



MASTER OFICIAL EN INGENIERIA DEL MANTENIMIENTO

TRABAJO FINAL DE MASTER

DIAGNOSTICO DE BARRAS ROTAS NO ADYACENTES EN MOTORES ELECTRICOS DE INDUCCIÓN MEDIANTE ANALISIS DE CORRIENTES

Autor:

EDGAR DENNIS NEYRA ALARCÓN

Director:

JOSE ALFONSO ANTONINO DAVIU

Valencia, 01 de Octubre del 2015

AGRADECIMIENTOS

A José Alfonso Antonino Daviu, por su apoyo y cooperación como tutor del presente Trabajo Final de Máster.

A los profesores del Máster Universitario de Ingeniería del Mantenimiento por haber aportado sus conocimientos.

Al departamento de Ingeniería Eléctrica por su apoyo con las instalaciones y laboratorios para la realización de este trabajo.

DEDICATORIA

A mis padres que me apoyaron incondicionalmente durante este proyecto que se inició hace más de un año.

A José Antonino Daviu por sus enseñanzas y apoyo como tutor del presente trabajo.

RESUMEN

Los motores eléctricos de inducción con rotor de jaula de ardilla son las máquinas eléctricas rotativas más extendidas a nivel industrial, y las podremos encontrar en infinidad de aplicaciones. Estos equipos pueden presentar fallas mecánicas, eléctricas o externas, y debido a la criticidad de los procesos que suelen controlar, es necesario poder monitorizar estas posibles fallas para evitar paradas imprevistas.

Dentro de las fallas eléctricas podemos encontrar las fallas en el estator, y en el rotor. En el presente trabajo se realiza el estudio y ensayos experimentales para poder diagnosticar la existencia de barras rotas en motores eléctricos de inducción (rotor) así como analizar como el número y la posición de estas fallas influye en el diagnóstico, específicamente cuando no son consecutivas, utilizando inicialmente el análisis espectral de corrientes (MCSA) en régimen permanente y posteriormente, mediante la Transformada Discreta Wavelet (DWT) en régimen transitorio.

Contenido

1.	Introducción	2
2.	Planteamiento del problema	4
2.1.	Definición del problema	4
2.2.	Justificación	5
2.3.	Hipótesis.....	5
2.4.	Objetivos	5
3.	Conceptos básicos	6
3.1.	Mantenimiento Industrial	6
3.2.	Historia del Mantenimiento	7
3.3.	Tipos de mantenimiento	8
3.3.1.	Mantenimiento Preventivo	8
3.3.2.	Mantenimiento Correctivo.....	10
3.3.3.	Mantenimiento Predictivo	11
3.4.	Máquinas eléctricas rotativas	12
3.4.1.	Constitución general de una máquina eléctrica rotativa	13
3.4.2.	Principio de Funcionamiento	14
3.4.3.	Clases de Máquinas eléctricas rotativas	18
3.4.4.	Motor de Inducción con rotor de jaula de ardilla	21
3.5.	Mantenimiento de motores eléctricos	23
4.	Fallos en motores eléctricos.....	27
4.1.	Fallos Eléctricos	27
4.1.1.	Fallos en el Estator	27
4.1.2.	Fallos en el rotor.....	28
4.2.	Fallos Mecánicos	29
4.2.1.	Excentricidad del rotor	29
4.2.2.	Desequilibrios	31
4.2.3.	Desalineación	32
4.2.4.	Fallos en los Cojinetes	33
4.2.5.	Fallos en los engranajes	34
4.3.	Fallos Externos	36
5.	Técnicas de diagnóstico de fallos	37

5.1.	Análisis de Vibraciones.....	37
5.2.	Medida de Temperatura	39
5.3.	Análisis del estado del aislamiento	40
5.4.	Análisis de corrientes estatóricas.....	43
6.	Análisis de corrientes estatóricas.....	46
6.1.	Fenómeno de la rotura de barras en motores de inducción	46
6.2.	Método clásico: Análisis en régimen permanente.....	47
6.3.	Método moderno: Análisis en régimen transitorio	50
7.	Rotura de barras no adyacentes	52
8.	Ensayos experimentales.....	54
8.1.	Medida de la señal	54
8.1.1.	Sensores para la medida de la corriente.....	54
8.1.2.	Equipos de registro de datos.....	55
8.2.	Análisis de señal	57
8.2.1.	Transformada de Fourier.....	57
8.2.2.	Uso de ventanas Temporales	58
8.2.3.	Transformada de Wavelet Discreta (DWT)	60
8.2.4.	Transformada de Wavelet Continua (CWT)	62
8.3.	Procesamiento de la señal mediante Matlab.....	63
8.4.	Esquema de ensayo experimental	64
8.5.	Descripción del procedimiento	69
8.5.1.	Cambio de Rotor	69
8.5.2.	Realización de medidas en régimen permanente.....	71
8.5.3.	Realización de medidas en arranque (transitorio).....	71
8.5.4.	Medición de ruido	72
9.	Resultados	73
9.1.	Régimen Permanente.....	73
9.2.	Transitorio	81
9.3.	Ensayo experimental: Análisis de Ruido.....	89
10.	Conclusiones.....	90
	Futuros Trabajos.....	92
	Bibliografía	93

Anexo 1: Transformada de Fourier	94
Anexo 2: Transformada Discreta Wavelet	96
Anexo 3: Toolbox Wavelet – Matlab	99

Índice de Figuras

Figura 1: Aplicación de Mantenimiento Preventivo	9
Figura 2: Curva de la bañera	11
Figura 3: Maquinas eléctricas según su uso	13
Figura 4: Partes constructivas de una máquina eléctrica rotativa (estator).....	14
Figura 5: Partes constructivas de una máquina eléctrica rotativa (rotor)	14
Figura 6: A la izquierda: cuerpo ferromagnético, al centro: cuerpo paramagnético, a la derecha: cuerpo diamagnético.....	15
Figura 7: Líneas de flujo en imanes	15
Figura 8: Experimento de Faraday	16
Figura 9: Campo magnético variable produce cambios en corriente que circula por alambre	16
Figura 10: Generación de una fem	17
Figura 11: Líneas de flujo magnético y rotación producida	18
Figura 12: Clasificación de máquinas rotativas.....	19
Figura 13: Motor de corriente continua	20
Figura 14: Rotor de Jaula de ardilla	21
Figura 15: Tensión, intensidad y par en un motor de inducción	22
Figura 16: Curvas representativas del par y la velocidad de giro.....	23
Figura 17: Clasificación de los fallos en motores eléctricos para el presente trabajo	27
Figura 18: Excentricidad estática. A la izquierda se estator ovalado. A la derecha, mal posicionamiento del rotor.	30
Figura 19: Excentricidad dinámica. A la izquierda, ovalidad del rotor. A la derecha, eje de giro del rotor no coincide con centro de masas	31
Figura 20: Fuerza resultante de la desalineación de ejes.....	32
Figura 21: Desalineación angular.....	33
Figura 22: Desalineación radial.....	33
Figura 23: Rodamiento o cojinete de elementos rodantes (bolas).....	34
Figura 24: Sistema elemental de masa y resorte	38
Figura 25: Movimiento armónico simple	38
Figura 26: Desplazamiento ($x(t)$), Velocidad ($v(t)$) y Aceleración ($a(t)$).....	38
Figura 27. Imagen termográfica de un motor eléctrico	39
Figura 28. Esquema del ensayo de descargas parciales	42
Figura 29. Ejemplo de representación de descargas parciales en base de tiempos lineal.....	42
Figura 30: Ejemplo de espectro de corriente.....	43
Figura 31: Corriente en dominio temporal, régimen transitorio y permanente.....	44
Figura 32. Rotor con rotura de barra y daño en barras laterales	46
Figura 33. Ejemplo de espectro de frecuencia de corriente de Jaula con barra rota	49
Figura 34. Equivalencia del método tradicional (izquierda) con el método moderno del análisis de corrientes (derecha).....	51
Figura 35. Rotor de 5MW, 6kV con múltiples barras rotas	52
Figura 36. Cadena de medida.....	54

<i>Figura 37. Sonda de corriente fluke i3000s</i>	55
<i>Figura 38.Registrador de datos ScopeCorder DL850</i>	56
<i>Figura 39. Arriba: señal temporal del giro de un ventilador de pedestal. Abajo: señal resultante de la transformada de Fourier</i>	58
<i>Figura 40. Comparación de espectro de Fourier a señal con ciclos completos (negro) con respecto a señal con ciclos incompletos (azul)</i>	59
<i>Figura 41. Ejemplo anterior utilizando una ventana temporal</i>	59
<i>Figura 42. Distribución de bandas de frecuencia de la DWT</i>	61
<i>Figura 43. Análisis DWT de una señal senoidal pura</i>	61
<i>Figura 44. Análisis DWT de una señal compuesta por distintas señales senoidales (5 Hz, 15 Hz, 30 Hz and 50 Hz)</i>	62
<i>Figura 45. Análisis DWT de una concatenación de 4 señales senoidales (5 Hz, 15 Hz, 30 Hz and 50 Hz)</i>	62
<i>Figura 46. Ejemplos de aplicación de la CWT. Arriba izquierda: arranque-1 barra rota. Arriba derecha: arranque máquina sana. Abajo izquierda: 1 barra rota, transitorio completo. Abajo derecha: 1 barra rota-oscilaciones de velocidad</i>	63
<i>Figura 47. Esquema de conexión de equipos para adquisición de datos en laboratorio del DIE</i>	64
<i>Figura 48. Pupitre de suministro de energía</i>	65
<i>Figura 49. Medidor de calidad de Energía</i>	65
<i>Figura 50. Registrador de datos (ScopeCorder DL850)</i>	66
<i>Figura 51. Sonda de corriente (Flukei300s). Arriba: sensores de corriente en cada línea de alimentación. Abajo: acondicionadores de señal</i>	66
<i>Figura 52. Motor eléctrico de inducción</i>	67
<i>Figura 53. Torquímetro. Arriba: Sensor. Abajo: Display</i>	67
<i>Figura 54. Tacómetro</i>	68
<i>Figura 55. Motor de Corriente Continua en configuración generador (dínamo)</i>	68
<i>Figura 56. Carga variable</i>	69
<i>Figura 57. Retiro de guarda de protección del motor.</i>	70
<i>Figura 58. Pin de sujeción del acoplamiento del eje del motor</i>	70
<i>Figura 59. Retiro de pernos de sujeción del rotor</i>	70
<i>Figura 60. Retiro del rotor</i>	71
<i>Figura 61. Procesamiento de la señal utilizando MATLAB</i>	72
<i>Figura 62. Espectro Fourier de régimen permanente de motor de inducción en distintos casos a plena carga</i>	74
<i>Figura 63. Espectro Fourier de régimen permanente de motor de inducción en distintos casos al 65% de la carga</i>	76
<i>Figura 64. Espectro Fourier de régimen permanente de motor de inducción en distintos casos al 40% de la carga</i>	78
<i>Figura 65. Toolbox Wavelet - Matlab</i>	81
<i>Figura 66. Aplicación de la DWT a corriente de motor a plena carga con diferentes rotores</i>	83
<i>Figura 67. Aplicación de la DWT a corriente de motor al 65% de la carga con diferentes rotores.</i> 85	
<i>Figura 68. Aplicación de la DWT a corriente de motor sin carga con diferentes rotores</i>	87

Figura 69. Espectros de Fourier del análisis de Ruido del motor con distintas características a plena carga..... 89

1. Introducción

Las máquinas eléctricas rotativas y en especial las máquinas eléctricas de inducción se encuentran en una gran mayoría de procesos productivos, gracias a su simplicidad constructiva y su alta fiabilidad. Estos equipos normalmente han sido considerados como máquinas que requieren un bajo nivel de mantenimiento en comparación con otros elementos, sobre todo los motores con rotor de jaula de ardilla los cuales son bastante robustos.

No obstante, estas máquinas eléctricas pueden sufrir diferentes fallos de naturaleza mecánica o eléctrica, e incluso una combinación de ambos que de no ser monitorizadas pueden ser fallos catastróficos pudiendo llegar a la pérdida de la máquina en el peor de los casos, siendo importante tener en cuenta distintas técnicas de monitorizado, y de esta forma mantener la disponibilidad y calidad de producción de las distintas plantas.

Al ser considerados como elementos con bajo índice de averías, no se les presta la suficiente atención hasta que provocan paradas de planta, equipos o líneas de producción intempestivas. Sin embargo, la tendencia actual es diseñar máquinas de bajo coste con lo cual los materiales utilizados trabajaran más cerca de sus límites de resistencia mecánica y electromagnética, y es por este motivo que la posibilidad de deterioro progresivo ha aumentado.

Los motores de inducción con rotor de jaula de ardilla, son uno de los tipos de motor más robustos que se encuentran actualmente extendidos en gran parte de la industria, desde pequeños motores de poca potencia hasta grandes motores de gran potencia trabajando en diferentes procesos y en diferentes rubros industriales. Se llaman con rotor de jaula de ardilla por la forma constructiva del rotor, el cual cuenta con barras que son unidas a dos anillos de cortocircuito dando la apariencia de una "jaula de ardilla".

Como se menciona en párrafos anteriores, estos motores son afectos a distintos fallos, pero en este trabajo nos centraremos en uno en especial: la rotura de barras. Y aún más específicamente, cuando este fenómeno se da en barras no consecutivas de la jaula. Este fenómeno se iniciará normalmente por diversos factores, desde defectos de fabricación, hasta esfuerzos térmicos, mecánicos y electromagnéticos a los que es expuesto el rotor durante su vida de trabajo. Cuando aparece una primera grieta o una rotura de barra y no es detectada a tiempo, esta conllevará a la degeneración gradual de otras barras (adyacentes o no a la barra con el defecto), hasta un punto que el daño será mayor y se producirá una falla de magnitud mayor, es aquí donde radica la importancia de *monitorizar* este fenómeno.

El mejor método actual, que aporta mayor información sobre este fenómeno es el análisis espectral de corrientes. Este es un método relativamente nuevo, en comparación con otros métodos como el análisis espectral de vibraciones, y que cada vez va tomando mayor importancia debido a sus ventajas a la hora de usarlo frente a otros métodos. En el presente trabajo estudiaremos el fenómeno de la rotura de barras no adyacentes en motores de inducción con rotor de jaula de ardilla utilizando el análisis espectral de corrientes, teniendo en cuenta las limitaciones de este método desde su enfoque clásico hasta un enfoque moderno.

El presente trabajo está organizado en diez capítulos. En el primer capítulo se ha expuesto una breve introducción sobre el presente trabajo, en el segundo capítulo se expone el planteamiento del problema, la justificación y el objetivo del presente trabajo. En el tercer capítulo mostraremos nociones básicas sobre mantenimiento industrial, los diferentes tipos de mantenimiento industrial, el mantenimiento de máquinas eléctricas, los tipos de máquinas eléctricas, principio de funcionamiento y estructura de las máquinas asíncronas. En el cuarto capítulo mostraré los

distintos fallos que presentan las máquinas asíncronas, clasificados en tres grupos: fallos mecánicos y fallos eléctricos y fallos externos. En el quinto capítulo se expondrá las diferentes técnicas de mantenimiento predictivo que se aplican a las máquinas eléctricas asíncronas como el análisis por vibraciones, medida de temperatura y análisis de corrientes estáticas. En el capítulo seis nos introduciremos al método clásico de análisis espectral de corrientes, entendiendo más a profundidad el fenómeno de la rotura de barras y como funciona esta técnica para su diagnóstico. En el capítulo siete estudiaremos el fenómeno de la rotura de barras no adyacentes, y que alternativas tenemos para poder diagnosticarlas. En el capítulo ocho, realizaremos ensayos experimentales con motores eléctricos del laboratorio, dando los resultados en el capítulo nueve. Finalmente en el capítulo diez daremos las conclusiones del presente trabajo.

2. Planteamiento del problema

2.1. Definición del problema

Las máquinas eléctricas de inducción constituyen más del 90% del total de las máquinas eléctricas rotativas. Adicionalmente en un país industrializado, estas máquinas pueden consumir entre 40% y 50% de toda la capacidad generada por dicho país [1] quedando demostrado ser las máquinas más utilizadas a nivel industrial.

Por su presencia en la mayoría de procesos productivos, se hace obvia la necesidad de controlar las averías, para de esta forma poder adelantarse a los fallos y evitar posibles paradas de planta o de equipos.

A pesar de estar demostrado la importancia de estas máquinas y lo extendidas que se encuentran en toda la industria, se observa que no se realiza un control adecuado sobre ellas, limitándose a realizar mantenimiento correctivo y mantenimiento preventivo, que cuenta con operaciones relativamente básicas y donde no se observan síntomas internos de las máquinas. Por otro lado, el mantenimiento predictivo observado se limita al monitoreado de temperatura, el megado y análisis de vibraciones, aun quedando pendiente otras posibles fuentes de falla como son las excentricidades y la rotura de barras en el rotor.

Siendo los problemas en el rotor, como la rotura de barras entre otros, la menor causa de fallos desde el punto de vista global (la primera causa de origen mecánico como el deterioro de rodamientos u otros, y la segunda las fallas en el estator), es que tal vez no se toma en cuenta a la hora de realizar diagnósticos tanto como las anteriores fallas nombradas. Esto no quita que este fenómeno exista y que siempre podrá causar una parada intempestiva de no ser diagnosticada a tiempo.

Adicionalmente, el agrietamiento o rotura de una barra solo será el inicio para la degeneración de más barras, en donde los estudios se han centrado en especial en el caso de barras adyacentes a la barra que tiene el primer fallo. Pero con el paso del tiempo se ha evidenciado que este fenómeno no tiene por qué suceder de esta manera, por lo contrario se ha observado que las barras se pueden ir dañando de forma aleatoria, y que de esta forma incluso se puede enmascarar la falla por fenómenos desconocidos, llegando a un punto alto de daño del rotor sin poder detectarlo.

El método que se utiliza para poder diagnosticar el fenómeno de la rotura de barras es el análisis espectral de corrientes. Con este método, en régimen permanente y transitorio, se podrá encontrar patrones de falla causado por la rotura de barras que no se puede diagnosticar con ninguno de los métodos anteriormente nombrados. También se puede diagnosticar posibles excentricidades rotóricas que con el apoyo del análisis de vibraciones se puede dar diagnósticos más certeros evitando diagnósticos erróneos a la hora de tomar decisiones sobre el el mantenimiento de una máquina.

Entonces, se hace obvia la necesidad de aumentar el conocimiento sobre técnicas de diagnóstico para el problema de la rotura de barras no adyacentes.

2.2. Justificación

El análisis espectral de corrientes es una técnica relativamente nueva, y que cada vez se ve con mejores ojos a la hora de determinar posibles excentricidades rotóricas y rotura de barras de la jaula. El método tradicional para el diagnóstico de excentricidades ha sido desde hace mucho el análisis de vibraciones pero este método ha presentado algunos problemas significativos.

El análisis espectral de corrientes se basa en la medida de la corriente estatórica de una línea de alimentación y su posterior tratamiento de señal con la transformada de Fourier (enfoque clásico) o con alguna herramienta tiempo-frecuencia en régimen transitorio (enfoque moderno).

Para implementar esta técnica se requiere de menos inversión que con el análisis de vibraciones, y es un método no invasivo, no siendo necesario ni siquiera tener acceso al motor eléctrico en sí, sino a sus líneas de alimentación desde el MCC o cuadro de alimentación y con el uso de un sensor de corriente (que puede ser una pinza amperimétrica) y un osciloscopio capturar datos de corriente, tanto en régimen transitorio como en régimen permanente. Luego se analizarán estos datos con ayuda de un software. Como se puede observar, a simple vista se puede ver claramente que este método ofrece muchas ventajas que valen la pena ser estudiadas e implementadas para poder tener un mejor control de las máquinas de inducción asíncronas.

2.3. Hipótesis

Mediante el uso de equipos de adquisición de datos (sensor de corriente y osciloscopio), y procesando la señal con el software Matlab es posible poder demostrar la existencia de barras rotas no adyacentes en un motor de inducción.

2.4. Objetivos

- Estudio del análisis espectral de corriente para el diagnóstico de rotura de barras adyacentes y no adyacentes en máquinas eléctricas rotativas asíncronas con rotor de jaula de ardilla.
- Realizar pruebas en el laboratorio, demostrar y validar los resultados obtenidos observando la utilidad de este método y su facilidad de aplicación a nivel industrial.
- Realizar ensayos preliminares utilizando el análisis de ruido aplicado a motores eléctricos.

3. Conceptos básicos

3.1. Mantenimiento Industrial

Podríamos definir al mantenimiento como el conjunto de acciones y técnicas que permiten conservar o restablecer un equipo a un estado específico y asegurar un determinado servicio con un coste mínimo y máxima seguridad. El mantenimiento industrial y específicamente refiriéndome a los distintos talleres de mantenimiento (mecánico, eléctrico, etc.) juegan el papel de médicos, siendo sus pacientes las máquinas, y analizando sus diferentes síntomas que presentan, comparando con ciertos límites establecidos, se puede llegar a un diagnóstico que ayudará a tomar acciones sobre estas máquinas. El mantenimiento es la “medicina de las máquinas”.

Existen diferentes enfoques de mantenimiento que son bastante conocidos y extendidos a lo largo de la industria como son el mantenimiento preventivo, el cual se basa en anticiparse a las posibles fallas tomando acciones previas, teniendo en cuenta datos históricos, recomendaciones del fabricante y la experiencia previa. Con este método normalmente se desperdicia vida útil de los equipos o máquinas.

El mantenimiento correctivo, se basa en tomar acciones cuando el fallo se ha dado. El inconveniente de este método es, obviamente, que para tomar acciones, primero tuvo que haber fallado el equipo, perjudicando el proceso al cual pertenece esta máquina.

El mantenimiento predictivo se basa en la monitorización de síntomas que puede ser continua o discontinua (dependiendo de la criticidad del equipo monitorizado). Luego de esto se hará una evaluación de estos síntomas estableciendo ciertos límites, y finalmente con estos pasos previos obtendremos un diagnóstico, donde determinaremos la causa y la acción a tomar. Es una gran estrategia pero su principal inconveniente es que requiere de instrumentación específica y de una alta formación a los técnicos que desarrollan este tipo de mantenimiento, por lo cual resulta ser costoso implementarlo. Estas diferentes estrategias de mantenimiento se explicarán con mayor profundidad en el apartado 3.3.

En las últimas décadas el mantenimiento ha cambiado, quizás más que cualquier otra disciplina en general. Estos cambios se deben principalmente al gran aumento de equipos y edificaciones industriales que deben ser mantenidos en todo el mundo. Diseños más complejos, nuevos métodos de mantenimiento y una óptica cambiante en la organización el mantenimiento y sus responsabilidades. El mantenimiento también debe responder a expectativas cambiantes como la creciente toma de conciencia para evaluar hasta qué punto las fallas en los equipos afectan a la seguridad y al medio ambiente, relación entre mantenimiento y la calidad del producto y la presión de alcanzar una alta disponibilidad en la planta y mantener acotado el costo. [2]

Se puede realizar una comparación entre el mantenimiento industrial y la medicina pues como se nombró en apartados anteriores, el mantenimiento industrial sería “la medicina de las máquinas”. Para aclarar este punto podemos observar la siguiente tabla en donde se reflejan las analogías de estos conceptos.

MEDICINA		MANTENIMIENTO	
Conocimiento del hombre	NACIMIENTO	PUESTA EN SERVICIO	Conocimiento de la máquina
Conocimiento de enfermedades	LONGEVIDAD	DURABILIDAD	Conocimiento de fallos
Historial médico	BUENA SALUD	FIABILIDAD	Histórico de la máquina
Reconocimiento médico	CHEQUEO	MONITORIZADO	Inspección técnica
Tratamiento	ENFERMEDAD	FALLOS	Reparación
Autopsia	MUERTE	REEMPLAZO	Diagnóstico

Tabla 1. Símil entre Medicina y Mantenimiento [3]

El mantenimiento como tal es ante todo un servicio y este se debe de ajustar dependiendo de la filosofía y estructura de cada empresa, pero en general se suelen tener conflictos entre el área de producción con el área de mantenimiento lo que conlleva a cambios en la planificación, y en consecuencia posibles fallas pueden aparecer y en ambos casos se ve de mala manera al equipo de mantenimiento. El objetivo general del área de mantenimiento se puede sintetizar en los siguientes puntos:

- Reducir costos debido a paradas por averías que conlleven a pérdida de producción o del servicio incluyendo en tales costes los correspondientes al propio Mantenimiento.
- Evitar, reducir y en todo caso reparar los fallos sobre los equipos.
- Evitar detenciones inútiles o paros de máquinas.
- Alcanzar o prolongar la vida útil de los equipos.
- Evitar incidentes y aumentar la seguridad para las personas.

Entonces se puede deducir que un buen mantenimiento tiende a prolongar la vida útil y obtener un mejor rendimiento de los equipos durante más tiempo reduciendo el número de fallos.

3.2. Historia del Mantenimiento

La palabra mantenimiento se emplea para designar las técnicas y operaciones utilizadas para asegurar el correcto y continuo uso de equipos, maquinaria, instalaciones y servicios. Si nos vamos a la época del hombre primitivo, el mantenimiento sería afilar herramientas y armas, coser y remendar pieles de tiendas y vestidos, etc.

Durante la revolución industrial el mantenimiento era correctivo, es decir de urgencia. En esta época, con la aparición de máquinas sofisticadas como la máquina a vapor, donde existían calderas y mecanismos trabajando a elevadas presiones y temperaturas, se requería personal especializado.

Desde 1925, se hace patente en la industria americana la necesidad de organizar el mantenimiento con una base científica y se empieza a pensar en la conveniencia de reparar antes que ocurra el desgaste o la rotura o el fallo para evitar interrupciones en el proceso productivo, lo cual viene a ser el concepto del Mantenimiento Preventivo.

Durante la segunda guerra Mundial, debido a que la producción masiva de material bélico era determinante para el curso de la guerra, se requirió de fabricación a toda costa y por consiguiente el mantenimiento a cualquier precio.

A partir de los años sesenta, con el desarrollo de la industria electrónica, espacial y aeronáutica, aparece en el mundo anglosajón el mantenimiento Predictivo, por el cual la intervención no depende ya del tiempo de funcionamiento, sino del estado o condición efectiva de los equipos y sus elementos, y de la fiabilidad del sistema.

En los años ochenta se ve un auge en el mantenimiento tras la crisis industrial sufrida en la anterior década, mediante la tecnificación del mantenimiento utilizando potentes técnicas como el análisis de vibraciones, análisis de lubricantes, etc. y la adopción de la informática para ayudar a la gestión del mantenimiento. Se desarrolla el TPM (Total Productive Maintenance), en donde algunas tareas simples realizadas por personal de mantenimiento son transferidas a los operarios de producción como son limpieza, lubricación, ajustes, re ajuste de tornillos, etc. Al estar el operario más en contacto con la máquina implica que éste se implique con el cuidado de su máquina (motivación).

Actualmente, ya estando en lo que se podría denominar como la tercera generación, con la disponibilidad de equipos electrónicos de inspección y control altamente fiables, se puede conocer el estado real de equipos mediante la utilización de diferentes técnicas de monitorizado para distintos parámetros como vibraciones, ruidos, temperaturas, ultrasonidos, endoscopías, etc. y con el desarrollo de la industria informática se puede acumular experiencia (datos históricos) e incluso sistemas de tratamiento de datos existiendo sistemas expertos e inteligencia artificial más avanzados para poder apoyar en el diagnóstico de averías y facilitar actuaciones de mantenimiento en condiciones difíciles.

Dependiendo del tamaño de la empresa, el presupuesto con el que cuenta, la filosofía y política de la alta dirección y los objetivos que persigue actualmente se cuenta con muchos modelos de mantenimiento con el cual pueden optimizar sus recursos acorde a sus necesidades.

3.3. Tipos de mantenimiento

El mantenimiento se puede diferenciar en diferentes tipos que dependen del enfoque con el cual se realizarán las operaciones. Los tipos más conocidos son el Mantenimiento Preventivo, Correctivo y Predictivo, pero existen otros tipos que no son tomados en cuenta como por ejemplo el Mantenimiento Modificativo, o el Mantenimiento Conductivo. Para los fines de este trabajo daré un breve resumen de los tipos más comunes que se encuentran en la Industria.

3.3.1. Mantenimiento Preventivo

Está basado en realizar actividades en las diferentes máquinas y/o equipos antes de que se produzca la avería, teniendo en cuenta periodos determinados por experiencia, históricos, recomendaciones del fabricante, etc. A pesar de estas operaciones, siempre existirá un riesgo residual que se produzca la avería y que conlleve al siguiente tipo de mantenimiento, el Correctivo.



Figura 1: Aplicación de Mantenimiento Preventivo

Los objetivos principales del mantenimiento preventivo son los siguientes:

- Garantizar la seguridad de los equipos y/o instalaciones para el personal.
- Reducir la gravedad de las averías.
- Evitar paradas productivas imprevistas.
- Reducir costes que se derivan del mantenimiento, optimizando recursos.
- Mantener los equipos en condiciones de seguridad y productividad.
- Alargar la vida útil de las instalaciones y equipos.

Mediante este tipo de mantenimiento y teniendo en cuenta sus principales objetivos podremos observar las ventajas que obtendríamos en caso de aplicar esta metodología.

- Disminución de tiempos muertos o paradas de planta imprevistas.
- Disminución de pagos por tiempo extra a trabajadores de mantenimiento debido a reparaciones en paros imprevistos.
- Disminuye costos de reparaciones de defectos sencillos realizados antes de las paradas imprevistas.
- Menor necesidad de equipo de producción, reduciendo con ello la inversión de capital y aumenta la vida útil de los equipos existentes.
- Mayor seguridad para los trabajadores y mejor protección para la planta.
- Cumplimiento con los objetivos de producción comprometida.
- Conocer anticipadamente el presupuesto de costos de mantenimiento.

Las desventajas que presenta este tipo de mantenimiento son:

- Cambios innecesarios: debido a que las piezas se suelen cambiar antes del final de su vida útil, es decir, que el elemento que se cambia permitiría ser utilizado durante un tiempo más prolongado. En otros escenarios, ya con el equipo parado, se observa la necesidad de

“aprovechar” para realizar el reemplazo de piezas menores en buen estado, cuyo coste es escaso frente al total de la intervención con el fin de prolongar la vida del conjunto, lo cual lo podríamos definir como una anticipación del reemplazo o cambio prematuro.

- Problemas iniciales de operación: cuando se desmonta y se montan piezas nuevas, es más común de lo que se piensa que durante las primeras pruebas de funcionamiento, pueden aparecer diferencias en la estabilidad, seguridad o regularidad de la marcha.
- Coste de operaciones: que se refiere al coste asociado a la parada del proceso productivo, a pesar de estar programado siempre está parada se reflejará en la economía de la empresa.
- Coste en inventarios: debido a que para implementar este tipo de mantenimiento será necesario contar con un stock de piezas y por tanto de almacenes que deberán ser gestionados por personal cualificado, dando como resultado un coste adicional.
- Mano de obra: es necesario contar con mano de obra intensiva y especial para periodos cortos.
- Mantenimiento no efectuado: lo cual es muy común debido a las necesidades del área de producción o a la falta de algún repuesto importante, se dan los conocidos reprogramaciones de mantenimiento, lo cual afecta los periodos de intervención y se produce una degeneración del servicio.

3.3.2. Mantenimiento Correctivo

Consiste en una operación de mantenimiento efectuada después del fallo. Fallo será el descenso en el nivel de prestaciones de un material por debajo de la cota que estableceremos como mínimo aceptable. Este sistema de mantenimiento resulta aplicable en sistemas complejos, normalmente componentes electrónicos o en los que no es posible predecir fallos y en procesos que admiten ser interrumpidos en cualquier momento durante cualquier tiempo. También es aplicable para equipos que cuentan con cierta antigüedad.

Normalmente podremos dividir la duración de la vida de un equipo en tres periodos diferentes:

- Zona de mortalidad infantil – Juventud

En esta zona el fallo se produce inmediatamente o transcurrido poco tiempo de la puesta en funcionamiento del equipo que puede ser consecuencia de:

- Errores de diseño.
- Defectos de fabricación o montaje, entre otros.
- Periodo de vida útil – Madurez

Periodo de vida útil en el que se producen fallos de carácter aleatorio. Es el periodo de mayor duración. Estos fallos sobrevienen de manera irregular, inesperada e imperceptible. Pese a su aleatoriedad, obedecen a ciertas reglas de probabilidad, de manera que suceden con una tasa de fallo constante.

- Envejecimiento

Corresponde al agotamiento, al cabo de un cierto tiempo, de algún elemento que consume o deteriora constantemente durante el funcionamiento.

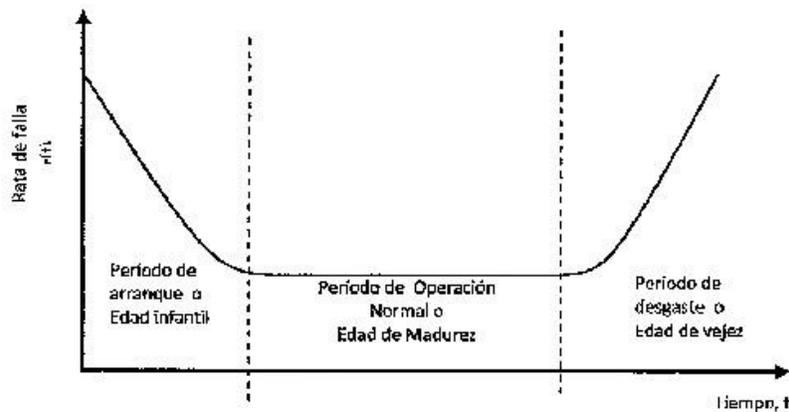


Figura 2: Curva de la bañera

Cuando se superponen estas tres zonas conocidas en la evolución de la vida útil de un equipo podremos obtener la curva de la bañera (figura 2), en donde se puede ver claramente la evolución de la tasa de fallo con respecto al tiempo. La tasa de fallos se puede definir como, para valores suficientemente pequeños de tiempo (t), como la probabilidad de fallo del componente en un tiempo infinitamente pequeño (dt) cuando en el instante t estaba operativo.

Entonces, volviendo al tema, el Mantenimiento correctivo tiene como inconvenientes, que el fallo puede sobrevenir en cualquier momento, muchas veces en el menos oportuno, debido justamente a que en esos momentos se somete al bien a una mayor exigencia. Así mismo los fallos no detectados a tiempo pueden causar daños importantes en otros elementos o piezas conexas que se encontraban en buen estado de uso y conservación.

3.3.3. Mantenimiento Predictivo

Son el conjunto de operaciones de seguimiento, monitorización y diagnóstico continuo de un sistema que permiten una intervención correcta inmediata como consecuencia de la detección de algún síntoma de fallo.

El mantenimiento predictivo tiene como base el hecho que la mayoría de los fallos no se producen intempestivamente, sino por lo contrario, lentamente y previamente en la mayoría de los casos, indicándonos algunas evidencias de un futuro fallo, que puede ser detectado a simple vista o bien mediante la monitorización, es decir, mediante la elección de ciertos parámetros importantes que representen el buen funcionamiento del equipo analizado, por ejemplo temperatura, vibraciones, presión, velocidad angular, velocidad lineal, resistencia eléctrica, ruidos, rigidez dieléctrica, viscosidad, nivel de un fluido, etc. en otras palabras, con este método se trata de seguir la evolución de futuros fallos.

En este tipo de mantenimiento podremos encontrar diferentes técnicas de monitorizado para las diferentes aplicaciones, como por ejemplo el análisis de vibraciones, el uso de pirómetros,

cámaras termográficas, análisis de aceite, uso de ultrasonido para el diagnóstico de grietas, análisis de corrientes, descargas parciales, etc.

Los objetivos del Mantenimiento Predictivo son:

- Máxima utilización de la vida útil de componentes, logrando de esta forma:
 - a. Reducción de costes
 - b. Aumento de disponibilidad
 - c. Evitar desmontajes innecesarios
- Aumento de la seguridad.
- Disminución de mantenimiento correctivo.

Las ventajas de contar con esta metodología son:

- Seguimiento de la evolución de un posible fallo hasta que sea peligroso. Elimina gran parte de la indeterminación.
- Programación de paradas reduciendo costes por baja producción, y evitando paradas innecesarias.
- Mejor programación de repuestos y mano de obra.
- Reducción de tiempo de reparación cuando se tiene más clara la posible causa de la falla.
- Aumenta la seguridad.

Las desventajas serán:

- Requerimiento de herramientas específicas que conlleva a inversiones costosas en instrumentos para la adquisición y el tratamiento de datos como sensores, tarjetas de adquisición de datos, etc.
- Mayor entrenamiento a personal. Se requiere personal con un mayor conocimiento sobre las diferentes técnicas que encontramos en este tipo de mantenimiento, lo que supone un coste adicional.
- Generación de gran cantidad de información, siendo necesario inversión en sistemas de almacenamiento de datos.
- Siempre se cuenta con ciertas limitaciones con el estado actual de estas técnicas con algunos tipos de fallos. Se encuentran siempre en desarrollo nuevas técnicas mas precisas y fiables.

3.4. Máquinas eléctricas rotativas

Las máquinas eléctricas rotativas es un conjunto de mecanismos que es capaz de generar, aprovechar o transformar la energía eléctrica. Si la máquina convierte energía mecánica en energía eléctrica se llama generador, mientras que si convierte energía eléctrica en energía mecánica se denomina motor. Esta relación se conoce como principio de conservación de la energía electromecánica. [5]

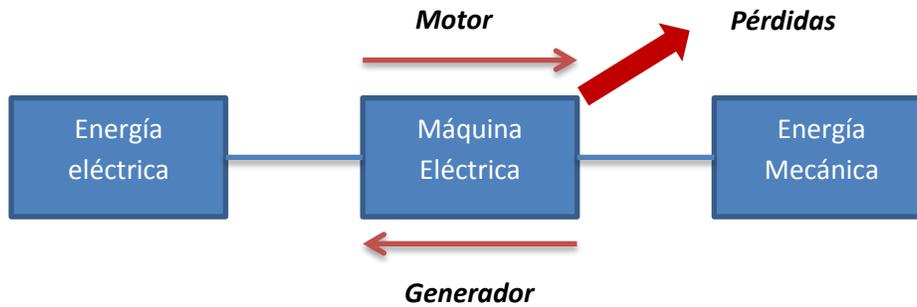


Figura 3: Maquinas eléctricas según su uso

En las máquinas rotativas hay una parte fija llamada estator y una parte móvil llamada rotor. Normalmente el rotor gira en el interior del estator. A continuación analizaremos la constitución general de este tipo de máquinas.

3.4.1. Constitución general de una máquina eléctrica rotativa

Tanto las máquinas rotativas de corriente continua como de alterna, tienen una constitución similar. Describiremos brevemente a continuación las partes más relevantes de toda máquina eléctrica rotativa, lo cual nos permitirá conocer tanto sus limitaciones como sus aplicaciones mas adecuadas.

Toda máquina eléctrica rotativa consta de los siguientes elementos básicos:

Inductor: es una de las dos partes fundamentales que forman una máquina eléctrica, y su función es la de producir y conducir el flujo magnético. Es llamado también estator pues es la parte fija de la máquina. Tiene forma de cilindro hueco donde el rotor se coloca siendo esta la parte móvil. La distancia u holgura que existe entre el estator y el rotor se denomina entrehierro, la cual impide que ambas partes rocen entre sí. En el entrehierro tienen lugar los fenómenos electromagnéticos que permiten la conversión de energía eléctrica a mecánica y viceversa. En el estator encontraremos la pieza polar, la cual sujeta a la culata de la máquina, incluye al núcleo propiamente dicho y a su expansión, el núcleo que forma parte del circuito magnético de la máquina junto con los polos, y en éste se encuentran los devanados inductores. Los cuales son el conjunto de espiras que, en un número prefijado para cada tipo de máquina, producirá el flujo magnético cuando circula corriente eléctrica. Finalmente la expansión polar es la parte mas ancha de la pieza polar y se encuentra próximo al inducido o rotor de la máquina.

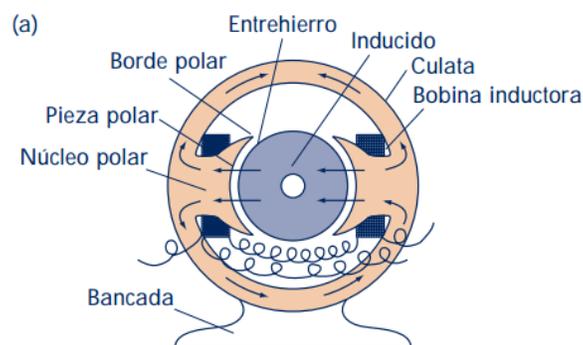


Figura 4: Partes constructivas de una máquina eléctrica rotativa (estator)

Inducido: constituye el otro elemento fundamental de la máquina, y es conocido como rotor por ser la parte que gira del sistema. En el rotor se encuentra un núcleo magnético, bien cilíndrico o de polos salientes, sobre el que se coloca el devanado, bobinado o arrollamiento del rotor. Este núcleo está formado por un cilindro de chapas magnéticas, generalmente de acero laminado. Este cilindro se fija al eje de la máquina el cual se apoya en unos cojinetes.

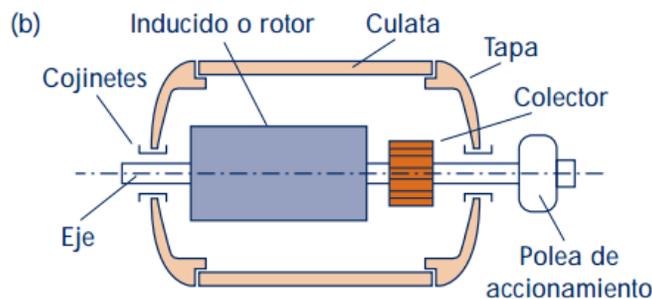


Figura 5: Partes constructivas de una máquina eléctrica rotativa (rotor)

Dependiendo del tipo de máquina eléctrica podremos encontrar partes como colector, escobillas, etc.

3.4.2. Principio de Funcionamiento

El funcionamiento de estas máquinas es relativamente sencillo y en esencia es el mismo tanto en motores de corriente continua como en los de corriente alterna. Para comprender el funcionamiento primero debemos recordar el tema referente al magnetismo y su relación con la electricidad.

Un imán o magneto es un cuerpo que posee la propiedad de atraer hacia sí elementos ferromagnéticos como lo son algunos metales y pueden ser naturales (magnetita) o artificiales (barras de hierro o acero que adquirieron estas propiedades magnéticas). En ambos tipos de imanes la corriente que origina es el conjunto de todas las corrientes de sus moléculas, que son electrones girando alrededor de sus núcleos. Si los elementos que componen estos imanes están desordenados, es decir cada uno orientado en una dirección del espacio, la resultante total del conjunto de estos imanes elementales es nula y no presentan magnetismo, mientras que si los imanes elementales presentan una orientación (pueden orientarse fácilmente debido a influencias externas o el mismo magnetismo terrestre), su resultante ya no es nula y por tal motivo se comporta como un imán.

Existe un grupo de materiales como el hierro, cobalto, níquel y otros compuestos especiales que son extremadamente paramagnéticos, es decir que sus dominios magnéticos son fácilmente orientables o fáciles de magnetizar. Como el primero que se descubrió fue el hierro, estos materiales también se conocen como ferromagnéticos. El caso opuesto se conoce como cuerpos diamagnéticos.

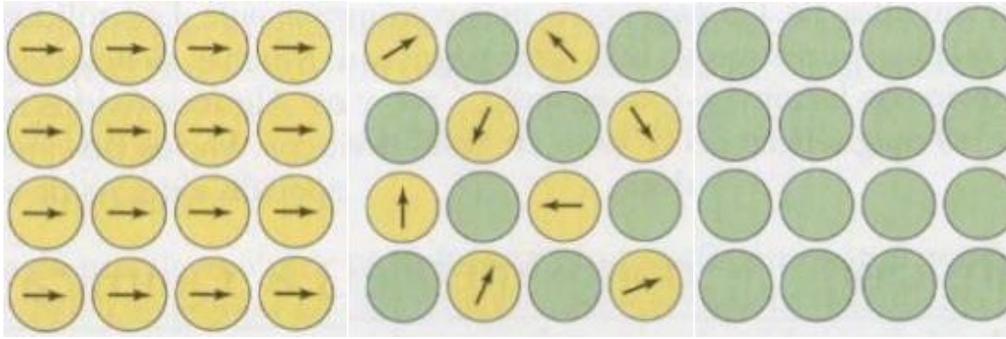


Figura 6: A la izquierda: cuerpo ferromagnético, al centro: cuerpo paramagnético, a la derecha: cuerpo diamagnético

Estos cuerpos poseen dos polos llamados polo norte y polo sur en referencia a los polos de la tierra, el cual es un gran magneto. Si partimos a la mitad un imán nuevamente se obtendrán dos polos, es decir que nunca existirá un imán que sea monopolo o que tenga un solo polo.

La región del espacio en donde el imán puede ejercer sus propiedades de atracción es conocida como el campo magnético el cual se distribuye como se puede ver en la figura 7.

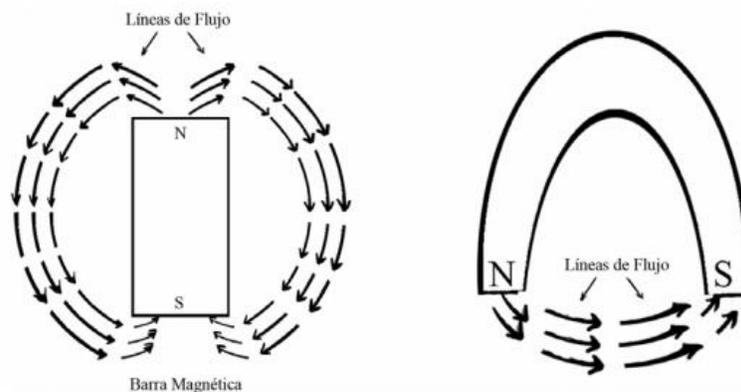


Figura 7: Líneas de flujo en imanes

Los imanes tienen reglas simples como son que los polos iguales se repelen mientras que polos diferentes se atraen, y esta interacción es fundamental para el funcionamiento de los motores eléctricos.

Existe una relación estrecha entre el magnetismo y la electricidad. En 1820 Hans Christian Oersted descubrió que cuando una brújula era acercada a un conductor eléctrico, como puede ser un alambre, ésta se movía al hacer pasar un flujo de corriente en el conductor. Luego el inglés Michael Faraday descubrió que se puede inducir una corriente eléctrica utilizando un campo magnético. Para su experimento conectó una batería a una bobina con un núcleo de hierro (bobina se refiere a un conductor enrollado y el núcleo al material dentro de este rollo) para lograr un mayor campo magnético, a comparación del aire que se genera un campo menor.

Al hacer circular corriente suficientemente grande en el embobinado con un entrehierro pretendía que fuera capaz de inducir otra corriente en el segundo embobinado que a su vez estaba

conectado a un galvanómetro (instrumento que sirve para medir la corriente eléctrica). De esta manera quería poder comprobar su teoría de que es posible producir una corriente eléctrica induciendo un campo magnético sobre un conductor.

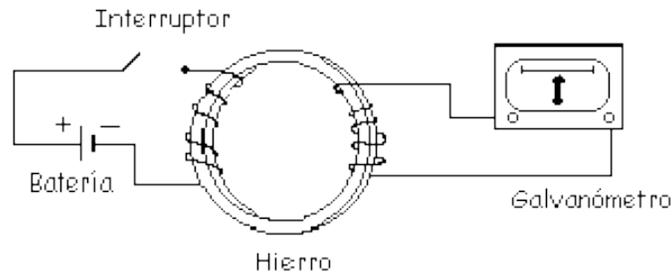


Figura 8: Experimento de Faraday

No tuvo éxito debido a que utilizó una corriente estable, pero observó que la aguja del galvanómetro se movía al conectar y al desconectar la batería, con lo cual le hizo pensar que una corriente estable en el primer embobinado no inducía una corriente en el segundo, por lo tanto concluyó que un campo magnético estable no produce corriente eléctrica en cambio un campo magnético variable si es capaz de producirla.

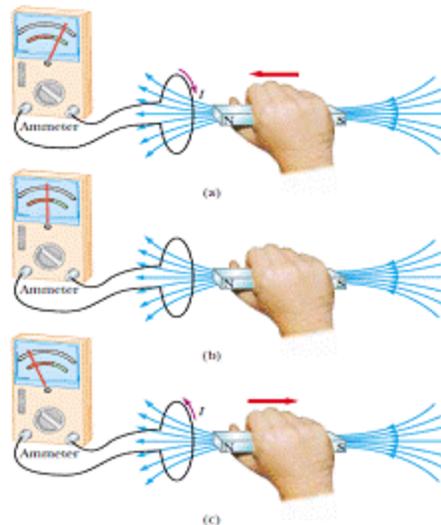


Figura 9: Campo magnético variable produce cambios en corriente que circula por alambre

Con esta primera parte explicada podemos empezar a comprender el principio de funcionamiento de los motores.

Como ya sabemos los motores eléctricos están constituidos por un estator y un rotor. Ambos cuentan con núcleos los cuales se encargan de conducir el campo magnético a través de las bobinas de los devanados. El material de estos por lo general es de hierro o acero. Los devanados tienen la función de conducir corriente eléctrica que a su vez produce el campo magnético como lo demostró Faraday con su experimento.

El movimiento de los motores es resultado de la atracción y repulsión entre los polos magnéticos del rotor y del estator. Como se mencionó antes al existir polos iguales se genera una fuerza mecánica de repulsión, mientras que polos distintos producen una fuerza mecánica de atracción. Los devanados en los motores son diseñados para que produzcan polos magnéticos en la superficie interna del estator y en la superficie externa del rotor y mediante esta interacción de atracción y repulsión de polos magnéticos producen el movimiento del rotor y por consiguiente del eje.

Para poder lograr un movimiento continuo en un mismo sentido es necesario que el número de polos tanto del rotor como del estator sean los mismos, es decir, por cada polo norte se debe tener un polo sur y por ende el número de polos siempre será un número par (pares de polos). Si en un motor se tienen dos polos en el estator, se tendrán dos polos en el rotor y se dice que este motor tiene dos polos.

Entonces, cuando un conductor se encuentra situado en el interior de un campo magnético se mueve de tal forma que corta líneas de flujo magnético se genera una fuerza electromotriz (fem). Cuando circula una corriente eléctrica a través de un conductor situado dentro de un campo magnético se produce una fuerza mecánica que tiende a mover el conductor en dirección perpendicular a la corriente y al campo magnético.

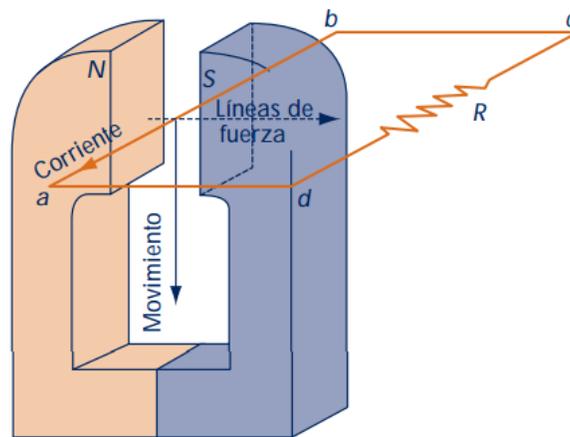


Figura 10: Generación de una fem

En los motores eléctricos, los conductores se montan paralelos al eje de rotación y sobre el inducido. Cuando gira el inducido, los conductores (C) cortan las líneas de campo magnético y de este modo se genera en ellos una fem. En la figura 11 se puede ver claramente este fenómeno, donde los puntos y las cruces representados en las secciones de los conductores (C) indican el sentido de la fem generada cuando el inducido gira en sentido contrario al de las agujas del reloj.

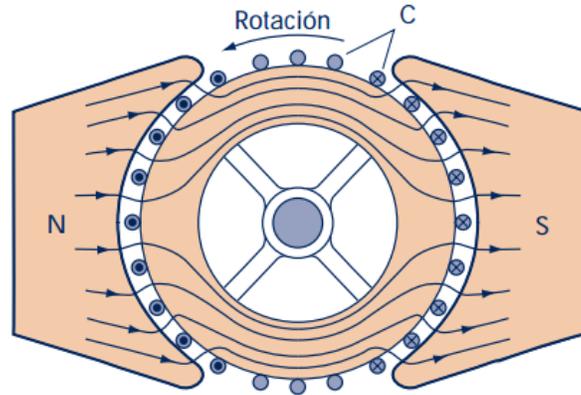


Figura 11: Líneas de flujo magnético y rotación producida

Alrededor del año 1880 entró en funcionamiento el primer sistema generador de potencia de corriente continua en la ciudad de Nueva York, y su propósito era el de suministrar potencia necesaria para encender bombillas incandescentes, conocidos comúnmente como focos, pero este sistema tenía un gran impedimento que era la transmisión de voltajes muy bajos y que requería una corriente considerablemente grande para poder transmitir cantidades suficientes de potencia para la demanda existente. A mayor cantidad de corriente mayor cantidad de pérdidas por lo cual era mejor tener la planta cerca de los usuarios por lo cual se tenía un número limitado de usuarios.

Con la creación de los transformadores se comenzó a generar corriente alterna, la cual no tenía las limitaciones anteriormente mencionadas. Con elevadores de voltaje se puede generar energía eléctrica alterna en un punto y ser transmitida grandes distancias económicamente y con pérdidas mucho menores a las que existirían si se pretendiera hacer esto con corriente continua. Las pérdidas generadas en las líneas de transmisión son proporcionales al cuadrado de la corriente, tras elevar el voltaje eventualmente se disminuye la corriente junto con las pérdidas. La diferencia fundamental con los motores de corriente continua radica en que no es necesario tener un conmutador ni escobillas que alternen la corriente.

En el siguiente apartado daremos una breve descripción de los diferentes tipos de motor que encontramos a nivel industrial.

3.4.3. Clases de Máquinas eléctricas rotativas

En la figura 12 se puede observar la clasificación básica de los motores eléctricos y específicamente el tipo de motores en los cuales se basa el presente trabajo, que son las máquinas eléctricas de inducción con rotor de jaula de ardilla.

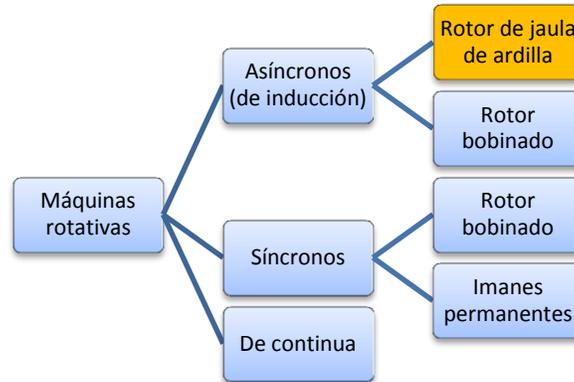


Figura 12: Clasificación de máquinas rotativas

A modo descriptivo a continuación se dará una muy breve descripción de las máquinas eléctricas más comunes.

Máquinas síncronas: son un tipo de motor de corriente alterna. Dependiendo de la frecuencia y de la tensión de alimentación estas máquinas tienen una velocidad constante que dependerá también del número de pares de polos del motor. Esta velocidad de giro se llama velocidad de sincronismo y en estas máquinas el campo magnético generado rota a la misma velocidad que la velocidad de sincronismo. La velocidad de sincronismo viene dada por la expresión:

$$n_s = \frac{60f}{p} \tag{3.1}$$

Donde f es la frecuencia de la red, y p son el número de pares de polos de la máquina. Un motor síncrono no puede arrancar por si solo porque el par motor es nulo al inicio siendo necesario utilizar alguna técnica adicional (por ejemplo otra máquina eléctrica, un variador de velocidad o un devanado amortiguador) para mover el rotor hasta la velocidad de sincronismo para luego dejarlo y este funcionará a la velocidad de sincronismo. Este tipo de máquinas son más utilizados como generadores, su mantenimiento suele ser mayor que el de motores asíncronos aunque a muy altas potencias, tienen mayor rendimiento y pueden modificar o regular el factor de potencia, a comparación de las máquinas asíncronas.

Máquinas de Corriente Continua: Se debe tener en cuenta que el primer método de generación de energía eléctrica fueron las baterías que generan una corriente directa y por ello las primeras máquinas eléctricas que existieron fueron las que funcionaban con corriente continua. Se alimentan con corriente continua aunque internamente requieren transformar dicha alimentación en corriente alterna (debido a la necesidad de tener un campo magnético variable), mediante la utilización de un conmutador. El conmutador está compuesto por varias delgas y su función principal es transformar corriente continua en corriente alterna en el caso de trabajar como motor. En caso de trabajar como generador (o dínamo), el conmutador actuará como rectificador.

Estos motores no son tan utilizados industrialmente debido a que requiere de más mantenimiento, las escobillas de contacto suelen generar chisporroteos cuando pasan de una delga a otra (en el conmutador) siendo una desventaja a la hora de trabajar en lugares con riesgo de explosión. La principal ventaja con la que contaba este tipo de motores es la facilidad de regulación de velocidad, que actualmente con la tecnología y electrónica desarrollada ya no es una gran ventaja con respecto a las máquinas asíncronas.

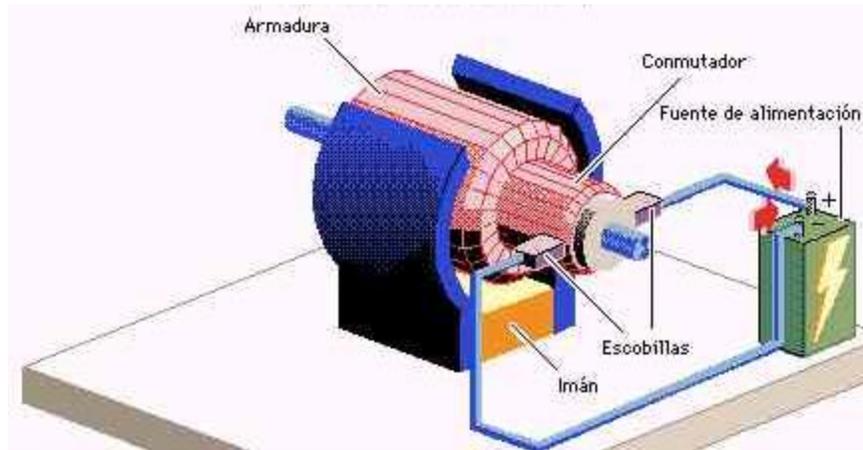


Figura 13: Motor de corriente continua

Máquinas asíncronas: estas máquinas son utilizadas en su mayoría como motores (aproximadamente un 90%) y dentro de esta categoría, la mayoría son de rotor de jaula de ardilla. No olvidemos que en esta categoría también encontramos los motores asíncronos de rotor bobinado que tiene sus propias ventajas. A diferencia de las máquinas síncronas, la velocidad de giro de estas máquinas es ligeramente inferior a la velocidad de sincronismo (de aquí el nombre de asíncronas), con esta diferencia de velocidades se puede hallar un valor importante denominado *Deslizamiento*, el cual es de útil ayuda para caracterizar fallos en el dominio de la frecuencia que se verán en capítulos posteriores.

- Rotor de jaula de ardilla: como su nombre lo indica, constructivamente el rotor estará compuesto por una estructura que cuenta con barras y anillos de cortocircuito en ambos lados, dando la impresión de ser una jaula de ardilla. Estos son los motores de uso más extendido industrialmente por ser muy robustos y tener una alta fiabilidad. Los problemas que pueden presentar son la ruptura de barras entre otros. En el siguiente apartado se explicará con mayor profundidad este tipo de motores siendo objeto de estudio del presente trabajo.
- Rotor bobinado: que a diferencia del anterior tipo que cuenta con barras y anillos de cortocircuito, este tipo cuenta con bobinados de cortocircuito. La ventaja fundamental de este tipo de motores es que las bobinas son accesibles externamente, pudiendo acceder a las corrientes que circulan por el rotor. Se pueden intercalar resistencias a estas bobinas logrando mayores pares de arranque o para atenuar picos de corriente. Su principal

ventaja es que requiere de mayor mantenimiento por tener anillos rozantes, escobillas, adicionalmente que las bobinas son más delicadas y más caras.

3.4.4. Motor de Inducción con rotor de jaula de ardilla

El motor de rotor de jaula de ardilla también llamado rotor en cortocircuito, es el más sencillo y el más utilizado actualmente. El núcleo de dicho rotor está construido de chapas de acero al silicio en el interior de las cuales se disponen unas barras que son generalmente de aluminio moldeado a presión. Estas barras del devanado van conectadas a unos anillos conductores denominados anillos de cortocircuito, de aquí el nombre de una jaula de ardilla por su similitud.

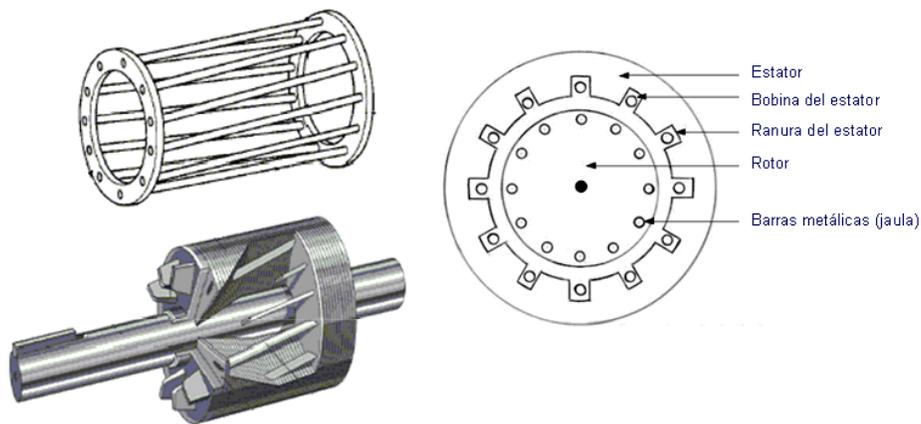


Figura 14: Rotor de Jaula de ardilla

Las ranuras del rotor se suelen hacer oblicuas respecto al eje para evitar así puntos muertos en la inducción electromagnética. Uno de los inconvenientes de este tipo de rotor es que en el arranque absorbe una corriente muy alta (de 4 a 7 veces la corriente nominal) lo cual se puede mejorar con distintos tipos de arranque.

Hasta los años 90 un inconveniente de estos motores era que su velocidad no era regulable, pero en la actualidad con el avance en la electrónica que a su vez hicieron posible el desarrollo de variadores de velocidad se puede conseguir un control perfecto de los parámetros del motor entre los que destacan el par, corriente absorbida y la velocidad de giro.

Alguna de las características de funcionamiento de estos motores de inducción son:

Velocidad de Sincronismo: que se describió en el apartado referente a las máquinas síncronas, y que se refiere a la velocidad del campo magnético giratorio y es igual a:

$$n_s = \frac{60f}{p} \text{ (rpm)}$$

(3.2)

Dónde:

f = Frecuencia

p = número de pares de polos

Representa la velocidad a la que tiene que girar un alternador del mismo número de polos para proporcionar la misma frecuencia que se aplica al motor.

Velocidad nominal: dado que un motor asíncrono no gira a la velocidad de sincronismo, la velocidad a la que gira se le denomina la velocidad nominal, la cual es ligeramente inferior a la velocidad de sincronismo.

Par motor: al cortar el campo magnético las barras del rotor se generan en ella fuerzas electromotrices que dan lugar a corrientes que circulan en los sentidos representados por puntos y cruces en la figura 15.

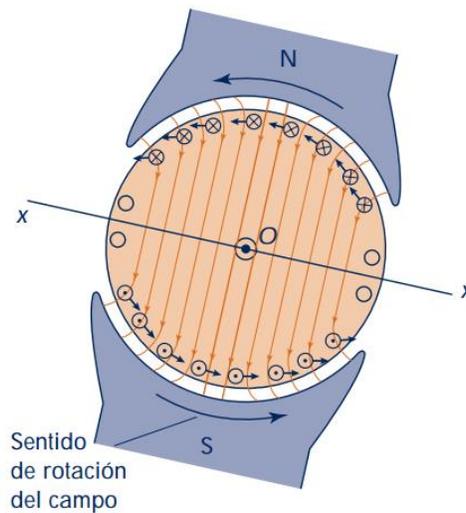
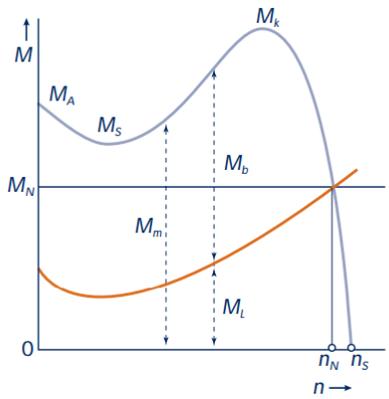


Figura 15: Tensión, intensidad y par en un motor de inducción

Se encuentran sometidas a fuerzas que tienden a moverlas en dirección perpendicular al campo magnético, siendo aproximadamente tangenciales a la circunferencia de rotación produciendo de esta forma el par motor. En un motor eléctrico el par (M) y la velocidad de giro o velocidad nominal (n) están relacionados de tal forma que cuando la velocidad decrece el par aumenta.



M_N Par normal	M_A Par de arranque (para $n=0$)
M_m Par motor	M_k Par máximo
M_l Par resistente	M_s Par mínimo
M_b Par de aceleración	M_N Velocidad nominal
	n_s Velocidad de sincronismo

Figura 16: Curvas representativas del par y la velocidad de giro

Deslizamiento: como se mencionó anteriormente, la velocidad de giro del motor debe ser menor a la velocidad del flujo magnético, puesto que si tuviera la misma velocidad las barras del rotor no cortarían las líneas de flujo, y por tanto no se generaría en ellas las líneas de flujo necesarias para generar la fem (fuerza electro motriz) resultando que la corriente en el rotor sería nula. A esta diferencia de velocidades entre la velocidad de sincronismo y la velocidad del rotor (velocidad de giro) se denomina deslizamiento.

$$S = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 \tag{3.3}$$

3.5. Mantenimiento de motores eléctricos

Al igual que cualquier máquina o equipo industrial, los motores eléctricos son afectos a los distintos tipos de mantenimiento como son el mantenimiento correctivo, preventivo y predictivo que fueron explicados en el apartado anterior. Las máquinas eléctricas son equipos que transforman energía eléctrica en otro tipo de energía que puede ser eléctrica o mecánica.

Para tener más claro el panorama podemos diferenciar rápidamente los grandes grupos en que se dividen las máquinas eléctricas que serán:

- Máquinas estáticas: En este grupo encontramos los transformadores, los cuales no transforman la energía eléctrica a otro tipo de energía sino que transforman sus características. Obviamente estos equipos no cuentan con partes móviles.
- Máquinas rotativas: En este grupo encontramos los distintos tipos de motores eléctricos como son las máquinas de corriente continua, máquinas síncronas, máquinas asíncronas, etc.

Debemos tener en cuenta, fuera de los tipos de mantenimiento antes nombrados, que la tarea de mantenimiento de estas máquinas inicia desde el proceso de selección. El grado de selección y aplicación incorrecta de un motor puede variar ampliamente, siendo necesario, que se seleccione correctamente el tamaño apropiado del motor de acuerdo a la carga de trabajo. También es necesario observar el tipo de servicio para el que está dimensionado el motor ya que cuando no son seleccionados en forma apropiada, los arranques, los paros y frenados bruscos, así como los períodos de aceleración largos, conducen a fallas en el motor. También es importante saber las condiciones de trabajo para el motor como la altura (msnm) a la cual trabajará el motor y este es un factor que normalmente no es considerado. A grandes alturas la densidad del aire es más baja y se reduce la efectividad de enfriamiento.

Otro factor importante es la instalación. Cuando se dan errores a la hora de instalar el motor, estos errores pueden conllevar a fallas del motor. Puede suceder que el tamaño de los tornillos o anclas de montaje y sujeción no sean los apropiados, o bien se tienen problemas de alineación, lo que conduce a problemas de vibraciones con posibles fallas en las rodamientos o hasta en el eje del rotor. Este montaje y cimentación resultan de gran importancia para evitar posibles problemas mecánicos y eventualmente eléctricos.

Finalmente el montaje es también importante, teniendo en cuenta que un cambio en su carga o en el acoplamiento de accionamiento se manifestará como una sobrecarga en el motor. Los rodamientos pueden comenzar a fallar o bien se presentará algún otro tipo de fricción que se manifieste como sobrecarga. Cuando se presenta una sobrecarga, el motor demanda más corriente, lo cual incrementa la temperatura del mismo y reduce la vida del aislamiento.

Luego de tener en cuenta estos factores nombrados en párrafos anteriores debemos tener en cuenta que una máquina eléctrica rotativa puede presentar fallos de tipo eléctrico, mecánico o una combinación de ambos debido a diferentes factores como envejecimiento de los devanados por calentamiento excesivo, entre otros. Estas fallas dependen del régimen de trabajo y de las condiciones a las que la máquina se encuentra expuesta. Estas características se pueden observar en el catálogo del fabricante donde nos da suficiente información para saber en que caso estamos trabajando con el motor fuera de su rango nominal.

Mantener un motor es: preservar que las condiciones de uso y de accionamiento sean aproximadamente las mismas que se fijaron para su selección. Esto implica hacer una serie de verificaciones, rellenos y cambios que podemos diferenciar entre operaciones de Mantenimiento Mecánico y Mantenimiento Eléctrico.

En el Mantenimiento Mecánico podremos encontrar operaciones típicas que pertenecen tanto a Preventivo como Predictivo que son:

- Re engrase de rodamientos: por experiencia y el conocimiento de los elementos que pueden afectar el correcto estado de la grasa son los mejores indicadores para establecer los lapsos de re engrase. El re engrase se realizará retirando la grasa usada, desmontando el rodamiento y lavándolo para luego volver a engrasarlo.

- Revisión de rodamientos: se puede utilizar un estetoscopio, mediante el ruido escuchado, se puede obtener una idea del estado de los rodamientos. Un método ya bastante extendido para este tipo de fallos en rodamientos es el análisis por vibraciones, que ya pertenece a mantenimiento predictivo.
- Fijación de motor y de los elementos de acoplamiento o transmisión: lo cual puede ser muy crítico justamente con posibles vibraciones no deseadas.

En el caso de Mantenimiento Eléctrico también podemos observar.

- Corriente consumida: Se observará la constancia de la intensidad de corriente consumida por el motor cuando funciona con carga estable a la vez (en el caso del motores trifásicos) si son prácticamente iguales las corrientes en cada una de las tres fases. Si se observan fluctuaciones de la corriente con carga constante o se aprecian diferencias entre las intensidades de corriente de las tres fases, se deben revisar la jaula del rotor o el estator respectivamente. La observación de esta variable se puede hacer mediante instrumentos ubicados en el tablero de control, o con una pinza amperimétrica.
- Tensión de red y carga del motor: Se controlan los valores de tensión en bornes del motor y de la corriente consumida a plena carga. Si existe menos tensión en la red o una carga mayor a la adecuada, se producirán corrientes mayores que la nominal llevan a calentamientos que reducen la vida útil del motor
- Arranque: Se observa el arranque para verificar su correcta acción, controlando la actuación de los elementos de maniobra. Deben revisarse los contactos de los interruptores, relés térmicos y contactores, reemplazándolos a estos últimos cuando sea necesario.
- Conexión de puesta a tierra: Se debe controlar periódicamente el apriete de todas las conexiones y la rigidez de los empalmes y terminales, para asegurar que no queden elementos flojos que originen calentamientos localizados excesivos.
- Estado del aislamiento: Este factor medirá en que estado se encuentra el aislamiento de nuestro motor. Se utilizará un meger, el cual dará un valor de tensión similar a la de la tensión nominal del motor. Si no llegase a un valor adecuado se procederá a la limpieza del bobinado, puesto que debido a la suciedad es lo que más comúnmente reduce la
- Resistencia de aislamiento; luego se puede pasar a un proceso de secado, ya que en la pérdida de aislamiento también se puede deber a presencia de humedad.
- La limpieza del motor se suele dar con el motor abierto y con el sopleteado de aire a presión, o la aplicación de un cepillo suave. La aplicación de un nuevo barnizado no debe ser necesaria cuando se midan valores relativamente altos de la resistencia de aislamiento (el aumento del recubrimiento de material aislante puede reducir la capacidad de

disipación térmica). Solamente se procede a barnizar cuando se vean claras muestras de erosión química o mecánica del aislamiento y se asegure que el barniz penetre a los lugares más necesarios, que en general no son las cabezas de las bobinas.

- Si fuera necesario realizar el secado del motor se puede cubrir el motor con una lona y distribuyendo interiormente lámparas o resistencias calefactoras. Se dejará camino a la aireación de manera de evacuar la humedad o se agregará un ventilador. Este método he visto aplicarse en motores de tracción en Volquetes mineros Komatsu 830E en donde el mantenimiento se da sin quitar el motor de la llanta de dicho equipo, al igual que la limpieza y barnizado.
- Limpieza: en ambientes de gran suciedad o con partículas en suspensión, se instalarán motores del grado de protección adecuado (IP). Aún en este caso, será necesaria una permanente vigilancia, con revisiones periódicas para evaluar y prevenir las consecuencias de la acción de partículas sobre el aislamiento. Un ejemplo de ambientes hostiles puede ser los motores eléctricos de una planta concentradora de cobre o de una cementera en donde se encuentra una gran cantidad de partículas en suspensión e incluso agua, y donde es de suma importancia haber seleccionado bien el motor, y se realizan normalmente revisiones periódicas en cada parada de planta.
- Revisión del rotor, en motores de Jaula la revisión podrá prevenir en alguna medida un futuro defecto. En general solo cabrá una inspección visual, buscando algún indicio de anomalías. En caso de jaulas de cobre, se observarán sus soldaduras y rigidez mecánica. Para el caso de mantenimiento predictivo se puede utilizar la técnica de análisis del espectro de corrientes (en régimen transitorio y permanente) para determinar posibles roturas en las barras del rotor.
- Medición de resistencia ohmica de los bobinados.

En este apartado solo he dado un panorama general y explicado de forma simple algunas de las operaciones más comunes de mantenimiento (tanto preventivo como predictivo) en motores de inducción, pero existen muchas otras operaciones en los distintos tipos de máquinas eléctricas que se encuentran a nivel industrial, pero este no es el objetivo del presente trabajo, por lo cual no entraré a profundizar dichas operaciones.

4. Fallos en motores eléctricos

Los fallos de los motores pueden ser clasificados desde diversos puntos de vista, como por ejemplo según la naturaleza física del fallo, por causas mecánicas, eléctricas, hidráulicas, etc. otro criterio podría ser según el elemento constitutivo de la máquina como el estator o el rotor, otro criterio por la gravedad del fallo, etc.

Para el caso del presente trabajo haremos una clasificación de los fallos según su naturaleza física, ya sean eléctricos o mecánicos o externos. A su vez los dos primeros grupos estarán sub clasificados por los elementos donde se produce la avería, es decir el rotor o el estator. De esta forma mostraremos los principales fallos que se producen en las máquinas eléctricas rotativas tal como se muestra en la figura 17.

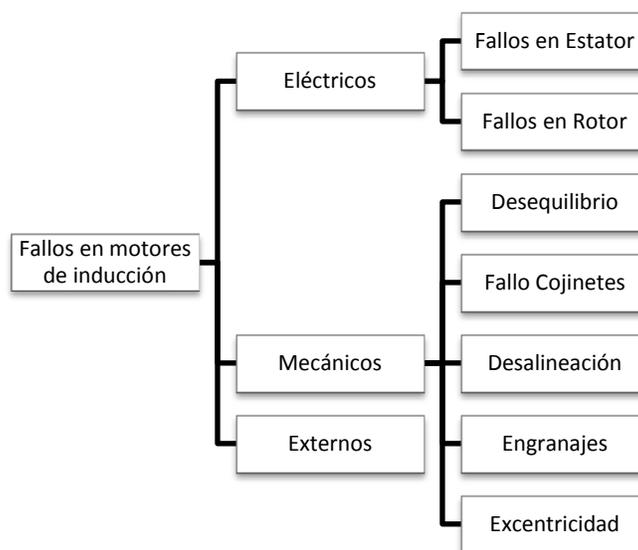


Figura 17: Clasificación de los fallos en motores eléctricos para el presente trabajo

Debemos tener en cuenta que la principal causa de fallo (entre 40% y 50%) son los rodamientos, seguido por fallos en aislamiento estático (24% al 36%), siendo los fallos en el rotor la tercera causa de fallo (5% al 10%). [6]

A continuación se dará una descripción de estos fallos, sus posibles causas y efectos que tienen sobre el conjunto.

4.1. Fallos Eléctricos

4.1.1. Fallos en el Estator

Estos fallos son generalmente producidos en el aislamiento de los motores, y los diferentes fallos posibles pueden ser:

- Cortocircuito entre espiras contiguas. El motor puede seguir funcionando.

- Cortocircuito entre bobinas de una misma fase. El motor puede seguir funcionando, normalmente estos cortocircuitos entre devanados del estator entre espiras o bobinas de la misma fase generan vibraciones al doble de la frecuencia de la red eléctrica ($2 \times 50\text{Hz} = 100\text{Hz}$ en Europa).
- Cortocircuito entre fases distintas, el motor se detendrá inmediatamente y en caso de tener protección ésta deberá actuar.
- Caída de una fase. El motor continúa funcionando pero reducirá sus prestaciones.
- Cortocircuito de fase a tierra o a masa debe ocasionar el salto de las protecciones con el consiguiente paro del motor.
- Fallo del aislamiento. A raíz de los fallos anteriores, el aislamiento se irá deteriorando por efecto de las temperaturas elevadas. Las causas de estas sobrecargas térmicas son variaciones de tensión de alimentación, arranques continuos, desequilibrio de la tensión entre fases, mala ventilación, suciedad, alta temperatura ambiente. Otra causa del deterioro del aislamiento es un posible roce entre el rotor y estator producido por fallo en un rodamiento, una deformación del rotor, una desalineación o la entrada de un cuerpo extraño entre el rotor y el estator.

Estos fallos nombrados en el estator pueden producir ciertos síntomas como:

- La temperatura se eleva anómalamente en las bobinas y/o en el núcleo del estator.
- Descargas eléctricas y desbalances en el suministro.
- Actuación de las protecciones. Parada de motor y de cadena productiva.

4.1.2. Fallos en el rotor

Como ya se mencionó en el apartado 3.4.4. el rotor de un motor de inducción de jaula de ardilla cuenta con un conjunto de barras unidas en ambos extremos por dos anillos de cortocircuito. El núcleo magnético del rotor está constituido por chapas magnéticas, aisladas y apiladas, que ocupan el espacio entre las barras. [7]:

El problema que se abordará en esta sección será el de la rotura de barra y anillo de cortocircuito o el aumento de resistencia. Como se puede intuir, la única forma que circule corriente en el rotor será a través de las barras que se encuentran perfectamente aisladas de las chapas del circuito magnético.

El problema puede iniciarse incluso durante la construcción del motor debido a la fundición defectuosa del rotor o a uniones defectuosas entre las barras y los anillos de cortocircuito, apareciendo así juntas de alta resistencia eléctrica o porosidades, produciendo en estos puntos una alta temperatura. Usualmente estas rupturas o fracturas de las barras se suelen iniciar cerca de la unión entre éstas y los anillos de cortocircuito o inclusive en el mismo anillo, debido a que en este punto se acumulan las tensiones mecánicas de la estructura.

Este problema se puede producir por [7]:

- Esfuerzos térmicos debido a sobrecargas térmicas y desbalanceadas, zonas calientes o excesivas pérdidas.
- Esfuerzos magnéticos a causa de fuerzas electromagnéticas.
- Esfuerzos dinámicos emergentes del par producido en el eje, fuerzas centrífugas y esfuerzos cíclicos.
- Esfuerzos ambientales producidos por ejemplo por la contaminación y abrasión de materiales de rotor debido a la humedad y productos químicos.
- Esfuerzos mecánicos debido a laminaciones, fatigas, fallos en los cojinetes.

Al romperse una barra se genera una asimetría en la jaula rotórica del motor de inducción lo cual produce un campo magnético rotativo de sentido contrario al giro del motor. Adicionalmente, cuando existe una barra rota y no se repara este defecto, existirá la posibilidad que se sigan rompiendo barras contiguas o incluso aleatoriamente produciendo un fallo más grave.

Debido a este fallo se pueden encontrar vibraciones anómalas a la frecuencia de la velocidad de giro (f_g) y de sus armónicos superiores junto con bandas laterales espaciadas un incremento de frecuencia igual a la frecuencia de paso de polos f_{pp}

$$f_{pp} = 2 \cdot S \cdot f_{red} = 2 \cdot p \cdot (f_s - f_g) \quad (4.1)$$

También se pueden encontrar frecuencias al doble de la frecuencia de alimentación ($2 \cdot f_{red}$) con bandas laterales espaciadas a la frecuencia de paso de polos f_{pp} .

Aumento en la amplitud de paso de barra del rotor con bandas laterales espaciadas el doble de la frecuencia de red.

$$f_{pb} = N_b \cdot f_g \quad (4.2)$$

Donde f_{pb} es la frecuencia de paso de barra del rotor y N_b es el número de barras del rotor, normalmente un múltiplo par del número de polos y usualmente está entre 30 y 40. [6]

4.2. Fallos Mecánicos

La mayoría de fallos mecánicos se producen en el rotor por ser la parte móvil, y se identifican como desequilibrios, desalineamientos, fallos en los cojinetes, fallos en los engranajes y excentricidades en sus diferentes variantes.

4.2.1. Excentricidad del rotor

Es un problema bastante habitual en este tipo de máquinas encontrar excentricidad del rotor, es decir tener un entrehierro no uniforme lo que origina asimetrías en el circuito magnético del motor. Debemos tener en cuenta que no existe ningún rotor que tenga una redondez perfecta por lo cual siempre encontraremos una excentricidad incluso en un motor nuevo.

Un entrehierro no uniforme se refiere a una máquina eléctrica rotativa que no presenta la misma distancia de cualquier punto del rotor al estator ya sea girando o parada. Generalmente esta distancia suele ser muy reducida (inferior a un milímetro) haciendo de vital importancia conseguir una perfecta alineación de los centros del rotor y del estator.

La excentricidad en el entrehierro es la segunda causa de fallos en el rotor después de la rotura de barras y agrietamientos de los anillos de cortocircuito. [7]

Este fallo lo podemos clasificar en tres casos como son, excentricidad estática, excentricidad dinámica y excentricidad mixta. A continuación se explica más detalladamente estos tipos de excentricidades.

4.2.1.1. *Excentricidad estática*

El eje de rotación coincide con el eje geométrico del rotor, pero no con el centro geométrico del estator. En este caso la posición de la mínima distancia del entrehierro es fija en el espacio. Puede ser causada por:

- Ovalidad del alojamiento estatórico.
- Incorrecto posicionamiento del rotor dentro del estator debido a:
 - o Cojinetes desgastados.
 - o Mal apoyo en cojinetes.
 - o Malformación de los alojamientos, entre otras.

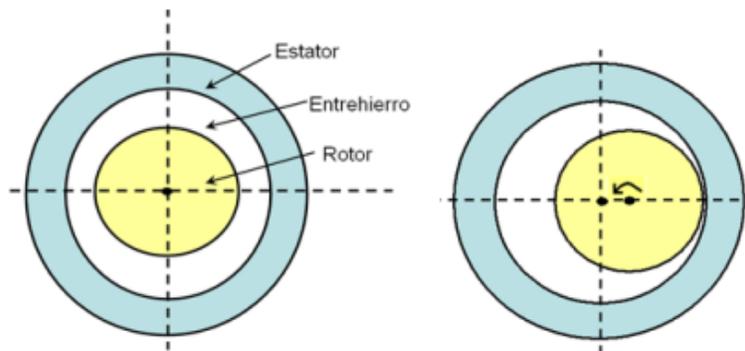


Figura 18: Excentricidad estática. A la izquierda se estator ovalado. A la derecha, mal posicionamiento del rotor.

4.2.1.2. *Excentricidad dinámica*

El eje de rotación no coincide con el eje geométrico del rotor. En este caso la posición de mínimo entrehierro gira con el rotor y puede ser causado por:

- Ovalidad del rotor.
- El centro de giro del rotor no es el centro geométrico de rotación causado por:
 - o Cojinetes desgastados.
 - o Flexión del eje.
 - o Malformaciones en el paquete magnético del rotor, entre otras.

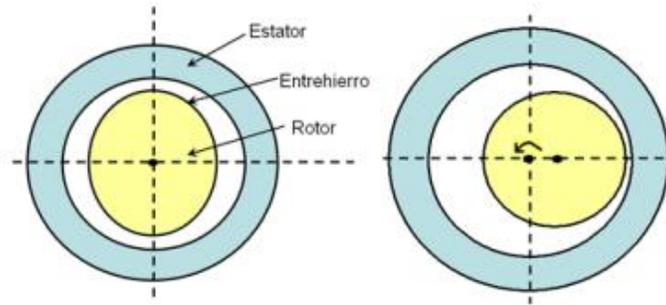


Figura 19: Excentricidad dinámica. A la izquierda, ovalidad del rotor. A la derecha, eje de giro del rotor no coincide con centro de masas

4.2.1.3. Excentricidad mixta

Cuando se encuentran ambos tipos de excentricidades, es decir, la excentricidad estática y la excentricidad dinámica. El eje de giro del rotor de la máquina eléctrica está desplazado del eje geométrico del estator de la máquina eléctrica, y por tanto el centro de masas del rotor no coincide con su eje de giro.

4.2.2. Desequilibrios

Un sistema mecánico giratorio está en equilibrio si la resultante de todas las fuerzas, tanto internas como externas y sus respectivos pares son de magnitud, dirección y sentido constante. Una vez lograda esta constancia en el módulo, dirección y sentido, mediante una perfecta y homogénea distribución de masas de la parte móvil, la máquina se puede fijar mediante anclajes que opongan una fuerza y movimiento de reacción resultante del sistema.

Los problemas de desequilibrio pueden ser consecuencia de masas soportadas cuyo centro de gravedad no coincide con el eje de giro o ser ocasionado por ejes deformados. Se pueden diferenciar entre dos tipos de desequilibrio

Estático: Debido a una distribución no homogénea de masa y detectable con el rotor parado. Si un rotor posee este desequilibrio, al apoyar sus dos extremos sobre los cojinetes, se desplazará hasta quedar la parte más pesada en la posición más baja. Para proceder a su equilibrado no será necesario hacer girar el rotor.

Dinámico: Asociado al propio movimiento. Un rotor con una distribución longitudinal de pesos incorrecta produce la intersección de los ejes de rotación y principal de inercia en un solo punto.

La frecuencia f (Hz) de las vibraciones producidas por los desequilibrios está determinada por la velocidad de rotación n (r.p.m.), de modo que [6]:

$$f = \frac{n}{60} \text{ Hz} \tag{4.3}$$

La amplitud y la fase de la señal obtenida dependen de la zona en la que nos estemos moviendo es decir, por debajo o encima de la frecuencia natural del sistema.

4.2.3. Desalineación

Como se nombró anteriormente, no existe ningún rotor con una redondez perfecta y de igual manera no es posible una alineación del eje del motor con la máquina acoplada en todos los planos. La mayoría de máquinas rotativas como bombas, compresores, molinos, ventiladores, etc. están accionadas por otra máquina motriz que suele ser un motor eléctrico. El acoplamiento se realiza a través de un sistema rígido o flexible, y para ambos casos se debe conseguir que las máquinas sean perfectamente colineales. Si el acoplamiento no es perfecto se producirá una fuerza resultante que se puede calcular según la expresión de la figura 20 [4]:

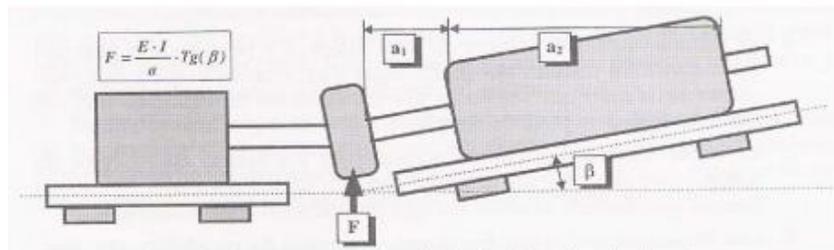


Figura 20: Fuerza resultante de la desalineación de ejes

La expresión de la fuerza, como se observa en la figura 20 es:

$$F = \frac{E \cdot I}{\alpha} \cdot Tg(\beta) \tag{4.4}$$

Donde E e I son parámetros constructivos del rotor, α es una constante geométrica que depende de a_1 y a_2 . Obviamente con la aparición de esta fuerza aparecerán vibraciones de amplitud proporcional a ella y por lo tanto, al grado de desalineación.

Este es uno de los problemas más frecuentes de las máquinas rotativas, ya que debido a la presencia de holguras, expansiones térmicas, procesos dinámicos en rotores, desgastes, fuerzas externas, provocan la deformación del rotor y su desplazamiento favoreciendo así a la desalineación.

Las desalineaciones las podemos dividir en

Desalineación angular: Donde los ejes de las máquinas se cortan formando un ángulo no previsto inicialmente. Se caracteriza por una alta vibración en dirección axial con un desfase de 180° a ambos lados del acoplamiento [6]:

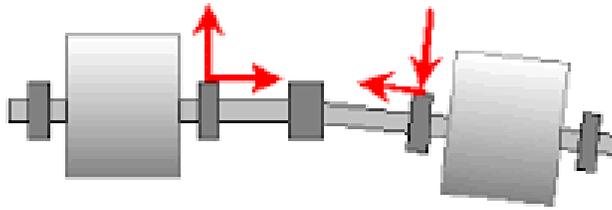


Figura 21: Desalineación angular

Desalineación radial: Cuando los ejes son paralelos estando separados una determinada distancia. En este caso tendremos vibración radial con un desfase importante (teóricamente 180°) entre los dos lados del acoplamiento. El segundo armónico $2f$ suele ser superior al primero $1f$ y también pueden aparecer armónicos superiores importantes. [6]

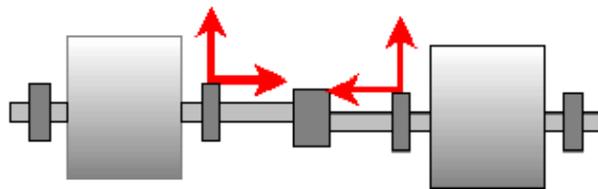


Figura 22: Desalineación radial

Desalineación mixta: Que resulta de la combinación de los dos casos anteriores y que se suele encontrar habitualmente en casos reales.

La relación del efecto de las desalineaciones del eje con la máquina eléctrica rotativa está en función de la frecuencia natural de la misma y de la estructura que la compone. Existe una relación de proporcionalidad entre la amplitud de las vibraciones y el nivel del fallo alcanzado, inclusive si fuese capaz de excitar la vibración en algún elemento constitutivo de la máquina cercano a la de resonancia, podría ser destructivo.

4.2.4. Fallos en los Cojinetes

En general, todas las máquinas rotativas cuentan con cojinetes sobre los cuales se apoyan los extremos del eje que sostiene la parte móvil. Estos elementos son sometidos a una constante fricción y movimiento de donde cualquier defecto o agente externo que produzca alguna vibración será transmitida directamente provocando que este sea el elemento con mayor tasa de fallas. Debido a este hecho es que se han desarrollado diversas técnicas de diagnóstico para conocer el estado de los cojinetes, destacando el análisis de vibraciones.

Un cojinete de elementos rodantes, análogamente con uno de rodillos, posee tolerancias extremadamente pequeñas que no permiten un movimiento significativo del eje con respecto al propio cojinete. Los esfuerzos desde el eje son transmitidos a través de los elementos rodantes hasta el anillo exterior del cojinete y de allí hacia su alojamiento. Se generan unas frecuencias específicas de vibración basadas en la geometría del cojinete, número de elementos rodantes, velocidad de giro del eje, apareciendo incluso cuando el cojinete está en perfecto estado pero de magnitud no muy significativa.

Estos elementos tienen vida finita o limitada por su resistencia a la fatiga, por tanto, el fallo se producirá siempre incluso cuando trabaje en condiciones supuestamente ideales. Por este motivo es que los fabricantes reconocen este hecho y desarrollaron expresiones para permitir conocer a los usuarios la esperanza de vida de un cojinete o rodamiento. Habitualmente estos elementos no trabajan a condiciones ideales o recomendadas por el fabricante, produciéndose fallos prematuros antes de alcanzar su tiempo de vida útil. Estos fallos se pueden deber a:

- Carga excesiva o sobrecarga que puede ser estática o debido a la desalineación o desequilibrio.
- Lubricación insuficiente o excesiva.
- Contaminación externa.
- Instalación incorrecta del cojinete.
- Diseño incorrecto o fabricación defectuosa.
- Exposición a vibraciones cuando el cojinete no se encuentra rodando.
- Paso de corriente eléctrica a través del cojinete.

En los rodamientos también se puede evaluar su estado mediante la medida de la temperatura de funcionamiento, sin embargo se ha demostrado insuficiente para determinar el grado de deterioro.

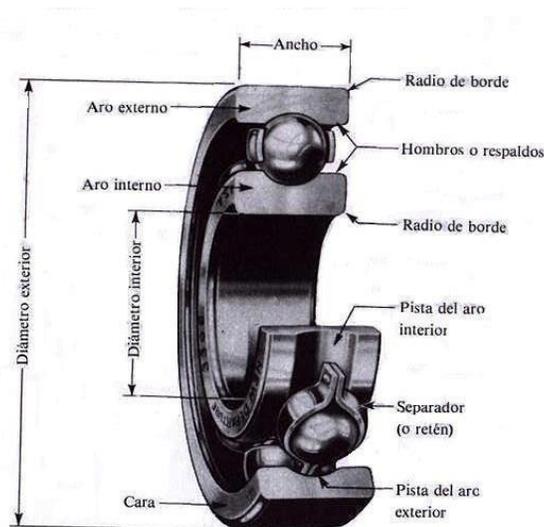


Figura 23: Rodamiento o cojinete de elementos rodantes (bolas)

4.2.5. Fallos en los engranajes

Debido a la elevada velocidad de giro de las máquinas eléctricas rotativas, y al hecho de la cantidad de procesos mecánicos que implican diferentes rangos en los pares motores y velocidades de giro, en muchos casos se necesita introducir trenes de engranajes entre la máquina a accionar y el motor eléctrico.

Estos trenes de engranajes pueden estar constituidos de diferentes formas, por ejemplo por una pareja de piñones, un piñón y un conjunto de engranajes, o varios conjuntos de estos formando una estructura mucho más compleja.

Los defectos en los engranajes son debidos normalmente a la geometría de los dientes (por problemas de fabricación, desgastes o deformaciones), o a tener una mala posición. No es fácil situar captadores próximos a los engranajes, y además estas cajas de engranajes suelen tener múltiples frecuencias de vibración, resultando un espectro con muchas frecuencias a identificar.

Teniendo en cuenta el caso más simple de un tren de engranaje, que consta de un solo piñón y una rueda dentada, se pueden encontrar algunas frecuencias propias del engranaje.

- Frecuencia de giro del engranaje, la cual es la velocidad de giro de la rueda dentada de salida al engranaje. R_g es la velocidad de la rueda dentada en r.p.m.

$$f_{rg} = \frac{R_g}{60} \tag{4.5}$$

- Frecuencia de giro del piñón, similar que el caso anterior donde R_p es la velocidad del piñón en r.p.m.

$$f_{rp} = \frac{R_p}{60} \tag{4.6}$$

- Frecuencia de engrane, que es la frecuencia a la cual engranan la rueda dentada y el piñón, donde N_g es el número de dientes de la rueda dentada y N_p es el número de dientes del piñón.

$$f_m = f_{rp} \cdot N_p = f_{rg} \cdot N_g \tag{4.7}$$

- Frecuencia de ensamblaje, que tiene que ver con las formas de montar un engranaje, ya que a la larga todos los dientes de la rueda deben de pasar por todos los dientes del piñón, para de esta forma tener el mismo desgaste. La frecuencia de vibración será como se muestra en la siguiente ecuación, donde N_a es el producto de los factores primos comunes del número de dientes del piñón y de la corona.

$$f_a = \frac{f_m}{N_a} \tag{4.8}$$

- Frecuencias de repetición de diente, que se dará cuando se comprueba que un diente de un engranaje se pone en contacto con otro cada cierto número de revoluciones. Esta componente suele ser de muy baja frecuencia y su expresión matemática será:

$$f_{tr} = \frac{N_a \cdot f_m}{N_p \cdot N_g} \quad (4.9)$$

4.3. Fallos Externos

Los fallos externos serán los que son producidos por causas externas a la máquina eléctrica rotativa, como puede ser debido a la carga, a la alimentación, al medio ambiente, etc.

Es usual encontrar en la mayoría de aplicaciones, que las máquinas eléctricas de inducción no son alimentadas directamente desde la red, por razones como evitar los picos de corriente, establecer velocidades de giro preestablecidas, acciones de frenada, etc. encontrando sistemas electrónicos encargados de dichas regulaciones.

Se ha visto muchos casos en que el problema en sí no es la máquina eléctrica sino el equipo que controla dicha máquina, por lo cual se debe tener en cuenta también a la hora de realizar un estudio de diagnóstico y detección de fallos de estos sistemas.

Otro fallo común que se ve tiene que ver con la carga. Como se comentó anteriormente, el mantenimiento de estos equipos empezará desde el momento de selección de la máquina, lo cual a veces se suele pasar por alto y se adquieren máquinas que no están diseñadas para los requerimientos del proceso. Debemos tener en cuenta que las máquinas eléctricas rotativas de inducción están diseñadas para darnos un rendimiento a ciertas condiciones de velocidad y de par, si uno de estos factores cambia, el rendimiento de nuestra máquina se verá directamente afectado. En una máquina eléctrica ideal donde los enlaces de flujo del estator son puramente senoidales, cualquier oscilación que se produzca en el par de la carga y a la velocidad de giro del rotor $m \cdot f_r$ producirá unas componentes espectrales en la corriente del estator que responden a la siguiente ecuación [7]:

$$f_{carga} = f_s \pm m \cdot f_r = f_s \cdot \left[1 \pm m \cdot \left(\frac{1-s}{p} \right) \right] \quad (4.10)$$

Donde $m=1,2,3,\dots$ siendo habitual en sistemas donde el par de la carga varía en el tiempo, estas frecuencias pueden enmascarar otros tipos de fallos, siendo difícil discernir si la frecuencia característica es debida a un posible fallo, excentricidad, o rotura de barras o una variación de carga. Existen estudios en los cuales es posible detectar rotura de barras aun cuando existen armónicos inducidos por la variación de la carga de la máquina eléctrica.

5. Técnicas de diagnóstico de fallos

Con el paso del tiempo, el desarrollo de la tecnología y las necesidades de la industria, la complejidad de las máquinas industriales se ha incrementado considerablemente. Al haber aumentado esta complejidad, trae muchos beneficios para la producción pero a su vez trae nuevos desafíos para el área de mantenimiento, el cual debe de asegurar que estas máquinas trabajen de una forma óptima y ininterrumpida. A raíz del avance de la tecnología de las máquinas es que se requiere de mejores técnicas, y entre ellas el del diagnóstico de maquinaria, dentro de lo que es el mantenimiento.

Para poder realizar diagnóstico de fallas, actualmente se debe dominar varias disciplinas, conocimiento de máquinas, instrumentación y propiedades físicas susceptibles a ser controladas. A continuación se hará una breve descripción de algunas de las técnicas más comunes y difundidas a nivel industrial.

5.1. Análisis de Vibraciones

Las máquinas con partes móviles vibran durante su funcionamiento, en ocasiones estas vibraciones se pueden apreciar directamente por ejemplo debido al sonido que estas emiten al golpear algún elemento, o simplemente poniendo la mano sobre la máquina lo podremos percibir. Las vibraciones son causadas por fuerzas no continuas que pueden variar en magnitud y/o en dirección o fuerzas que se aplican y liberan de forma rápida.

Por ejemplo, en máquinas rotativas se genera una fuerza centrífuga que combina su dirección en el espacio con el giro del rotor. Este efecto también se ve en ventiladores o bombas en donde además aparecen frecuencias asociadas al fluido y al paso de álabe.

Cuando este nivel de vibraciones es excesivo, puede traer efectos adversos con lo cual se reduce la vida útil de los componentes de la máquina y la misma máquina. Los esfuerzos variables pueden generar fallos por fatiga del material, además, la transmisión de estas vibraciones puede llegar a afectar al personal que realiza su trabajo junto a la máquina.

El nivel de vibraciones irá variando a lo largo de la vida de la máquina, debido al desgaste. Después del periodo inicial (rodaje) el nivel de vibraciones se incrementará prácticamente de forma lineal, hasta el final de su vida útil donde sufre un incremento rápido. Controlando esta intensidad de la vibración podremos diagnosticar el estado de la máquina y cuando es necesario realizar una intervención de mantenimiento.

Las vibraciones serán consecuencia de la transmisión de esfuerzos cíclicos en elementos móviles. Para entender los fundamentos de este fenómeno, podemos observar el movimiento vibratorio más sencillo que es el movimiento armónico simple (M.A.S.).

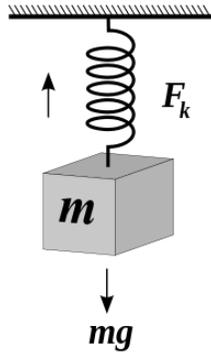


Figura 24: Sistema elemental de masa y resorte

Cuando se separa la masa de su posición de equilibrio una distancia A se ocasionará un movimiento periódico conocido como movimiento armónico simple, gobernada por la siguiente ecuación:

$$y = A \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

(5.1)

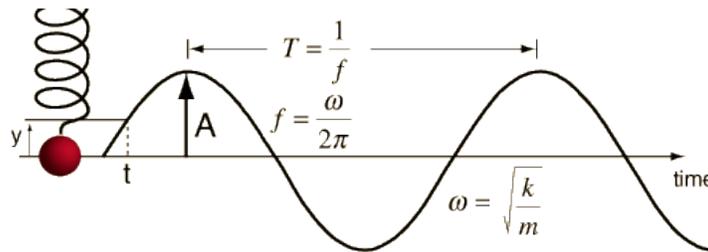


Figura 25: Movimiento armónico simple

De este movimiento podremos hallar sus diferentes variaciones como son el desplazamiento, la velocidad y la aceleración, para lo cual deberemos tener en cuenta el transductor a utilizar pues se pueden obtener medidas de cada una de estas tres magnitudes

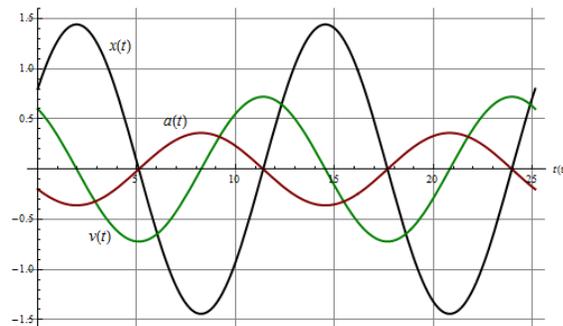


Figura 26: Desplazamiento $x(t)$, Velocidad $v(t)$ y Aceleración $a(t)$

La obtención de estos tres parten de la ecuación del desplazamiento, y derivando obtendremos la velocidad y al realizar la segunda derivada obtendremos la aceleración, que en resumen podríamos concluir que lo que cambiará será la amplitud que será multiplicado por la frecuencia y la fase entre cada una de ellas.

En general se ha demostrado que en el rango de frecuencias de 10Hz a 1kHz la medida de la velocidad proporciona mejor indicación de severidad por vibraciones. Cuando se desea analizar vibraciones en un rango amplio de frecuencias, la elección entre el desplazamiento, velocidad o aceleración solo determinará la atenuación que sufran las diferentes componentes de la vibración en función de su frecuencia. Los transductores más utilizados industrialmente son los acelerómetros, ya que midiendo la aceleración, para armónicos de pequeña amplitud y alta frecuencia, aumentará la resolución de la medida y tienen un gran rango dinámico. Estos acelerómetros básicamente están constituidos por un sistema masa-muelle muy rígido con un amortiguamiento muy pequeño. Cuando registra vibración se genera una salida en forma de tensión debido a la deformación del elemento piezoeléctrico del que suele estar constituido. El nivel de tensión será directamente relacionado con su nivel de deformación con lo cual podremos cuantificar el nivel de vibración.

Como resumen podremos concluir que para poder medir las vibraciones será necesario el uso de un transductor (que puede ser un acelerómetro), el cual deberá estar pegado a la máquina rotativa (medida invasiva), luego adaptar la señal y procesarla mediante otros componentes electrónicos como una tarjeta de adquisición de datos, software adecuado, etc.

5.2. Medida de Temperatura

La temperatura es una de las magnitudes físicas que pueden darnos una idea del buen o mal funcionamiento de una máquina eléctrica rotativa. Existen diferentes instrumentos para poder obtener esta magnitud, por ejemplo el uso de termopares en grandes motores, el uso de pirómetros o cámaras termográficas para obtener la temperatura superficial de los motores, etc.



Figura 27. Imagen termográfica de un motor eléctrico

Si la temperatura es anómalamente alta por un problema externo (medio ambiente) o un problema interno, será una posible causa de fallo, ya que los motores deben operar en rangos predeterminados por los fabricantes, y al excedernos de estos límites uno de los elementos que empezará a desgastarse rápidamente será el aislamiento, el cual conllevará a problemas más graves disminuyendo el tiempo de vida útil del motor.

Para saber si la temperatura es correcta o adecuada para un motor eléctrico, podemos observar en sus características su clase térmica, la cual nos dirá hasta que límite de temperatura debe funcionar el motor en condiciones normales. Esta medida se debe realizar en el punto más caliente del aislamiento del motor, el cual obviamente no es fácilmente accesible por lo cual se usa una corrección sobre las medidas tomadas por los instrumentos (normalmente termopares). También se pueden realizar medidas de temperatura superficial para hallar, por ejemplo, malos contactos en la caja de bornes que producen normalmente un incremento de temperatura, desequilibrios o desalineaciones, que también se podrán apreciar como un incremento de la temperatura. En el caso de la utilización de una cámara termográfica, se puede obtener imágenes de los motores en condiciones normales y de esta forma se obtendrá una firma térmica, con la cual podremos comparar con el paso del tiempo si se mantiene trabajando en estas condiciones, o si se están generando puntos calientes por alguna posible falla en el motor. Debemos tener en cuenta que esta técnica usualmente es complementaria ya que nos servirá de apoyo para encontrar la causa raíz del problema.

5.3. Análisis del estado del aislamiento

Los defectos en el aislamiento son bastante comunes en este tipo de motores, y se puede dar un fallo en el aislamiento debido a la presencia de contaminación, humedad, defectos en el aislamiento en zonas sometidas a mayores esfuerzos dieléctricos y mecánicos (cabeza de bobina) y cortocircuitos entre espiras o contacto directo entre una fase del devanado y tierra.

Para poder analizar el estado del aislamiento que existen diferentes técnicas e instrumentos. Dejando de lado los aparatos de medida más comunes como amperímetros, voltímetros, osciloscopios, etc. básicamente podemos nombrar los equipos que se utilizan para realizar el ensayo del aislamiento que son:

- Megómetro o Megger (Medidor de resistencia del orden de megaohmios).
- Generadores de Onda de choque.
- Medidores de capacidad y de tangente de delta (puentes de Schering).
- Detectores de descargas parciales.

Megómetro

Utilizando un megómetro mediremos la resistencia del aislamiento de un bobinado, aplicando una tensión continua al circuito capacitivo compuesto por el conjunto conductor-aislante-hierro. Cuando se aplica esta tensión se induce una corriente y aplicando la ley de ohm ($V=I \cdot R$) podremos obtener la Resistencia del aislamiento, que en un motor sano suele estar en el orden de los Megaohmios.

Se puede resaltar que el uso del Megómetro está muy extendido a nivel industrial, pero que un gran inconveniente sobre este método es la necesidad de realizar este ensayo en modo “*offline*”, es decir cuando el motor no funciona.

Generador de ondas de choque

Son equipos que se utilizan para evaluar el estado del aislamiento entre espiras de los devanados. Se aplican ondas de sobretensión que se presentan típicamente al realizar maniobras con interruptores. Este método, al igual que el método anterior, se realiza con el motor parado.

Puente de Schering

Un motor cuenta con un sistema conductor-aislamiento-hierro, y este sistema se puede asimilar a un circuito capacitivo, donde podemos medir su capacidad y del factor de pérdidas resulta de utilidad para el diagnóstico del estado del aislamiento.

Estos tres métodos nombrados básicamente se realizan con el motor parado, en estado *offline* siendo un inconveniente.

Descargas parciales

La descarga parcial es un fenómeno de ruptura local del aislamiento que cortocircuita una zona localizada del mismo provocando su envejecimiento. Se trata de fenómenos de ionización gaseosa transitoria originados siempre en el seno de un gas presente en el interior de un sistema aislante, en donde el gradiente de tensión aplicado excede un valor crítico. Estas descargas se producirán por tanto en cavidades, espacios o huecos en la estructura aislante. [10]

Estas descargas parciales pueden ocurrir principalmente en equipos de alta tensión donde existan:

- Esfuerzos térmicos (sobrecalentamiento).
- Ataques químicos de ambiente (humedad, polvo, etc).
- Campos eléctricos.
- Causas mecánicas (vibraciones, impactos).

Mediante este método se puede detectar:

- Cuñas con holguras.
- Defectos en los conductores.
- Contaminación en bobinado.
- Descargas entre fase, ranuras, grietas.
- Fallos en laminaciones internas.

Debemos tener en cuenta algunos datos. Todos los motores presentan descargas parciales, incluso los nuevos. Este método es relativamente nuevo y requiere de personal especializado para poder diagnosticar de manera eficiente. Monitorizando las descargas parciales de un motor periódicamente se podrá detectar problemas en su fase de inicio y permitiría al equipo de mantenimiento tomar las medidas necesarias.

A diferencia de los métodos anteriores, este método cuenta con grandes ventajas como son:

- Test no destructivo.
- Se puede realizar con el motor en funcionamiento (online) y con el motor parado (offline).
- Se determina el estado del aislamiento del estator.
- Permite monitorización en continuo.

Para realizar el ensayo de descargas parciales se necesita un condensador de acoplamiento, un detector de descargas, y una impedancia de bloqueo.

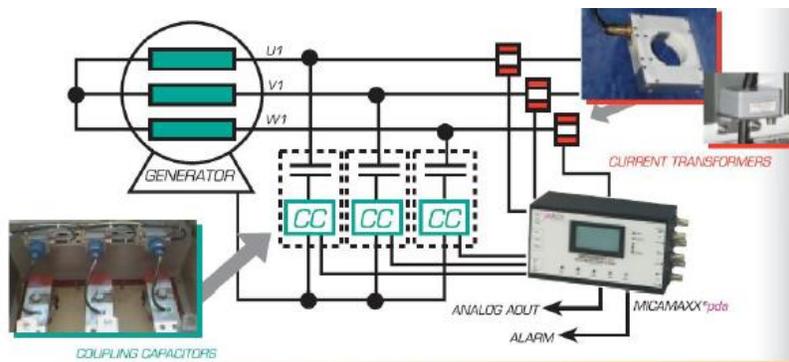


Figura 28. Esquema del ensayo de descargas parciales

El esquema de este ensayo se puede observar en la figura 28. Para interpretar los datos, como se nombró anteriormente, se requiere de personal cualificado que pueda interpretar estas gráficas.

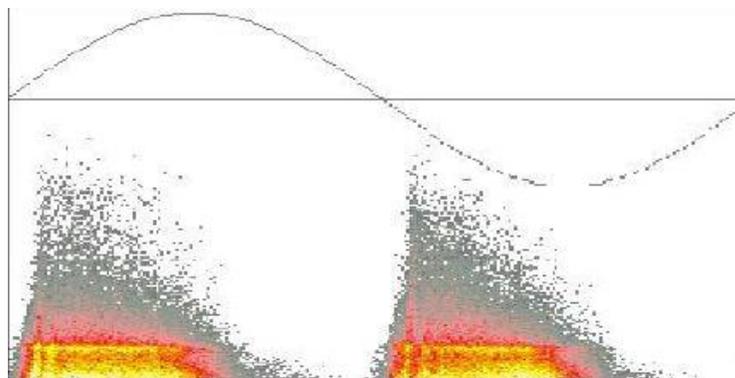


Figura 29. Ejemplo de representación de descargas parciales en base de tiempos lineal

5.4. Análisis de corrientes estáticas

A pesar de tener muchas ventajas, esta técnica no ha sido tan difundida a nivel industrial y continúa en desarrollo. Para la detección de fallas del rotor es necesario utilizar un espectro de frecuencia, el cual contiene importante información acerca del funcionamiento del motor. Al observar los armónicos obtenidos de la corriente es posible detectar anomalías o variaciones presentes en la frecuencia la cual indica un mal funcionamiento, dichos armónicos muestran diferentes espectros dependiendo de la falla del motor así como de su severidad [8]

Se basa en la adquisición (corriente) del motor eléctrico para luego, mediante el uso de herramientas de procesamiento de señales, obtener el espectro en frecuencias de donde podremos encontrar información y patrones de falla. Esta técnica la podemos observar desde dos enfoques o métodos:

- Método tradicional: El cual se basa en la toma de datos de corriente en régimen permanente, y donde se utiliza la transformada de Fourier (FFT) para obtener el espectro en frecuencias de la corriente. Luego, mediante la detección de picos, se pueden detectar averías.

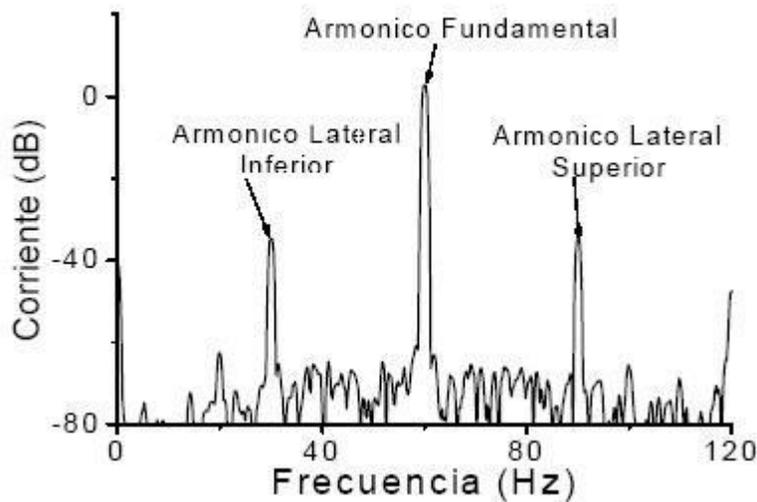


Figura 30: Ejemplo de espectro de corriente

- Método moderno: Se basa en la toma de datos de corriente en regímenes transitorios (por ejemplo arranque de motor eléctrico, que es lo usual). Para el análisis de estos datos serán necesarias herramientas que permitan la descomposición tiempo-frecuencia. Un ejemplo de estas herramientas sería el uso del espectrograma, CWT (Transformada continua Wavelets), etc.

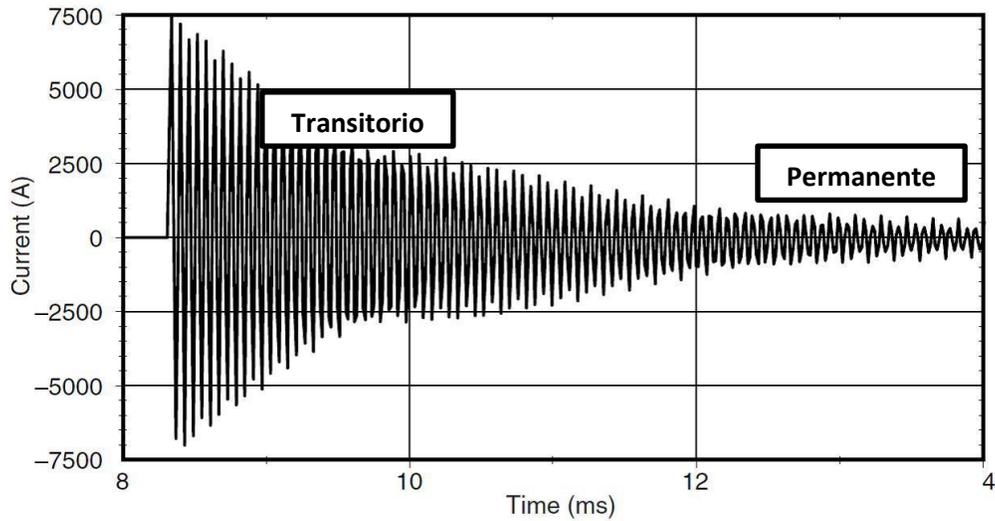


Figura 31: Corriente en dominio temporal, régimen transitorio y permanente

Podemos destacar de la técnica de análisis de corrientes lo siguiente:

- La corriente es una magnitud simple de medir (uso de pinzas amperimétricas, sensores de corrientes, etc.)
- Para la toma de datos, no será necesario interrumpir el proceso donde se encuentra el motor, incluso no será necesario realizar la medida directamente en el motor, pudiendo realizarse en el cuadro de alimentación. Esto lo convierte en una técnica no invasiva.
- Solo es necesaria la toma de datos de una fase (en caso de motores trifásicos no será necesario medir corriente en cada una de las tres fases).
- Sencillez de equipos de medida.
- Simplicidad de software de procesamiento.
- Con este método se puede detectar un rango de averías con respecto a
 - o Diagnóstico fiable de la condición del rotor
 - o Detección de excentricidades
 - o Posibilidad de informar sobre posibles fallos en rodamientos e incluso cortocircuitos estáticos.
- La desventaja sería la necesidad de personal calificado para la programación del software y la interpretación de los resultados.
- El método tradicional por si solo nos puede dar falsos diagnósticos, en donde podemos cometer los Falsos positivos y los Falsos negativos.
 - o Falsos positivos: Cuando diagnosticamos que existe una avería en un motor y no existe dicha avería.
 - o Falsos negativos: Cuando no diagnosticamos ninguna posible avería en el motor y existe dicha avería.
- Ambos casos son negativos con respecto a la imagen del equipo de mantenimiento, por lo cual es recomendable la utilización de ambos métodos para poder comprobar que existe

una posible avería, pues con el método moderno se tiene una mayor certeza de este tipo de fallos.

Se pueden medir otros parámetros como la impedancia, medida de flujos axiales o concéntricos con el eje, medida del par mecánico, del par interno o electromagnético o medida de la potencia instantánea [7].

Para el presente trabajo nos enfocaremos en la ruptura de barras no adyacentes como fallo principal, y la técnica utilizada será el análisis de corrientes, para demostrar las diferentes anomalías que pueden encontrarse en el espectro de frecuencia y como identificar esta falla y su grado de severidad. En el siguiente capítulo se iniciará con la descripción de este tema.

6. Análisis de corrientes estáticas

Se conoce que la corriente de alimentación de la máquina eléctrica es una de las magnitudes que contiene más información sobre el estado de la misma. Así por tanto, está siendo la magnitud más utilizada, para posteriormente tratarla con técnicas de señal adecuadas que nos permitan detectar y diagnosticar posibles fallos en la misma [7].

Para poder entender la base de este método será necesario primero comprender como se produce el fenómeno de la rotura de una barra y como esta falla se manifiesta en los resultados.

6.1. Fenómeno de la rotura de barras en motores de inducción

Como se explicó en el apartado 3.4.4, el rotor de un motor de inducción está constituido por barras que se unen en los anillos de cortocircuito dando lugar a la “jaula” por lo que son conocidos este tipo de motores eléctricos. En el núcleo magnético del rotor está constituido por chapas magnéticas aisladas y apiladas que ocupan el espacio entre las barras. Las jaulas pueden ser construidas con diferentes tecnologías, en donde podemos diferenciar cuando las barras están encastradas fuertemente en las ranuras del núcleo magnético y soldadas en los extremos a los anillos de cortocircuito, o la otra opción es construir la jaula en aluminio, de tal forma que tanto las barras como los anillos se funden dentro del paquete magnético rotórico. La primera forma constructiva suele ser propia de motores de tamaño considerable mientras que la segunda a motores de dimensiones más reducidas.

El fenómeno de la rotura de barras de la jaula se puede iniciar desde la etapa de construcción del motor, debido a una mala fundición en los rotores de aluminio o a uniones defectuosas en el caso de anillos de cortocircuito soldados, apareciendo juntas de alta resistencia eléctrica o porosidades que conlleva al aumento de la temperatura dentro de la jaula. Estas fracturas se suelen iniciar en las uniones con los anillos de cortocircuito o en este mismo, debido al aumento de temperatura y al hecho de que en esta zona se sufre mayores tensiones mecánicas (especialmente en regímenes transitorios). Cuando un motor arranca o frena sufriendo fluctuaciones bruscas en su velocidad de giro, la estructura es la que recibe estos esfuerzos mecánicos, que a la larga pueden causar la rotura de una barras.



Figura 32. Rotor con rotura de barra y daño en barras laterales

Una vez que una barra o anillo se ha agrietado, el proceso es degenerativo, es decir que en estas grietas se producirán arcos eléctricos entre las dos partes separadas, lo cual puede dañar el circuito magnético. Luego al estar ya rota una barra, instintivamente podemos predecir que en las barras adyacentes circulará una mayor corriente, lo cual significa que soportarán también temperaturas más elevadas de lo normal y también soportarán mayores tensiones mecánicas, lo cual puede iniciar el proceso de aparición de nuevas grietas en otros puntos de la jaula.

Teóricamente se entiende que la corriente solo circula en las barras de la jaula, pero, especialmente en grandes motores, se debe tener en cuenta la existencia de corrientes interlaminares [4] que son las corrientes que circulan por las chapas magnéticas, al no estar perfectamente aisladas las barras del núcleo magnético. En motores pequeños con jaula de aluminio estas corrientes son despreciables, pero en grandes motores se deben tener en cuenta a la hora de realizar el análisis. Para nuestro caso, trabajaremos con motores pequeños con jaula de aluminio.

6.2. Método clásico: Análisis en régimen permanente

En el apartado 5.3 se dio una breve descripción sobre el método clásico de análisis permanente, que se basa en la toma de datos (corriente) de una línea de alimentación de un motor de inducción en régimen permanente para su posterior procesamiento. En este apartado realizaremos un análisis más profundo de este método.

De [7] podemos extraer la justificación matemática de la influencia de una anomalía en un motor eléctrico. Definimos la corriente de alimentación de una línea (en este caso la línea a) como:

$$i_a(t) = I \cdot \cos(\omega \cdot t) \tag{6.1}$$

Ahora, cuando una máquina rotativa posee alguna anomalía está demostrado que aparecen otros elementos.

$$I_a(t) = i_a(t) \cdot (1 + m \cdot \cos(\omega_o \cdot t)) \tag{6.2}$$

Donde m es el índice de modulación, y ω_o es la frecuencia característica del fallo. Reemplazando 6.1 en 6.2 se obtiene:

$$I_a(t) = I \cdot \cos(\omega \cdot t) + m \cdot I \cdot \cos(\omega \cdot t) \cdot \cos(\omega_o \cdot t) \tag{6.3}$$

Operando la ecuación 6.3 obtenemos:

$$I_a(t) = I \cdot \cos(\omega \cdot t) + m \cdot I \cdot [\cos((\omega + \omega_o) \cdot t) + \cos((\omega - \omega_o) \cdot t)] \tag{6.4}$$

Donde se puede concluir que cuando un motor presente una anomalía en su funcionamiento, cuando se analice su espectro se obtendrán tres frecuencias que son: la frecuencia de giro del motor, la frecuencia de giro del motor más la frecuencia característica del fallo y la frecuencia de giro del motor menos la frecuencia característica del fallo.[7]

Ahora, cuando se rompe una barra se puede abordar este problema de distintas posibilidades. Se podría decir, para simplificar este apartado, que cuando se rompe una barra el circuito queda afectado debido a la corriente que circula por dicha barra. Un método de análisis nos lleva a una jaula relativamente simple con 5 barras, luego a sustituir en dicha barra con una fuente de corriente de fallo superpuesta de igual magnitud pero en sentido contrario, mientras que el otro circuito será el de la jaula en buen estado. Al superponer ambos circuitos (jaula en mal estado con jaula en buen estado), la corriente en la barra rota será nula. Tras una serie de superposiciones y descomposiciones de estas corrientes y utilizando un análisis mediante elementos finitos, se ha demostrado la generación de una distorsión del campo magnético en la zona de la rotura, e incluso que este campo va a presentar dos polos situados a ambos lados de la avería. Este campo causado por la rotura de la barra presenta las siguientes características:

- Es un campo alternativo de eje fijo.
- Es de naturaleza escalonada debido al número limitado de barras rotóricas.
- Presenta un par de polos localizados a ambos lados de la avería.

Entonces, este campo se podrá descomponer mediante un desarrollo en serie de Fourier en una suma de campos senoidales de eje fijo que pulsarán en el tiempo a la frecuencia de deslizamiento. Finalmente, de este método se puede concluir que el efecto producido por la jaula de ardilla con una barra rota, es la aparición de dos series infinitas de armónicos espaciales: la primera gira con sentido de giro directo y la segunda con sentido inverso. [4]

Teniendo en cuenta que no existe ningún motor eléctrico de inducción perfecto, siempre se encontrarán asimetrías rotóricas, y cuando obtenemos el espectro en frecuencia de las corrientes de alimentación de un motor sano igual podremos ver armónicos a distintas frecuencias aparte de la fundamental. Entonces, los armónicos generados por la rotura de una barra, se superpondrán a las ya existentes. Si observamos la ecuación 6.4, podríamos re escribirla para el caso de la rotura de barras como:

$$i_a(t) = I \cdot \cos(\omega \cdot t) + I_{li} \cdot \cos((1 + 2S)\omega t) + I_{ls} \cdot \cos((1 - 2S)\omega t) \quad (6.5)$$

Dónde:

I_{li} : Amplitud del armónico inferior

I_{ls} : Amplitud del armónico superior

Estos armónicos, se ha demostrado que aparecerán a ambos lados de la frecuencia fundamental de red a las siguientes frecuencias:

$$f_{li} = f \cdot (1 - 2 \cdot S) \tag{6.6}$$

$$f_{ls} = f \cdot (1 + 2 \cdot S) \tag{6.7}$$

Donde f_{li} es la frecuencia lateral inferior, f_{ls} es la frecuencia lateral superior, f es la frecuencia de red y S es el deslizamiento.

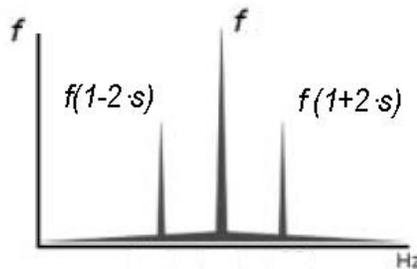


Figura 33. Ejemplo de espectro de frecuencia de corriente de Jaula con barra rota

En el apartado 5.3 se comenta algunas de las ventajas y desventajas de este método, en donde cabe destacar la existencia de posibles confusiones a la hora de interpretar estos espectros dando como resultado falsos positivos y falsos negativos. Esto se debe a que, debido a la influencia de otros factores, se puede obtener espectros que muestren esta anomalía, sin que ella exista, o que la enmascaren y parezca estar en buenas condiciones, y presente rotura de barras.

Para el caso de los falsos positivos, podemos tomar como ejemplos:

- Presencia de oscilaciones en la carga.
- Existencia de conductos axiales de refrigeración en el rotor.
- Proceso de fabricación del rotor. [10]

Estos tres ejemplos, pueden darnos como resultado en la lectura de corrientes estáticas, un espectro con armónicos en las frecuencias estudiadas en este apartado, dándonos la impresión de la existencia de barras rotas cuando éstas no existen. Como consecuencias tendremos una posible parada y desmontaje innecesario, un daño a la imagen del área de mantenimiento, entre otros.

Para el caso de falsos negativos, tenemos:

- Máquinas operando en vacío o con cargas reducidas.
- Rotura de jaula externa en rotores de doble jaula.
- Rotura de barras no adyacentes.

Estos tres ejemplos nos pueden enmascarar el problema, encontrando un espectro similar al de una máquina sana cuando en realidad, la jaula presenta al menos una barra rota. Esto dará como consecuencias una parada intempestiva de la máquina, afecta de igual manera a la imagen del área de mantenimiento, entre otras consecuencias que pertenecen a mantenimiento correctivo. Cabe destacar de este último punto la importancia de la rotura de barras no adyacentes y su importancia, debido a que se ha demostrado que, cuando la rotura de barras es no consecutiva, puede llegar a un punto en que las componentes de una barra rota se anulen con los de otra barra rota, enmascarando la existencia de este defecto.

6.3. Método moderno: Análisis en régimen transitorio

El método moderno o enfoque clásico del análisis de corriente, como se explica brevemente en el apartado 5.3, se basa en la medición de la señal en régimen transitorio (por ejemplo y usualmente en el arranque), para su posterior procesamiento con herramientas tiempo-frecuencia.

Para poder observar este fenómeno, podemos analizar como varía la señal en el régimen transitorio con sus correspondientes armónicos.

De la ecuación 3.3, 6.1 y 6.2 obtenemos los diferentes valores del deslizamiento y de la evolución de los armónicos laterales de la señal.

Etapas 1 (arranque): $n = 0$

$$S=1$$

$$|f_{li}| = f$$

$$|f_{ls}| = 3f$$

Etapas 2 (mitad de la velocidad de sincronismo): $n = n_s/2$

$$S=0.5$$

$$|f_{li}| = 0$$

$$|f_{ls}| = 2f$$

Etapas 3 (velocidad nominal cercana a velocidad de sincronismo – régimen permanente): $n \approx n_s$

$$S=0$$

$$|f_{li}| = f$$

$$|f_{ls}| = f$$

Luego de analizar estas tres etapas por las que pasa un motor en el arranque hasta llegar a su velocidad nominal o régimen permanente, podemos observar que las componentes de los armónicos laterales tienen un comportamiento característico. Mientras que el armónico lateral

inferior empieza a la frecuencia de red, a la mitad de la velocidad de sincronismo se hace cero y luego vuelve a su valor inicial, formando en una gráfica tiempo-frecuencia una especie de "V". Por otro lado el armónico lateral superior empieza al triple de la frecuencia de alimentación, posteriormente al doble de la frecuencia hasta que en régimen permanente se estabiliza a la frecuencia de alimentación. Normalmente se analiza con más detenimiento la aparición del armónico lateral inferior, que nos muestra más información.

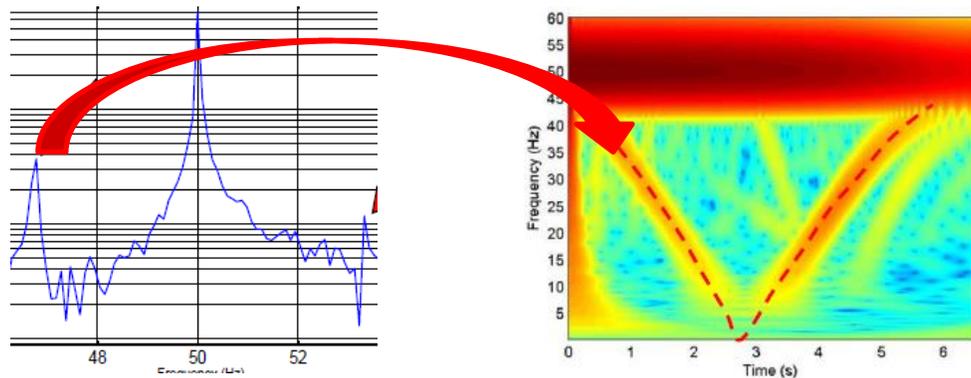


Figura 34. Equivalencia del método tradicional (izquierda) con el método moderno del análisis de corrientes (derecha).

Como se puede observar claramente en la figura 34 (izquierda), con el método tradicional observaremos el posible fallo de una manera "fija", es decir sin saber cómo evoluciona en el tiempo, lo que nos puede llevar a un diagnóstico erróneo. En la gráfica de la derecha, mediante el uso de una herramienta tiempo-frecuencia, se puede observar como varía la frecuencia del armónico lateral inferior en el arranque del motor. Con estos dos métodos se puede llegar a diagnósticos más precisos.

7. Rotura de barras no adyacentes

Tradicionalmente, los estudios de las asimetrías de los rotores de los motores de inducción de jaula de ardilla se han enfocado en el análisis de barras adyacentes en el campo magnético y en el espectro de corriente. Sin embargo, grandes fabricantes de estas máquinas han reportado casos en donde las barras dañadas o rotas están distribuidas aleatoriamente alrededor del perímetro del rotor, especialmente en máquinas de alta tensión. En alguno de estos casos, los motores estaban siendo monitorizados por un programa de mantenimiento basado en el análisis espectral de corriente (MCSA por sus siglas en inglés: Motor Current Signature Analysis), y el grado de degradación encontrado en el rotor fue mayor que el que se predijo por el análisis de su espectro. Este hecho desencadenó que se lleve a cabo un nuevo estudio comprendido por análisis teórico, simulaciones y pruebas para investigar la influencia del número y la posición que las barras defectuosas tienen sobre el procedimiento tradicional de diagnóstico MCSA. [9]



Figura 35. Rotor de 5MW, 6kV con múltiples barras rotas

Se ha comprobado experimentalmente, como se menciona en el párrafo anterior, que el espectro de corriente que se tiene de un motor con barras rotas en la jaula adyacentes se comporta de manera diferente con uno que tiene las barras rotas en posiciones aleatorias utilizando el método clásico de análisis de corrientes. La teoría tradicional nos dice que luego que se da la ruptura o formación de una grieta, se debe notar un aumento en la corriente que circula en las barras adyacentes al de la barra dañada, que luego se suavizaran o disminuirán dependiendo de la distancia con respecto a la barra en cuestión.

Ahora, cuando se nota que las barras se pueden romper o dañar aleatoriamente se realizaron estudios sobre este fenómeno. Se analizó la corriente antes y después de la rotura de una barra aplicando un modelo de un motor asíncrono utilizando elementos finitos. Los resultados revelaron una distribución asimétrica de la corriente en ambos lados de la falla, así como algunos aumentos secundarios que estaban a una distancia de la rotura igual a la distancia entre polos de la máquina. Estos incrementos secundarios aparecen en la corriente de las barras y a pesar de que la magnitud de estos efectos secundarios es más baja y que su presencia es variable durante un ciclo eléctrico, ellas pueden causar el inicio de una nueva falla en una barra en otros puntos de la jaula. [9]

Luego de estos resultados obtenidos, se puede atribuir que debido a este fenómeno se pueden dañar barras en la jaula en posiciones aleatorias. Teniendo en cuenta que debido a la no existencia de jaulas perfectamente simétricas, a defectos en la fabricación como malas soldaduras, porosidades, entre otras, no debería sorprendernos que un daño progresivo en el rotor pudiera empezar simultáneamente en diferentes puntos de la jaula, evolucionando en cada punto a velocidades diferentes. Como resultado, una rotura de barra se puede dispersar en todo el perímetro del rotor.

Como se explicó en el apartado anterior, se han realizado muchos estudios sobre el fenómeno de la ruptura de barras, y en especial énfasis cuando este fenómeno se da en barras adyacentes, pero, utilizando el método tradicional de análisis de corrientes, y con barras rotas a ciertas distancias, pueden fallar a la hora de detectar el número de barras dañadas y podrían, bajo ciertas raras circunstancias, fallar en detectar el defecto [9], es decir que por estos fenómenos podemos analizar un espectro de corriente de un motor que presenta más de una barra rota en posiciones aleatorias, y veremos que su espectro es igual al de una máquina sana, lo cual es totalmente falso.

8. Ensayos experimentales

En este apartado se explicará el procedimiento que se llevó a cabo para realizar los ensayos experimentales, para poder diagnosticar la existencia de barras rotas no consecutivas en motores eléctricos de inducción. Estos ensayos se realizaron en el Laboratorio del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la UPV, y se utilizaron diferentes rotores con barras rotas en diferentes posiciones y distribuciones.

A continuación se describirán algunas características importantes de cada etapa realizada, mostrando conceptos básicos sobre dichas características y cómo se aplicaron en estos ensayos.

8.1. Medida de la señal

La medida de la señal es la etapa en donde se obtiene, desde una magnitud física, los datos acondicionados que pueden ser registrados, visualizados y/o analizados. Normalmente para poder realizar la medida de la señal existe una cadena de medida característica que se muestra en la figura 36:

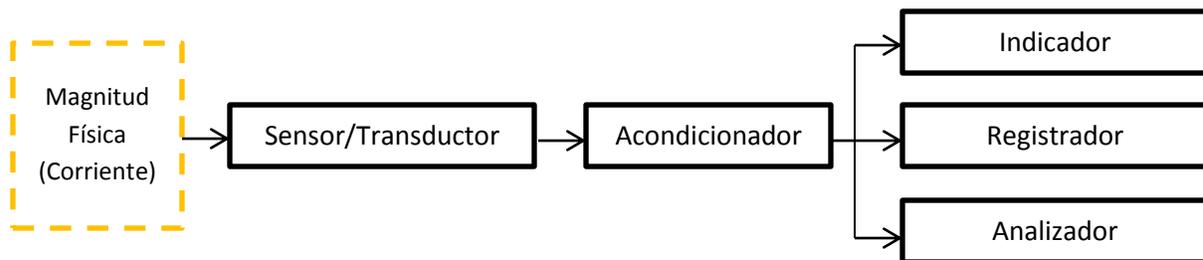


Figura 36. Cadena de medida

A continuación daremos una breve descripción de estos elementos y también de los equipos utilizados en los ensayos experimentales.

8.1.1. Sensores para la medida de la corriente

Para realizar la medida de la corriente de alimentación del motor se pueden utilizar diferentes tipos de sensores. Para este caso se utilizan transformadores de corriente. Debemos tener en cuenta algunas características de los sensores en general como son:

a. Rango de medida

El rango de medida se refiere al rango en el cual el sensor ha sido dimensionado para medir adecuadamente. Por ejemplo, si el rango de un sensor de corriente es de 0 a 1 amperio, y medimos una línea por donde circulan 2 amperios, ésta no será capaz de medir de forma adecuada dicha magnitud.

b. Sensibilidad

Es la relación entre la magnitud de salida y la de la entrada (en este caso ambas de naturaleza eléctrica al actuar como un transformador de corriente). Por ejemplo, para cada 1 amperio que

mide un sensor a la salida nos puede dar 1mA que es adecuado para el equipo de acondicionamiento y/o adquisición.

c. Rango de frecuencias

Nos indica en que rango de frecuencias el sensor nos dará una respuesta lineal óptima. En caso se trabaje fuera de este rango de frecuencias, la medida no será precisa.

d. Otros

Existen otras características como la precisión, impedancia de la carga, alimentación, etc. que deben ser estudiados y analizados dependiendo del caso.

Para los ensayos se ha utilizado una sonda de corriente fluke (modelo i300s)



Figura 37. Sonda de corriente fluke i300s

Las características de este equipo son:

Rango	30A/300A/3000A
Sensibilidad	100mV/10mV/1mV
Rango de frecuencia	10Hz – 50kHz

Teniendo en cuenta que los motores con los que se realizan los ensayos no superan los 3.5A por cada fase de alimentación, y que todos funcionan a 50Hz (frecuencia de red) basta con utilizar la escala de 30A. Además se debe aclarar que este equipo cumple con la función de sensor/transductor y acondicionador de la señal (filtros, amplificación, etc.) para conectarse directamente con un equipo de registro de datos.

8.1.2. Equipos de registro de datos

Los equipos de registro de datos son equipos electrónicos que se encargan de “registrar” los datos obtenidos para luego graficarlos, procesarlos, etc. Algunas características que podemos tener en cuenta sobre estos equipos son:

a. Frecuencia de muestreo

La frecuencia de muestreo (f_s) es la frecuencia con la cantidad de muestras que se toman por unidad de tiempo de una señal analógica. Por ejemplo, la frecuencia de muestreo de un equipo puede ser de 1kSample/segundo, es decir que por cada segundo, el equipo será capaz de tomar 1000 muestras. Para el mismo ejemplo, la frecuencia de muestreo se puede dar en muestras/sec o en Hz, que en este caso sería 1kHz.

Esta característica es importante para evitar problemas a la hora de digitalizar la señal como es el efecto aliasing. El efecto aliasing nos dice que si la frecuencia de la señal medida (f) es mayor que la mitad (aproximadamente) de la frecuencia de muestreo (f_s), entonces aparecerán frecuencias fantasmas reflejadas en la gráfica. Para evitar este problema se debe tener en cuenta el criterio de Nyquist, que nos dice que la frecuencia de muestreo (f_s) debe ser al menos el doble de la frecuencia de la señal medida (f).

b. Resolución

Estos equipos electrónicos trabajan convirtiendo las señales analógicas generadas por los transductores (en este caso voltaje) en señales digitales, empleando convertidores A/D (analógico/digital). Al realizar esta conversión, cada dato tomado será representado mediante un número finito de cifras significativas existiendo siempre una pérdida de resolución. La resolución depende del número de bits del convertidor A/D y la relación entre el valor máximo de la señal y el rango del convertidor. En otras palabras, si la resolución (numero de bits) del equipo es pobre, se obtendrán valores numéricos con poca precisión, por ejemplo: 1.2, 1.3, etc. Mientras que con una resolución mayor, se tendrán datos con más información: 1.23454, 1.34535, etc.

En los ensayos realizados en el laboratorio se trabajó con el ScopeCorder DL850, que es un potente registrador de señales.

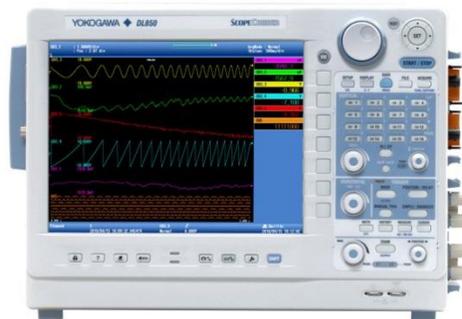


Figura 38. Registrador de datos ScopeCorder DL850

Este equipo cuenta con funciones avanzadas que para nuestro caso no son necesarias nombrar, así que solo mostraremos las características utilizadas para estos ensayos:

Nro. de canales	16
Resolución (elegible)	12 bits y 16 bits
Frecuencia de muestreo (modificable)	50kSample/sec

8.2. Análisis de señal

Una señal eléctrica de un motor específicamente se compone de una componente transitoria, es decir que aparece por un periodo de tiempo y luego desaparece, y una componente permanente la cual se mantiene en el tiempo. Por ejemplo, cuando un motor eléctrico arranca suele, independientemente del método de arranque utilizado, la corriente en el inicio de este proceso es mayor por un periodo de tiempo, lo que sería la componente transitoria de nuestra señal. Cuando se establece la corriente se podrá observar uniformidad en la corriente que consume el motor eléctrico, observando en este caso la componente permanente de la señal.

En el caso del método clásico de análisis de corriente, este se basa en el análisis de la señal en régimen permanente, es decir cuando la señal (corriente) es estable en el tiempo tras el transitorio de arranque o cambio de referencia. En régimen permanente se utiliza tradicionalmente la transformada de Fourier como herramienta de procesamiento de señal.

8.2.1. Transformada de Fourier

Como se menciona en el apartado anterior, la medición de señales se suele hacer en el dominio temporal, ya que por simple lógica representamos señales de alguna magnitud física en un tiempo transcurrido determinado. El problema de tener una señal en dominio temporal se da por la dificultad de encontrar información relevante en dicha gráfica, especialmente cuando esta señal no es pura, es decir que contiene ruido o una mezcla de señales lo cual nos hace imposible encontrar parámetros tan simples como el periodo de la señal estudiada.

Hace más de un siglo que el matemático y físico francés conocido como Jean Baptiste- Joseph Fourier (1768-1830) demostró que cualquier forma de onda se puede representar mediante la suma de infinitas ondas senoidales de diferentes frecuencias, logrando una nueva forma de representación utilizando, en vez del dominio temporal, la frecuencia. Matemáticamente tendríamos, dada una señal periódica $f(t)$ de periodo T:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{p=1}^{\infty} a_p \cos \omega_p t + \sum_{p=1}^{\infty} b_p \sin \omega_p t$$
$$\text{con: } \begin{cases} \omega_p = p \frac{2\pi}{T} & p = 0, 1, \dots, \infty \\ a_p = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos \omega_p t dt & a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt \\ b_p = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin \omega_p t dt \end{cases}$$

Esta herramienta se puede aplicar a cualquier señal periódica y con esta transformada, se puede representar la misma señal temporal que no nos da la suficiente información otra que será más fácil de entender y de donde podremos obtener datos más importantes. A continuación se muestra un ejemplo del análisis de ruido de un ventilador, donde se puede observar originalmente

la señal temporal en donde difícilmente podremos identificar la frecuencia de giro de dicho artefacto mientras que en su espectro de Fourier podemos ver algunas frecuencias características que posteriormente se pueden estudiar para encontrar su origen.

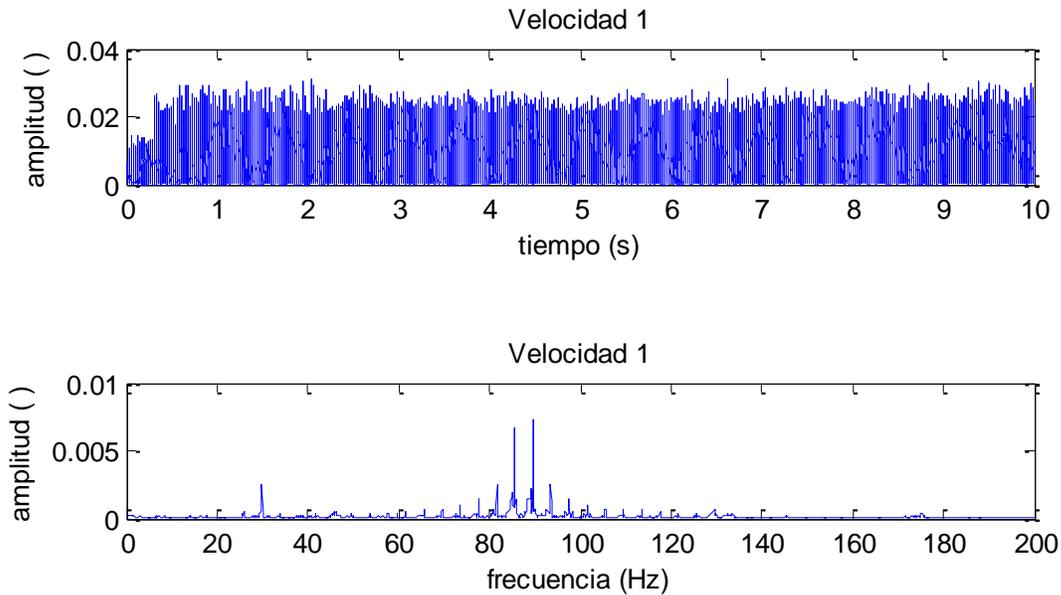


Figura 39. Arriba: señal temporal del giro de un ventilador de pedestal. Abajo: señal resultante de la transformada de Fourier

Como se comentó anteriormente, en la gráfica en el dominio de la frecuencia se pueden observar claramente componentes a frecuencias determinadas lo cual nos da mucha más información que la gráfica superior. Este ejemplo se tomó del ruido de un ventilador, y obviamente se utiliza en cualquier tipo de señal periódica como la corriente eléctrica.

A continuación, adentrándonos en el método clásico de análisis de corrientes estáticas para determinar la rotura de barras de un motor de inducción explicaremos primeramente como se da este fenómeno.

8.2.2. Uso de ventanas Temporales

Cuando se aplica la herramienta FFT a una señal temporal, el algoritmo de este método se basa en que la señal analizada medida se comporta de una manera periódica (un número de ciclos completos), lo cual obviamente es casi imposible en medidas reales. Cuando esta premisa no se da, el resultado se verá afectado, más que todo en la pérdida de información del espectro de Fourier, existiendo una distribución mayor. Una solución para este problema es el uso de una ventana temporal que multiplicada por la señal medida tendremos un espectro más claro y con mayor precisión. Para poder observar este fenómeno lo describiremos a continuación.

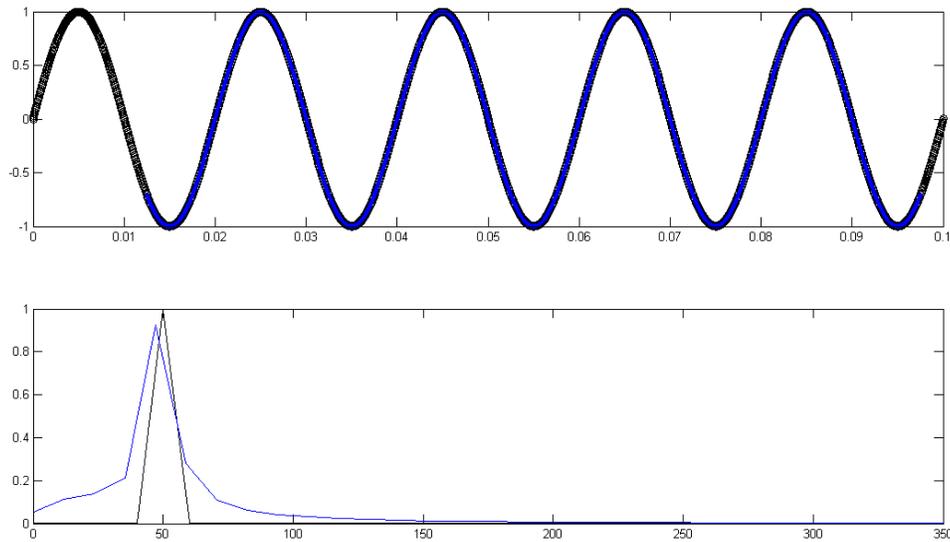


Figura 40. Comparación de espectro de Fourier a señal con ciclos completos (negro) con respecto a señal con ciclos incompletos (azul)

En la figura 40 podemos observar en la parte superior dos señales senoidales superpuestas. La primera que la gráfica negra, que se puede observar claramente que es periódica (ciclos completos) mientras que la gráfica azul se puede observar que no cumple con los ciclos suficientes para considerarla una señal periódica. Cuando se realiza la transformada de Fourier, la que corresponde a la señal periódica, se comporta de una manera óptima, mientras que en la segunda se puede observar una distribución de energía que logra que se pierda precisión.

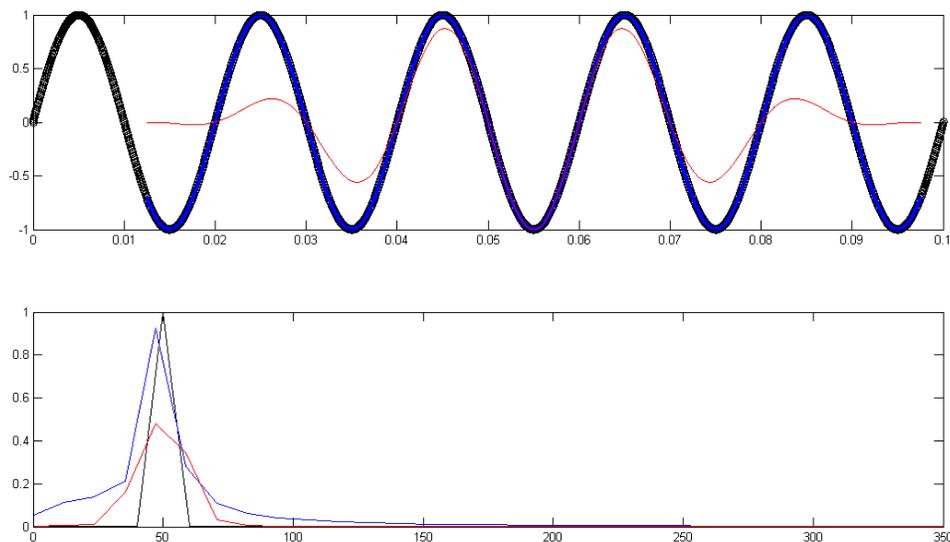


Figura 41. Ejemplo anterior utilizando una ventana temporal

Para corregir este problema utilizamos una ventana de hanning, con la cual, al multiplicarla por la señal temporal lograremos forzar a que nuestra señal medida se comporte de una manera más periódica. Se puede ver en la figura 41 en la parte superior la gráfica roja, que es el resultado de la multiplicación de la señal azul por la ventana de hanning, y en la parte inferior el resultado después de la transformada de Fourier. Podemos ver que mejoramos la precisión del resultado, aunque se pierde amplitud. Esta es una herramienta útil para nuestro caso teniendo en cuenta que los armónicos laterales de la corriente medida pueden estar muy próximos a la frecuencia fundamental, y se pueden confundir y enmascarar en el resultado.

8.2.3. Transformada de Wavelet Discreta (DWT)

Pertenece a las herramientas de procesamiento tiempo-frecuencia. Esta herramienta utiliza diferentes filtros pasabandas para ir creando los diferentes niveles de detalle y la señal de aproximación. El número total de niveles se selecciona en función de la frecuencia de muestreo, muy útil para realizar un filtrado.

Cada señal de wavelet (aproximación y detalle) tiene una banda de frecuencia asociado, de los límites de que están bien establecidas, una vez que se conoce la frecuencia de muestreo (f_s) de la señal analizada original. Las fórmulas que se emplean para calcular los límites de las bandas de frecuencias asociadas con cada señal de wavelet, de acuerdo con el algoritmo de Mallat, se especifican en la Fig.42. Se debe tener en cuenta cómo los límites de la banda de frecuencia para cada señal de ondas dependen la frecuencia de muestreo (f_s), así como en el nivel de la señal de ondas correspondiente (j). Por ejemplo, si la tasa de muestreo utilizado para la captura de $s(t)$ es $f_s = 5000$ muestras/segundo, y llevamos a cabo la descomposición DWT en $n = 8$ niveles, las bandas de frecuencia asociadas con cada señal de wavelet son los que se muestran en la siguiente tabla [11].

Señal Wavelet	Banda de frecuencia
a_8	[0-9'2] Hz
d_8	[9'2-19'5] Hz
d_7	[19'5-39] Hz
d_6	[39-78'1] Hz
d_5	[78'1-156'2] Hz
d_4	[156'2-312'5] Hz
d_3	[312'5-625] Hz
d_2	[625-1250] Hz
d_1	[1250-2500] Hz

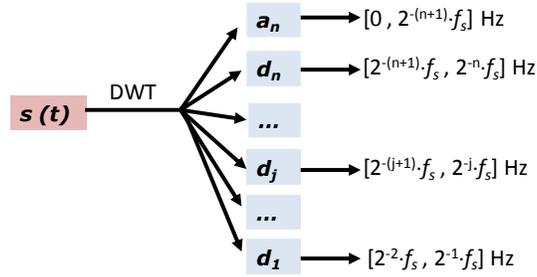


Figura 42. Distribución de bandas de frecuencia de la DWT

Entonces, como se comenta en el primer párrafo, la DWT se comportaría como un filtro para cada banda de frecuencia asociada, descomponiendo la señal en varias señales para cada intervalo de frecuencia. A continuación de [11] mostramos algunos ejemplos de la aplicación de la DWT a distintas señales, donde se puede observar claramente el comportamiento “filtro” de esta herramienta.

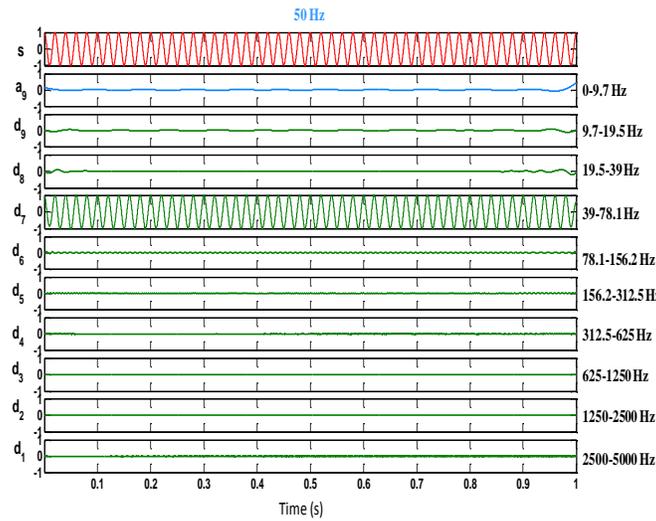


Figura 43. Análisis DWT de una señal senoidal pura

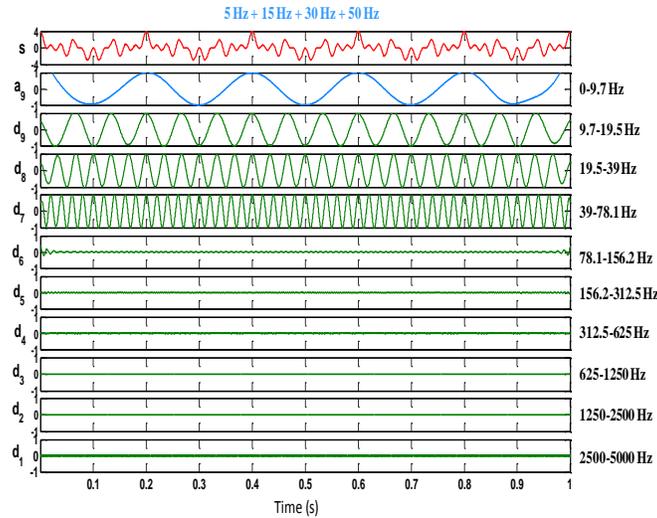


Figura 44. Análisis DWT de una señal compuesta por distintas señales senoidales (5 Hz, 15 Hz, 30 Hz and 50 Hz)

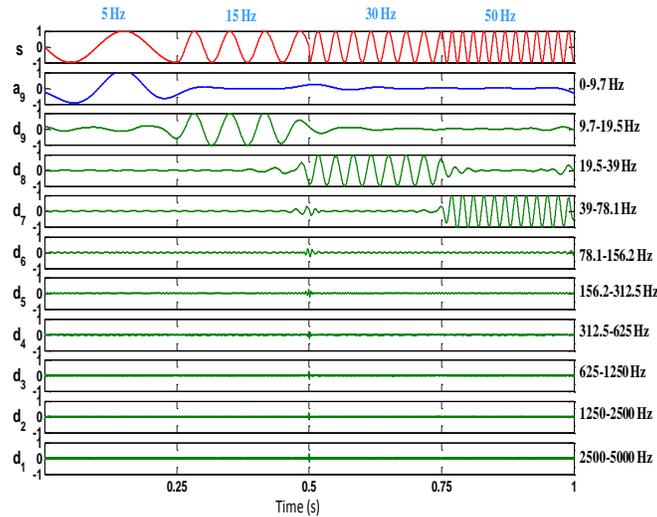


Figura 45. Análisis DWT de una concatenación de 4 señales senoidales (5 Hz, 15 Hz, 30 Hz and 50 Hz)

La gran ventaja de la Transformada Wavelet Discreta (DWT) radica en su sencillez, el costo computacional asociado al uso de esta herramienta es menor que la transformada continua, y que facilita la cuantificación de la severidad de la avería.

8.2.4. Transformada de Wavelet Continua (CWT)

Antes de desarrollar esta herramienta, se utilizaba la transformada corta de Fourier (STFT-Short Time Fourier Transform), la cual era la aplicación de transformadas de Fourier (conjunto de ondas senoidales) aplicando ventanas a cada “trozo” de la señal, teniendo en cuenta para esta herramienta el ancho de esta ventana y el solapamiento entre ellas. Debido a algunos inconvenientes con los que contaba esta herramienta, como la resolución que presentaba, se dio esta alternativa.

Básicamente la transformada Wavelet consta de una señal (wavelet madre que se puede elegir entre distintas que existen), la cual será aplicada a la señal medida, similar a la STFT, pero donde el ancho de la ventana se modifica para cada componente espectral considerado.

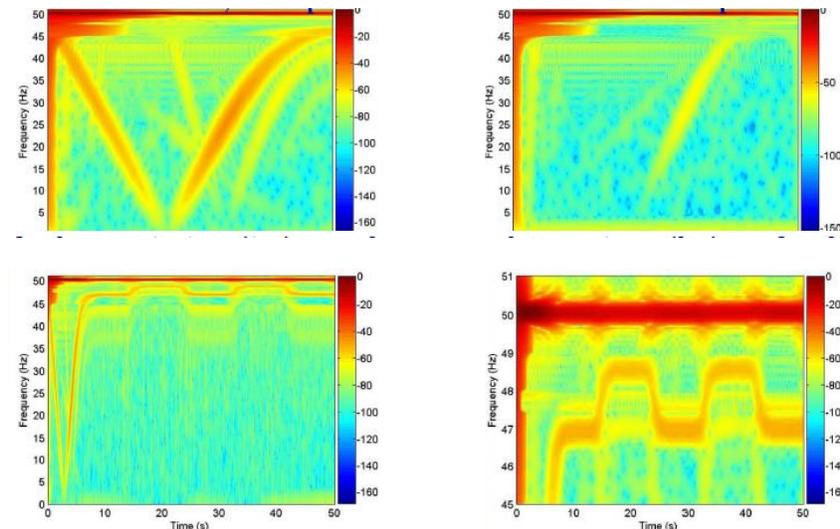


Figura 46. Ejemplos de aplicación de la CWT. Arriba izquierda: arranque-1 barra rota. Arriba derecha: arranque máquina sana. Abajo izquierda: 1 barra rota, transitorio completo. Abajo derecha: 1 barra rota-oscilaciones de velocidad

Realizando estas operaciones se permite que el análisis de fenómenos transitorios, no estacionarios se puedan observar con una mayor resolución y de esta forma observar detalles que no eran posibles con la STFT. Entonces al utilizar la CWT será una representación mas completa de la evolución de las componentes del fallo. Permiten diagnosticar en base a más armónicos, dándonos más fiabilidad. Para poder aplicar esta herramienta, se requiere de un mayor costo computacional (a diferencia del método anterior).

8.3. Procesamiento de la señal mediante Matlab

Matlab es el lenguaje de alto nivel y el entorno interactivo utilizado por millones de ingenieros y científicos en todo el mundo. Le permite explorar y visualizar ideas, así como colaborar interdisciplinariamente en procesamiento de señales e imagen, comunicaciones, sistemas de control y finanzas computacionales (www.mathworks.com).

Este es un software potente de simulación que cuenta con innumerables aplicaciones en el campo de la ingeniería y la investigación, donde se pueden realizar cálculos y simulaciones, desde las mas sencillas hasta los mas complejos, pasando por las diferentes áreas (control, aeroespacial, economía, etc).

Para el presente trabajo se ha utilizado para el procesamiento de las señales medidas, utilizando las herramientas descritas en el apartado anterior para poder obtener los resultados necesarios.

8.4. Esquema de ensayo experimental

La adquisición de datos se realizó en el laboratorio del Departamento de Ingeniería de la UPV. El esquema de conexiones fue el siguiente:

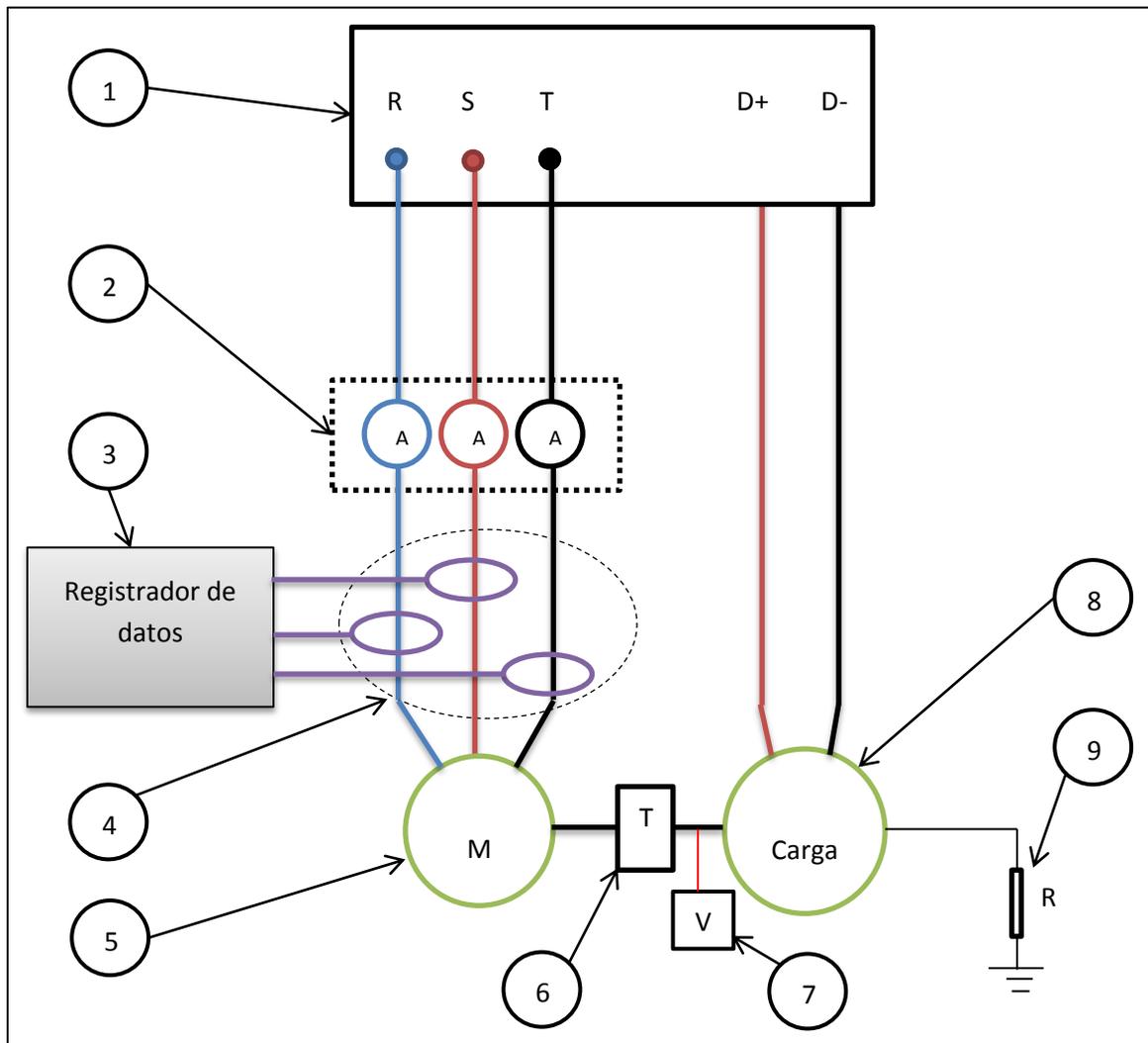


Figura 47. Esquema de conexión de equipos para adquisición de datos en laboratorio del DIE

Entonces, los elementos utilizados para la adquisición de datos fue el siguiente:

1. Pupitre de suministro de energía. Este es un módulo que se encuentra adaptado para la toma de energía eléctrica, para este caso se trabajó con el suministro de tensión trifásica variable (con autotransformador, máximo 380V entre línea y línea) y con el suministro de tensión continua variable (170 VDC).



Figura 48. Pupitre de suministro de energía

2. Medidor de calidad de energía. Este es un equipo capaz de medir características eléctricas de las líneas de alimentación como la potencia activa, la reactiva, corriente, etc. Para este caso se utilizó en modo amperímetro, para poder monitorizar el valor RMS de la corriente de cada fase.



Figura 49. Medidor de calidad de Energía

3. Registrador de datos (ScopeCorder DL850). Como se explicó en el apartado 8.1.2, con este equipo se puede observar gráficamente la corriente que está siendo cada medida. Luego de configurar algunos parámetros (tiempo base de tiempo, frecuencia de muestreo, etc.) se procede a guardar los archivos en su disco duro, para luego ser extraídos para su procesamiento con ordenador. Los datos tomados de este equipo son datos temporales.



Figura 50. Registrador de datos (ScopeCorder DL850)

4. Sondas de corriente (fluke i300s). Estas sondas de corriente se colocan alrededor de cada línea de alimentación del motor, y se conectan directamente al registrador de datos. Sus características se explicaron en el apartado 8.1.1. La función de estas sondas básicamente, es entregar al registrador de datos una señal eléctrica (tensión en mV) adecuada y acondicionada.



Figura 51. Sonda de corriente (Flukei300s). Arriba: sensores de corriente en cada línea de alimentación. Abajo: acondicionadores de señal

5. Motor Eléctrico de Inducción. Las características de este motor son:

Potencia	1.1 kW
Frecuencia	50 Hz
Tensión de alimentación (Y)	400 V
Corriente Nominal (Y)	2.7 A
Velocidad nominal	1410 rpm
Deslizamiento nominal	0.06
Conexión	Estrella
Número de pares de polos	2
Número de barras en rotor	28

Con este motor se realizan las pruebas únicamente cambiando el rotor (parte móvil del motor) para cada medición. Este motor estuvo configurado en estrella.



Figura 52. Motor eléctrico de inducción

6. Torquímetro. Con este instrumento se midió el torque que el motor realizaba sobre la carga para cada medición. Estuvo ubicado entre el eje del motor y el eje de la carga.



Figura 53. Torquímetro. Arriba: Sensor. Abajo: Display

7. Tacómetro. Con este instrumento se midió la velocidad (en RPM) que el motor entregaba a la carga para cada medición. Es un tacómetro óptico y es externo al circuito de pruebas, es decir que para cada medición fue realizado de manera externa.



Figura 54. Tacómetro

8. Motor de Corriente Continua. Este es un motor de corriente continua que trabaja en configuración generador (dínamo) y el que cumple la función de carga en el circuito. Para su correcto funcionamiento, el inducido de este equipo debe ser conectado a tensión en continua, y la energía generada debe ser “gastada” de alguna forma, en este caso con el uso de resistencias.



Figura 55. Motor de Corriente Continua en configuración generador (dínamo)

9. Carga variable (resistencia). Este es un módulo acondicionado para trabajar como carga de cualquier generador de corriente. Su función es disipar energía eléctrica en forma de calor, haciendo circular esta corriente por distintos componentes como resistencias. Otra característica importante de este equipo es la capacidad de modificación de la carga, que para este caso se ha modificado desde aproximadamente entre el 100%, 70% y 40% de la capacidad de carga del motor de inducción.



Figura 56. Carga variable

8.5. Descripción del procedimiento

8.5.1. Cambio de Rotor

Debemos tener en cuenta que para poder comparar y analizar la existencia de barras rotas en distintas posiciones, se debe contar con rotores que tengan este defecto en diferentes posiciones. En el laboratorio se cuenta con varios rotores con defectos forzados que han sido utilizados para realizar las mediciones. A continuación mostramos una tabla con estos rotores y la descripción de la posición de las barras rotas de cada uno.

Rotor	Posición barras rotas
1	Sano
2	Barra 1
3	Barra 1-2
4	Barra 1-3
5	Barra 1-4
6	Barra 1-5
7	Barra 1-6
8	9 Barras consecutivas
9	9 Barras aleatorias

El procedimiento de cambio de rotor para cada medición fue el siguiente:

- Desconexión de energía del pupitre de suministro.
- Retiro de guarda de protección.



Figura 57. Retiro de guarda de protección del motor.

- Se afloja el pin de acoplamiento del eje.



Figura 58. Pin de sujeción del acoplamiento del eje del motor

- Retiro de pernos de sujeción del rotor.

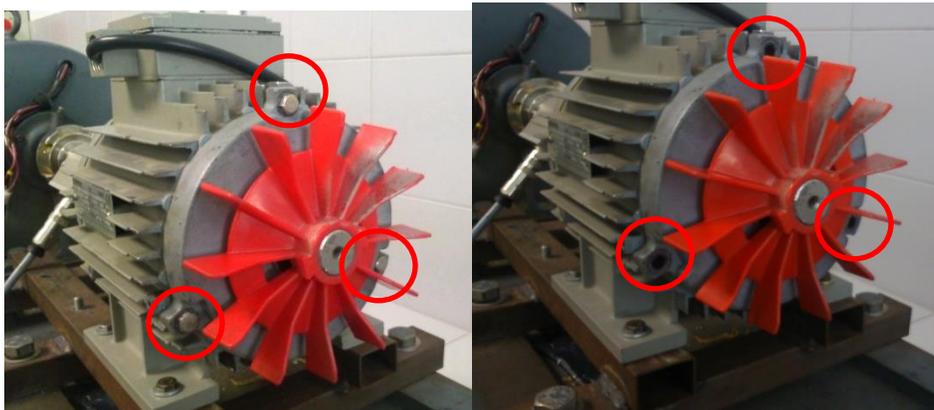


Figura 59. Retiro de pernos de sujeción del rotor

- Retiro del rotor. Se utiliza primero un destornillador para poder separar el rotor, para luego manualmente retirarlo.



Figura 60. Retiro del rotor

Luego de retirar el rotor se realizó el mismo procedimiento de manera inversa.

8.5.2. Realización de medidas en régimen permanente

Para el análisis en régimen permanente, se utilizaron los nueve rotores mostrados en el apartado 8.5.1. El procedimiento realizado fue el siguiente:

- El motor de inducción se alimentó con 380VAC (tensión nominal).
- El dínamo se alimentó con 170VDC y se utilizó el 100% de la capacidad de carga de las resistencias de disipación de energía eléctrica.
- Se energizó el circuito, comprobando previamente la conexión correcta de todos sus componentes.
- Mediante el registrador de datos, se registró 60 segundos de funcionamiento del motor de inducción con cada rotor con tres capacidades de carga (la carga se varió con el juego de resistencias conectadas al dínamo y son medidas aproximadas).
 - a. Carga al 100%
 - b. Carga al 65%
 - c. Carga al 40%
- La corriente consumida de cada fase, el torque y la velocidad del motor se obtuvieron visualmente de los equipos explicados en el apartado 8.4.

8.5.3. Realización de medidas en arranque (transitorio)

Se realizó de manera similar que la realización de medidas en régimen permanente, pero con los rotores 1, 2, 3, 4, 6 y 8. Debido a que el arranque de estos motores es bastante rápido, fue necesario realizar dos ajustes a estas medidas.

- Se realizó arranques con tensión reducida (245VAC) para prolongar el tiempo de arranque del motor.
- La carga se varió en:
 - a. Carga al 100%
 - b. Carga al 65%
 - c. Sin carga

- El tiempo de medición fue de 10 segundos, debido a que no se requiere más tiempo para registrar el arranque del motor.

8.5.4. Medición de ruido

Adicionalmente se tomaron algunas medidas de ruido del motor en funcionamiento con un Smartphone, para analizar estos datos como una posible solución alternativa.

Luego de realizar todas estas mediciones, se procedió a su procesamiento mediante el software Matlab, con la previa programación de un script.

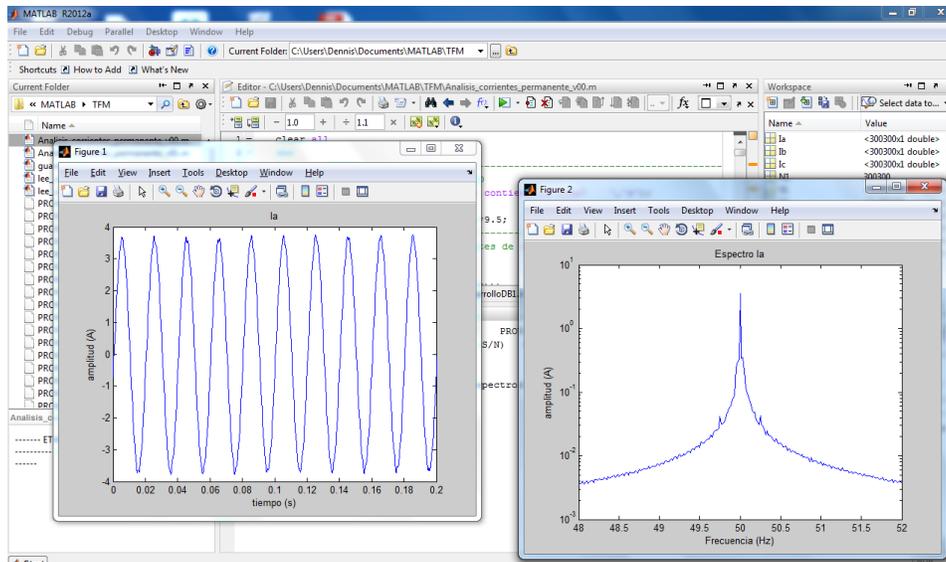


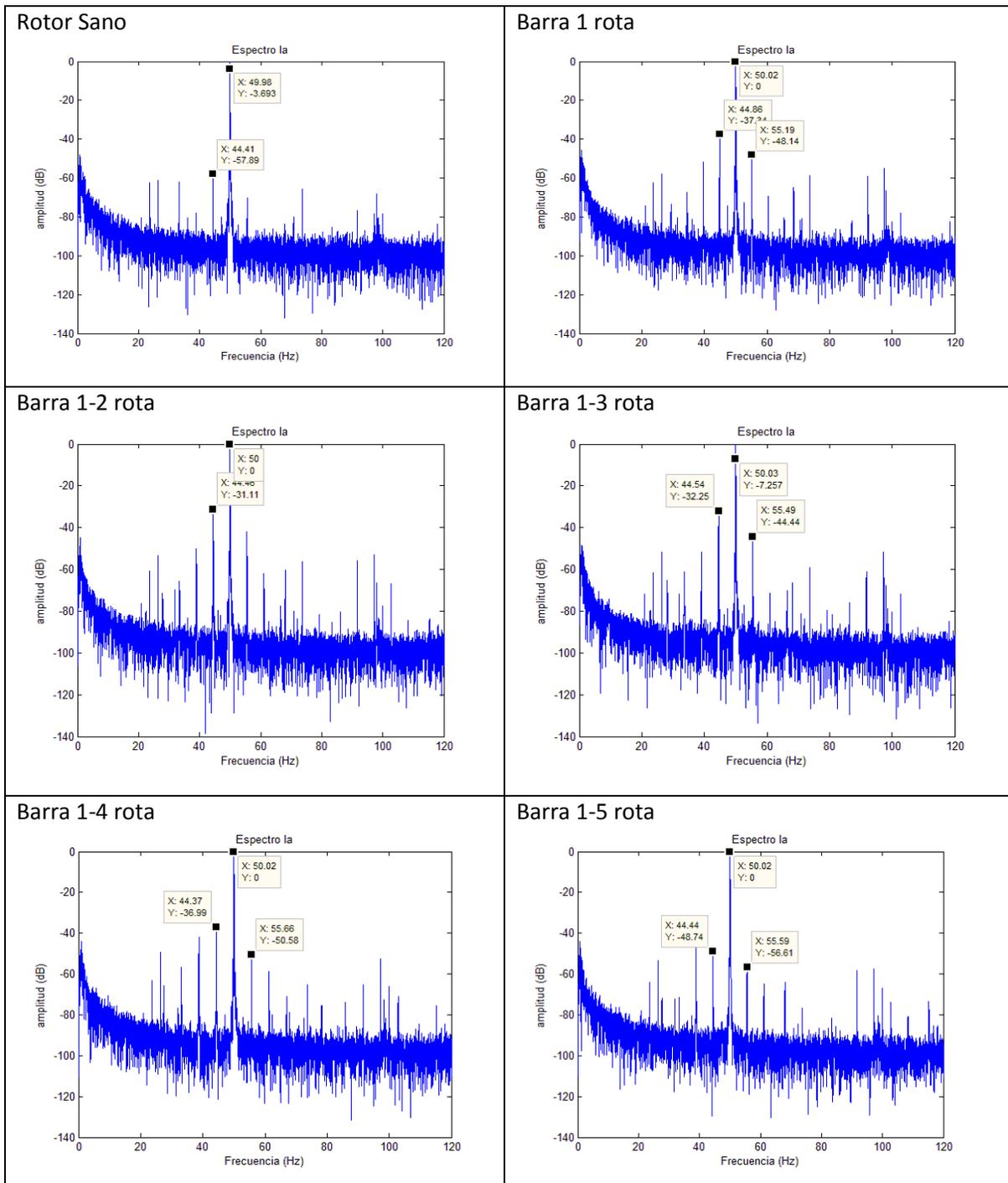
Figura 61. Procesamiento de la señal utilizando MATLAB

9. Resultados

9.1. Régimen Permanente

Se procesaron las señales en régimen permanente utilizando el MCSA (Motor Current Signature Analysis), obteniendo los siguientes resultados:

- **A plena carga:**



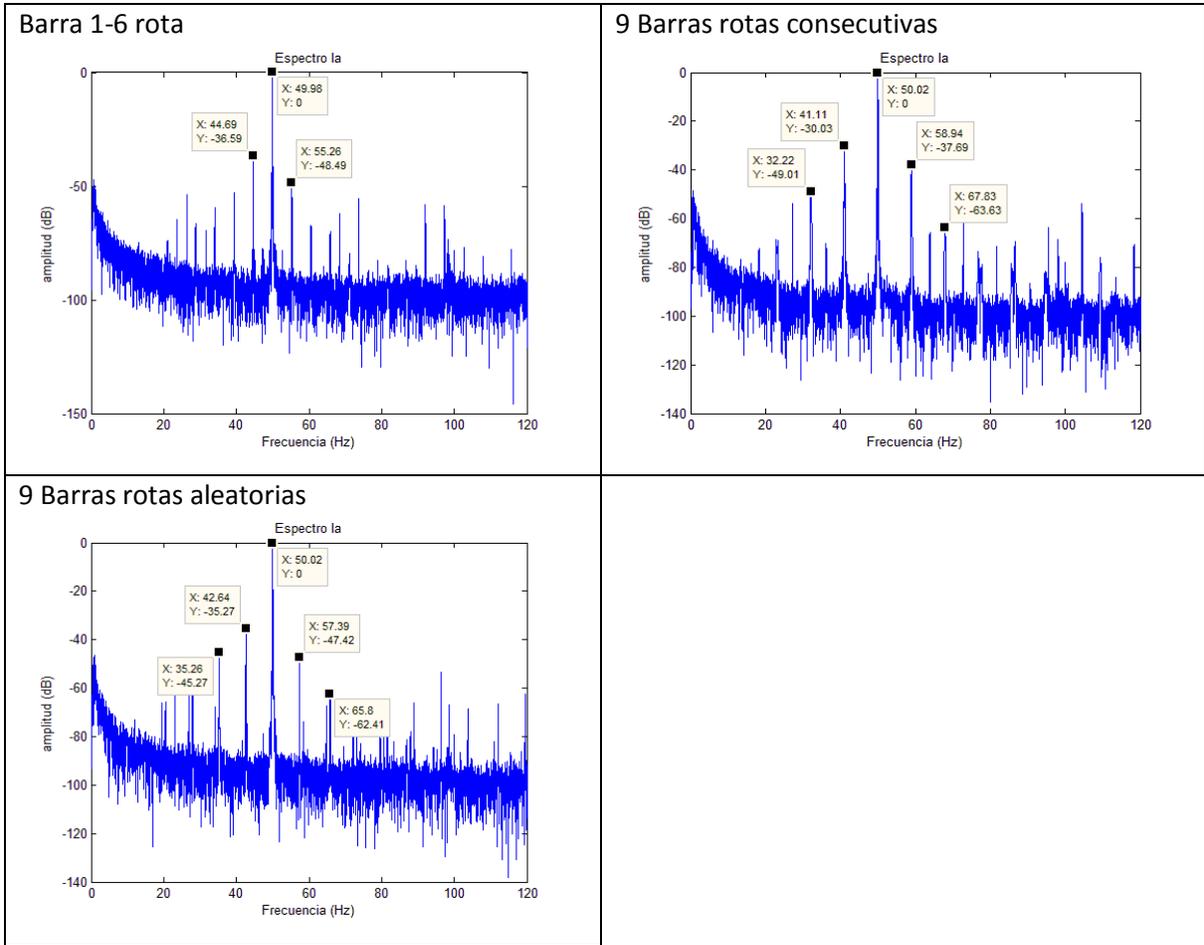
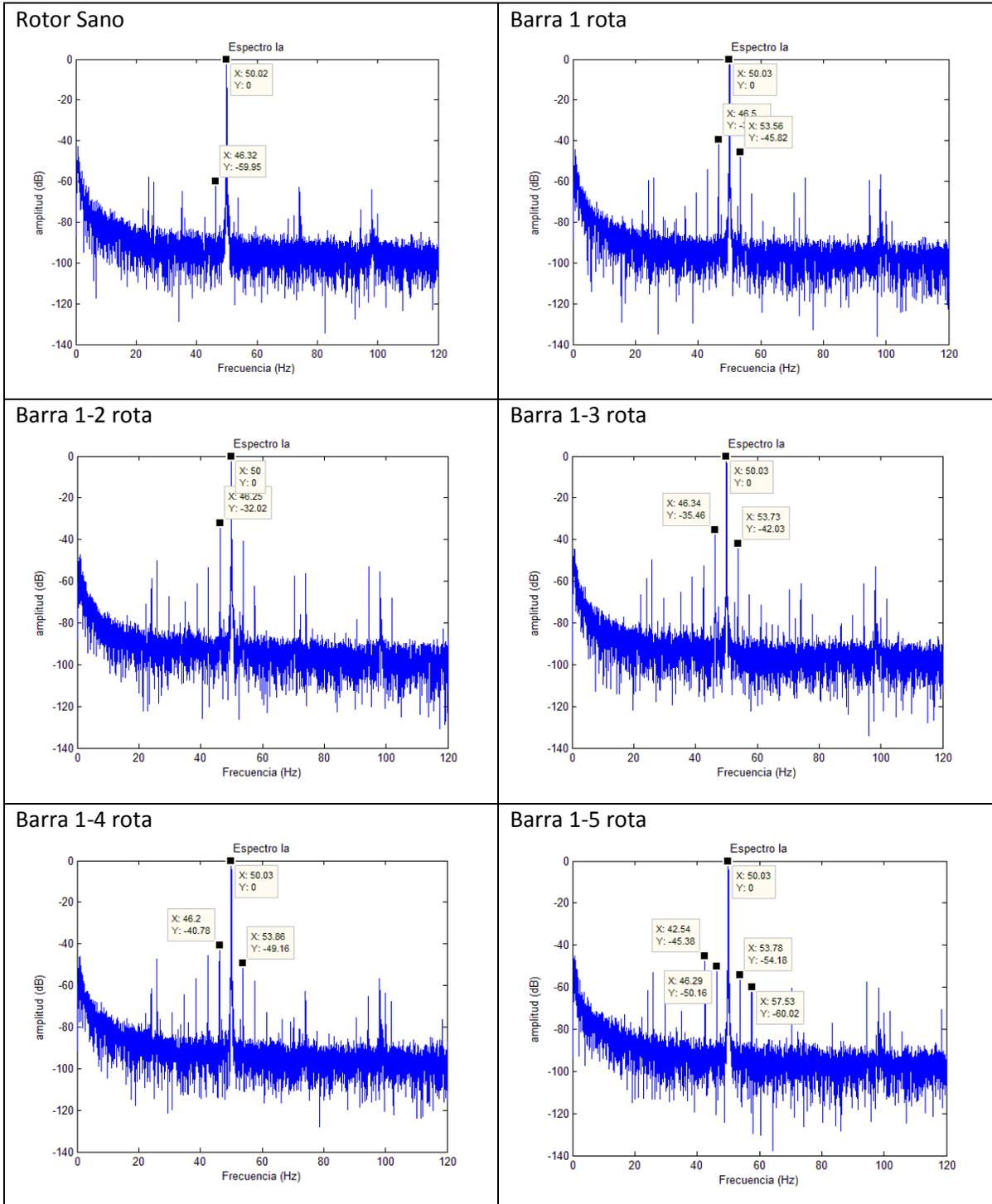


Figura 62. Espectro Fourier de régimen permanente de motor de inducción en distintos casos a plena carga

- Al 65% de carga



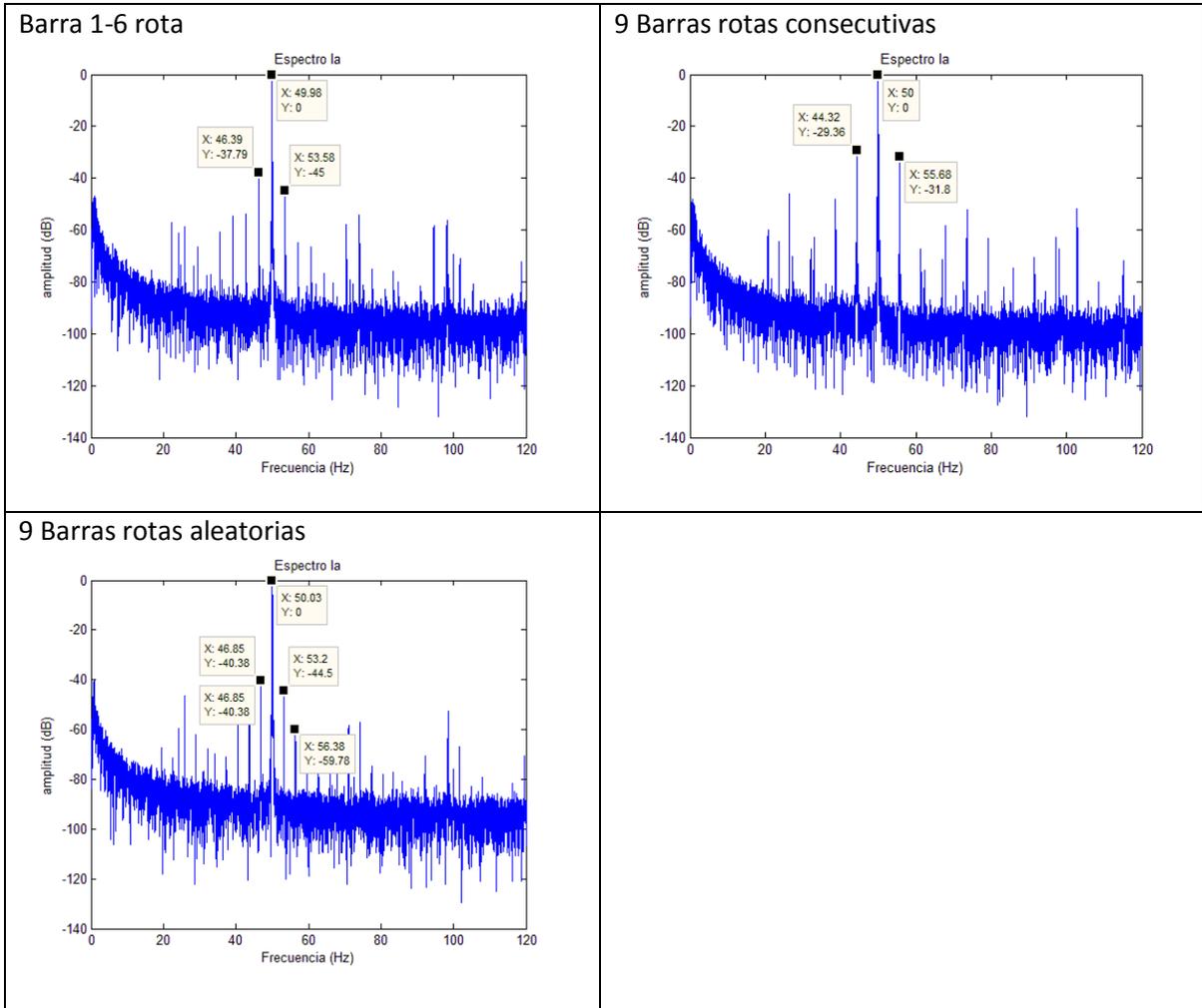
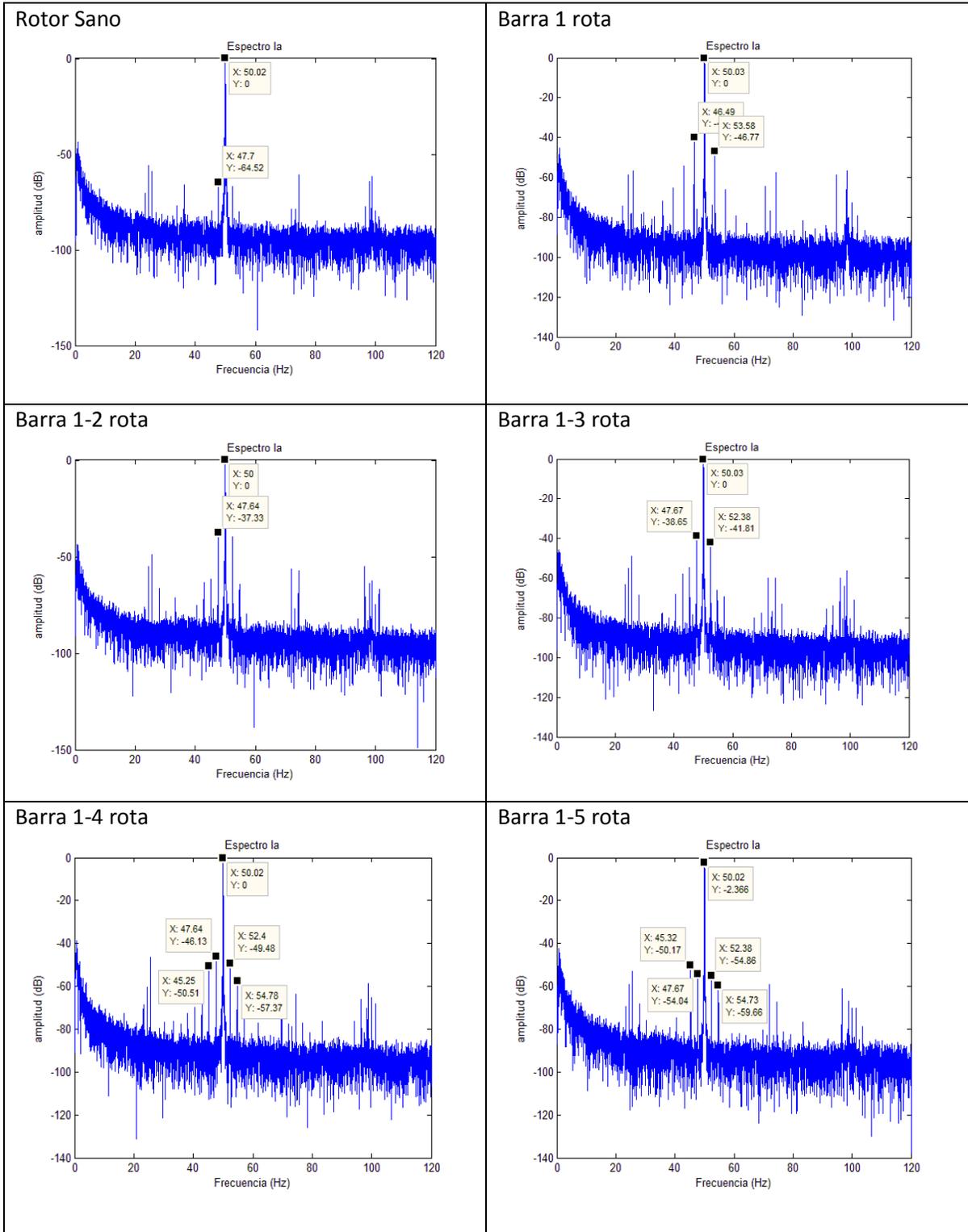


Figura 63. Espectro Fourier de régimen permanente de motor de inducción en distintos casos al 65% de la carga

- Al 40% de carga



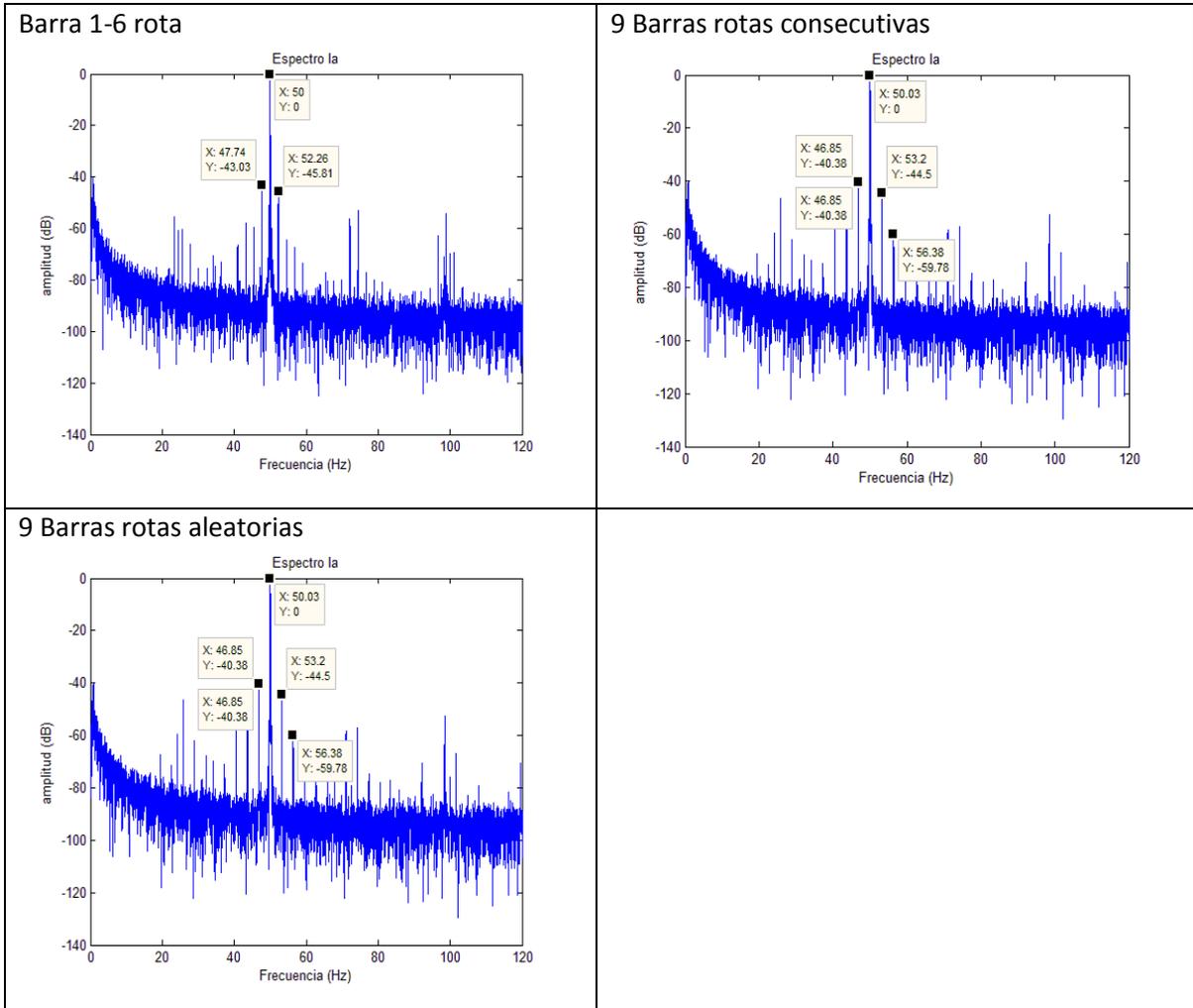


Figura 64. Espectro Fourier de régimen permanente de motor de inducción en distintos casos al 40% de la carga

A continuación se muestran las tablas con el resumen de los resultados obtenidos con cada nivel de carga:

Carga al 100%					
Rotor (barras rotas)	Corriente RMS I_a (A)	Par T (N.m)	Velocidad n (Rpm)	Amplitud armónico lateral inferior I_{li} (dB)	Frecuencia de f_{li} (Hz)
Sano	2.71	7.36	1417	-57.89	44.41
1	2.77	7.29	1422	-37.51	44.86
1-2	2.82	7.22	1417	-31.11	44.48
1-3	2.73	7.17	1418	-32.25	44.54
1-4	2.80	7.69	1414	-36.99	44.37
1-5	2.84	7.54	1415	-48.74	44.44
1-6	2.82	7.48	1418	-36.59	44.69
9 barras adyacente	3.55	7.10	1367	-30.03	41.11
9 barras aleatoria	2.90	7.28	1392	-35.27	42.64

Carga al 65%					
Rotor (barras rotas)	Corriente RMS I_a (A)	Par T (N.m)	Velocidad n (Rpm)	Amplitud armónico lateral inferior I_{li} (dB)	Frecuencia de f_{li} (Hz)
Sano	2.16	5.05	1444	-59.95	46.32
1	2.24	5.02	1442	-39.83	46.50
1-2	2.27	5.01	1443	-32.02	46.25
1-3	2.20	5.01	1445	-35.46	46.34
1-4	2.26	5.30	1445	-40.78	46.20
1-5	2.26	5.21	1440	-50.16	46.29

1-6	2.26	5.19	1446	-37.79	46.39
9 barras adyacente	2.73	5.03	1413	-29.36	44.32
9 barras aleatoria	2.32	5.10	1425	-35.32	45.06

Carga al 40%					
Rotor (barras rotas)	Corriente RMS I_a (A)	Par T (N.m)	Velocidad n (Rpm)	Amplitud armónico lateral inferior I_{li} (dB)	Frecuencia de f_{li} (Hz)
Sano	1.86	3.20	1466	-64.52	47.70
1	1.95	3.20	1468	-39.74	46.49
1-2	1.96	3.20	1466	-37.33	47.64
1-3	1.88	3.25	1465	-38.65	47.67
1-4	1.92	3.32	1465	-46.13	47.64
1-5	1.94	3.29	1465	-54.04	47.67
1-6	1.96	3.33	1464	-43.03	47.74
9 barras adyacente	2.23	3.24	1447	-37.86	46.55
9 barras aleatoria	2.0	3.20	1453	-40,38	46.85

En las tablas anteriores se pueden observar algunos valores marcados en rojo. Teniendo en cuenta que establecemos un límite para considerar que existe una avería (en este caso será de -40dB, pero este valor depende de otras características del motor), se pueden considerar estos valores como indicadores de un posible fallo en el rotor.

De estos resultados se pueden extraer varias conclusiones como:

- La carga a la que esté sometida el motor influirá en el diagnóstico del motor utilizando el método MCSA.
- Conforme la carga va disminuyendo, se van atenuando los armónicos característicos de fallo, llegando a ocultar la existencia de rotura de barras no adyacentes (carga al 40% rotores 1-4,1-5, 1-6 y 9 barras aleatorias).

- A los tres niveles de carga, con el rotor que tiene la barra 1 y 5 rotas, podrían ser motivo de un diagnóstico erróneo pensando que se encuentra trabajando en condiciones normales, cuando ya existen dos barras rotas.

9.2. Transitorio

Estos resultados se obtuvieron utilizando la DWT (Discrete Wavelet Transform) del toolbox Wavelet de Matlab. Como se explicó en el apartado 8.5.3, para este apartado se modificó la tensión de alimentación del motor trifásico a un 65% de la tensión nominal (245VAC) con la finalidad de lograr que el arranque de este motor se prolongue lo suficiente para poder observar el patrón de fallo. Si no se realizara de esta manera, al ser tan rápido el arranque no se podría observar ningún patrón.

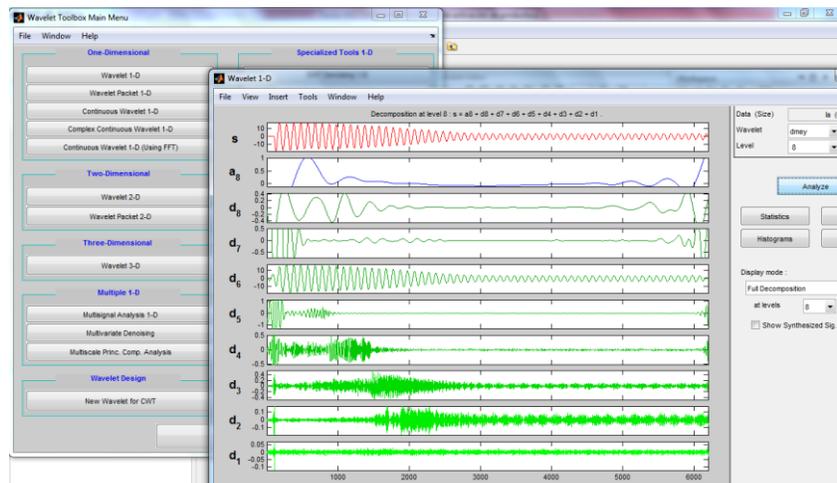


Figura 65. Toolbox Wavelet - Matlab

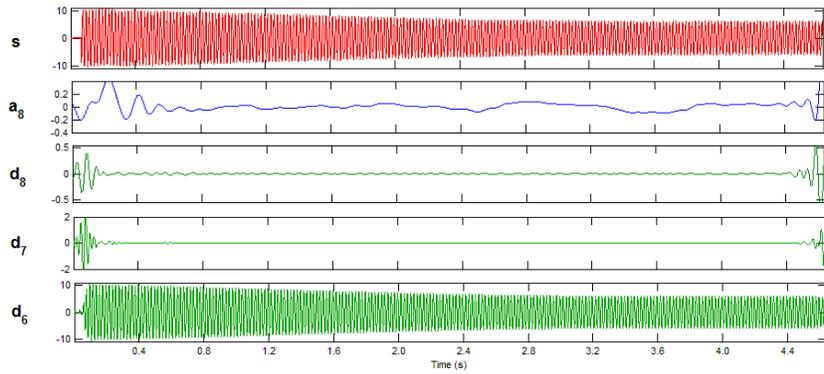
Por otro lado, a diferencia del apartado anterior, las pruebas se realizaron con menos rotores. Las pruebas se realizaron a:

- Rotor sano.
- Rotor con barra 1 rota.
- Rotor con barras 1 y 2 rotas.
- Rotor con barras 1 y 3 rotas.
- Rotor con barras 1 y 5 rotas.
- Rotor con 9 barras rotas consecutivas.

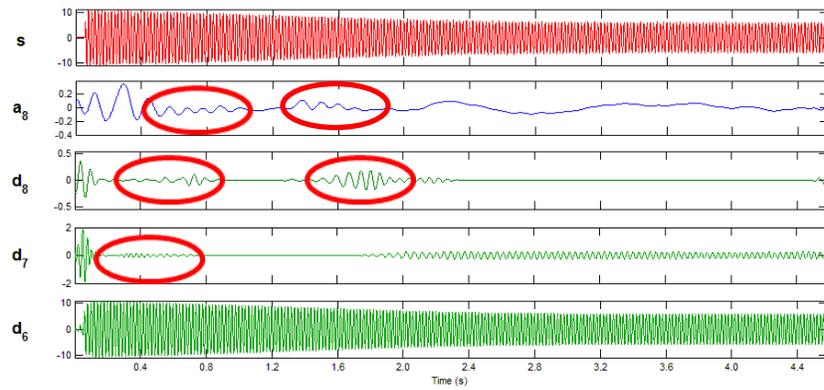
Los resultados obtenidos los dividimos en los tres niveles de carga estudiados.

- Al 100% de la carga

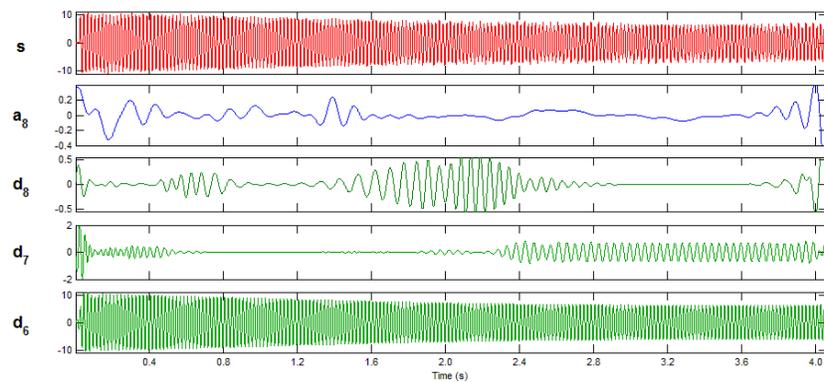
Rotor sano



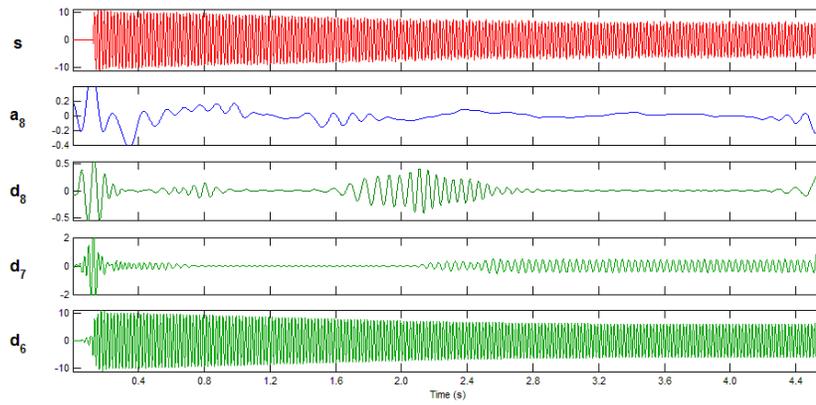
Barra 1 rota



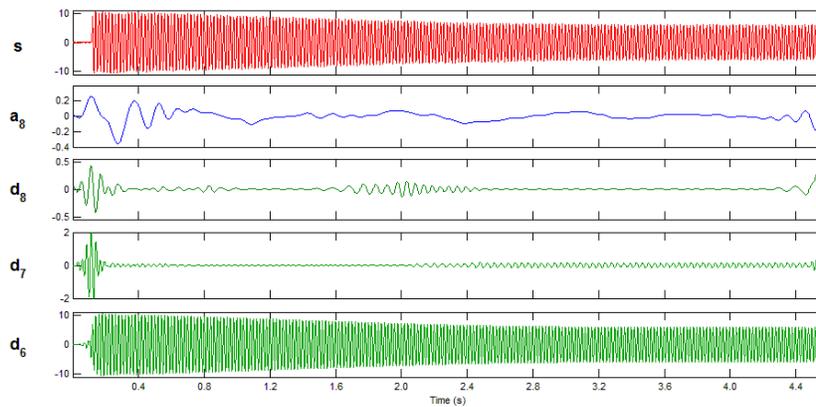
Barras 1 y 2 rotas



Barras 1 y 3 rotas



Barras 1 y 5 rotas



9 Barras rotas consecutivas

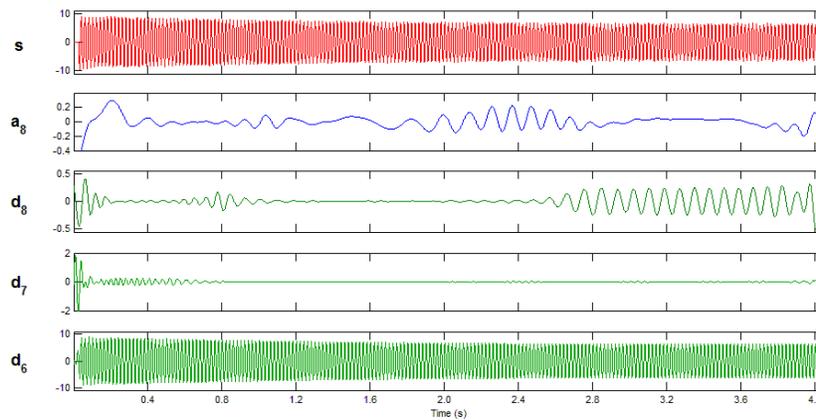
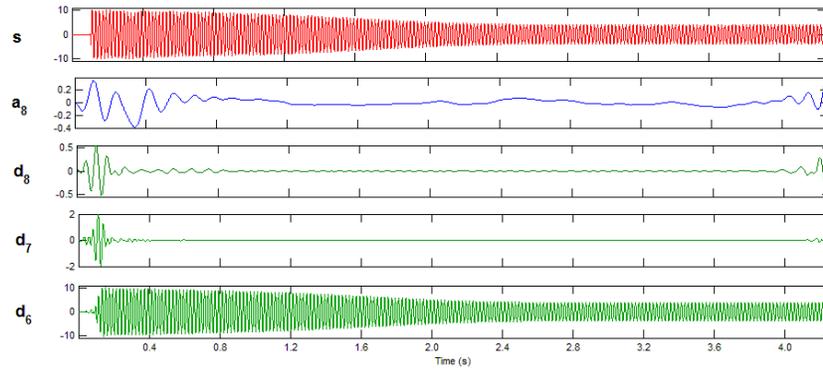


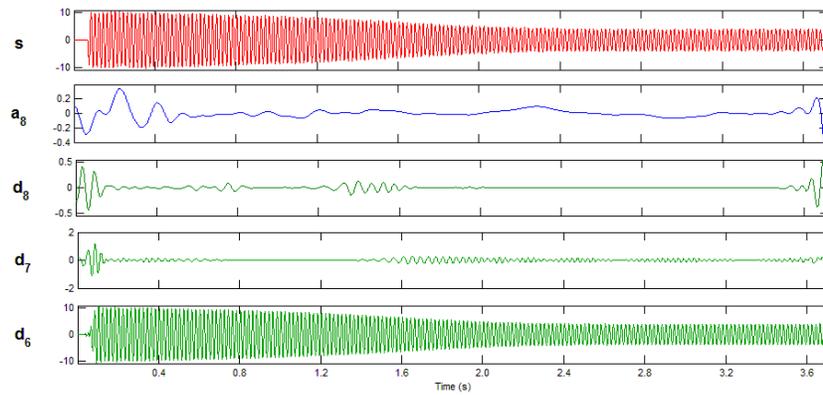
Figura 66. Aplicación de la DWT a corriente de motor a plena carga con diferentes rotores

- Al 65% de la carga

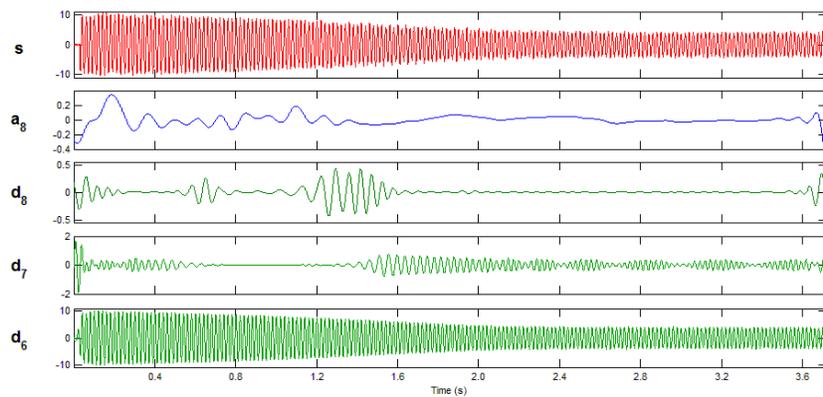
Rotor sano



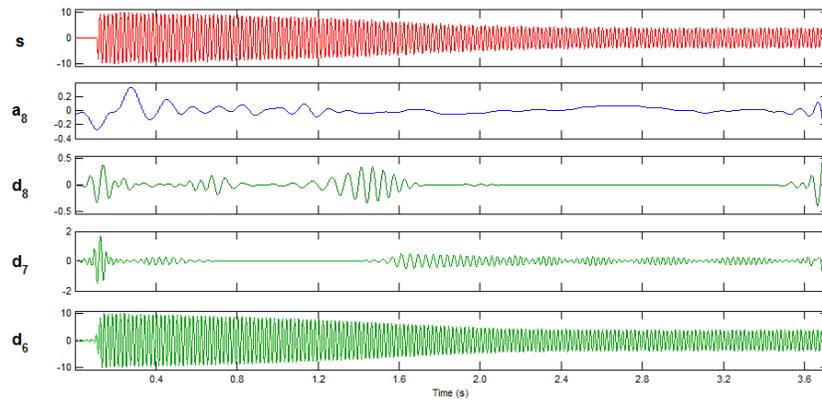
Barra 1 rota



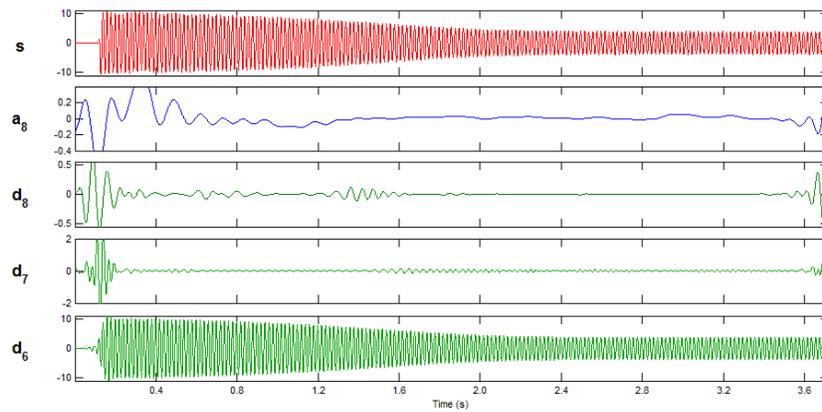
Barras 1 y 2 rotas



Barras 1 y 3 rotas



Barras 1 y 5 rotas



9 Barras rotas consecutivas

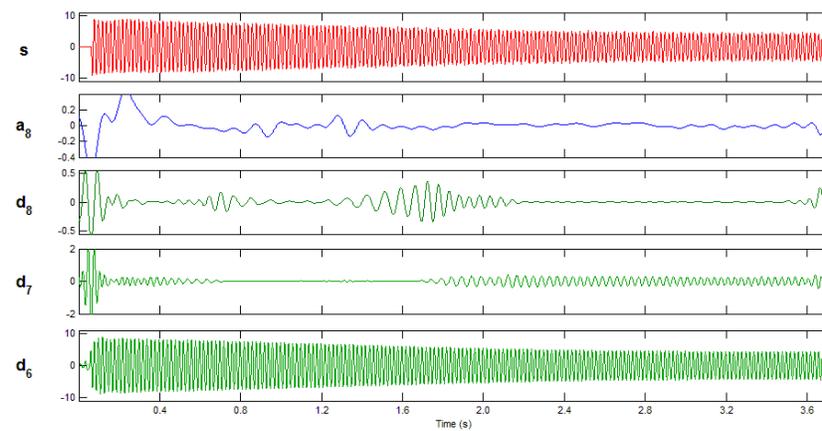
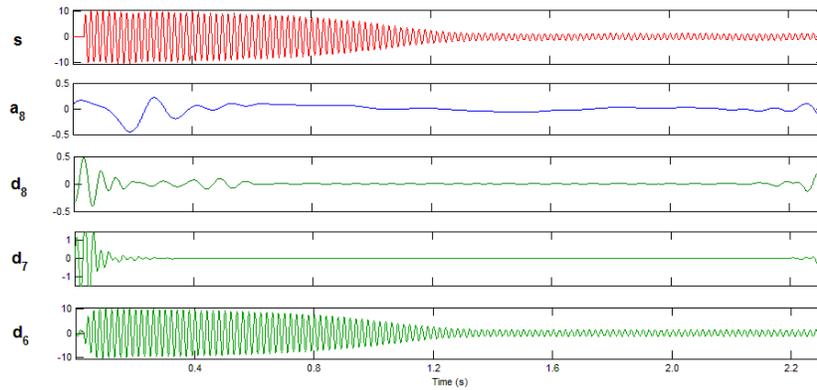


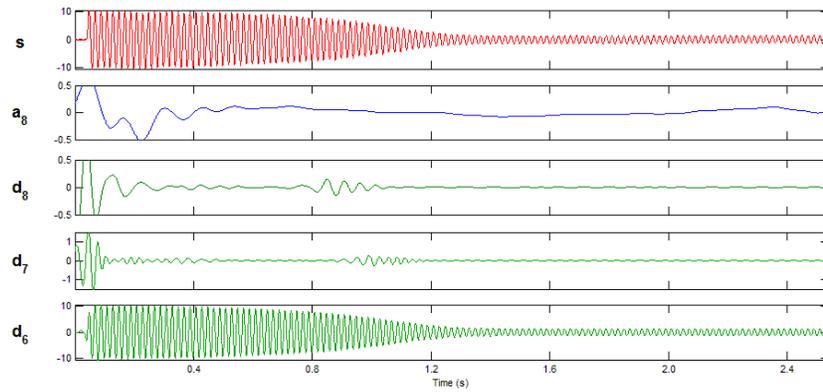
Figura 67. Aplicación de la DWT a corriente de motor al 65% de la carga con diferentes rotores

- Sin carga

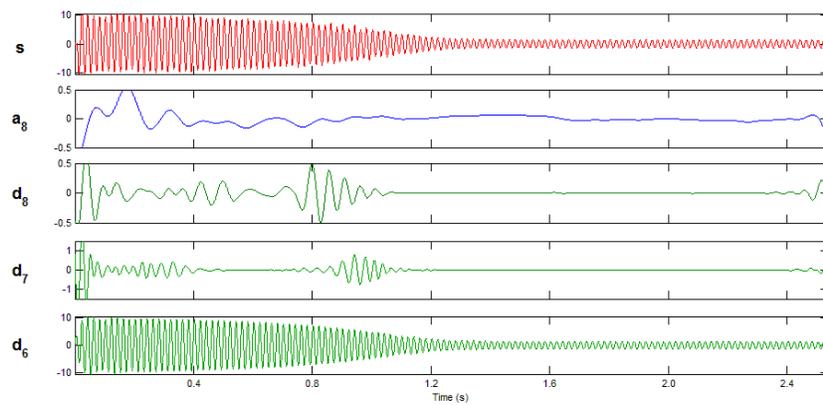
Rotor sano



Barra 1 rota



Barras 1 y 2 rotas



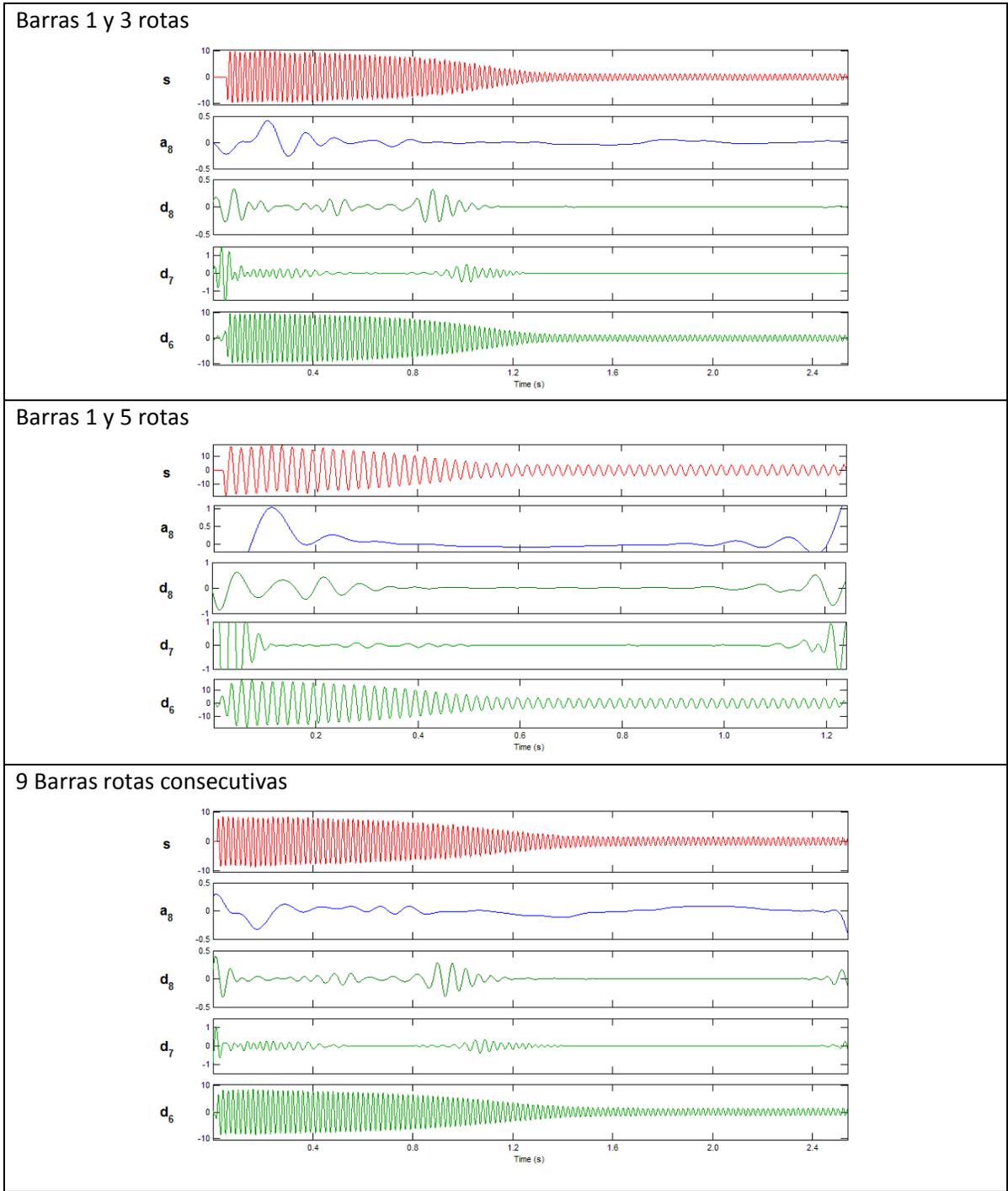


Figura 68. Aplicación de la DWT a corriente de motor sin carga con diferentes rotores

A diferencia del MCSA, en las gráficas anteriores se puede observar la existencia de un patrón de fallo en todos los casos estudiados. Algunas conclusiones de esta etapa son:

- Cuando el rotor está sano, en las bandas de frecuencia d7, d8 y a8 no se observa ninguna anomalía en su comportamiento.

- Con los rotores que tienen barra/s rotas se observa un patrón en las bandas d7, d8 y a8 que se comportan como una especie de distorsiones de la señal. Estas distorsiones se deben a que debido al aumento de la velocidad del motor desde 0 hasta su velocidad nominal, el armónico lateral inferior se comporta como se explicó en el punto 6.3, variando su frecuencia desde la frecuencia fundamental, hasta cero y luego volviendo a la frecuencia fundamental. Debido a este comportamiento, se puede observar como este armónico se traslada desde la banda d7 hasta la banda a8, y luego vuelve a aparecer en a8 y se desplaza descendientemente hasta d7.
- En todos los casos ensayados este patrón aparece, dándonos una mayor seguridad de la existencia del fallo (a diferencia del MCSA).
- A diferencia del MCSA y como una ventaja se tiene que, para este método, se puede realizar el ensayo sin carga (en vacío) lo cual no se puede realizar con el método clásico, debido a que al ser la velocidad nominal tan cercana a la velocidad de sincronismo, el deslizamiento sería muy pequeño, dando como resultado que los armónicos laterales característicos estén muy cerca del armónico fundamental, siendo difícil su observación.
- Otra ventaja de este método es que el costo computacional requerido es menor que si se utiliza una herramienta continua, como por ejemplo la CWT (Continuous Wavelet Transform).
- Una desventaja de este método sería que el resultado no es tan intuitivo a comparación de una herramienta como la CWT o la STFT (Short Time Fourier Transform).

9.3. Ensayo experimental: Análisis de Ruido

Como un análisis adicional y experimental, se utilizó una aplicación de android para grabar el ruido que produce el motor en funcionamiento con distintos rotores. Se debe tener en cuenta que para este ensayo no se utilizó un micrófono de laboratorio debidamente calibrado ni el ambiente adecuado, así que los resultados obtenidos son puramente referenciales.

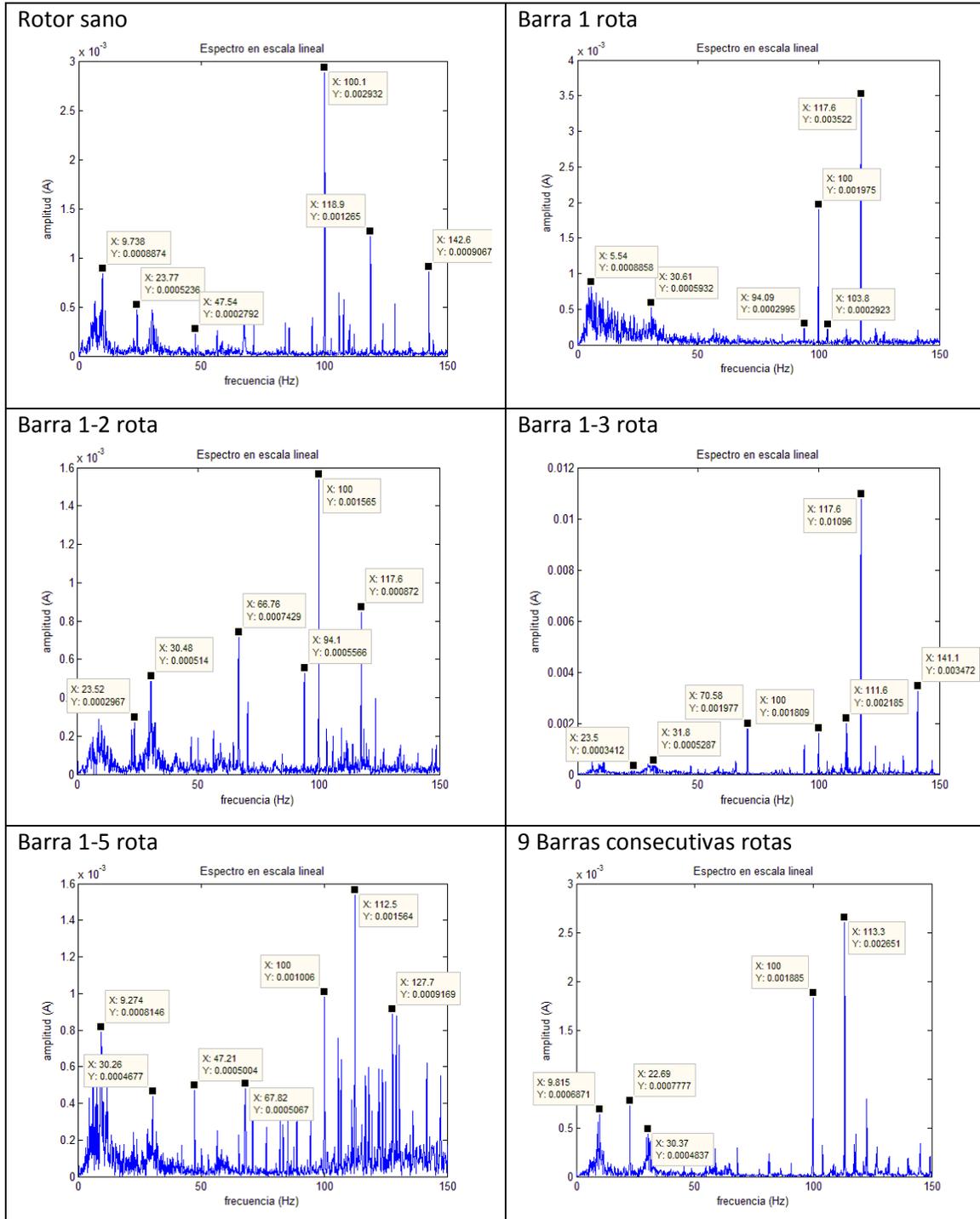


Figura 69. Espectros de Fourier del análisis de Ruido del motor con distintas características a plena carga

10. Conclusiones

- Se demostró que la carga a la que esté sometida el motor influirá en los resultados obtenidos, utilizando el método de análisis espectral de corrientes (MCSA).
- En los ensayos realizados se pudo verificar la problemática del método de análisis espectral de corrientes (MCSA) con respecto a la existencia de barras rotas no adyacentes, observándose que, bajo ciertas circunstancias, se pueden enmascarar estas fallas (armónicos laterales) dando un diagnóstico erróneo sobre el estado del motor.
- La Transformada Discreta Wavelet (DWT) es una herramienta tiempo-frecuencia que no requiere un gran costo computacional para el procesamiento de señales, lo que la hace una herramienta atractiva para diagnosticar la existencia de barras rotas en un motor eléctrico de inducción.
- Esta herramienta se comporta como un filtro para ciertas bandas de frecuencia, en donde se puede observar la aparición de un patrón de fallo que se caracteriza por desplazarse desde bandas inferiores hasta superiores (d7 hasta a8 y luego descendientemente).
- En todos los casos ensayados este patrón aparece, dándonos una mayor seguridad de la existencia del fallo (a diferencia del MCSA), aunque no permite identificar la posición de las barras rotas.
- A diferencia del MCSA y como una ventaja se tiene que, para este método, se puede realizar el ensayo sin carga (en vacío) lo cual no se recomienda realizar con el método clásico, debido a que al ser la velocidad nominal tan cercana a la velocidad de sincronismo, el deslizamiento sería muy pequeño, dando como resultado que los armónicos laterales característicos estén muy cerca del armónico fundamental, siendo difícil su observación.
- Una desventaja de este método sería que el resultado no es tan intuitivo a comparación de una herramienta como la CWT (Continuous Wavelet Transform) o la STFT (Short Time Fourier Transform), requiriendo de un mayor conocimiento y entrenamiento para realizar un diagnóstico adecuado.
- Se recomienda trabajar con ambas técnicas, ya que se puede dar un diagnóstico más certero, evitando los posibles diagnósticos falsos (falso positivo o negativo). Cuando aparece el patrón de fallo en régimen permanente (utilizando el método MCSA) se recomienda que se realice una prueba en régimen transitorio (arranque), para el caso de este trabajo utilizando la DWT. Cabe resaltar que existen otras herramientas tiempo-frecuencia que también pueden ser aplicadas.
- El análisis de ruido no ha mostrado un patrón característico fiable, pero se puede continuar con esta técnica que no ha sido aplicada para el diagnóstico de este fallo en condiciones de laboratorio, con sensores y ambiente adecuados.

Futuros Trabajos

Seguir estudiando y desarrollando el diagnóstico de barras rotas no adyacentes utilizando herramientas tiempo-frecuencia más sofisticadas, como la CWT (Continuous Wavelet Transform).

Extensión de estas técnicas de diagnóstico a otras fallas eléctricas en el rotor, como por ejemplo las excentricidades.

Aplicar el análisis de ruido a nivel más detallado para diagnosticar la existencia de barras rotas y otras fallas.

Aplicación de estas técnicas de diagnóstico en el ámbito industrial.

Bibliografía

- [1] "Current signature analysis to detect induction motor faults", Thomson, W.T., Robert Gordon Univ., Aberdeen, UK, Fenger, M.
- [2] Mantenimiento basado en la confiabilidad – Mourbray
- [3] Fundamentos de Ingeniería del Mantenimiento – Vicente Macián
- [4] Técnicas para el Mantenimiento y diagnóstico de máquinas eléctricas rotativas -
- [5] Máquinas eléctricas rotativas – InfoPlc
- [6] Diagnóstico y corrección de fallos de componentes mecánicos – Antonio José Besa
- [7] Nuevos métodos de diagnosis de Excentricidad y otras asimetrías rotóricas en máquinas eléctricas de inducción a través del análisis de la corriente estatórica - Rubén Puche Panadero
- [8] Detección de barras rotas en motores de inducción utilizando SMCSA (Square Motor Current Signature Analysis), David Alejandro Fernández Tavitas, Corporación Mexicana de Investigación en Materiales
- [9] Influence of Nonconsecutive Bar Breakages in Motor Current Signature Analysis for the diagnosis of Rotor Faults in Induction Motors.
- [10] Apuntes de clase de Mantenimiento de Máquinas e Instalaciones Eléctricas UPV – José Antonino
- [11] Application of advanced signal processing techniques to the diagnostic of induction motors – José Antonino Daviu
- [12] Mantenimiento Industrial - Belén Muñoz Abella, Universidad Carlos III de Madrid
- [13] Motores de Corriente Alterna – Andrés de Vandelvira
- [14] Introducción a la Transformada Wavelet – Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional del Centro, Buenos Aires.

Anexo 1: Transformada de Fourier

De [14] tenemos:

Es una herramienta matemática que se puede aplicar a cualquier señal periódica y con esta transformada, se puede representar la misma señal temporal en dominio frecuencial, dándonos la suficiente información que será más fácil de entender y de donde podremos obtener datos más importantes.

Matemáticamente tendríamos, dada una señal periódica $f(t)$ de periodo T:

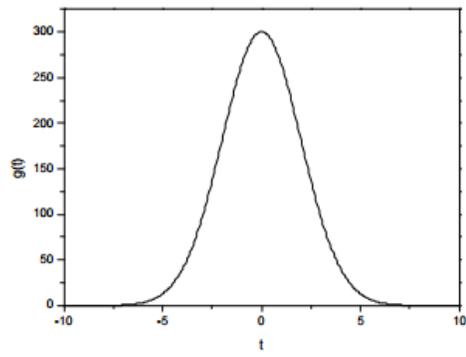
$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{p=1}^{\infty} a_p \cos \omega_p t + \sum_{p=1}^{\infty} b_p \sin \omega_p t$$
$$\text{con: } \begin{cases} \omega_p = p \frac{2\pi}{T} & p = 0, 1, \dots, \infty \\ a_p = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos \omega_p t dt & a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt \\ b_p = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin \omega_p t dt \end{cases}$$

Limitaciones de la Transformada de Fourier

La Transformada de Fourier es ampliamente utilizada en el procesamiento y análisis de señales y con resultados satisfactorios en los casos en que estas señales son periódicas y lo suficientemente regulares, pero no ocurre lo mismo para el análisis de señales cuyo espectro varía con el tiempo (señales no estacionarias). Tomando el caso en el que la función f a descomponer es una señal dependiente del tiempo, puede decirse que las funciones de la base de Fourier son de duración infinita en el tiempo, pero locales en frecuencia. La Transformada de Fourier detecta la presencia de una determinada frecuencia pero no brinda información acerca de la evolución en el tiempo de las características espectrales de la señal. Muchos aspectos temporales de la señal, tales como el comienzo y el fin de una señal finita y el instante de aparición de una singularidad en una señal transitoria, no pueden ser analizados adecuadamente por el análisis de Fourier. Para los casos de señales no estacionarias y transitorias se utiliza generalmente la Transformada de Fourier con Ventana.

Transformada de Fourier con Ventana

Con la Transformada de Fourier con Ventana se logra una mejor localización de la aparición de una singularidad en una señal. Pero solo se conocerá en qué intervalo de tiempo se produce la singularidad, debido a que la localización depende del ancho elegido para la función ventana. Además, los eventos no podrán ser resueltos si aparecen muy cerca unos de otros, ya que no será posible distinguir diferentes comportamientos dentro de una misma amplitud de ventana.



Utilizando esta ventana se puede “obligar” a hacer periódica a una señal no periódica.

Anexo 2: Transformada Discreta Wavelet

De [14] tenemos:

Introducción

La Transformada Wavelet es una herramienta matemática desarrollada a mediados de los años 80. Esta herramienta es eficiente para el análisis local de señales no estacionarias y de rápida transitoriedad y, al igual que la Transformada de Fourier con Ventana, mapea la señal en una representación de tiempo-escala. El aspecto temporal de las señales es preservado. La diferencia está en que la Transformada Wavelet provee análisis de multiresolución con ventanas dilatadas. El análisis de las frecuencias de mayor rango se realiza usando ventanas angostas y el análisis de las frecuencias de menor rango se hace utilizando ventanas anchas.

Las Wavelets, que son funciones bases de la Transformada Wavelet, son generadas a partir de una función Wavelet básica, mediante traslaciones y dilataciones. Estas funciones permiten reconstruir la señal original a través de la Transformada Wavelet inversa y no es solamente local en tiempo, sino también en frecuencia.

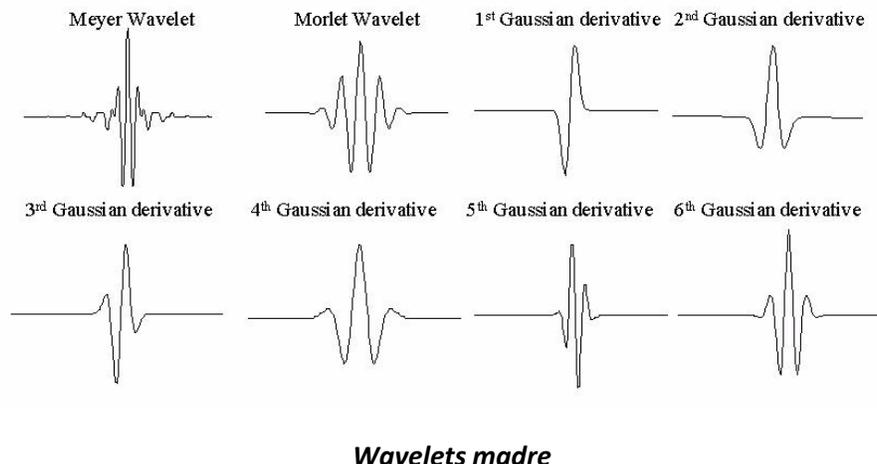
Dentro de los usos de esta poderosa herramienta podemos nombrar, además del análisis local de señales no estacionarias, el análisis de señales electrocardiográficas, sísmicas, de sonido, de radar, así como también es utilizada para la compresión y procesamiento de imágenes y reconocimiento de patrones.

Bases Wavelets

Las wavelets son generadas a partir de la wavelet madre $\psi(t)$ por traslaciones y dilataciones discretas.

$$\psi_{i,k} = 2^{\frac{i}{2}}\psi(2^{-i}t - k)$$

Existen distintas familias Wavelets que tienen características específicas.



Transformada Wavelet

De manera muy general, la Transformada Wavelet de una función $f(t)$ es la descomposición de $f(t)$ en un conjunto de funciones $\psi_{s,t}(t)$, que forman una base y son llamadas las "Wavelets". La Transformada Wavelet se define como:

$$W_f(s, \tau) = \int f(t) \psi_{s,\tau}^*(t) dt.$$

Las Wavelets son generadas a partir de la traslación y cambio de escala de una misma función wavelet $\psi(t)$, llamada la "Wavelet madre", y se define como:

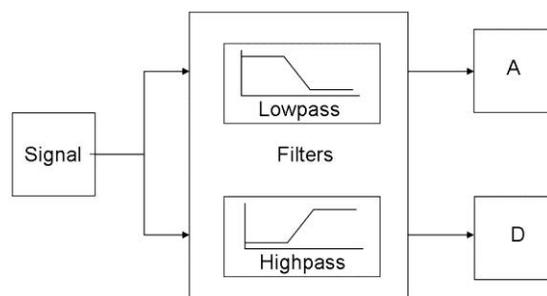
$$\psi_{s,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right),$$

donde s es el factor de escala, y τ es el factor de traslación.

Las wavelets $\psi_{s,t}(t)$ generadas de la misma función wavelet madre $\psi(t)$ tienen diferente escala s y ubicación τ , pero tienen todas la misma forma. Se utilizan siempre factores de escala $s > 0$. Las Wavelets son dilatadas cuando la escala $s > 1$, y son contraídas cuando $s < 1$. Así, cambiando el valor de s se cubren rangos diferentes de frecuencias. Valores grandes del parámetro s corresponden a frecuencias de menor rango, o una escala grande de $\psi_{s,t}(t)$. Valores pequeños de s corresponden a frecuencias de mayor rango o una escala muy pequeña de $\psi_{s,t}(t)$.

La Transformada Wavelet Discreta (DWT)

Sirve para agilizar el proceso sin requerir de demasiado costo computacional, y además se ha encontrado que la eficiencia se puede mantener utilizando escalas diádicas (escalas y posiciones en potencias de 2). Una manera de implementar la DWT es utilizando filtros, lo que lleva a la transformada rápida de wavelets; una caja a la que entra una señal y de la que salen coeficientes.

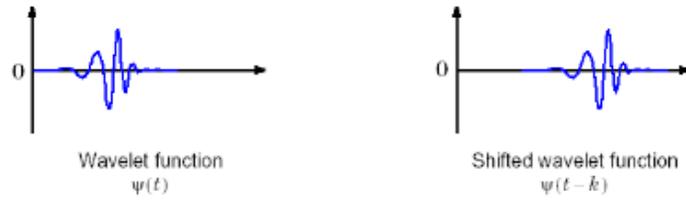


Funcionamiento básico de la DWT

El funcionamiento de la transformada wavelet consta de dos características.

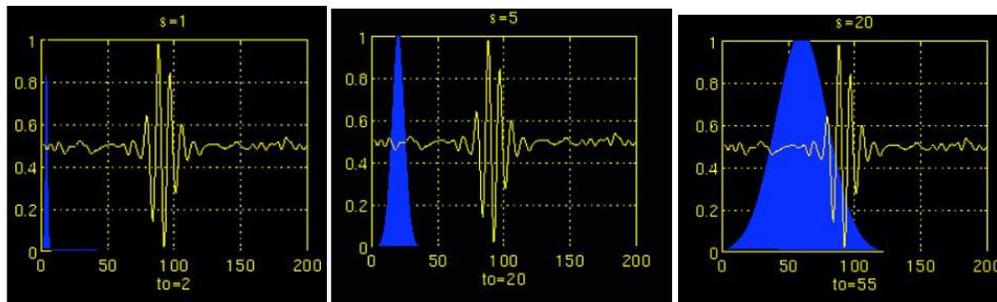
Traslaciones

La wavelet madre se traslada a lo largo de la señal estudiada.



Dilataciones

La wavelet madre se dilata para cada interacción de la transformada.

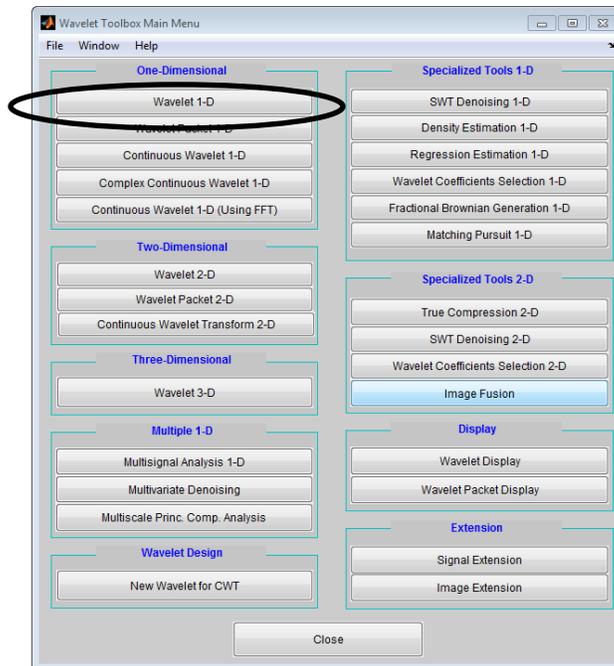


Es decir, la señal temporal se muestra empleando versiones (wavelets) del wavelet madre (dilatados y trasladados) estudiando punto a punto para qué dilataciones y traslaciones la señal y el wavelet son más similares.

Anexo 3: Toolbox Wavelet – Matlab

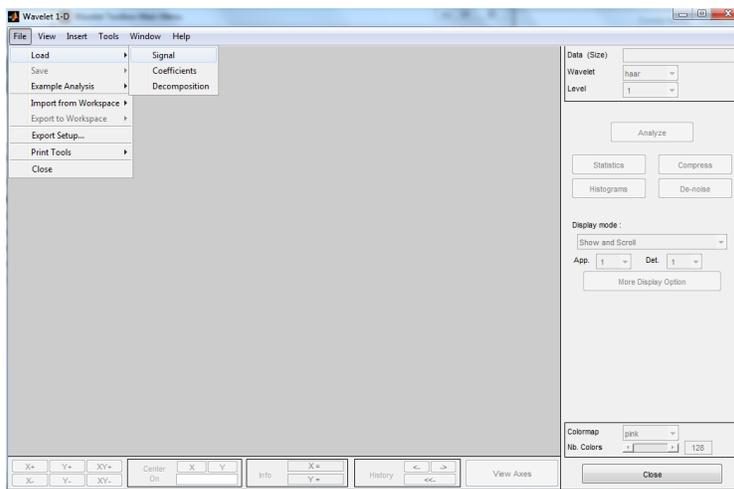
En el presenta trabajo se trabajó con la versión Matlab R2012a. Para poder acceder a este GUI en la pantalla de comandos se teclea wavemenu.

El Comando wavemenu abre un menú para acceder a las diversas herramientas gráficas proporcionadas en el software Wavelet Toolbox.



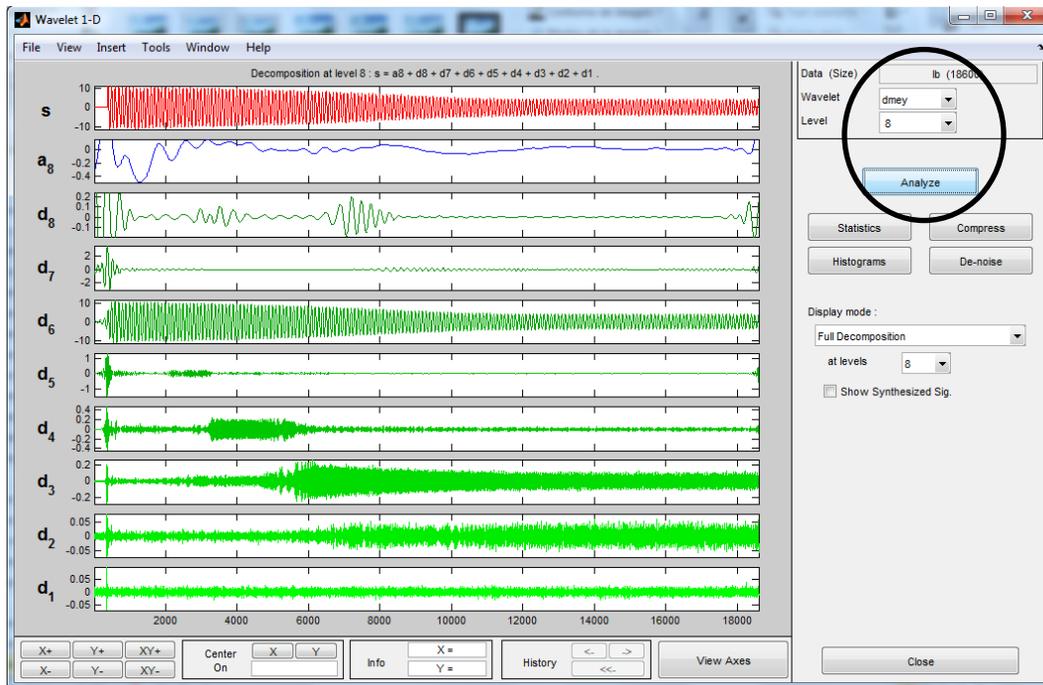
Menú Wavelet Toolbox – Matlab

La herramienta utilizada para el análisis de las señales transitorias fue: Wavelet 1-D.



Wavelet 1-D – Matlab

En este menú se carga una señal y se elige los niveles que se desean procesar la señal (bandas de frecuencia) y la familia wavelet. Luego se analiza las señales con esta herramienta y obtenemos los niveles de banda elegidos. Para el caso de la siguiente figura podemos observar que se eligió el filtro dmey (de meyer) y ocho niveles de descomposición. Se utilizó esta familia wavelet debido a su buen comportamiento como filtro y los ocho niveles de descomposición dependen de la información más relevante que necesitamos, que para el caso de este trabajo basta con estos niveles.



Aplicación de DWT utilizando el toolbox Wavelet – Matlab

Para mayor información se puede acceder al menú de ayuda del toolbox o a la página web de Mathworks.