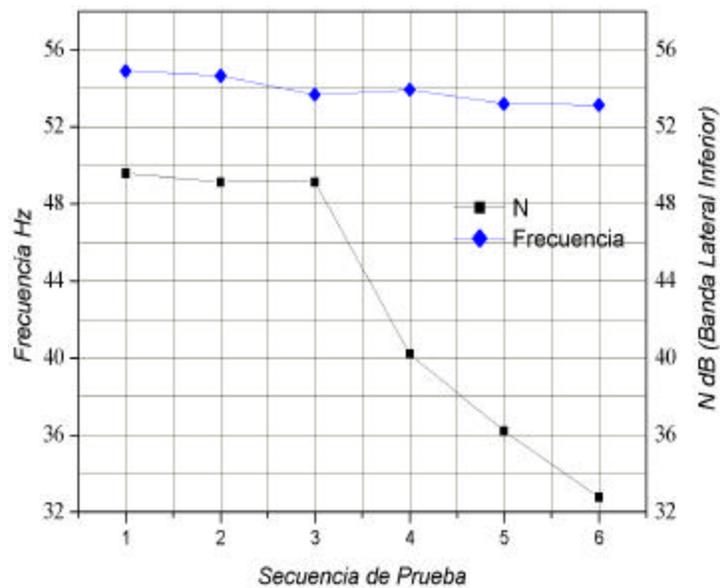


Figura 5.41 Secuencia de pruebas en el segundo rotor.

En la figura 5.41 se muestra una comparación del valor de N y su respectiva frecuencia de deslizamiento, de acuerdo a la secuencia de pruebas en el rotor de la tabla 5.8. La asimetría en el rotor disminuye el valor de N. En esta etapa de experimentación se trabajó todas las fallas a condiciones nominales, por lo que también se verifica que la frecuencia de las bandas laterales es independiente del incremento de la asimetría.

En la figura 5.42 se presenta la relación de N_{5th} con respecto al 5° armónico de corriente y su respectiva frecuencia de deslizamiento. La frecuencia de modulación es independiente de la asimetría del rotor, prácticamente se mantiene como una condición lineal. La magnitud de la banda lateral alrededor del 5° armónico, no cuantifica la severidad de la falla, ya que el valor se mantiene en un promedio de 20 dB. Esta magnitud se puede manejar como un indicativo de problemas en la jaula del rotor, con respecto a fallas de tipo mecánico que se reflejen en el espectro de corriente.

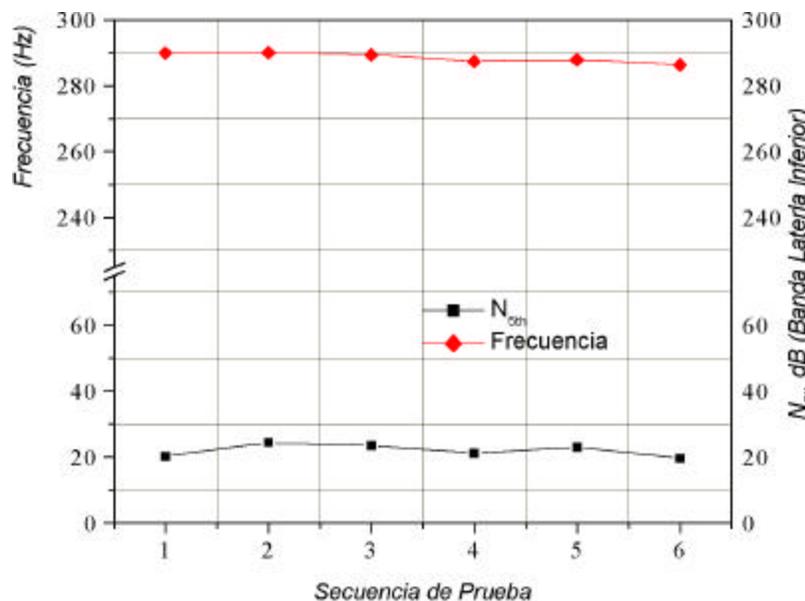


Figura 5.42 Secuencia de pruebas en el segundo rotor, para el 5° armónico.

5.3 Evaluación de Motores Trabajando en Línea.

Con el apoyo de una institución de investigación se evaluaron varios motores de capacidad mayor. El objetivo de esta parte del trabajo fue validar los resultados obtenidos en laboratorio. Los casos evaluados en laboratorio sirvieron como indicativo en el análisis de la modulación del espectro de corriente debido a la asimetría en el rotor.

Los datos se encuentran especificados en la tabla 5.9. Los motores están conectados en estrella con su neutro flotado eléctricamente. Estos motores son utilizados como motocompresores. El arranque de los motores se hace a tensión plena. Esto implica la generación de transitorios de voltaje y corriente que inciden directamente en las condiciones dieléctricas de los devanados.

Tabla 5.9 Datos de motores evaluados en línea.

Motor	Potencia (CP)	Fases	Voltaje (Volts)	Corriente (Amperes)	Frecuencia (Hz)	Polos	Velocidad (rpm)
3500A	3500	3	13,200	134	60	2	1789
3500B	3500	3	13,200	134	60	2	1789
6800A	6800	3	13,200	259	60	2	1794
6800B	6800	3	13,200	259	60	2	1794
6800C	6800	3	13,200	259	60	2	1794

Los cinco espectros de corriente presentados en las figuras 5.43 a 5.47, no se encuentran ordenados por su capacidad, sino por las condiciones del rotor. En el motor 3500B se detectó una asimetría en la jaula del rotor. Una barra se fisuró en la unión con el anillo de cortocircuito y causó problemas de operación en el motor. La probabilidad de falla en las barras del rotor, aumenta debido a que el tiempo de arranque es relativamente largo y se requiere arranques frecuentes como parte de su ciclo de trabajo.

En la tabla 5.10 se presentan las frecuencias y el valor de N, para la primera banda lateral. En cuatro motores los valores de N se encuentran sobre 60 dB. Esto significa que las condiciones de asimetría son aceptables en su correspondiente rotor.

Tabla 5.10 Modulación y magnitud de N.

Motor	Modulación (Hz)	N (dB)
3500A	59.0	69.10
3500B	58.9	47.50
6800A	58.8	70.16
6800B	58.8	65.73
6800C	58.9	67.85

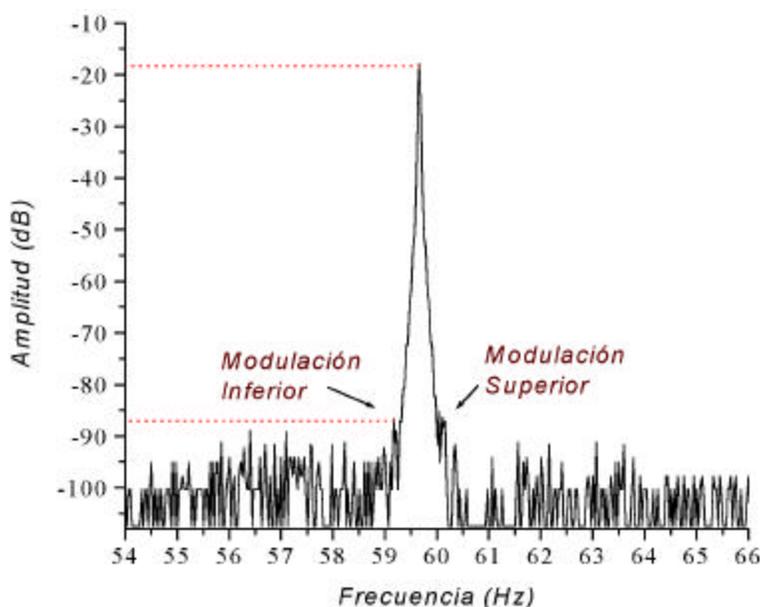


Figura 5.43 Espectro de corriente del motor 3500A.

En la etapa de pruebas en laboratorio se observó que el valor de N asociado a la banda lateral inferior estima la condición del rotor. Bajo este criterio se analizan las figuras 5.43, 5.44 5.45 y 5.46. Se realizaron diferentes adquisiciones de la señal de corriente de cada uno de estos motores. De acuerdo al indicativo N de laboratorio para valores mayores de 60 dB el rotor se encuentra en buenas condiciones. Para la figura 5.47 el valor de N es menor a 60 dB, como se mostró en la tabla 5.10.

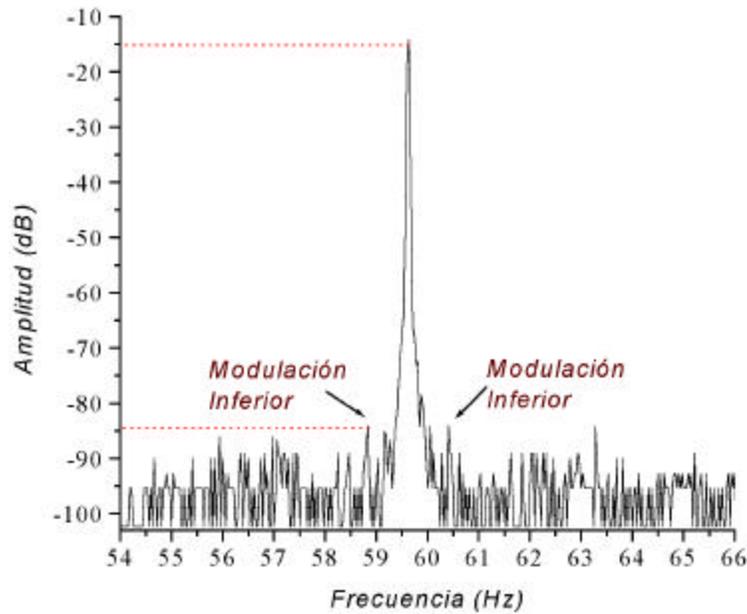


Figura 5.44 Espectro de corriente del motor 6800A

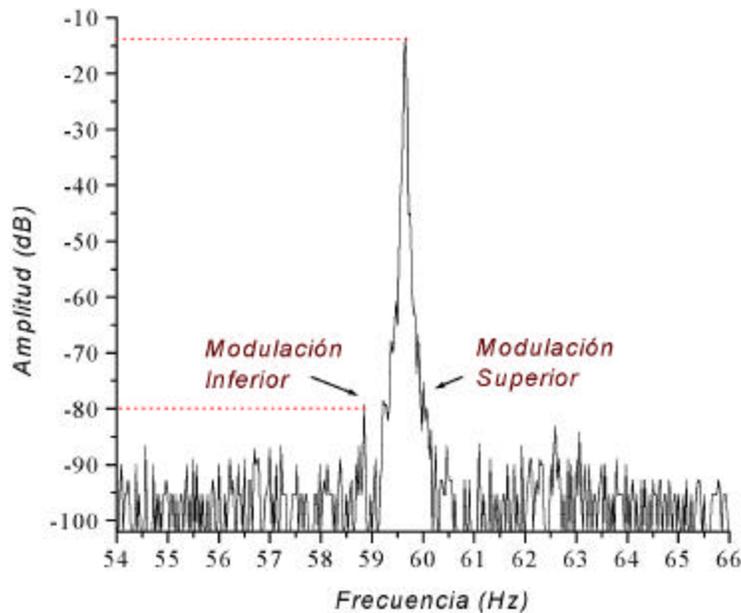


Figura 5.45 Espectro de corriente del motor 6800B.

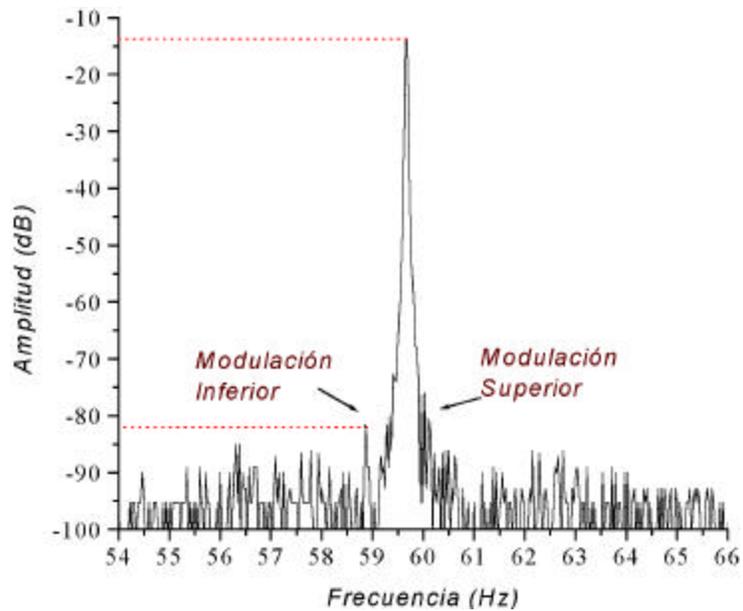


Figura 5.46 Espectro de corriente del motor 6800C.

En la figura 5.47 las bandas laterales alrededor de la fundamental son muy pronunciadas, por lo tanto el valor de N debe ser menor a 60 dB. En motores mayores a los 100 CP con ciclos de trabajo pesados, es suficiente con el inicio de una fisura entre las barras y el anillo de cortocircuito para que se identifique el valor de N. En el apéndice aparece la figura A8 de un rotor con algunas barras fracturadas.

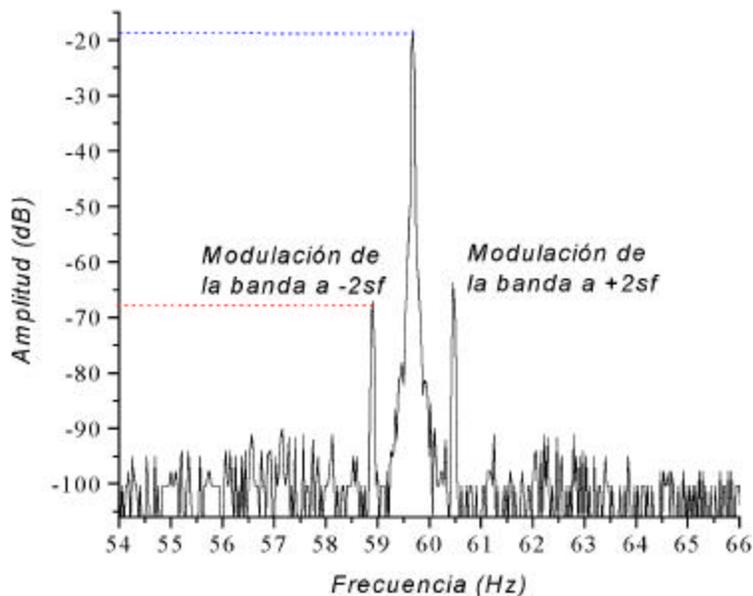


Figura 5.47 Espectro de corriente del motor 3500B.

En la figura 5.48 se resume el monitoreo de los motores trabajando en línea. Es una comparación de la frecuencia de modulación y su respectivo valor de N, con respecto al número de evaluaciones realizadas. La frecuencia de modulación en cada uno de los motores evaluados es de un valor muy semejante.

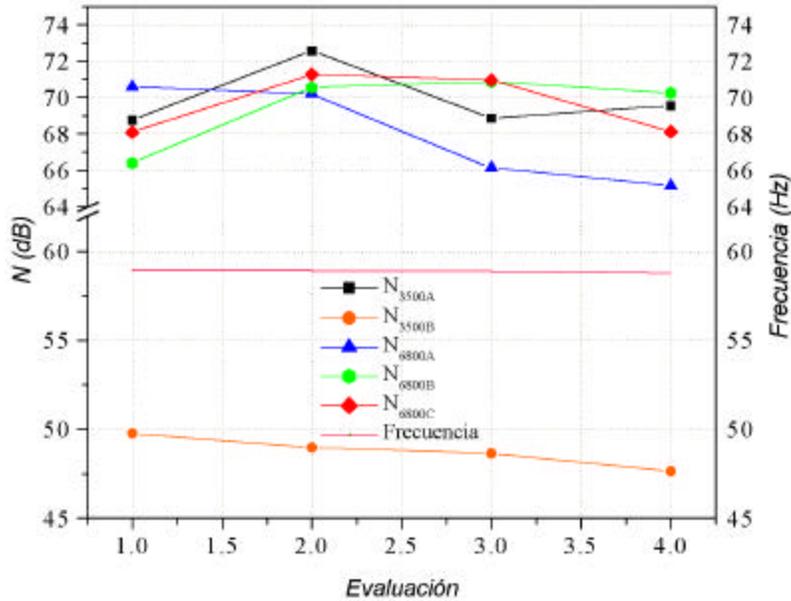


Figura 5.48 Comportamiento de N y frecuencia de los motores trabajando en línea.

La magnitud de N en cuatro de los cinco motores varía en un rango de 66 a 72 dB, lo que representa condiciones simétricas en cada una de estas máquinas. En el motor 3500B la magnitud decae aproximadamente de 50 a 47.5 dB. Esto significa que en la jaula del motor entre la barra y el anillo de cortocircuito existía una fisura. La condición se fue degradando de acuerdo al valor de N en la figura 5.48, este valor disminuye con respecto al número de evaluación. Dependiendo el ciclo de trabajo en el motor, la fisura entre la barra y el anillo de cortocircuito se puede convertir en fractura.

En la figura 5.49 se presenta el espectro del motor 3500B modulado alrededor del 5° armónico de corriente. Representa una condición semejante al primer motor de prueba de la figura 5.23. La relación de la banda lateral al 5° armónico se fijó en 20 dB (para que se considere problemas de barras).

Como se mencionó anteriormente las características constructivas de la máquina, mantienen influencia en las amplitudes de los armónicos, lo que genera un cierto grado de incertidumbre en el diagnóstico en determinados anchos de banda. Una alternativa al momento de diagnosticar, sería establecer un modelo matemático exhaustivo del motor o mediante un estudio estadístico realizado sobre un gran número de máquinas.

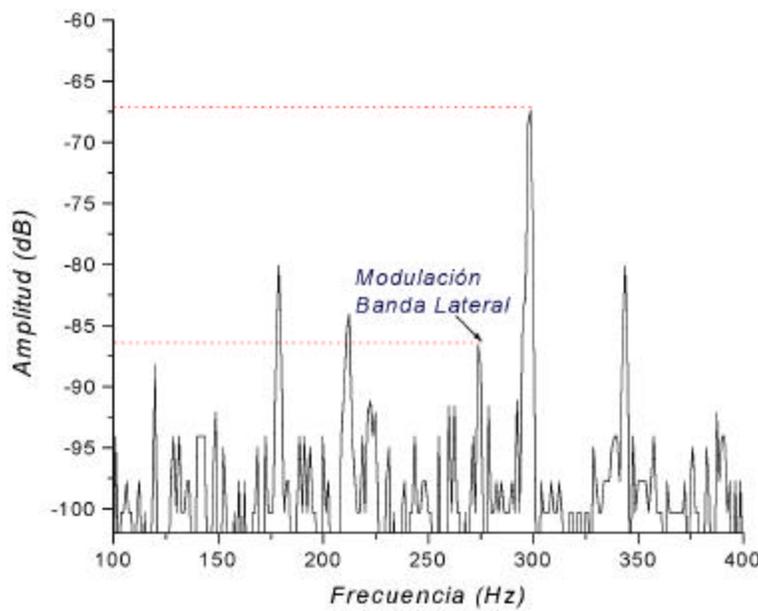


Figura 5.49 Espectro de corriente del motor 3500B, sobre el 5° Armónico.

En la figura 5.50, se observa el 5° y 7° armónicos en el espectro de corriente, para uno de los motores en condiciones simétricas. La modulación de la banda lateral alrededor de estos armónicos no es tan evidente en magnitud como en el espectro de la figura 5.49.

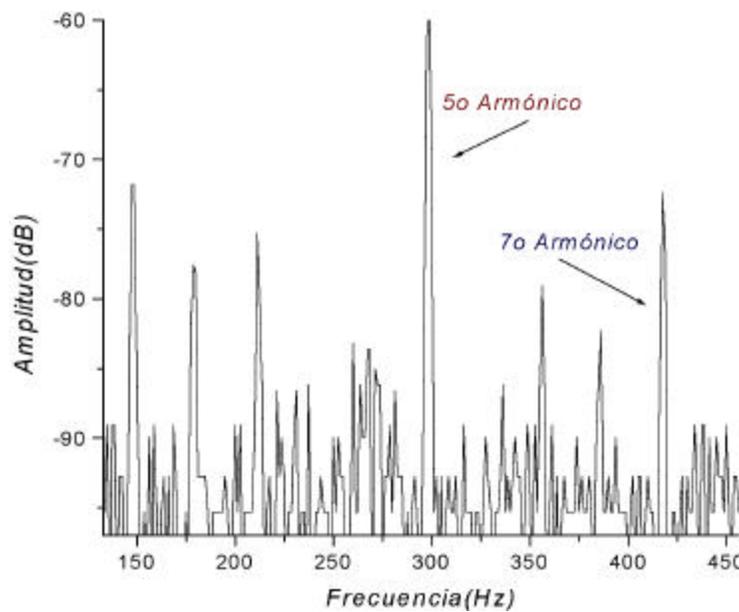


Figura 5.50 Espectro de corriente del motor 6800B, sobre el 5° y 7° Armónico.

La modulación de los armónicos debidos al ranurado en el rotor, generan componentes, alrededor de las cuales existe una modulación de $\pm 2sf$ la frecuencia de deslizamiento. En el capítulo 4 se indicó que las frecuencias de las componentes debidas al ranurado dependen de la ecuación 4.38, su magnitud es independiente de la variación de la carga.

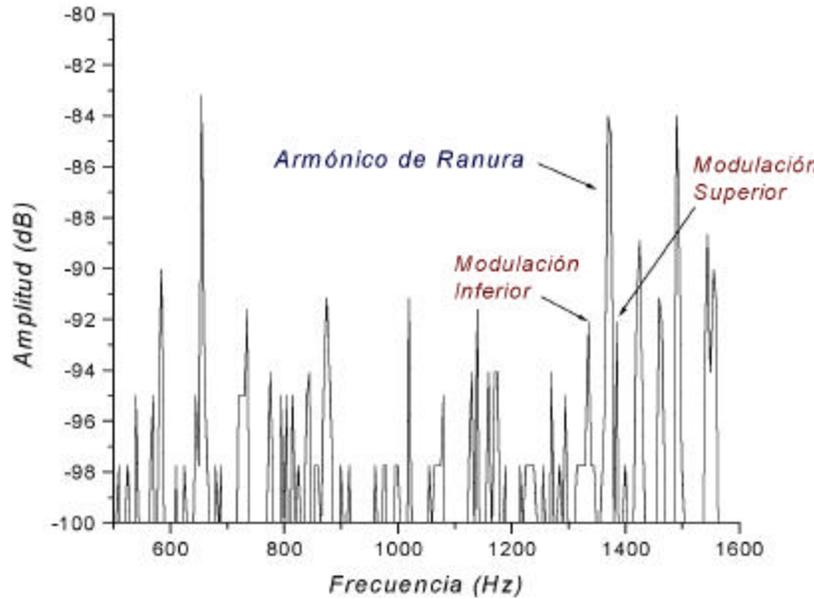


Figura 5.51 Espectro de corriente del motor 3500B, sobre armónicos de ranura.

En el capítulo 4 se mencionó, que cuando a un motor de inducción se le aplican cargas pulsantes, las oscilaciones de velocidad y el par producen alteraciones en el campo magnético del motor y, por tanto, en la corriente del estator. En la figura 5.52 se muestra un espectro modulado por la carga.

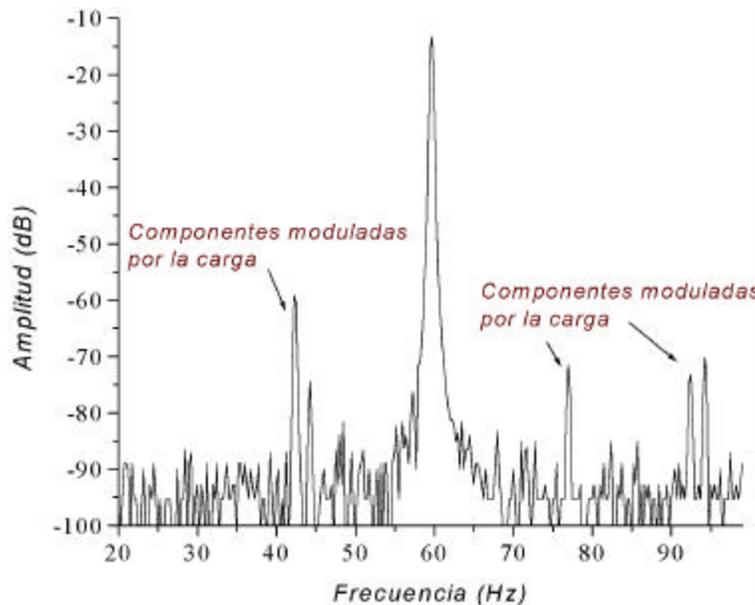


Figura 5.52 Espectro modulado por la carga.

En el espectro de la figura 5.52 las frecuencias se desplazan en rangos de 40 Hz, son frecuencias múltiples del número de polos del motor. Se observa que estas frecuencias están desplazadas de las frecuencias asociadas a las bandas laterales alrededor de la fundamental.

El tipo de carga acoplada al motor de inducción de máquinas como compresores, bombas y particularmente molinos entre otras máquinas, llevan acoplados un sistema de engranes reductores, lo que modularán el espectro de corriente. Las frecuencias de estas componentes se encuentran determinadas por la ecuación 4.39.

En el espectro de la figura 5.53 se muestra un ancho de banda mayor a la figura 5.52. Las componentes moduladas por la carga se desplazan como múltiplos del número de polos del motor.

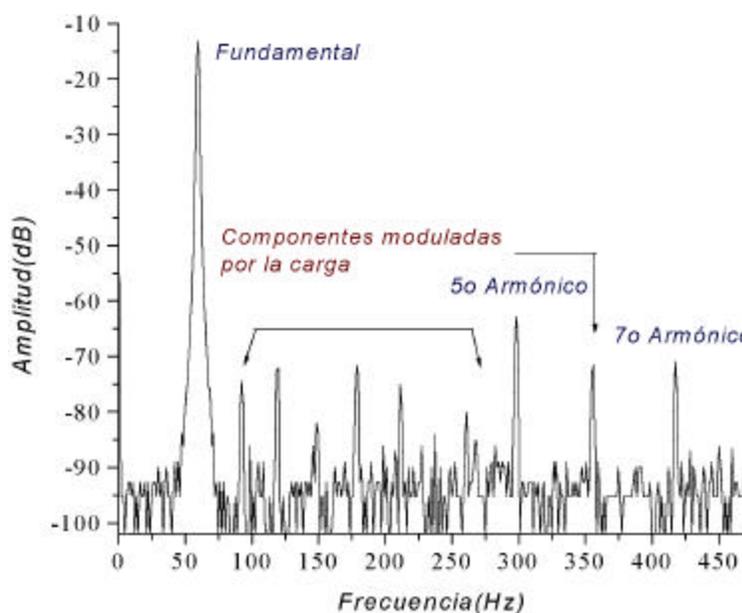


Figura 5.53 Espectro modulado por la carga, en un ancho de banda mayor.

En la figura 5.54 en una muestra de motores trabajando en sitio, se presenta una gráfica de los rangos -en decibeles- de la banda lateral inferior a la fundamental, con respecto a la asimetría del motor. En el mayor porcentaje de motores evaluados se encontró que el valor de N es mayor o igual a 60 dB. Esto reafirma lo establecido en las pruebas de laboratorio.

Para un rango menor a 50 dB, las condiciones del rotor presentan alguna fractura en desarrollo, si el valor de N sigue decrementando, significa que se generó la desconexión de una barra del anillo de cortocircuito.

En la figura 5.48 se observó que la barra falló aproximadamente en 46.5 dB. Cuando se encuentra este valor en el espectro de corriente, se recomienda un monitoreo continuo en el motor.

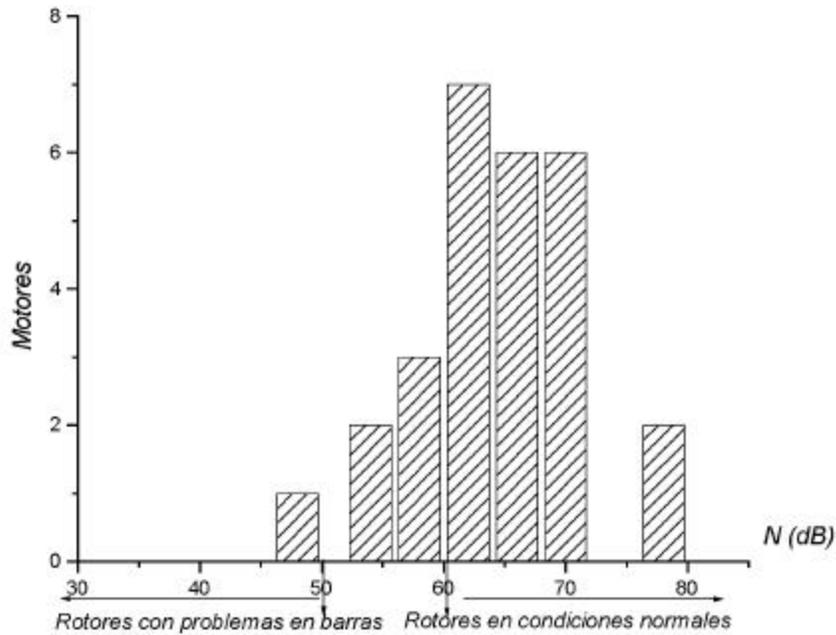


Figura 5.54 Rangos en decibeles de N

Si la magnitud de N se reduce, a medida que se inspeccione el espectro y el motor sigue trabajando, para valores de 40 dB hacia abajo la probabilidad de que existen múltiples barras con fisuras o desconectadas del anillo cortocircuito, es muy alta. Bajo estas condiciones se deben realizar pruebas que confirmen el problema.

En el rotor correspondiente al motor 3500B, la falla se inició con una fisura en la unión de una barra con el anillo de cortocircuito. Si no se detecta a tiempo, ésta continúa progresando hasta ocasionar una salida forzada. La figura 5.55 es una representación esquemática del rotor fallado. La barra fallada degradó parte de las laminaciones del núcleo del rotor.

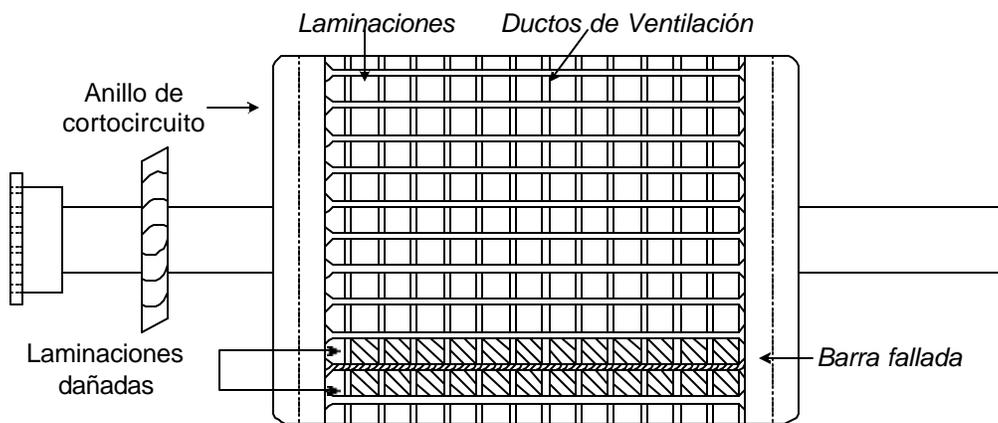


Figura 5.55 Rotor jaula de ardilla con una barra fallada.

En el apéndice aparecen los diagramas de los rotores empleados durante las pruebas de laboratorio. Adicionalmente se presentan las figuras en donde aparecen dos rotores: uno con fisuras entre la barra y el anillo de cortocircuito, y el otro con algunas barras fracturadas.

En la tabla 5.10 se resume el análisis de las componentes del espectro en corriente para estimar la condición del rotor. En esta tabla la magnitud de N se encuentra determinada por la banda lateral inferior. Los resultados consideran al motor trabajando a condiciones nominales.

Tabla 5.10 Rangos en decibeles que establecen la condición del motor.

Magnitud de N (dB)	Condición del Rotor	Acción Recomendada
Mayor de 60	Aceptable	Ninguna
50-60	Moderada	Revisión continua
50-40	1 barra fracturada	Realizar pruebas para confirmar problemas
Menor de 40	Múltiples barras dañadas	Remover el rotor

Las recomendaciones del diagnóstico una vez identificada la condición del rotor, fueron comparados con los que aparecen en la referencia [5]. La condición más incipiente de la falla (fisura entre el anillo de cortocircuito y la barra, figura A7) corresponde a un estudio posterior en donde se analice el efecto de las corrientes interlaminares [37], sobre la magnitud de las bandas laterales.

CAPÍTULO**6****Conclusiones**

6.1 Conclusiones

En este trabajo se realizó la simulación experimental en estado estacionario del motor trifásico de inducción, con asimetría en la jaula del rotor. El comportamiento de la simulación, permitió establecer cómo se puede estimar la condición del rotor, sin la necesidad de sacar de operación la máquina. La modulación de la banda lateral inferior y su incremento en magnitud es el indicativo que permite establecer tal estimación.

Es importante considerar al momento de la adquisición de la señal de corriente, que el número de puntos que la forman, sea el necesario para obtener un adecuado ancho de banda en el espectro. En el barrido del ancho de banda se deben obtener señales que no oculten componentes debido a limitaciones en la adquisición.

Independientemente de la condición en que se encuentra el rotor, aparece el fenómeno de modulación del espectro, esto debido a la tolerancia normal entre las barras y el anillo de cortocircuito.

La normalización -con respecto a la fundamental- de las bandas laterales debidas a la asimetría, es una forma de evitar que evolucionen con el incremento de la carga.

La modulación en frecuencia de las bandas laterales se aproxima a un comportamiento lineal, debido a la variación de la carga aplicada al motor. El desplazamiento de las bandas laterales depende del valor de deslizamiento de la máquina.

La magnitud de los anchos de banda alrededor de la fundamental, pueden presentarse más pequeños cuando existen corrientes interlaminares. Esto debido a que la transferencia de las corrientes entre barras reduce el desbalance magnético por la fractura en la barra. Inicialmente puede dificultar la ubicación de las componentes, específicamente cuando el monitoreo de las bandas laterales alrededor de la fundamental reduce los niveles comparables con la modulación debida a la carga.

Considerando lo anterior se puede verificar la modulación de las bandas laterales alrededor de los armónicos 5º, 7º ... Sin embargo al inspeccionar estos armónicos se debe tener en cuenta que el factor de devanado atenúa las magnitudes a medida que se incrementa su orden.

La presencia de asimetrías en barras opuestas por los máximos de corriente, no generan modulación en la amplitud de las bandas laterales -alrededor de la fundamental-, ya que se pueden encontrar en los cruces por cero de las fuerzas magnetomotrices o que sus componentes se cancelen.

Cuando la magnitud de N es mayor de 60 dB, no se recomienda ninguna acción en el motor, dado que la condición del rotor es aceptable. Para cuando N se encuentra entre 50 a 40 dB, se recomienda realizar pruebas a la máquina, tales como: análisis termográfico, consumo de corriente, vibraciones mecánicas entre otras. Esto debido a que es posible encontrar una barra fracturada. Para el caso en que N sea menor de 40 dB, se recomienda remover el rotor para una inspección visual, dado que se presentan múltiples barras fracturadas.

La modulación en el espectro de corriente no depende de la capacidad del motor. Sin embargo la magnitud de las bandas laterales pueden variar debido a los niveles de corriente en el motor y su redistribución en la jaula de ardilla. Si la impedancia del anillo es baja la corriente se redistribuye en todo el rotor, por el contrario si la impedancia es alta se redistribuye en barras adyacentes a la falla.

Cabe señalar que se debe monitorear cuando el costo efectivo sea el adecuado y/o las consideraciones de seguridad para el equipo lo demanden. Los costos de monitoreo incluyen la inversión inicial en la compra del equipo e instalación, capacitación y los costos asociados con la adquisición de datos. Estos gastos pueden ser amortizados sobre el costo de vida del sistema de monitoreo y a medida que permita evitar fallas en el sistema.

6.2 Aportaciones

Una técnica que puede estimar la condición del rotor jaula de ardilla, sin que el motor salga de operación. Esta técnica no depende de las variaciones de temperatura, como es el caso de la estimación paramétrica. En un periodo de tiempo se puede establecer un registro de la condición del rotor, como parte de un programa de mantenimiento predictivo.

6.3 Recomendaciones

Desarrollar un modelo analítico que considere la combinación de asimetrías tanto en el rotor como en el estator. Identificando las posibles frecuencias en flujo, corriente o voltaje.

Analizar el comportamiento de las señales como flujo axial, par de salida, potencia, velocidad entre otras, para identificar en su condición más incipiente a la falla en la jaula. Es decir cuando la barra presenta fisuras.

Implementar un sistema de adquisición de datos en línea, que identifique las componentes debidas a la asimetría.

Utilizar anchos de banda mayores a 2000 Hz, para identificar problemas de tipo mecánico y eléctrico.

Complementar el monitoreo del motor con una análisis de vibraciones mecánicas, para identificar problemas eléctricos.

Desarrollar un sistema integral de monitoreo, que permita diagnosticar al sistema electromecánico del motor bajo condiciones no invasivas.

Referencias y Bibliografía

1. Bonnett, A. H. and Soukup, G.C. *Rotor failures in squirrel cage induction motors*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol IA-22. No. 6, pp. 1165-1173, November-December 1986.
2. Bonnett, A. H. and Soukup, G.C. *Analysis of rotor failures in squirrel-cage induction motors*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 24, No. 6, pp. 1124-1130, November-December 1988.
3. Burnett, R. and Watson, J. F. *The detection and location of rotor faults within three phase induction motors*, 1989.
4. Burnett, R. and Watson, J. F. *The application modern signal processing techniques of rotor faults detection and location within three phase induction motors*, 1995.
5. Cabanas, M. F. *Técnicas para el mantenimiento y diagnóstico de máquinas eléctricas rotatorias*, Marcombo 2000.
6. Cameron, J. R. and Thomson, W. T. *Vibration and current monitoring for detecting airgap eccentricity in large induction motors*, IEE Proceedings, Vol. 133, Pt. B, No. 3, pp. 155-163, May 1986.
7. Carow, J. P. and Wilson, B. K. *Vibration and motor current analysis of a.c. induction motors in power plant applications*, pp. 1257-1262.
8. Chon, R. K. and Lang, H. J. *Detection of broken rotor bars in induction motors using state and parameter estimation*, IEEE, pp. 1-6, 1989.
9. Cochran, P. L. *Polyphase induction motors: analysis design and application*, New York: Marcel Decker, 1989.
10. Deleroi W. *Broken bar in squirrel-cage rotor of and induction motor, Part I: Description by superimposed fault- currents*, Archiv. Fur Elektrotechnik 67, pp. 91-99, 1984
11. Filippetti, F., Franceschini, G., Tassoni, C. and Vas, P. *Broken bar detection in induction machines: comparison between current spectrum approach and parameter estimation approach*, IEEE, pp. 95-102, 1994.

12. Fox, L.G. *Of cages, induction, deduction, bars, vars and squirrels*, Sound and Vibration, pp. 8-20, December 1994.
13. Hamer S. *Acceptance Testing of Electrical Motors and Generators*, IEEE, Transactions on Industry Applications Vol. 24, No. 6, pp. 1138-1152 November/December 1988
14. Hargis, C., Gaydon, B. and Kamash, K. *The detection of rotor defects in induction motors*, Central Electricity Generating Board, UK, pp. 216-219, 1982.
15. Heno H. Capolino G. and Poloujadoff M. *A circuit-oriented model of induction machine for diagnosis*, International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives, pp 185-190, 1999.
16. Ho, S. L. *Condition Monitoring of Induction Motors*, pp 56.1980.
17. Hoover Scott, F. *Condition Monitoring of Rotating Equipment with Motor Current Signature Analysis*, Predictive Maintenance Inspection, Inc. pp.592-603.
18. Houdouin G and Barakat G. *A new analytical model for calculation of the flux density in the airgap of the squirrel-cage*, International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives, pp. 48-53, 1999.
19. IEEE Standard Test Procedures for Polyphase Induction Motors and Generators. IEEE Std. 112, 1996. (Revision of IEEE Std. 112-1991).
20. Jufer, P. M. and Abdelaziz, M. *Influence d'une rupture de barre ou d'un anneau sur les caractéristiques extremes d'un moteur asynchrone a cage*. Bull SEV/VSE (Switzerland), vol 69 No. 17, pp. 921-925, September 1978.
21. Kliman, G. B., Koegl, R. A., Stein, J. and Endicott, R. *Noninvasive detection of broken rotor bars in operating induction motors*, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 3, No. 4, pp. 873-879, December 1988.
22. Kohler, J. L., Sottile, J. and Trutt, F. C. *Alternatives for assessing the electrical integrity of induction motors*, IEEE, pp. 1580-1586, 1989.
23. Kryter, R. C. and Haynes, H. D. *Condition monitoring of machinery using motor current signature analysis*, Sound and Vibration, pp. 14-21, September 1989.
24. Langsdorf, A. S. *Theory of alternating current machinery* Mac Graw-Hill, 1955
25. Lazarević Z and Petrović D. *The advanced method of rotor failure detection in large induction motors*, CIGRÉ 11-203, 2000.

26. Legowski, S. F., Sadrul Ula, H. M. and Trzynadlowski, A. M. *Instantaneous power as a medium for the signature analysis of induction motors*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol 32, No. 4, pp. 904-909, July/August 1996.
27. Lipowski, J. S. and Duggal, B. R. *Monitoring faults in the rotor of a squirrel-cage induction motors through the analysis of harmonic*, International power Engineering Conference, pp.p. 484-490, Singapore March 18-19, 1993.
28. Monitor de Aplicaciones DYMAC. *Problemas de confiabilidad en motores eléctricos*, Scientific Atlanta, Vol. 1, No. 4, 1982.
29. Penman, J. and Stavrou A. *Broken rotor bars: their effect on the transient performance of induction machines*, IEE Proceedings Electric Power Application, Vol. 143, No. 6, pp. 449-457, November 1996.
30. Preusser, B. E. and Hadley, G. L. *Motor current signature analysis as a predictive maintenance tool*, Proceedings of the American Power Conference, pp. 286-291.
31. Schoen, R. R., Habetler, T. G., Kamran, F. and Bartheld, R.G. *Motor bearing damage detection using stator current monitoring*, IEEE, pp. 110-116,1994.
32. Tavner, P. J., Armin, K. K. and Hargis, C. *An electrical technique for monitoring induction motor cages*. IEE Conference on Electrical Machine and Drives, IEE Publications No. 282, pp. 43-46, 1987.
33. Tavner, P. J. and Penman, J. *Condition monitoring of electrical machines*, England: Research Studies Press Ltd., 1987.
34. Thomson, W. T., Deans, N. D., Leonard, R. A. and Milne, A. J. *Monitoring strategy for discriminating between different types of rotor defects in induction motors*, 18th UPEC Proceedings, University of Surrey, Gilford, Uk, pp. 241-246, 1983.
35. Thomson, W. T. and Rankin, D *Case histories of on-line rotor cage fault diagnosis*, Journal Condition Monitoring, n.e., pp. 799-819, 1988.
36. Thomson, W. T., Rankin, D. and Dorrell, D. G. *On-line current monitoring to diagnose airgap eccentricity-an industrial case history of a large high-voltage three phase induction motors*, IEEE Transactions on industry applications, Vol. 33, No. 1, pp. 1-3, January/February 1997.

37. Walliser, R. F. and Landy, C. F. *Determination of interbar current effects in the detection of broken rotor bars in squirrel cage induction motors*, IEEE, Transactions on Energy Conversion, Vol. 9, No. 1, pp. 152-158, March 1994.
38. Williamson, S. *Steady-state analysis of three phase-cage motors with rotor bar and end-ring faults*, proc. IEE Vol. 29 pt. B, No. 3, pp 93-100, May 1982.
39. Williamson, S. and Magied, A *Steady-state analysis of double-cage induction motors with rotor-cage faults*. IEE Proceedings, Vol. 134, Pt. B, No. 4, pp. 199-206, July 1987.
40. Wolfe, E. J. *Managing motor maintenance*, IEEE, pp. 1365-1367, 1990.

Apéndice

A.1 Rotores Utilizados en Laboratorio

En la figura A1 se muestra la desconexión en el primer rotor utilizado en el laboratorio. En los puntos donde se inicia el área del anillo de cortocircuito con la barra se realizó la fisura; de tal manera que el circuito entre el anillo y la respectiva barra permanece abierto. Inicialmente se desconectó una barra, y posteriormente se desconectaron dos barras adyacentes a la primera. Considerando lo anterior se logró analizar el comportamiento del espectro de corriente, bajo diferentes porcentajes de carga y una condición de asimetría fija.

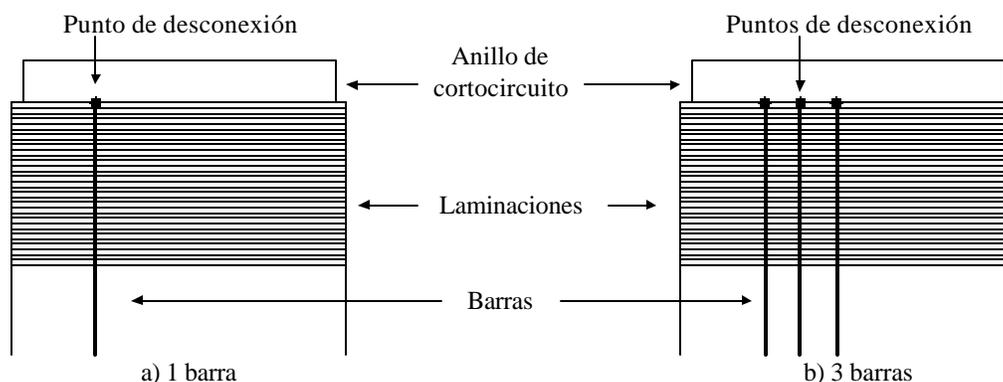


Figura A1 Desconexión entre las barras y el anillo de cortocircuito.

En las siguientes figuras se describen las secuencias de desconexión en la jaula del segundo motor. El propósito de esta etapa, fue analizar el comportamiento del espectro de corriente bajo diferentes condiciones de asimetría y carga nominal. La figura A2 es una representación del segundo rotor de prueba. En esta figura se desconectó de un extremo la barra del anillo de cortocircuito.

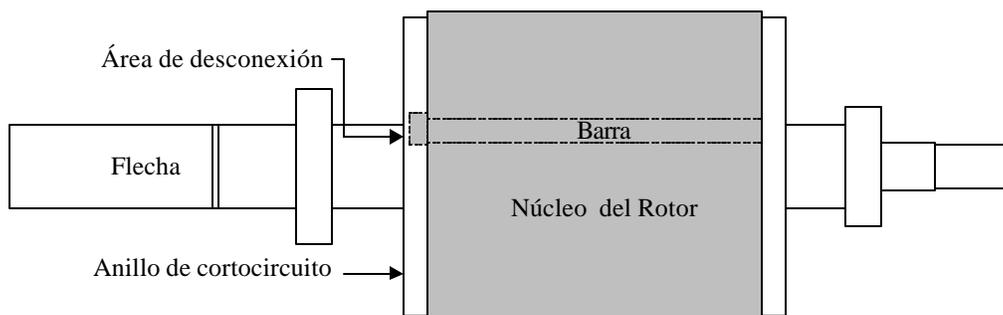


Figura A2 Una barra desconectada.

En la figura A3 se desconectó la barra anterior del otro extremo del anillo de cortocircuito.

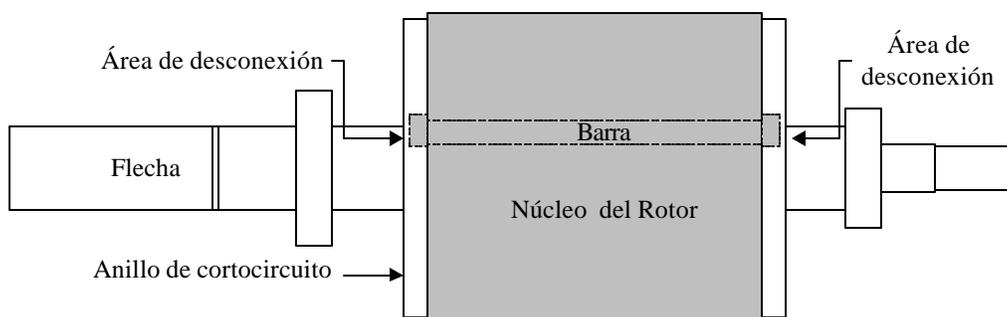


Figura A3 Una Barra desconectada de ambos anillos de cortocircuito.

En la figura A4 se desconectaron barras desplazadas a 90° mecánicos, en un solo anillo.

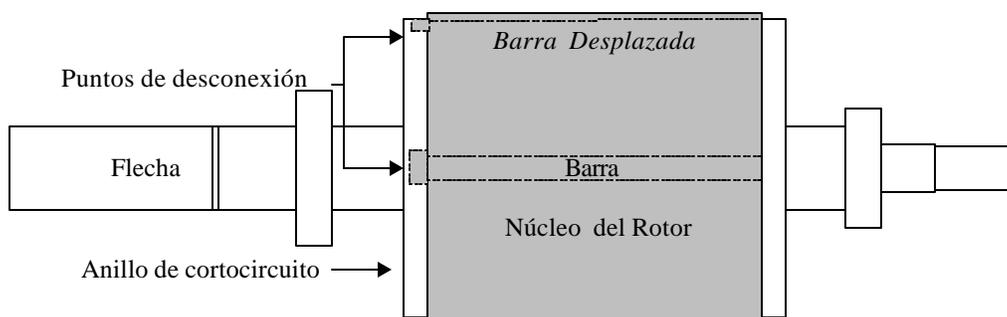


Figura A4 Barras desplazadas.

En la figura A5 se muestra el desplazamiento de una barra con respecto a la otra. Si la barra de la figura A3 se fija como la barra 1, la siguiente desconexión se realizó 90° mecánicos de la primera, es decir la barra 12. Esto se puede observar en la figura A6. El número de barras en este motor fue de 48 con cuatro polos, de tal manera que cada polo cubre 12 barras por polo.

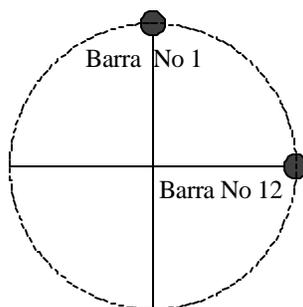


Figura A5 Referencia de las barras desplazadas.

En la figura A6 se desconectaron dos barras adyacentes. Es decir de la barra 12 de la figura A5 se desconectó una barra adyacente a esta. En el capítulo 2 se describió la secuencia de falla una vez que existe la fisura en la barra. Cuando se desconecta la barra, las barras adyacentes a ésta, mantienen un nivel de probabilidad elevado de fractura.

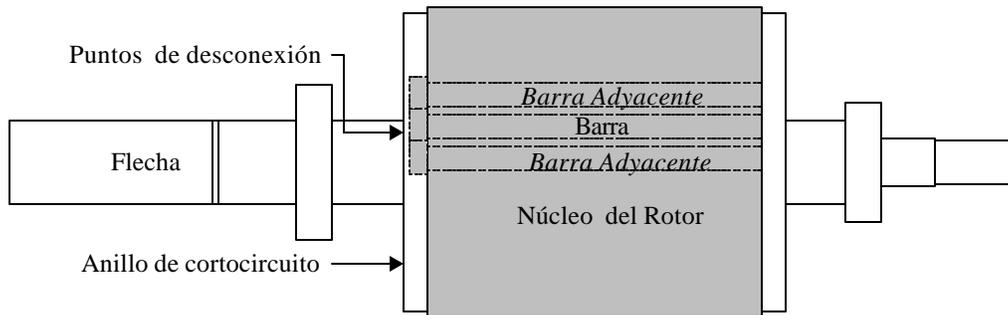


Figura A6 Barras adyacentes.

A.2 Rotores Dañados en Motores de Capacidad Mayor.

En la figura A7 se muestra la jaula de un motor de 3000 CP con barras fisuradas, entre el anillo de cortocircuito y estas. La figura A7, corresponde a las condiciones incipientes de falla que debidos a, la fuerza magnética, centrífuga, expansión y contracción térmica en anillos, se van generando en el rotor. Esto esfuerzos aparecen principalmente durante los periodos de aceleración ó ciclos de trabajo pesados.



Figuras A7 Jaula con barras agrietadas.

En la figura A8 se muestra la fractura de múltiples barras. La elevación de algunas de estas barras, puede dañar el devanado del estator. En esta condición el motor no puede seguir operando.



Figura A8 Jaula con múltiples barras fracturadas.

En la figura A9 se muestra el rotor de la figura A8 con la jaula reparada. Esta es una de las ventajas que tiene el rotor fabricado sobre el rotor fundido. Si las laminaciones del núcleo no se dañaron, algunos fabricantes remueven la barra desconectada. En la unión de la nueva barra con el anillo se emplea soldadura de plata.

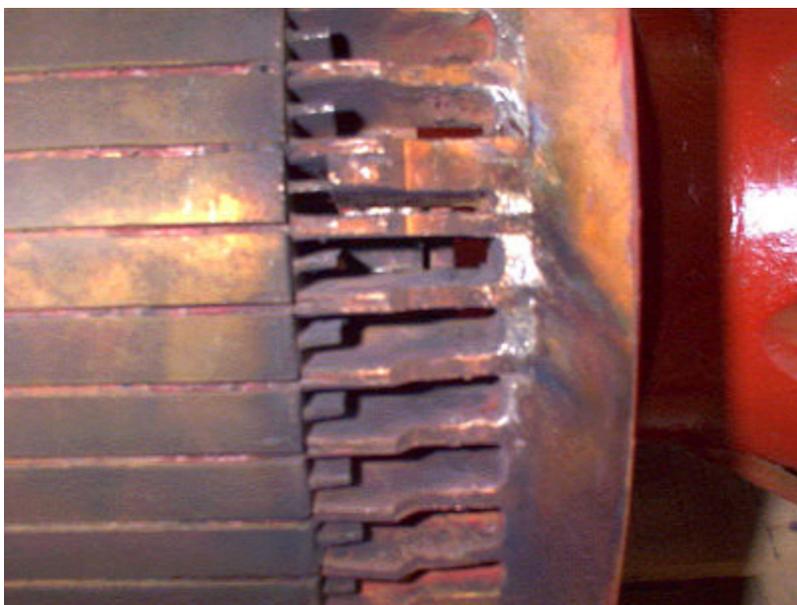


Figura A9 Jaula de ardilla reparada.