



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE ANÁLISIS DEL FLUJO MAGNÉTICO DE DISPERSIÓN PARA LA DETECCIÓN DE ASIMETRÍAS ROTÓRICAS EN MÁQUINAS DE INDUCCIÓN DE ROTOR BOBINADO

AUTOR: JORGE SINTES FERNÁNDEZ

TUTOR: JOSÉ ALFONSO ANTONINO DAVIU

COTUTOR: PEDRO LLOVERA SEGOVIA

Curso Académico: 2018-19



AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer, en primer lugar, a mi familia por el apoyo incondicional prestado, especialmente durante los años del grado. También agradezco a Ana, Sergio, José Pablo, Ana M. y Juan, que día a día me soportan y apoyan. Sin su ayuda, nada de esto habría sido posible.

Además, agradezco la ayuda de Mireia, Ana y Yasmina, y todos sus consejos estilísticos.

Por último, agradecer a mi tutor, José Alfonso, la atención y ayuda prestadas durante el desarrollo de la beca de colaboración, así como en la elaboración de este trabajo.

RESUMEN

El objeto de este trabajo es estudiar la efectividad de las técnicas basadas en análisis de flujo de dispersión para la detección de asimetrías en el devanado del rotor en máquinas asíncronas de rotor bobinado. Estas máquinas se emplean en procesos industriales con requerimientos de par de arranque elevados y es frecuente encontrarlas en el rango de altas potencias. La avería que se considera en el proyecto es una de las más habituales en este tipo de máquinas y su presencia puede acarrear consecuencias muy negativas para la máquina.

El trabajo se centra en el análisis del flujo de dispersión durante el arranque de la máquina. A tal fin se emplean herramientas especiales de análisis de señal (transformadas tiempo-frecuencia) y se relacionan los resultados de la aplicación de las mismas con el nivel de avería en la máquina.

Para el desarrollo del proyecto, se realizan múltiples ensayos con máquinas de laboratorio en los que se registra durante el arranque la señal de fuerza electromotriz inducida en una bobina externa, situada en diferentes posiciones de la carcasa de la máquina, para diferentes niveles de avería en el rotor. Posteriormente, estas señales se analizan con una herramienta tiempo-frecuencia, la transformada wavelet, y se interpretan los resultados obtenidos, evaluando la fiabilidad de cada tipo de análisis.

Palabras clave: Máquinas Asíncronas, Motor de Inducción de Rotor Bobinado, Mantenimiento Predictivo, Asimetrías Rotóricas, Flujo de Dispersión, Transformada Wavelet, Régimen Transitorio.

RESUM

L'objecte d'aquest treball és estudiar la efectivitat de les tècniques basades en anàlisi de flux de dispersió per a la detecció d'asimetries en el debanat del rotor en màquines asíncrones de rotor bobinat. Aquestes màquines s'utilitzen en processos industrials amb requeriments de par d'arrancada elevats i és freqüent trobar-les en el rang d'altres potències. L'avaria considerada en el projecte és una de les més habituals en aquest tipus de màquines i la seua presència pot comportar conseqüències molt negatives per a la màquina.

El treball es centra en l'anàlisi del flux de dispersió en l'arrancada de la màquina. Així, s'utilitzen ferramentes especials d'anàlisi de senyal (transformades temps-freqüència) i es relacionen els resultats de l'aplicació de les mateixes amb el nivell d'avaria de la màquina.

Per al desenvolupament del projecte, es realitzen múltiples assajos amb màquines de laboratori en els quals es registra en l'arrancada la senyal de força electromotriu induïda en una bobina externa, situada en diferents posicions de la carcassa de la màquina. Posteriorment, aquestes senyals s'analitzen amb una ferramenta temps-freqüència, la transformada wavelet, i s'interpreten els resultats obtinguts, avaluant la fiabilitat de cada tipus d'anàlisi.

Paraules clau: Màquines Asíncrones, Motor de Inducció de Rotor Bobinat, Manteniment Predictiu, Asimetries Rotòriques, Flux de Dispersió, Transformada Wavelet, Regim Transitori.

ABSTRACT

The purpose of this work is to study the effectiveness of the techniques based upon the dispersion flux analysis for detecting asymmetries in the rotor coil in asynchronous wound rotor machines. These machines are used in industrial processes with high starting torque requirements. They are often found in the high-power range. The fault considered in the project is one of the most common in this type of machines, and its presence might have very negative consequences for the machine.

The work focuses on the dispersion flux analysis during the start-up of the machine. Special signal analysis tools (time-frequency transforms) are used and their results will be related to the state of the machine.

For the development of the project, multiple tests are developed with laboratory machines in which the electromotive force induced in an external coil is registered during the start-up of the machine, locating the coil in different positions of the machine's casing, as well as altering its level of damage. Afterwards, these signals are analyzed with a time-frequency tool, the wavelet transform, and the results are interpreted, evaluating the reliability of each type of analysis.

Keywords: Asynchronous Machines, Winding Rotor Induction Motor, Predictive Maintenance, Rotor Asymmetries, Dispersion Flux, Wavelet Transform, Transitory Regime.

ÍNDICES

Índice de la Memoria

1. Introducción	11
1.1. Importancia y Evolución del Mantenimiento en Máquinas Eléctricas	11
2. El Mantenimiento Predictivo en el Motor de Inducción de Rotor Bobinado	12
2.1. Descripción de los Componentes del Motor	12
2.2. Principio de Operación	13
2.3. Defectos Habituales en los Motores de Inducción	17
2.3.1. Defectos en los Rodamientos.....	18
2.3.2. Defectos en el Estátor	19
2.3.3. Defectos en el Núcleo Magnético	20
2.3.4. Asimetrías Rotóricas.....	20
2.4. Técnicas Actuales de Diagnóstico de Fallos	22
2.4.1. Termografía Infrarroja.....	22
2.4.2. Análisis de Vibraciones	22
2.4.3. Análisis de Corrientes	23
3. Análisis del Flujo de Dispersión	26
3.1. Fundamento Teórico	26
3.1.1. Flujo Axial	26
3.1.2. Flujo Radial	28
3.2. Análisis en Régimen Permanente	29
3.2.1. Indicadores de Avería en Régimen Permanente	29
3.3. Análisis en Régimen Transitorio	32
3.3.1. Indicadores de Avería en Régimen Transitorio	33
3.3.2. Transformadas Tiempo-Frecuencia.....	34
3.3.2.1. Transformada de Fourier de Tiempo Reducido	34
3.3.2.2. Transformada Wavelet Continua	37
3.3.2.3. Transformada Wavelet Discreta.....	39

4. Ensayos Experimentales.....	43
4.1. Elementos del Ensayo.....	43
4.1.1. Bancada	43
4.1.2. Motor Ensayado y Carga Arrastrada	44
4.1.3. Sondas y Osciloscopio	47
4.2. Metodología de Ensayo	48
4.3. Metodología de Análisis	50
5. Análisis y Resultados	51
5.1. Sonda en Posición A	51
5.1.1. Sonda en Posición A: Escalón 0	52
5.1.2. Sonda en Posición A: Escalón 1	53
5.1.3. Sonda en Posición A: Escalón 5	54
5.1.4. Sonda en Posición A: Escalón 9	55
5.2. Sonda en Posición B	57
5.2.1. Sonda en Posición B: Escalón 0	57
5.2.2. Sonda en Posición B: Escalón 1	58
5.2.3. Sonda en Posición B: Escalón 5	58
5.2.4. Sonda en Posición B: Escalón 9	59
5.3. Sonda en Posición C	61
5.3.1. Sonda en Posición C: Escalón 0	61
5.3.2. Sonda en Posición C: Escalón 1	62
5.3.3. Sonda en Posición C: Escalón 5	62
5.3.4. Sonda en Posición C: Escalón 9	63
6. Resumen y Conclusiones.....	65
7. Bibliografía.....	68



Índice de Tablas

Tabla 1 Clases Térmicas de los Aislantes [13]	19
Tabla 2 Componentes Asimetría Rotórica en el Análisis en Régimen Permanente	31
Tabla 3 Resultados Indicadores de Fallo en la Posición A	56
Tabla 4 Resultados Indicadores de Fallo en la Posición B	60
Tabla 5 Resultados Indicadores de Fallo en la Posición C	64
Tabla 6 Coeficientes de Fallo: Carga Moderada	65
Tabla 7 Coeficientes de Fallo: Carga Alta	65

Índice de Ilustraciones

<i>Fig. 1 Despiece Motor Rotor Bobinado [1]</i>	13
<i>Fig. 2 Curva característica Par-Velocidad</i>	14
<i>Fig. 3 Arranque motor rotor bobinado variando resistencia rotórica [3]</i>	15
<i>Fig. 4 Rotor Bobinado Motor Industrial [5]</i>	16
<i>Fig. 5 Detalle Anillos Rozantes y Escobillas Alternador [6]</i>	16
<i>Fig. 6 Encuesta Thomson y Fenger</i>	17
<i>Fig. 7 Encuesta EPRI</i>	17
<i>Fig. 8 Sección rodamiento bolas</i>	18
<i>Fig. 9 Motor Rotor Bobinado en Industria</i>	21
<i>Fig. 10 Sistema de Escobillas-Anillos Rozantes</i>	21
<i>Fig. 11 Análisis Termográfico del Sistema de Escobillas-Anillos Rozantes</i>	21
<i>Fig. 12 Armónicos Laterales en el Espectro de Frecuencias de una Señal de Corriente [7]</i>	25
<i>Fig. 13 STFT de la Corriente de Arranque con Asimetría Rotórica: a. Alta b. Moderada c. Máquina Sana [15]</i>	25
<i>Fig. 14 Sistema de Referencia Rotor - Estator</i>	27
<i>Fig. 15 Posiciones A, B y C Sonda de Flujo</i>	28
<i>Fig. 16 Desequilibrio en las Corrientes del Rotor Causado por la Rotura de una Barra en Jaula de Ardilla [22]</i>	30
<i>Fig. 17 Esquema de Operación. (a) Máquina Sana. (b) Rotor Defectuoso. [20]</i>	30
<i>Fig. 18 Evolución Frecuencias Características de Fallo durante el Arranque</i>	33
<i>Fig. 19 STFT Usada para Analizar una Señal de Audio</i>	35
<i>Fig. 20 a. Función Ventana Estrecha. b. STFT de la Señal con esta Función Ventana [23]</i>	36
<i>Fig. 21 c. Función Ventana Ancha. d. STFT de la Señal con esta Función Ventana [23]</i>	36
<i>Fig. 22 Transformada Wavelet Continua de una Señal [23]</i>	38
<i>Fig. 23 Esquema de Descomposición DWT [23]</i>	40
<i>Fig. 24 Proceso de filtrado desarrollado por la DWT</i>	41
<i>Fig. 25 Descomposición DWT Señal Corriente. Máquina Sana</i>	42
<i>Fig. 26 Descomposición DWT Señal Corriente. Rotor con 1 Barra Rota</i>	42

<i>Fig. 27 Imagen del Montaje en el Laboratorio</i>	43
<i>Fig. 28 Placa de Características del Motor Ensayado.....</i>	44
<i>Fig. 29 Reostato de Arranque y Resistencia Variable Intercalada.....</i>	45
<i>Fig. 30 Banco de Resistencias</i>	46
<i>Fig. 31 Sonda Utilizada en los Ensayos. Cotas en mm</i>	47
<i>Fig. 32 Registro de la Señal en Posición C.....</i>	49
<i>Fig. 33 Evolución del Flujo de Dispersión Axial durante el Arranque. Posición A: Escalón 0</i>	52
<i>Fig. 34. Descomposición DWT. Posición A: Escalón 0. Carga Moderada.....</i>	52
<i>Fig. 35 Descomposición DWT Posición A: Escalón 0. Carga Elevada</i>	52
<i>Fig. 36 Descomposición DWT. Posición A: Escalón 1. Carga Moderada.....</i>	53
<i>Fig. 37 Descomposición DWT. Posición A: Escalón 1. Carga Elevada</i>	53
<i>Fig. 38 Descomposición DWT. Posición A: Escalón 5. Carga Moderada.....</i>	54
<i>Fig. 39 Descomposición DWT. Posición A: Escalón 5. Carga Elevada</i>	54
<i>Fig. 40 Descomposición DWT. Posición A: Escalón 9. Carga Moderada.....</i>	55
<i>Fig. 41 Descomposición DWT. Posición A: Escalón 9. Carga Elevada</i>	55
<i>Fig. 42 Evolución del Indicador de Fallo en la Posición A</i>	56
<i>Fig. 43 Evolución del Flujo de Dispersión Mixto durante el Arranque. Posición B: Escalón 0.....</i>	57
<i>Fig. 44 Descomposición DWT. Posición B: Escalón 0. Carga Elevada</i>	57
<i>Fig. 45 Descomposición DWT. Posición B: Escalón 1. Carga Elevada</i>	58
<i>Fig. 46 Descomposición DWT. Posición B: Escalón 5. Carga Elevada</i>	58
<i>Fig. 47 Descomposición DWT. Posición B: Escalón 9. Carga Moderada.....</i>	59
<i>Fig. 48 Evolución del Indicador de Fallo en la Posición B</i>	59
<i>Fig. 49 Evolución del Flujo de Dispersión Radial durante el Arranque. Posición C: Escalón 0</i>	61
<i>Fig. 50 Descomposición DWT. Posición C: Escalón 0. Carga Moderada.....</i>	61
<i>Fig. 51 Descomposición DWT. Posición C: Escalón 1. Carga Moderada</i>	62
<i>Fig. 52 Descomposición DWT. Posición C: Escalón 5. Carga Elevada</i>	62
<i>Fig. 53 Descomposición DWT. Posición C: Escalón 9. Carga Moderada</i>	63
<i>Fig. 54 Evolución del Indicador de Fallo en la Posición C.....</i>	63
<i>Fig. 55 Evolución Indicador de Fallo en las 3 Posiciones: Carga Baja.....</i>	66
<i>Fig. 56 Evolución Indicador de Fallo en las 3 Posiciones: Carga Alta</i>	66

MEMORIA

1. INTRODUCCIÓN

1.1. IMPORTANCIA Y EVOLUCIÓN DEL MANTENIMIENTO EN MÁQUINAS ELÉCTRICAS

Imaginarse la industria actual sin la utilización de máquinas eléctricas es sencillamente imposible; su uso está ampliamente extendido en todo tipo de campos. Además, con frecuencia estas máquinas se encuentran en el seno de sistemas de una gran complejidad y es necesario garantizar su correcto funcionamiento sin interrupciones. Por este motivo, el correcto mantenimiento de las máquinas eléctricas se vuelve de crucial importancia.

En el caso de procesos no críticos, en los que no es primordial el funcionamiento de la máquina en cuestión, el mantenimiento puede consistir simplemente en la reparación o sustitución de componentes tras la avería. Conocemos esto como **Mantenimiento Correctivo**.

No obstante, en los procesos industriales importantes, se suelen llevar a cabo planes de mantenimiento con una cierta periodicidad. Estos contienen operaciones tales como: limpieza de partes activas, sustitución de componentes susceptibles de fallo... Estos protocolos se conocen como **Mantenimiento Preventivo**, y suelen prolongar la vida útil de la máquina, reduciendo su probabilidad de fallo.

Cabe señalar que con esta metodología no estudiamos el estado real de la máquina, por lo que no se descarta del todo la posibilidad de que aparezca un fallo tras pocas horas de funcionamiento después de aplicar el mantenimiento.

Sin embargo, con las herramientas de análisis adecuadas, podemos estudiar los fallos más comunes en una máquina, desde su origen hasta el punto crítico, y de esta manera poder conocer el “estado de salud” de la máquina en cuestión, pudiendo así planificar las medidas correctivas necesarias mitigando las paradas no previstas por avería. Estos análisis, que se pueden realizar con técnicas no invasivas, es decir, se pueden emplear sobre equipos en funcionamiento, son lo que conocemos como **Mantenimiento Predictivo**.

2. EL MANTENIMIENTO PREDICTIVO EN EL MOTOR DE INDUCCIÓN DE ROTOR BOBINADO

El motor de inducción de rotor bobinado es un tipo de motor eléctrico asíncrono que, a diferencia del motor de jaula de ardilla convencional, permite alcanzar altos valores de par de arranque, con una demanda de corriente moderada durante dicho arranque y que también permite la regulación de velocidad, variando el valor de una resistencia externa conectada al bobinado del rotor. Actualmente no es muy común encontrar motores de rotor bobinado para aplicaciones que requieran control de velocidad, pues han quedado reemplazados por motores de inducción operados con variadores de frecuencia, por el abaratamiento de éstos y su mayor capacidad de regulación. Aun así, el motor de rotor bobinado sigue teniendo aplicación en situaciones que requieran un alto par de arranque, como se verá a continuación. En muchos casos, estas aplicaciones se sitúan en el rango de potencias muy elevadas.

2.1. DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL MOTOR

Antes de revisar el principio de operación de los motores eléctricos de inducción, conviene repasar brevemente los componentes que los integran (ver Figura 1):

- **Estátor:** devanado de 3 fases situado en las ranuras de una carcasa de láminas de acero. Consiste en bobinas dispuestas y conectadas de manera que cada fase forma un ángulo de 120° con las otras dos. Estas fases están formadas de devanados de hilo (motores de menor potencia) a base de conductores de cobre barnizados, o bien de conductores rígidos de cobre que forman las bobinas (devanado preformado) que se utilizan en motores más grandes.
- **Rotor:** núcleo cilíndrico compuesto por láminas de acero. Las bobinas se sitúan en ranuras practicadas en el núcleo, con un bobinado para cada fase, formando un ángulo de 120° entre ellas. El devanado del rotor debe tener el mismo número de pares de polos que el estátor. Cada bobina se conecta a un anillo rozante unido al eje del rotor. Mediante unas escobillas de carbono se conectan a unos terminales en la carcasa. Desde aquí se cortocircuitan las fases del rotor, permitiendo también la inserción de resistencias en serie.
- **Carcasa:** fabricada en acero fundido, sellada con tornillos. Suele tener tapas que permitan la inspección del interior del motor. Se usan rodamientos en el soporte del eje.

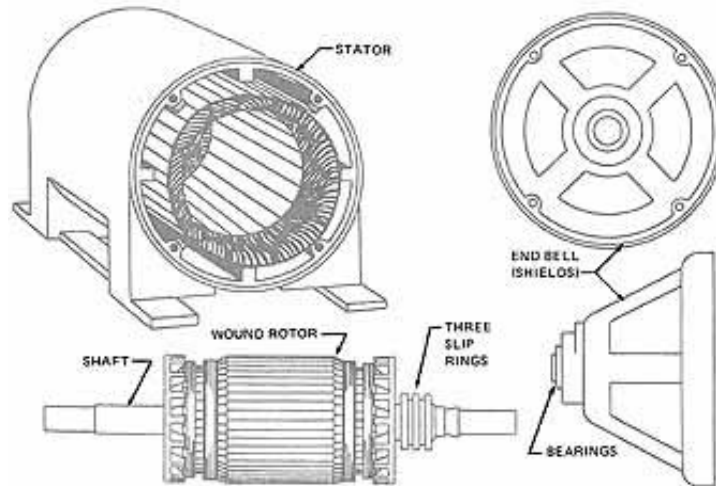


Fig. 1 Despiece Motor Rotor Bobinado [1]

2.2. PRINCIPIO DE OPERACIÓN

Al alimentar el devanado trifásico del estator con un sistema trifásico de tensiones se crea un campo magnético giratorio de módulo constante y velocidad uniforme. Esta es la denominada velocidad de sincronismo (n_s), fundamental a la hora de analizar el comportamiento de los motores eléctricos, que se calcula mediante:

$$n_s = \frac{60 \cdot f_{est}}{p} [rpm] \quad (2.1)$$

Donde f_{est} es la frecuencia de alimentación del estator y p el número de pares de polos de la máquina.

El flujo magnético concatenado por las bobinas del rotor (barras en los motores de rotor de jaula) será variable y, por tanto, tal como indica la Ley de Faraday-Lenz se inducirá en él fuerza electromotriz. Al cerrarse el circuito por las resistencias externas, estas fuerzas electromotrices provocarán la circulación de corrientes. Estas corrientes inducidas en el bobinado del rotor, al ser también trifásicas equilibradas, generarán un campo magnético giratorio que seguirá al del estator y que causará el giro del rotor en el mismo sentido de acuerdo con la Ley de Lenz. En los motores de jaula de ardilla el funcionamiento es similar.

La velocidad nominal de un motor de inducción (n_{rot}) suele encontrarse entre el 92 y el 99% de la velocidad de sincronismo. La velocidad de giro nunca podrá alcanzar la velocidad de sincronismo, puesto que en ese instante las bobinas del rotor dejarían de estar sometidas a variación de flujo, y por tanto no habría fuerza electromotriz inducida.

Una magnitud fundamental para describir el comportamiento de las máquinas eléctricas es el deslizamiento (s), el cual viene a medir la diferencia relativa entre la velocidad del rotor (n_{rot}) y la del campo magnético del estator (n_s):

$$s = \frac{n_s - n_{rot}}{n_s} \quad (2.2)$$

Así, en el momento inicial del arranque el deslizamiento será la unidad ($n_{rot} = 0$), mientras que en régimen permanente tendrá un valor cercano a cero (usualmente entre el 1% y el 4%). Si la máquina opera en vacío tendrá valores muy próximos al 0%.

La curva característica por excelencia de los motores de inducción, sean de jaula de ardilla o de rotor bobinado, es la curva Par-Velocidad: [2]

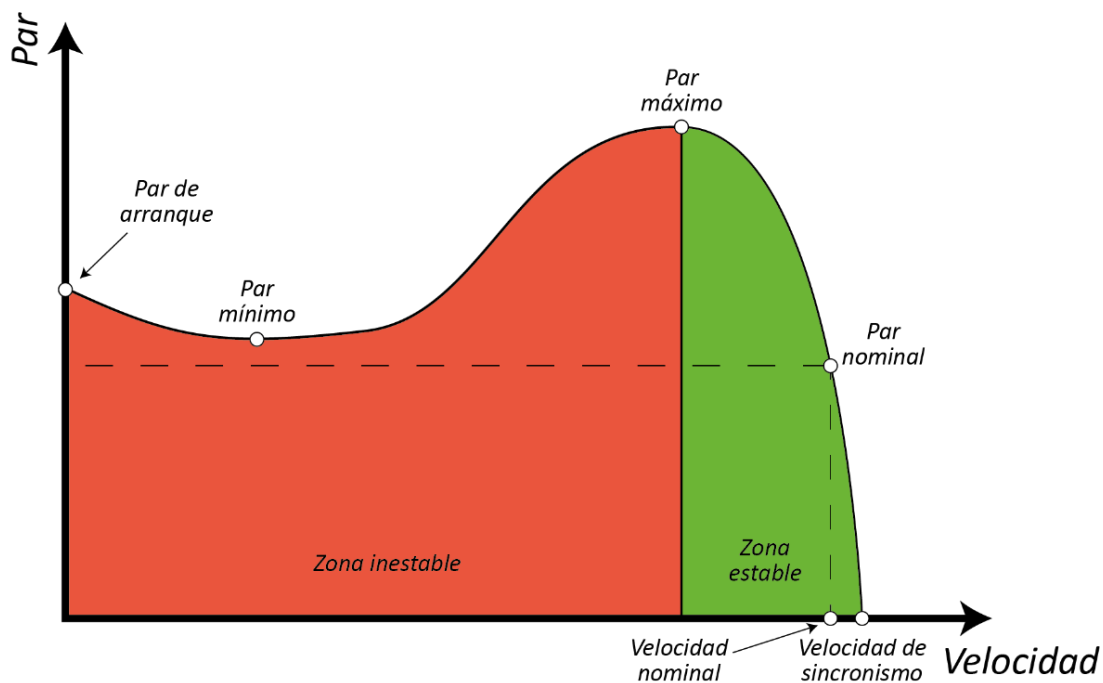


Fig. 2 Curva característica Par-Velocidad

Como se puede observar, la zona de trabajo de la máquina es la de velocidades muy próximas a la de sincronismo, y es donde la máquina entrega todo su rango de par. Pero ¿qué ocurre si el par resistente al que se somete la máquina es superior al par de arranque? En ese caso el motor no arrancará, pese a que en la zona estable sí pueda funcionar correctamente.

En los motores de rotor bobinado, como se ha comentado, es posible insertar resistencias externas en serie con el devanado del rotor. Así, en estos motores, al variar la resistencia rotórica, el máximo de la curva de par se desplaza hacia la izquierda, permitiendo aumentar de esta manera el par de arranque de la máquina. El procedimiento de arranque del motor es el siguiente:

En primer lugar, se conecta toda la resistencia externa disponible. Con las resistencias conectadas el factor de potencia del rotor es cercano a la unidad, por lo que su corriente estará casi en fase con la fuerza electromotriz inducida. Como consecuencia, los polos magnéticos del rotor se crean al mismo tiempo que los del estátor, lo que causa un par de arranque elevado. Además, el valor elevado de resistencia en la fase minimiza las corrientes en el rotor y, a su vez, la corriente demandada a la red. Según el motor acelera, se desconectan progresivamente resistencias hasta alcanzar la velocidad deseada. En la práctica este proceso se suele efectuar de forma automática haciendo uso de reostatos externos de arranque. La evolución del arranque se puede ver en la siguiente figura:

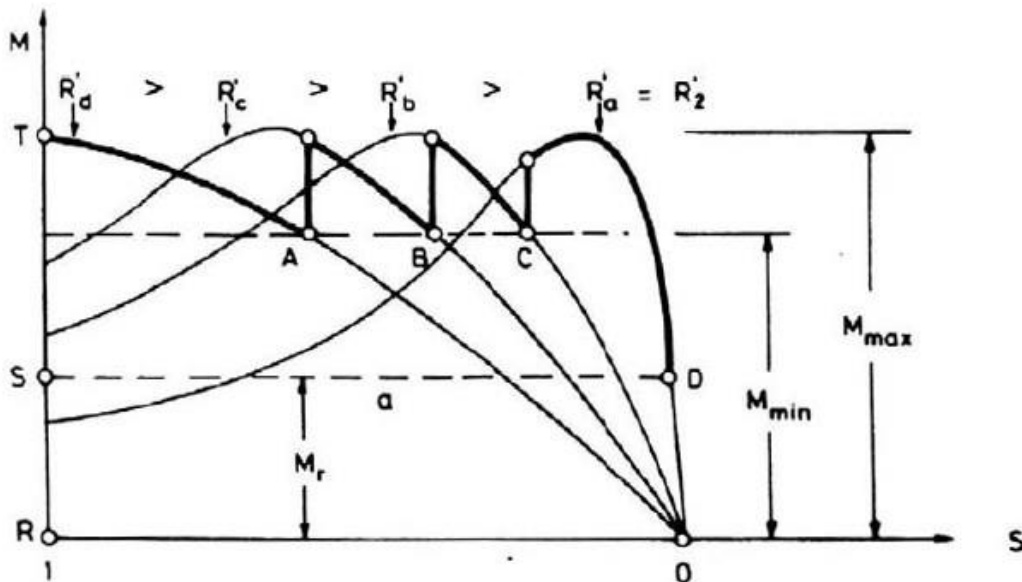


Fig. 3 Arranque motor rotor bobinado variando resistencia rotórica [3]

En la práctica, esta tipología de motor es útil para aplicaciones con grandes cargas inerciales, debido al gran par de arranque que entregan sin la demanda de corrientes elevadas. Otra ventaja que presenta este tipo de motor es la accesibilidad a las corrientes del rotor, lo que puede dar información adicional con fines de diagnóstico de posibles fallos mediante análisis de corrientes. Esto no es posible en los motores de jaula de ardilla, en los que las corrientes del rotor son inaccesibles.

En contrapartida, estos motores son mucho más caros que los de jaula de ardilla, al precisar de un devanado rotórico; aparte de requerir un mantenimiento mucho más cuidadoso y complejo debido al sistema de colectores y escobillas.

Pese a que este campo está dominado por los motores de inducción tradicionales con regulación por variación de frecuencia, los de rotor bobinado pueden usarse también para aplicaciones que requieran regulación de velocidad, siempre que no sea necesario un ajuste muy preciso. [1, 2, 4]



Fig. 4 Rotor Bobinado Motor Industrial [5]

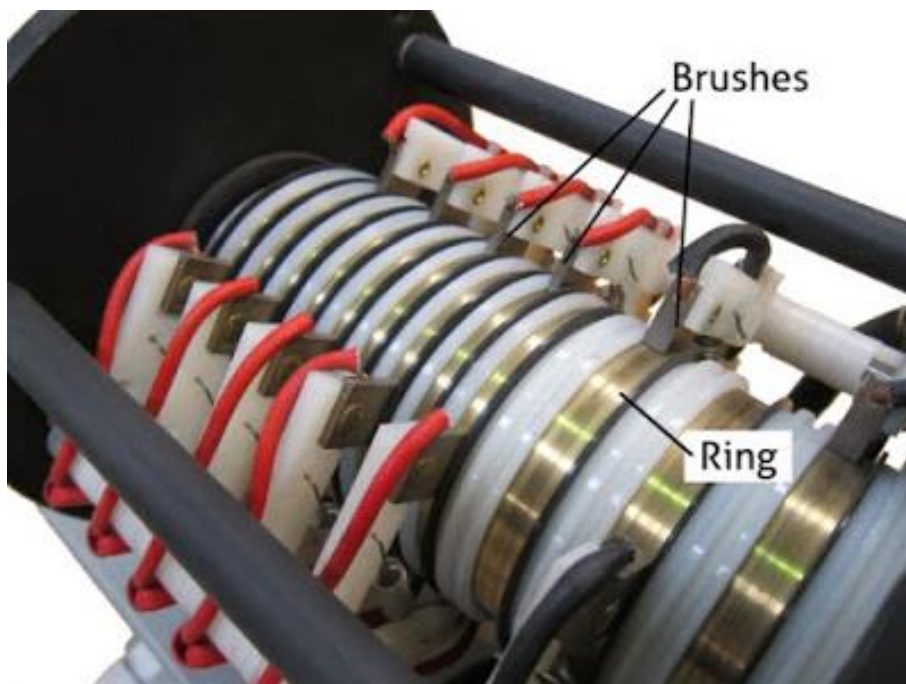


Fig. 5 Detalle Anillos Rozantes y Escobillas Alternador [6]

2.3. DEFECTOS HABITUALES EN LOS MOTORES DE INDUCCIÓN

Tradicionalmente, las máquinas eléctricas han sido elementos con una tasa de ocurrencia de averías más reducida que otras máquinas, especialmente los motores de inducción. No obstante, la tendencia actual de reducción de costes en la industria hace que los materiales trabajen muy cerca de su límite mecánico y electromagnético, y por tanto que su fiabilidad se vea afectada. [7]

W. T. Thomson y M. Fenger clasifican los fallos en máquinas eléctricas rotativas en las siguientes categorías [8]:

- Fallos mecánicos del rotor: daños en los rodamientos, excentricidad, eje doblado y desalineamientos. Ocurren en un 40% de los casos.
- Fallos en el estátor: apertura o cortocircuito del devanado, constituyen un 38% del total.
- Fallos en el rotor: apertura o cortocircuito del devanado en las máquinas de rotor bobinado, o rotura de barras y del anillo de cortocircuito para las de jaula de ardilla, en un 10%.
- Otras averías, que representan el 12% restante.

Otro estudio del *Electric Power Research Institute*, realizado sobre 6312 motores, arroja resultados similares: un 41% de los fallos ocurren en los rodamientos, 36% en el devanado del estátor, 9% en el del rotor, y 14% en otros. [9]

Pese a que estas estadísticas son de motores de inducción de jaula de ardilla, pueden considerarse representativas también para los motores de rotor bobinado. Algunos fallos, como la asimetría rotórica, son mucho más frecuentes para este último tipo de motores, como se comentará a continuación.

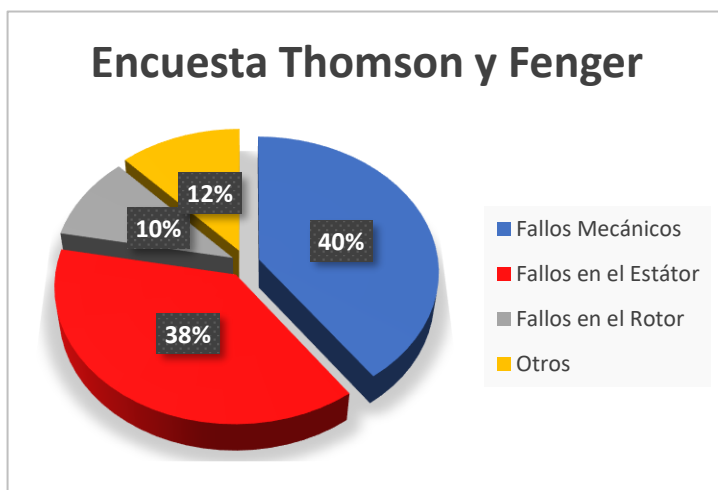


Fig. 6 Encuesta Thomson y Fenger

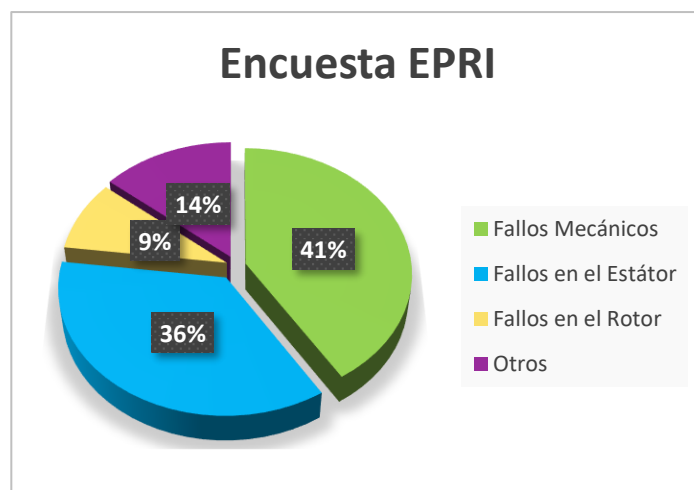


Fig. 7 Encuesta EPRI

Todos estos defectos en las máquinas eléctricas modifican sus propiedades simétricas, apareciendo en algunas de las magnitudes medibles en frecuencias características. Esto es el *quid* del mantenimiento predictivo, puesto que con las técnicas adecuadas podemos detectar estas frecuencias y evaluar el estado de la máquina.

A continuación, en los siguientes puntos se describen los tipos de fallo más habituales:

APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE ANÁLISIS DEL FLUJO MAGNÉTICO DE DISPERSIÓN PARA LA DETECCIÓN DE ASIMETRÍAS ROTÓRICAS EN MÁQUINAS DE INDUCCIÓN DE ROTOR BOBINADO

2.3.1. Defectos en los Rodamientos

El eje del rotor de una máquina eléctrica rotativa se apoya en sus extremos en elementos que los mantienen en posición dentro del estátor y permiten su giro. Con este fin, se suelen usar rodamientos. No es así en el caso de los motores de gran potencia, que usan cojinetes.

Los rodamientos constan de dos pistas circulares, por las que se disponen una serie de elementos rodantes, que pueden ser bolas, rodillos, etc. Según el sentido de las cargas que soportan pueden ser radiales, axiales o una combinación de ambos.

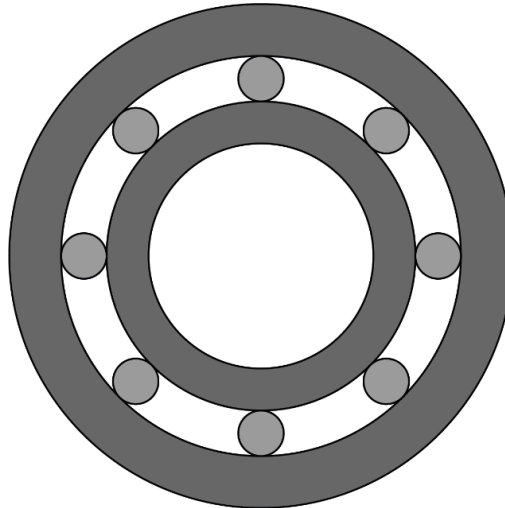


Fig. 8 Sección rodamiento bolas

Como se ha comentado anteriormente, estos elementos son la principal causa de fallo del motor, debido a las duras condiciones de trabajo a las que se suelen ver sometidos. A continuación, se describen las principales causas de fallo: [10]

- **Excesos de temperatura o de carga y ajustes incorrectos:** causan la degradación del lubricante, pudiendo llegar a ocasionar un gripado del rodamiento.
- **Fallo a fatiga:** es progresivo una vez tiene comienzo. Puede darse por motivos muy diversos.
- **Corrosión:** resulta de la exposición a medios corrosivos que atacan el material. Con tal de evitarlo, los rodamientos suelen ser de tipo sellado, de manera que las partes móviles no estén expuestas a la atmósfera.
- **Fallo de lubricación o contaminación:** cuando los rodamientos no son lubricados adecuadamente, o el ambiente de la máquina facilita la deposición de partículas o restos de polvo que se mezclan con el lubricante. Ambos causan desgaste.
- **Desalineación:** montaje incorrecto.
- **Circulación de corrientes:** fallo provocado por la inducción de tensiones de modo común en eje, bajo funcionamiento con variador de frecuencia, que provocan la circulación de corrientes a tierra a través de rodamientos.

La evolución de los fallos en estos elementos suele ser la siguiente: primero, el rodamiento desarrolla grietas microscópicas, lo que produce cambios en el espectro de alta frecuencia, por encima de 5 kHz. No suele ser económicamente rentable la sustitución del rodamiento en esta fase. Posteriormente, debido al contacto continuado de la zona con el defecto, se generan fenómenos de *flaking* y *spalling*, es decir, fenómenos de rotura en las láminas de las superficies. Las vibraciones empiezan a ser fácilmente detectables en la *prime spike region*, situada en unas 3 veces la frecuencia de rotación de la máquina en el espectro de frecuencias del análisis de vibraciones. La contaminación del lubricante extiende el fallo rápidamente y se alcanza el estado de fallo. En la práctica se usan frecuencias características sacadas a partir de las dimensiones del rodamiento para diagnosticar este elemento. [11]

2.3.2. Defectos en el Estátor

Los defectos en el estátor suelen estar causados por fallos en los conductores o, principalmente, en el sistema aislante. Estos problemas pueden causar bien la apertura (corte) de una fase o bien el cortocircuito entre las espiras de una fase. El primero permite que el motor siga trabajando durante cierto tiempo, sobrecargando a las fases operativas, mientras que el segundo es un fallo que progresa rápidamente deviniendo en efectos catastróficos.

La norma UNE EN 60034-18-1:2010 [12] de los aislantes de máquinas eléctricas rotativas establece que estos deben seguir la norma UNE EN 60085:2008 [13] que separa los aislantes en función de su clase térmica, es decir, la máxima temperatura que resisten:

Clase térmica °C	Letra de designación ^a
90	Y
105	A
120	E
130	B
155	F
180	H
200	N
220	R
250	–

Tabla 1 Clases Térmicas de los Aislantes [13]

Para prevenir este tipo de fallos, las máquinas eléctricas de mayor potencia (devanado preformado) constan de dos barreras de aislamiento: los conductores del estátor se recubren con un esmalte sintético, que ayuda a prevenir la conducción entre espiras de una misma fase, el cortocircuito; y capas de fibra de vidrio o papel de mica impregnado en la misma resina, que se disponen entre las bobinas de las diferentes fases y la armadura de la máquina. Estas son las encargadas de soportar la diferencia de tensión entre fases y entre fase y tierra.

Pese a tomar todas estas precauciones, tener la máquina bajo el mantenimiento adecuado y trabajando en el rango de potencia de diseño, pueden ocurrir defectos en el aislamiento por culpa del envejecimiento. Este envejecimiento es consecuencia de esfuerzos en el material de tipo eléctrico, mecánico, térmico, ambiental... [11]

2.3.3. Defectos en el Núcleo Magnético

Este tipo de fallo sucede en el aislamiento existente entre las láminas del paquete magnético de la máquina, encargado de limitar las corrientes parásitas de Foucault. Este defecto, por tanto, causa la circulación de estas corrientes que producen el calentamiento del núcleo por efecto Joule y generan pérdidas y averías adicionales. Es un tipo de fallo menos usual.

2.3.4. Asimetrías Rotóricas

Se suele considerar una máquina con rotor sano aquella que presenta una simetría total en el rotor, es decir, que las fases del rotor sean idénticas entre sí. No obstante, todas las máquinas reales presentan cierta asimetría en el rotor. Esta se produce cuando la resistencia de una de las fases del rotor varía respecto a las del resto de fases. En los motores de jaula de ardilla, el ejemplo más claro de asimetría rotórica ocurre cuando se rompe una de las barras.

Como consecuencia de este fallo, se producen oscilaciones en el par entregado por la máquina. Además, el circuito rotórico podría deteriorarse hasta llegar, en el peor de los casos, en motores de rotor bobinado, a un corte de la fase afectada, fallo catastrófico que implica el reemplazo del rotor al completo. [14]

La asimetría también puede deberse a una excentricidad del rotor, es decir, la existencia de un rotor no uniforme. Esta anomalía ocurre por distintos factores, desde un defecto en la fabricación del alojamiento de los rodamientos a una ovalidad del estátor o el rotor. Si la excentricidad es leve origina únicamente algunas vibraciones indeseadas, pero en casos extremos puede causar esfuerzos excesivos e incluso el roce entre rotor y estátor. [7]

Los motores de rotor bobinado son especialmente propensos a este tipo de fallo. Resulta muy difícil asegurar en el sistema escobillas-anillos rozantes un contacto idéntico en las tres fases del rotor, dado que ello implica que el tensionado de los muelles que permite el contacto anillos rozantes-escobillas deba ser exactamente el mismo en las tres fases. Además, las escobillas de cada fase pueden estar sometidas a un desgaste no uniforme entre ellas. En conclusión, este contacto desigual causa una diferencia en las resistencias del rotor, lo que genera la asimetría.

Como caso práctico de esta tipología de fallo, en el artículo *Reliable Detection of Rotor Winding Asymmetries in Wound Rotor Induction Motors via Integral Current Analysis* se describe el problema de asimetría rotórica detectado en un motor de rotor bobinado de 12 polos, 3,3 kV, 1500 kW que accionaba un molino en una industria cementera. [15]

En dicho artículo se describe con precisión cómo se detectó la citada anomalía: se detectaron en el análisis de corrientes indicadores de fallo que señalaban la presencia de una asimetría rotórica, tanto en el arranque como en régimen permanente. Por este motivo, no podía tratarse de un fallo en el reostato, dado que en régimen permanente se desconecta. El problema quedaba reducido entonces al rotor: o bien la asimetría se encontraba en el sistema de escobillas-anillos rozantes, o bien en el propio devanado del rotor. Esta segunda opción comportaría el rebobinado del rotor, con el coste que eso conlleva (más de 20.000€), aparte de detener la producción de toda la empresa. Gracias a un análisis termográfico de los anillos rozantes se detectó una diferencia de temperaturas entre el sistema de escobillas de la fase central y las fases adyacentes de más de 30 °C, llegando a alcanzar los 80 °C en funcionamiento. Ello permitió localizar el origen de la asimetría en tal punto. Así, se reemplazaron las escobillas y se mejoró el contacto con los anillos rozantes, eliminando de esta manera la asimetría y evitando todo fallo que esta pudiera haber causado si hubiera persistido.

Valga tal ejemplo para mostrar que este fallo se trata, por tanto, de un tipo de avería muy importante, dada la facilidad con la que puede aparecer en los motores de rotor bobinado, y que puede acarrear enormes pérdidas económicas si no es detectada a tiempo. Por este motivo, es el objeto de estudio del presente trabajo.



Fig. 9 Motor Rotor Bobinado en Industria



Fig. 10 Sistema de Escobillas-Anillos Rozantes

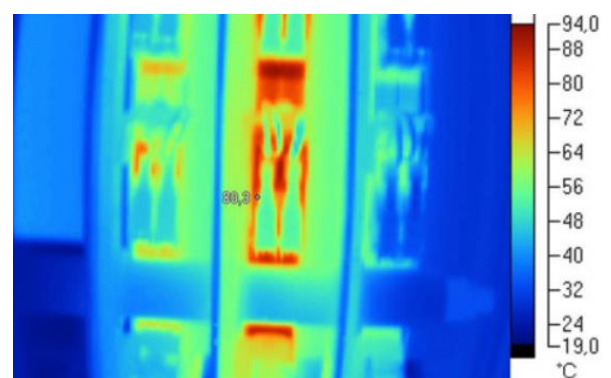


Fig. 11 Análisis Termográfico del Sistema de Escobillas-Anillos Rozantes

2.4. TÉCNICAS ACTUALES DE DIAGNÓSTICO DE FALLOS

A continuación, se enuncian y comentan brevemente las técnicas más extendidas en el ámbito del mantenimiento predictivo de máquinas eléctricas:

2.4.1. Termografía Infrarroja

Todos los cuerpos con temperatura mayor al cero absoluto ($-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$) emiten radiación infrarroja. Esta abarca el espectro de frecuencias entre la luz visible y las microondas (longitudes de onda de $0,7 - 1000\ \mu\text{m}$). La cantidad total de energía irradiada depende de la energía que estos puedan reflejar o absorber. Cualquier objeto absorbe una parte de la radiación incidente, refleja otra, y realiza su propia emisión de energía. Estas cantidades de energía son función de los coeficientes de *emisividad*, *transmisividad* y *reflectividad*, de los cuales nos interesará el primero, que tiene relación directa con la temperatura superficial. Este coeficiente relaciona el valor de la radiación emitida por el cuerpo y el emitido por un cuerpo negro para la misma longitud de onda. Depende, por tanto, del material del que esté constituido el cuerpo. [16]

Con la ayuda de una cámara termográfica es posible registrar la energía emitida por los cuerpos y, por ende, su temperatura superficial. Esta técnica se utiliza en el análisis de instalaciones. En el ámbito de los motores eléctricos su uso es más reciente, pero se ha demostrado su utilidad dado que muchos fallos dan lugar a calentamientos anormales en determinadas partes de la máquina.

Así, en motores eléctricos, se ha aplicado esta técnica para la detección de puntos calientes en el paquete magnético del estator, en el contexto de un ensayo estático denominado *core ring test* o *loop test*. Este ensayo permite detectar puntos en los que aislamiento entre chapas del núcleo del estator ha fallado y se están produciendo pérdidas por efecto Joule. La técnica también ha mostrado buenos resultados para la detección de otros tipos de fallo como problemas en el sistema de ventilación, fallos de lubricación en rodamientos, problemas en el sistema de transmisión o, incluso, asimetrías en el estator.

2.4.2. Análisis de Vibraciones

En una máquina eléctrica ideal no debería existir ninguna vibración puesto que las fuerzas presentes en ella en teoría se compensan. No obstante, debido a la existencia de imperfecciones constructivas, en las máquinas reales siempre se encuentran presentes vibraciones. Además, las averías provocan la aparición de fuerzas que modifican el contenido en frecuencias de la vibración ya existente. Así, en la vibración de la máquina podemos encontrar información sobre su estado de salud, asociando cada una de las vibraciones armónicas que aparecen con un fallo o defecto particular de algún componente del sistema. [16]

Los transductores permiten registrar la posición, velocidad y aceleración de la máquina, pero en la práctica se ha demostrado que la mejor indicación de la severidad de las vibraciones se obtiene en el rango de $10\ \text{Hz} - 1\ \text{kHz}$ de medida de la velocidad. [17]

Existen dos formas de trabajo distintas en cuanto al análisis de la señal por este método: la primera consiste en el análisis del nivel global de la vibración, evaluándolo periódicamente y analizando la evolución con el tiempo. Existen normas que regulan los valores máximos que puede alcanzar esta señal. Esto permite detectar cuándo el estado de vibración comienza a cambiar, y en este momento deberá realizarse un estudio más preciso.

Este estudio más preciso es la segunda forma de trabajo: el análisis espectral de la señal de vibración. Siempre es conveniente contar con un registro de los espectros de vibración antes de la aparición de ningún fallo, para determinar el estado inicial de la máquina y poder así comparar las frecuencias características de cada armónico, la causa que las origina y el nivel de daño alcanzado.

El análisis de vibraciones permite detectar fallos tales como desequilibrios, desalineaciones, fallos en rodamientos, fallos en engranajes, asimetrías rotóricas, excentricidades en el entrehierro, etc. La mayoría de los fallos mecánicos se pueden diagnosticar con esta técnica.

Este tipo de análisis es el primero y el más extendido en el campo del mantenimiento predictivo, pese a que la práctica demuestra que su validez es muy limitada para la detección de fallos de origen eléctrico. Por ello, en la práctica se combina esta técnica con otras que sí nos brinden información sobre el estado del circuito eléctrico de la máquina. Por otro lado, incluso para fallos de índole mecánica, la técnica no está exenta de la posible ocurrencia de falsos diagnósticos. Por tanto, se hace siempre recomendable contar con técnicas adicionales que puedan proporcionar información para alcanzar una mayor fiabilidad en el diagnóstico.

2.4.3. Análisis de Corrientes

La técnica de análisis de corrientes en motores eléctricos, o *Motor Current Signature Analysis* (MCSA) según se conoce en la bibliografía, es una de las más extendidas dentro del campo del Mantenimiento Preventivo, debido a sus características no invasivas y los buenos resultados que proporciona. Se basa en la monitorización de la señal de corriente en una de las fases de alimentación del motor y su análisis posterior. [8]

Las corrientes de alimentación son senoidales en una máquina idea. En la práctica, esto no es así, sino que las señales de corriente contienen muchos armónicos además de la componente fundamental. Estos aparecen de manera natural en la máquina, por razones constructivas, defectos de fabricación, etc.

No obstante, al igual que en el caso del análisis del flujo de dispersión, en el análisis de corrientes existen también unas componentes características de fallo contenidas en el espectro de frecuencias de la señal. Estas componentes solo aparecen en caso de aparición de alguna avería, y se incrementan en función de la severidad del mismo. Estas pueden observarse tanto en régimen permanente como en el arranque de la máquina.

Por tanto, de una manera similar a la del análisis de flujo, el análisis de corriente se realiza:

1. En el régimen permanente, se extraen las señales de corriente de alimentación de cada fase y se aplica la transformada de Fourier discretizada (ver ecuación 3.8). Así se obtiene el espectro de frecuencias de las señales y se pueden observar estas componentes de fallo (véase fig. 12). En la bibliografía al respecto [18], la manera de indicar la amplitud de los distintos armónicos obtenidos en la señal es la siguiente:

$$A(dB) = 20 \cdot \log_{10} \left[\frac{A_i}{A_0} \right] \quad (2.3)$$

Siendo A_i el valor de la amplitud del armónico en cuestión, y A_0 la amplitud de la componente fundamental.

Aun así, el análisis de corrientes en régimen permanente tiene ciertos defectos. En ocasiones puede conducir a falsos diagnósticos, lo que en el mantenimiento de máquinas es imperdonable por los costes que estos llevan asociados; y algunas componentes pueden entremezclarse, dando lugar a dudas del tipo de fallo en cuestión. Por estas razones, se realiza también el análisis en régimen transitorio.

2. En el arranque, las componentes de fallo se mantienen constantes en amplitud, pero no en frecuencia, al depender su frecuencia de la velocidad de giro generalmente. Este motivo hace inaplicable la Transformada de Fourier empleada para el régimen permanente, y exige que las señales de corriente de las fases sean analizadas con una transformada tiempo-frecuencia, como es por ejemplo la DWT (capítulo 3.3.2.3). De esta manera, se puede observar cómo se van modificando las frecuencias según el motor arranca, y se pueden identificar los patrones realizados por las componentes de fallo, como se muestra en la fig. 13.

Para más información sobre las componentes de fallo, el análisis en régimen permanente y el análisis en régimen transitorio, así como el funcionamiento de las transformadas tiempo-frecuencia, consúltese el capítulo 3 del presente trabajo, dedicado al análisis del flujo de dispersión.

Al contrario que con el análisis de vibraciones, el análisis de corrientes permite detectar fallos en el circuito del rotor, asimetrías y excentricidades, fallos en el circuito del estátor, así como fallos en rodamientos, desalineaciones, etc. Por este motivo, en la práctica se combinan ambas técnicas para obtener una visión más completa del estado de salud del motor y cerciorarse, en caso de que existiera, de la presencia del fallo antes de poner en marcha cualquier protocolo de mantenimiento, evitando incurrir en los costes innecesarios que ello supondría. [19]

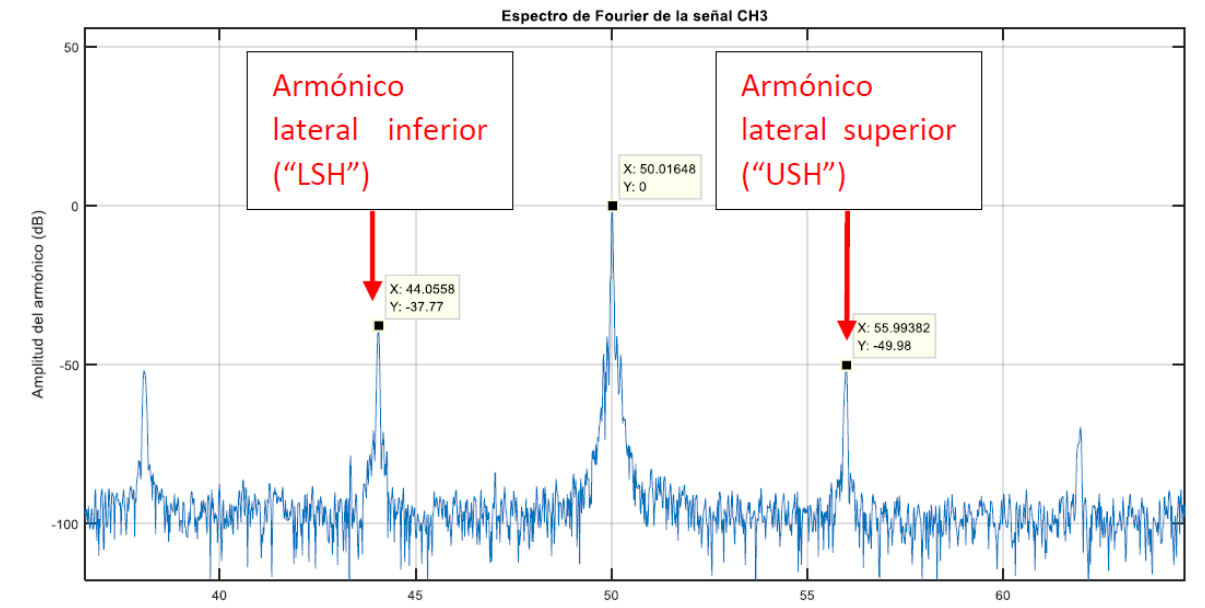


Fig. 12 Armónicos Laterales en el Espectro de Frecuencias de una Señal de Corriente [7]

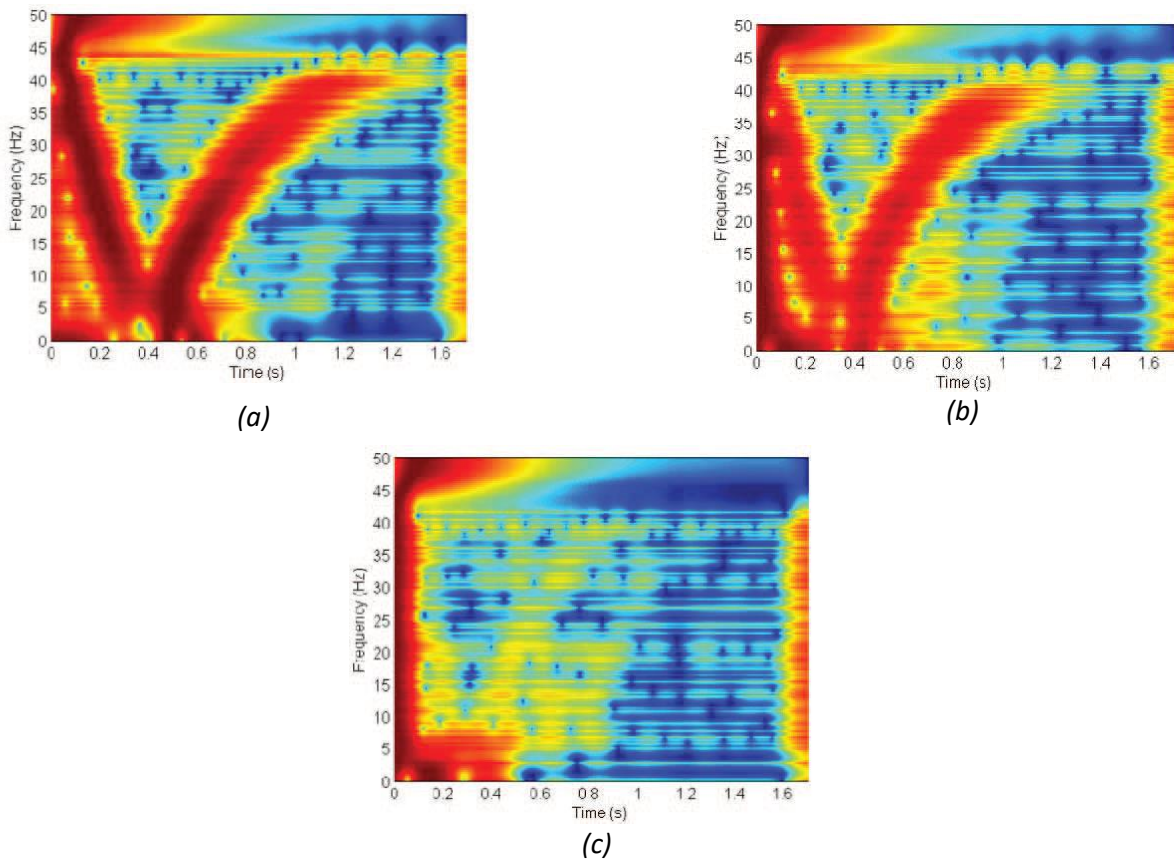


Fig. 13 STFT de la Corriente de Arranque con Asimetría Rotórica: a. Alta b. Moderada c. Máquina Sana [15]

3. ANÁLISIS DEL FLUJO DE DISPERSIÓN

Como se ha comentado en el capítulo anterior, el mantenimiento preventivo ha ido ganando terreno en la industria poco a poco y, hoy por hoy, técnicas como el análisis de vibraciones o de corrientes son habituales. En ocasiones, estas técnicas de análisis más convencionales no son lo suficientemente sensibles como para detectar el fallo en sus etapas más tempranas, o sus resultados no son concluyentes. Para estas situaciones resulta idóneo explorar otras técnicas que ofrezcan información adicional para determinar el estado de salud de la máquina.

Aquí es donde la técnica de análisis del flujo de dispersión de la máquina como herramienta para el diagnóstico de las máquinas asíncronas suscita especial interés, debido a su bajo coste y naturaleza no invasiva, lo que es fundamental para su aplicabilidad industrial. [20]

El objetivo del presente trabajo es evaluar la viabilidad de esta técnica para la detección de asimetrías rotóricas en motores de rotor bobinado. El estudio de esta avería se justifica en la frecuencia con la que ocurre en estas máquinas y en los altos costes a los que puede dar lugar en caso de no ser localizada a tiempo.

3.1. FUNDAMENTO TEÓRICO

El análisis del flujo de dispersión comparte bastantes características con el análisis de corrientes: se registra la señal con las sondas de medida y se extrae la información contenida en su espectro de frecuencias para analizar su valor en determinadas componentes indicativas de avería.

Como ya se ha mencionado, el análisis del flujo puede utilizarse como medida complementaria para mejorar el diagnóstico del fallo. En ocasiones, puede llegar a ser la única técnica disponibles en aquellos casos en los que no sea posible medir las vibraciones o las corrientes. Además, solo requiere la instalación de un sensor de flujo sobre la carcasa del motor, en el que se monitorizará la fuerza electromotriz inducida. [21]

EL flujo de dispersión de la máquina se descompone en flujo axial y radial.

3.1.1. Flujo Axial

El flujo axial es el que se encuentra en un plano que incluye al eje de la máquina, donde se establece la mayor parte de este. Existe como consecuencia de que las máquinas nunca pueden ser construidas de manera perfectamente simétrica. En estas siempre existen pequeñas asimetrías; debidas a defectos del proceso de fabricación, tolerancias, anisotropía de los materiales...; que se ven reflejadas en esta componente del flujo.

Cualquier tipo de anomalía o fallo contribuye a incrementar el grado de asimetría de la máquina y, por tanto, se verá reflejado en un cambio en el flujo axial, y más concretamente en sus componentes de frecuencia. Como además tanto el estátor como el rotor contribuyen a esta componente del flujo, se puede encontrar en su contenido en armónicos información sobre el estado de ambos circuitos.

Debido a la distribución del devanado en el estátor la inducción magnética en el entrehierro no tendrá carácter senoidal: [16]

$$B(\theta, t) = B_1 \cdot \cos(\omega \cdot t - p\theta) + B_5 \cdot \cos(\omega \cdot t + 5p\theta) - B_7 \cdot \cos(\omega \cdot t - 7p\theta) + B_{11} \cdot \cos(\omega \cdot t + 11p\theta) - \dots \quad (3.1)$$

Para todos los armónicos de orden $6k \pm 1$, en la que B_i es el i -ésimo armónico espacial de la inducción en el entrehierro, p el número de pares de polos, ω la pulsación de alimentación del estátor y θ es el ángulo medido alrededor de la periferia de la máquina.

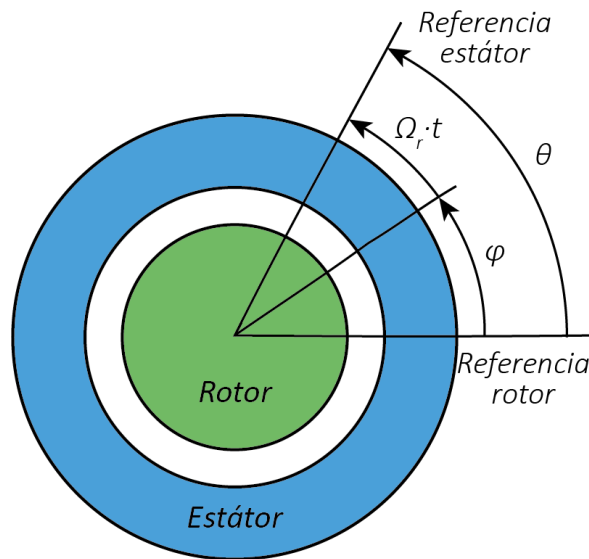


Fig. 14 Sistema de Referencia Rotor - Estator

La ecuación anterior se puede expresar en un sistema de referencia ligado al rotor con la siguiente ecuación, que relaciona un punto fijo del estátor con un punto fijo del rotor:

$$\theta = \varphi + \Omega_r \cdot t \quad (3.2)$$

Donde Ω_r es la velocidad angular del rotor y φ es su posición inicial en el instante $t = 0$.

Como $s = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s}$; donde $\Omega_s = \frac{\omega}{p}$ es la velocidad de sincronismo, la ecuación queda en:

$$\theta = \varphi + \frac{\omega \cdot (1 - s)}{p} \cdot t \quad (3.3)$$

Así, la expresión general para un armónico de la densidad de flujo en el entrehierro, referido al estátor será:

$$B_n \cdot \cos(\omega \cdot t \pm n \cdot p \cdot \theta) \quad (3.4)$$

Que, referida al rotor, se expresa como:

$$B_n \cdot \cos[(1 \pm n \cdot (1 - s)) \cdot \omega \cdot t \pm n \cdot p \cdot \varphi] \quad (3.5)$$

Desarrollando la ecuación 3.5 para los primeros términos se obtiene:

$$B(\varphi, t) = B_1 \cdot \cos[s \cdot \omega \cdot t - p \cdot \varphi] + B_5 \cdot \cos[(6 - 5s)\omega \cdot t + 5p \cdot \varphi] - \\ - B_7 \cdot \cos[(7s - 6)\omega \cdot t - 7p \cdot \varphi] + B_{11} \cdot \cos[(12 - 11s)\omega \cdot t + 11p \cdot \varphi] - \dots \quad (3.6)$$

Esta expresión muestra las componentes de frecuencia de las corrientes que se inducen en el rotor, debido a los armónicos espaciales de la inducción en el entrehierro, para el caso de un devanado trifásico simétrico alimentado de forma equilibrada. Estos armónicos en las corrientes producirán los mismos en la señal de flujo axial, sumados a los correspondientes a la frecuencia de alimentación.

Por tanto, incluso para una máquina sana, simétrica y perfectamente construida, el espectro de flujo axial contiene armónicos. Cuando se produzca algún fallo, se producirá un cambio en la distribución de armónicos en la inducción en el entrehierro, a su vez en las corrientes inducidas y, por tanto, en el flujo axial de dispersión. Por tanto, se pueden utilizar para detectar fallos en sus etapas iniciales. [16]

3.1.2. Flujo Radial

El flujo radial es el resultante después de la atenuación en la inducción causada por el entrehierro. Diversos autores proponen modelos para caracterizar esta atenuación en función de las características constructivas de la máquina. No obstante, dada la gran variedad de geometrías y características diferentes que se pueden encontrar en la industria, no suele ser operativo el caracterizar matemáticamente el flujo esperado por cada máquina.

En la práctica se estudia la máquina en condiciones de funcionamiento normales y se establecen órdenes de magnitud para determinados armónicos característicos, pudiendo así monitorizar fallos y errores.

A continuación, se muestra el esquema con las posiciones de las bobinas según qué componente del flujo se quiera captar. La posición A recibe mayoritariamente flujo axial, la C radial y la B una mezcla de ambas.

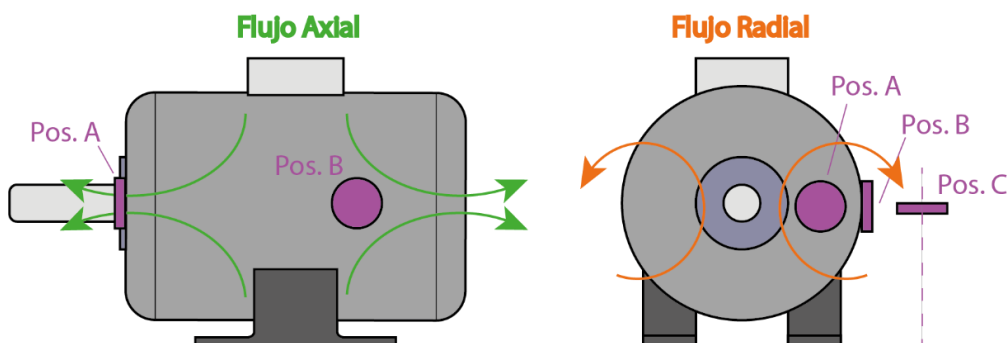


Fig. 15 Posiciones A, B y C Sonda de Flujo

3.2. ANÁLISIS EN RÉGIMEN PERMANENTE

Como queda descrito en el anterior punto, la medida del flujo de dispersión se realiza en la carcasa de la máquina, utilizando sondas formadas por bobinas que captan un flujo (pulsante) que origina una fuerza electromotriz en las mismas.

Esta señal de tensión tiene un contenido en armónicos que se puede escribir como suma de funciones senoidales de distinta frecuencia.

Con el fin de extraer estos armónicos se utiliza la transformada de Fourier:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (3.7)$$

Discretizando:

$$X_m = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi j}{N} mn} dt \quad m = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3.8)$$

Una vez obtenida esta función, el análisis del flujo en régimen permanente se basa en identificar ciertas componentes frecuenciales cuya amplitud es indicativa del nivel de fallo de la máquina, según el tipo de avería al que estén asociadas.

3.2.1. Indicadores de Avería en Régimen Permanente

En cuanto a las averías en el rotor, la bibliografía disponible se ha centrado en la identificación y evaluación de diferentes componentes de fallo que aparecen en la zona de bajas frecuencias en el análisis de la señal en régimen permanente.

En la referencia [2] se indica que, en una máquina sana ideal, el sistema trifásico equilibrado de corrientes origina el campo magnético giratorio. Este a su vez induce corrientes en el rotor de frecuencia:

$$f_{rot} = s \cdot f_s \quad (3.9)$$

Estas corrientes crean un campo giratorio en el rotor de velocidad:

$$\Omega_{rot}^{rot} = s \cdot \Omega_s \quad (3.10)$$

Referido en coordenadas del rotor. Si cogemos como sistema de referencia el estátor, la velocidad de giro de este campo será:

$$\Omega_{rot}^{est} = \Omega_{rot}^{rot} + \Omega_n = \Omega_s \quad (3.11)$$

Esta expresión indica que el campo giratorio del rotor, referenciado desde el estátor, tiene la misma velocidad que el del estátor, la de sincronismo. De cualquier otra manera, el motor no podría funcionar.

Cuando ocurre un fallo en el rotor, la rotura de una barra en motores de jaula de ardilla o una asimetría en rotor bobinado, se produce un desequilibrio en las corrientes del rotor, como muestra la siguiente figura:

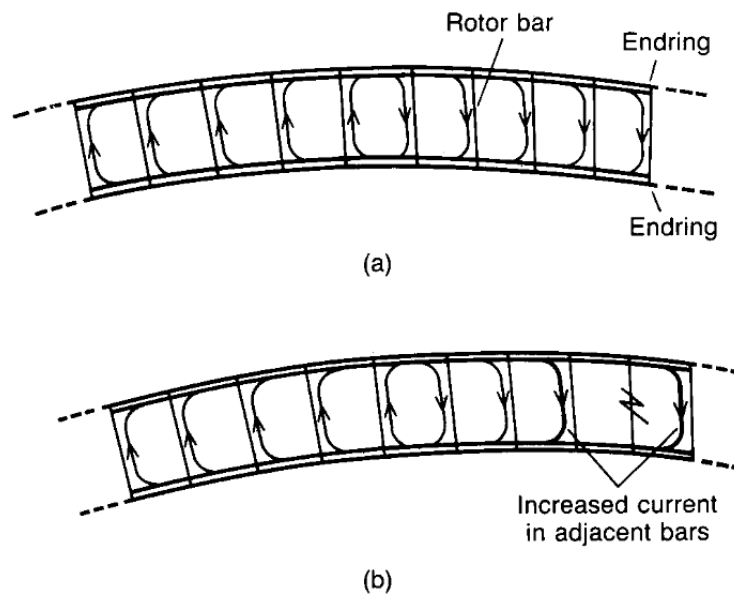


Fig. 16 Desequilibrio en las Corrientes del Rotor Causado por la Rotura de una Barra en Jaula de Ardilla [22]

Este desequilibrio se puede descomponer en la suma de dos estados superpuestos: el de máquina sana con las corrientes bien distribuidas y el de una fuente de corriente de valor igual al de la máquina sana pero de sentido contrario por la barra rota. Podemos descomponer de la misma manera el desequilibrio en las corrientes en un rotor bobinado con fallo.

Así, el campo creado por estas corrientes será, por un lado, el habitual en el funcionamiento correcto del motor, sumado a otro campo giratorio de sentido inverso.

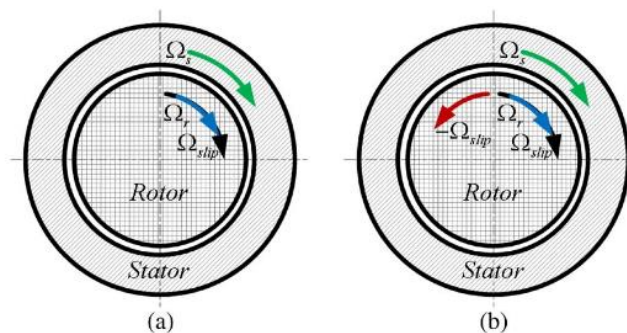


Fig. 17 Esquema de Operación. (a) Máquina Sana. (b) Rotor Defectuoso. [20]

Se puede observar que aparece una componente de avería en el campo magnético, con misma frecuencia que las corrientes del rotor (ecuación 3.9) pero de sentido contrario: $-s \cdot \Omega_s$. Se puede expresar en el sistema de referencia estático de la siguiente forma:

$$\Omega_{fallo} = \Omega_r - s \cdot \Omega_s = (1 - s)\Omega_s - s \cdot \Omega_s = (1 - 2s)\Omega_s \quad (3.12)$$

Esta es la componente de fallo que aparece en el flujo radial de dispersión (también en el espectro de corrientes) que se nombra numerosas veces en la bibliografía como [20]:

$$f_{fallo} = (1 - 2s)f_s \quad (3.13)$$

Estas corrientes y campos en sentido inverso producen unas oscilaciones en el par que entrega la máquina, con frecuencia característica $2 \cdot s \cdot f_s$. Estas oscilaciones crean unas oscilaciones en la velocidad que afectan a la componente $(1 + 2s)f_s$ en el flujo magnético del entrehierro, es decir, el flujo radial.

En cuanto al flujo axial de dispersión, en [20] se corrobora la existencia de una componente en el flujo axial de dispersión de frecuencia $s \cdot f$, cuyo valor incrementa en presencia de asimetrías, pero solo en presencia de excentricidad dinámica, por lo que puede hallarse por un mero defecto de fabricación.

También en el flujo axial encontramos, en presencia de variación de velocidad una componente de valor $3 \cdot s \cdot f$. Pequeñas variaciones de velocidad causan grandes aumentos en la amplitud de esta componente.

A modo de resumen, las componentes principales de análisis en régimen permanente son:

Componente frecuencial	Dirección principal del flujo	Características
$s \cdot f_s$	Axial	Influido por excentricidades dinámicas
$3 \cdot s \cdot f_s$	Axial	Influido por variaciones de velocidad
$f_s \pm 2 \cdot s \cdot f_s$	Radial	Armónicos laterales

Tabla 2 Componentes Asimetría Rotórica en el Análisis en Régimen Permanente

El análisis en régimen permanente consistirá en, mediante la FFT (*Fast Fourier Transform*) u otra transformada similar, obtener el contenido en frecuencias de la señal de flujo de dispersión. Posteriormente, evaluar el nivel de amplitud de estas componentes características detectando así cualquier anomalía.

En la práctica, las componentes más sensibles y fiables para la detección de asimetrías rotóricas en motores de inducción han resultado ser los armónicos laterales [21] y, por este motivo, nos centraremos en su estudio.

3.3. ANÁLISIS EN RÉGIMEN TRANSITORIO

El análisis del flujo de dispersión en régimen permanente, pese a ser una técnica relativamente reciente (en comparación con otras técnicas predictivas con mucha más tradición), ha demostrado su potencial para el diagnóstico. Aun así, como ocurre con otras técnicas, como la basada en el análisis de corrientes, el análisis de flujo en permanente es potencialmente sensible a la aparición de falsos diagnósticos. En el caso de análisis de corrientes, ha quedado ampliamente demostrado en la literatura reciente que la técnica clásica (MCSA) es propensa a dos tipos de falsos diagnósticos:

- *Falsos positivos*: Un falso positivo consiste en diagnosticar la máquina como averiada cuando realmente no existe la avería. Esto conduce a paradas innecesarias de la máquina, junto a los costes y pérdidas asociados a estas. Las causas más comunes de falsos positivos cuando se aplica la técnica clásica de corrientes (y, por tanto, potenciales causas de falsos diagnósticos si se aplica en análisis de flujo en permanente) son:
 - Oscilaciones en el par de carga.
 - Existencia de conductos axiales de refrigeración.
 - Problemas de anisotropía magnética.
- *Falsos negativos*: Consisten en diagnosticar la máquina como sana cuando en realidad está averiada. Las consecuencias de los falsos negativos son, si cabe, más graves que las de los falsos positivos, puesto que puede provocar una parada no prevista, comprometiendo la seguridad del usuario. Las causas más comunes de falsos negativos cuando se aplica la técnica clásica de corrientes (y, por tanto, potenciales causas de falsos diagnósticos si se aplica en análisis de flujo en permanente) son:
 - Diagnóstico en condiciones de vacío o carga reducida: el deslizamiento es muy cercano a cero y por tanto las componentes de fallo no se pueden distinguir correctamente.
 - Roturas en la jaula externa en rotores de doble jaula.
 - Roturas de barra no adyacentes.
 - Estimación errónea de la velocidad.

Esta serie de inconvenientes dieron lugar, en su día, a la búsqueda de alternativas al análisis en régimen permanente de corrientes, revelándose el análisis en régimen transitorio (y más concretamente el análisis de la corriente en el arranque) como una fuente de información crucial para evitar estas falsas indicaciones. Algo similar ha ocurrido con el análisis de flujo en el que el análisis transitorio ha emergido recientemente con fuerza, ofreciendo prometedores resultados. [21]

3.3.1. Indicadores de Avería en Régimen Transitorio

En el caso de que la máquina opere en régimen transitorio, y más concretamente durante el transitorio de arranque, las componentes asociadas a los diferentes fallos serán idénticas a las presentes cuando la máquina opera en régimen permanente. Sin embargo, las frecuencias de muchas de estas componentes de fallo son dependientes del deslizamiento s , y este, a diferencia de lo que ocurre en régimen permanente (en el que s permanece estable en un valor bajo) varía durante el arranque. Por consiguiente, durante el citado transitorio de arranque, al variar el deslizamiento, las frecuencias de estas componentes de fallo variarán, en lugar de permanecer constantes como ocurre en régimen permanente.

Así, se puede observar que, durante un arranque directo (máquina conectada a la red), el deslizamiento variará entre $s = 1$ (nada más arrancar la máquina, al ser $n_{rot} = 0$) y $s \approx 0$ (cuando se alcanza el régimen permanente, momento en el cual $n_{rot} \approx n_s$). Por tanto:

$$s = 1 : |f_{Ls}| = |f_s(1 - 2 \cdot 1)| = 50 \text{ Hz}$$

$$s = 0,5 : |f_{Ls}| = 0 \text{ Hz}$$

$$s = 0 : |f_{Ls}| = 50 \text{ Hz}$$

Podemos observar que la frecuencia del *armónico lateral inferior* (Lower Frequency Sideband) asociado a la asimetría rotórica seguirá una evolución en el tiempo dando lugar a un patrón en forma de V, a medida que esta frecuencia disminuye desde 50 Hz y 0 Hz y luego vuelve a aumentar hasta alcanzar un valor cercano a 50 Hz. Este patrón será visible sólo si existe la asimetría, ya que solamente en este caso está presente esta componente. En una máquina sana, esta componente no existirá y, por tanto, no aparecerá este patrón.

Siguiendo un razonamiento análogo para el resto de componentes asociadas a la asimetría comentadas anteriormente, se pueden deducir las respectivas evoluciones de sus frecuencias durante un arranque directo, a medida que el deslizamiento s varía entre 1 y casi 0. Estas evoluciones se muestran en la siguiente figura:

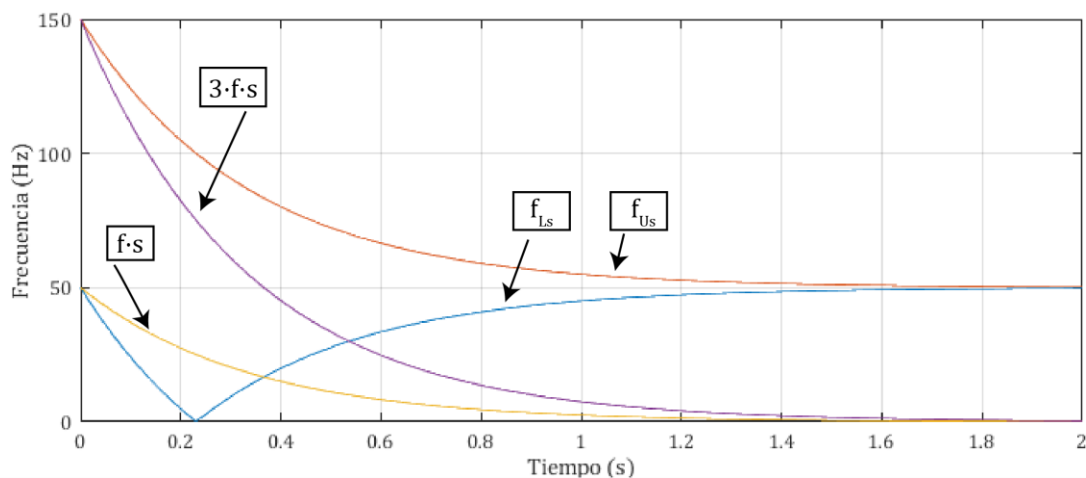


Fig. 18 Evolución Frecuencias Características de Fallo durante el Arranque

El patrón más característico de los formados por las frecuencias características de fallo durante el arranque es el del *armónico lateral inferior*, en forma de V. Esto lo convierte en el más sencillo de detectar en el análisis en régimen transitorio, y será por tanto el usado para determinar el nivel de fallo de la máquina de rotor bobinado en el actual trabajo.

3.3.2. Transformadas Tiempo-Frecuencia

La detección de las anteriores evoluciones de las frecuencias de las componentes de fallo durante el arranque tiene un inconveniente: la transformada de Fourier utilizada para el análisis permanente no resulta adecuada, ya que solamente proporciona el contenido en frecuencias de la señal analizada, pero no informa sobre cómo y cuándo se dan estas frecuencias en el tiempo. Es por esto por lo que se precisa otro tipo de herramienta para procesar la señal de flujo durante el arranque, que sea capaz de informar sobre cómo va cambiando el contenido en frecuencias en el tiempo. A este tipo de herramientas se las denomina *transformadas tiempo-frecuencia*.

3.3.2.1. Transformada de Fourier de Tiempo Reducido

Un representante clásico de este tipo de transformadas es la *Short-Time Fourier Transform* (STFT), que constituye una versión revisada de la Transformada de Fourier. Para su aplicación, se divide la señal registrada en segmentos suficientemente pequeños que se suponen estacionarios. Con este fin, se establece una *Window function* w , que tendrá valor en un intervalo T en el que suponemos la señal estacionaria y 0 en el resto del tiempo. Multiplicando la señal por esta función obtendremos el recorte de la señal original, al cual le aplicaremos la transformada de Fourier, obteniendo el contenido en frecuencias de este intervalo que suponemos estacionario:

$$STFT\{x(t)\}(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)w(t - \tau)e^{-j2\pi ft} dt \quad (3.14)$$

De esta manera, la función resultado no depende únicamente de la frecuencia f , sino también del tiempo τ en el que situemos la función ventana. Por tanto, como resultado se obtiene una función 3D que puede ser entendida como varias instantáneas de la transformada de Fourier de la señal a lo largo del tiempo.

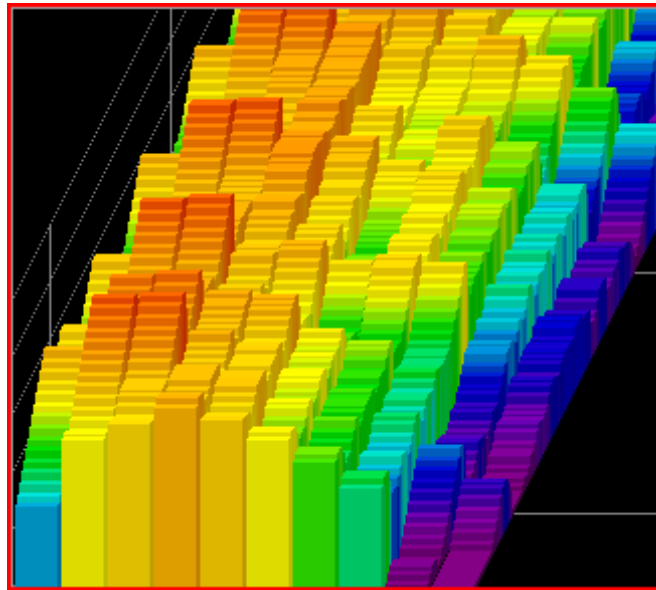
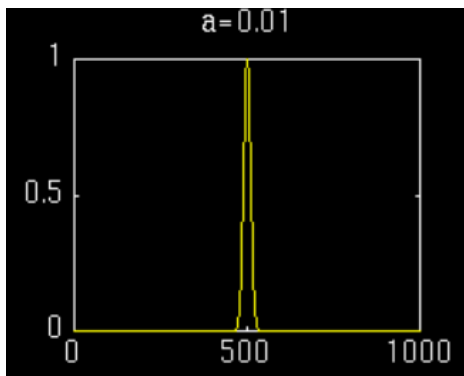


Fig. 19 STFT Usada para Analizar una Señal de Audio

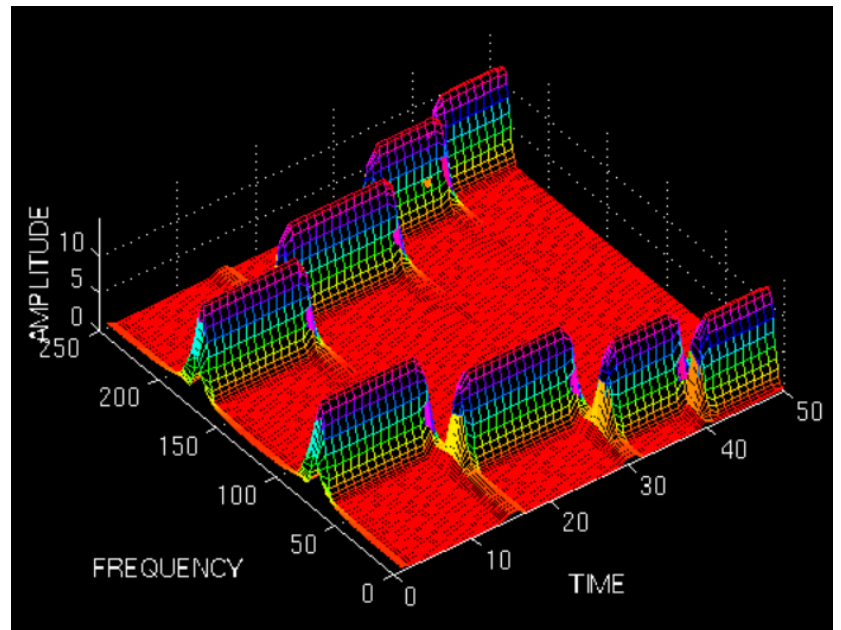
El problema de la STFT está relacionado con el Principio de Incertidumbre de Heisenberg, originalmente sobre el momento y la localización de las partículas en movimiento, pero aplicado a la información tiempo-frecuencia de una señal. El principio enuncia que no es posible conocer perfectamente qué componentes de frecuencia existen y en qué instantes de tiempo suceden. En la Transformada de Fourier la resolución del espectro de frecuencias que obtenemos es perfecta, pero en el tiempo es cero (no tenemos información). En cuanto a la STFT, el intervalo de medida es discreto, no cubre toda la señal, por lo que la resolución de las frecuencias obtenidas será más pobre: se conocen bandas de frecuencias que existen y el tiempo en el que estas suceden. Cuando más ancha sea la ventana adoptada mejor será la resolución frecuencial, pero peor la temporal. Así:

- Si Ventana estrecha → buena resolución en el tiempo, mala en frecuencias.
- Si Ventana amplia → mala resolución en el tiempo, buena en frecuencias.

Para ilustrar este hecho, a continuación se muestran dos análisis con la STFT de la misma señal con dos funciones de ventana, una amplia y otra estrecha:

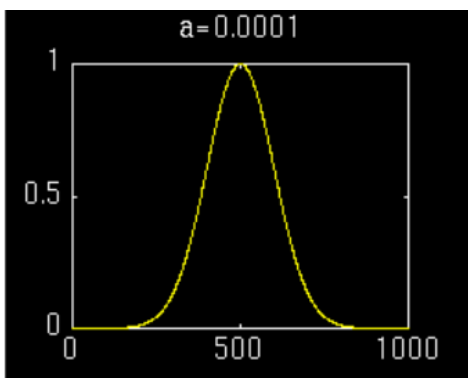


(a)

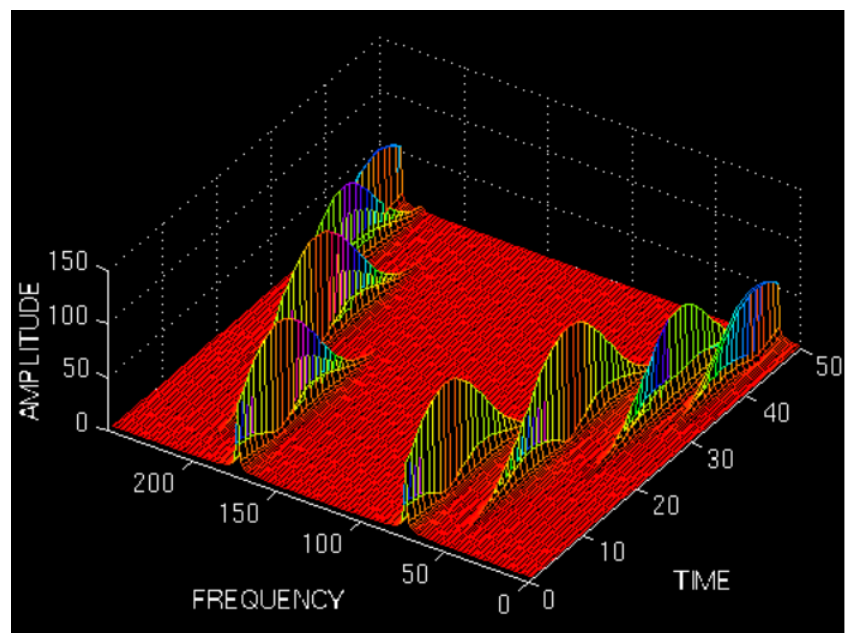


(b)

Fig. 20 a. Función Ventana Estrecha. b. STFT de la Señal con esta Función Ventana [23]



(c)



(d)

Fig. 21 c. Función Ventana Ancha. d. STFT de la Señal con esta Función Ventana [23]

Como se muestra en las figuras, al elegir una ventana estrecha los cambios temporales están muy definidos, no hay solapamientos en las regiones. No obstante, en el dominio frecuencial, estas aparecen por bandas, no como frecuencias concretas. Al contrario, al usar la ventana amplia vemos que las frecuencias se estrechan para darnos las frecuencias concretas. Pero, la resolución en el tiempo empeora, las bandas de frecuencia se solapan.

Estos ejemplos ilustran el principal problema de la STFT, la resolución: es necesario jugar con el ancho función ventana según la resolución que se precise tanto en tiempo como en frecuencia. De hecho, el principio de incertidumbre de Hilbert, conocido en física como el principio de incertidumbre de Heisenberg, establece una constante geométrica como límite de la resolución tiempo-frecuencia. Con tal de mejorar el problema de resolución de la STFT, se desarrollaron otro tipo de transformadas tiempo-frecuencia que solventan parte de este problema.

Estas transformadas surgen como un acercamiento alternativo al problema de la resolución tiempo-frecuencia en la STFT explicado anteriormente. Este tipo de análisis se conoce en la bibliografía como *MultiResolution Analysis* (MRA), y consiste en la variación de las resoluciones en función de que frecuencias de la señal se analice. Esto es, para frecuencias altas obtener una resolución temporal buena y peor en frecuencia, y para las frecuencias bajas obtener una resolución temporal peor, pero buena frecuencial. Esta forma de análisis es frecuentemente la óptima, puesto que las señales encontradas suelen tener frecuencias bajas presentes en todo el espectro, y frecuencias altas que suceden en momentos puntuales. [23]

Dentro del MRA, la familia de transformadas más usada actualmente son las *wavelets*. A continuación, se describirá brevemente el funcionamiento de la transformada wavelet continua, para entender la idea detrás de este tipo de análisis; y la transformada wavelet discreta (DWT), que será la que finalmente implementemos para los ensayos experimentales.

3.3.2.2. Transformada Wavelet Continua

La *Continuous Wavelet Transform* se desarrolló como un acercamiento alternativo a la STFT, para solucionar el problema de la resolución mediante el MRA. Tiene dos diferencias fundamentales: no se toma la Transformada de Fourier de la señal, y el ancho de la función de ventana cambia conforme la transformada se computa. La expresión es:

$$CWT^{\Psi}\{x(t)\}(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int x(t) \Psi^*\left(\frac{t-\tau}{s}\right) dt \quad (3.15)$$

Donde τ es la traslación, es decir, donde se coloca la función ventana; $\Psi(t)$ es la función wavelet madre, la función ventana utilizada; y s la escala.

Esta escala sustituye al término frecuencia de la STFT, y funciona de manera similar a la escala de un mapa, estirando o contrayendo la función wavelet madre. Cuando su valor es pequeño, esta es una función ventana estrecha, que nos permite encontrar altas frecuencias con buena resolución; cuando su valor es alto, al contrario, la wavelet se expande dándonos acceso a las bajas frecuencias.

La transformada se computa iniciando con $s = 1$; la función sin dilatar. Se integra para todo el intervalo de tiempo de la señal, multiplicando el resultado por $1/\sqrt{s}$, para que la transformada muestre la misma energía para todas las escalas. Posteriormente, se desplaza la τ y se vuelve a integrar. Una vez este proceso se ha terminado, se aumenta la s y repite. Así, si en algún momento la señal tiene una componente frecuencial que corresponda a la de la función escalada, el producto se verá ampliado en ese lugar.

Obtenemos de esta manera una función en 3D, donde la escala representa en cierta forma lo que era la frecuencia en la STFT, y la traslación lo que era el tiempo:

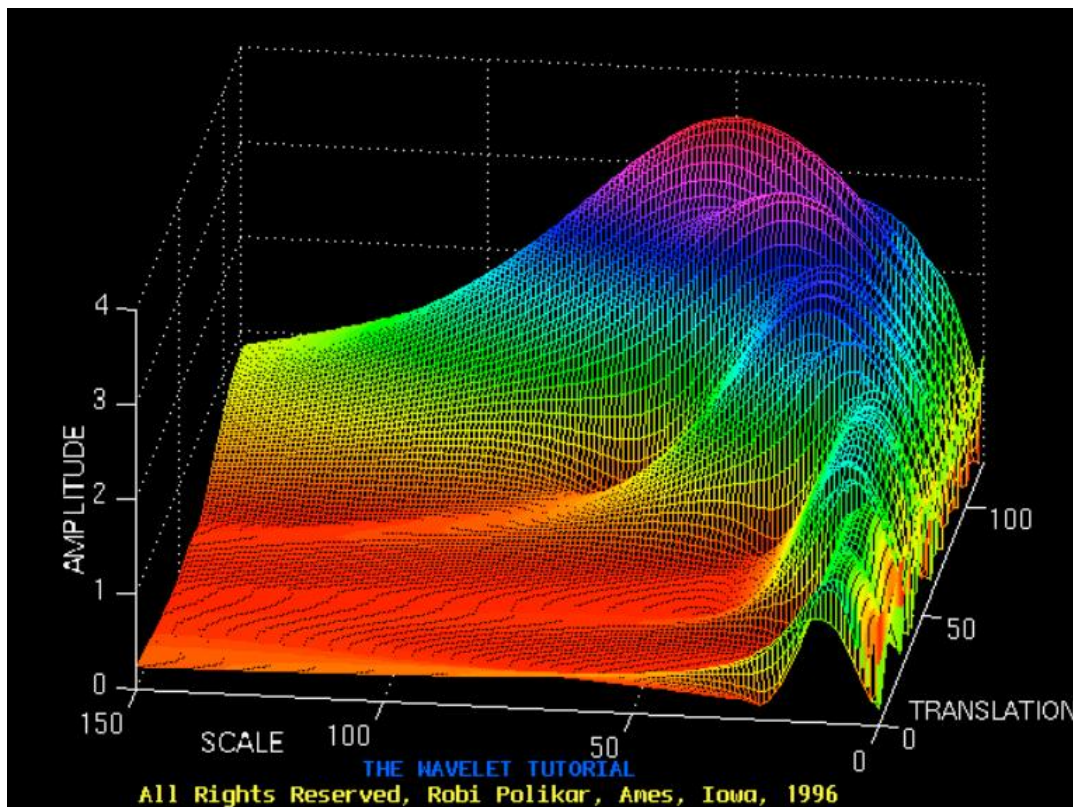


Fig. 22 Transformada Wavelet Continua de una Señal [23]

Como la escala va dividiendo, cuanto menor sea esta, mejor resolución de escala tendrá. No obstante, esto corresponde a una función ventana estrecha por lo que la resolución de frecuencia será mala, pero buena en el tiempo. Para escalas altas, la ventana será amplia, por lo que la resolución de frecuencia buena, pero mala en el tiempo.

Para computarla con un ordenador, esta transformada se puede discretizar. No obstante, su tiempo de computación puede tomar desde unos segundos a horas, dependiendo del tamaño de la señal y la resolución exigida. Por esto, se desarrolló un algoritmo mucho más rápido que nos entrega información similar: la *Discrete Wavelet Transform*.

3.3.2.3. Transformada Wavelet Discreta

La Transformada Wavelet Discreta o *Discrete Wavelet Transform* (DWT) permite el análisis tiempo frecuencia de la señal original con una reducción significativa del tiempo de computación respecto a la CWT discretizada. La DWT se basa en el filtrado de la señal capturada en bandas frecuenciales. La DWT descompone la señal analizada en varias señales denominadas wavelets, de manera que cada una viene asociada a una banda de frecuencias. Así, cada señal wavelet refleja la evolución temporal de las componentes frecuenciales incluidas en su banda de frecuencias asociada.

Para esto, la señal analizada (discreta) se pasa por un filtro. Filtrar corresponde matemáticamente a la operación de convolución de la señal $x[n]$ y la respuesta del filtro a un impulso $h[n]$:

$$x[n] * h[n] = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} x[k] \cdot h[n - k] \quad (3.16)$$

De esta manera, la señal se pasa por un filtro paso bajo de media banda y otro paso alto, dividiendo el espectro de frecuencias en dos mitades. Cada señal filtrada tendrá ahora la mitad de ancho de banda de frecuencias que la original, por tanto, por el teorema de Nyquist-Shannon [24], la mitad de las muestras pasarán redundantes y pueden no tenerse en cuenta. Así las operaciones quedarán, siendo g el filtro de paso alto y h el de paso bajo:

$$\begin{aligned} y_{high}[n] &= \sum_k x[k] \cdot g[2n - k] \\ y_{low}[n] &= \sum_k x[k] \cdot h[2n - k] \end{aligned} \quad (3.17)$$

Este procedimiento se conoce como *subsampling*, y mejora el tiempo de computación. Eliminando *samples* con cada descomposición consecutiva se empeorará la resolución de tiempos, pero la frecuencia mejorará, puesto que los anchos de banda se reducen.

La descomposición sigue el siguiente esquema:

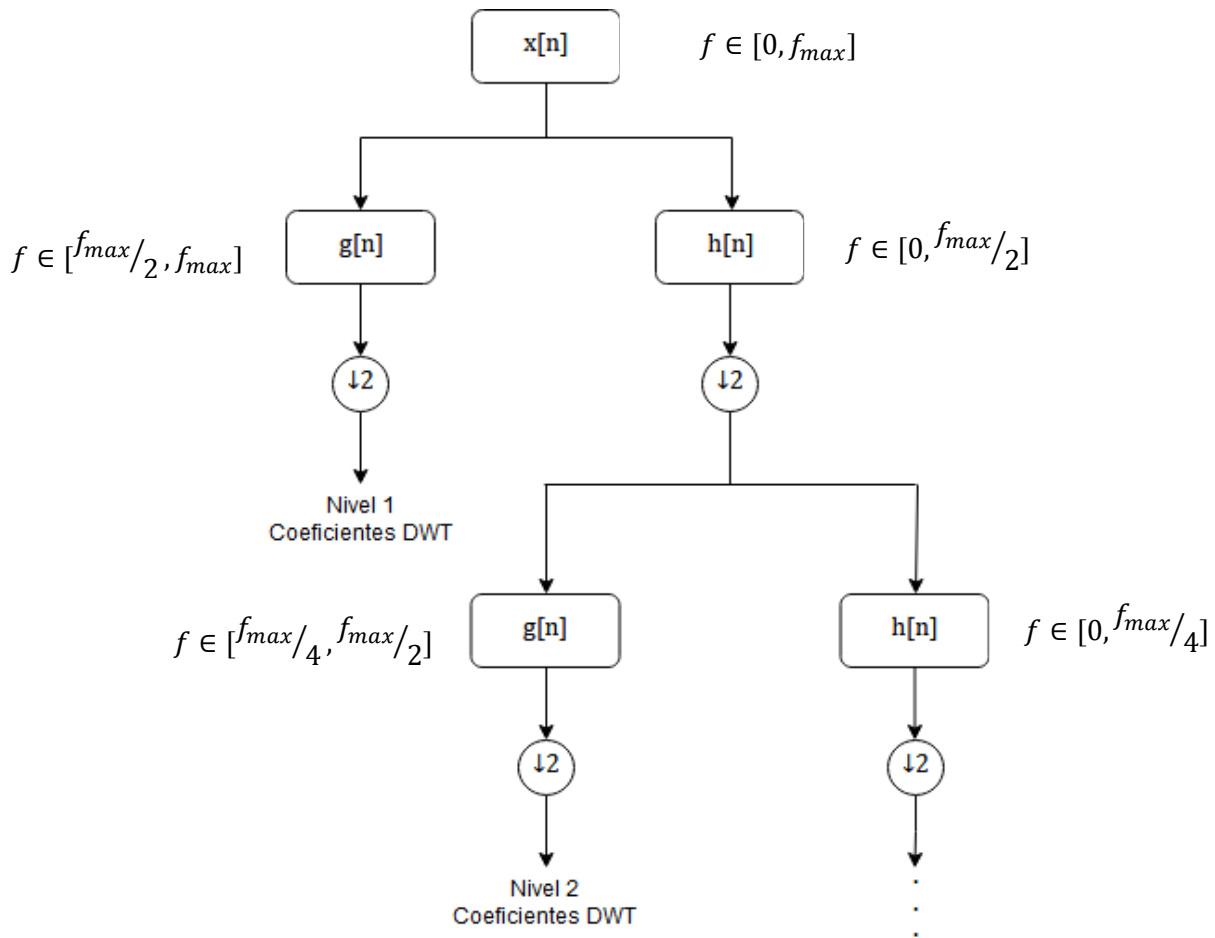


Fig. 23 Esquema de Descomposición DWT [23]

Como síntesis de este proceso, cuando se aplica la descomposición DWT de n niveles sobre una señal se obtendrán, por un lado, n señales de detalle, que contendrán las componentes incluidas en su intervalo de frecuencias asociado. Los límites del intervalo de frecuencias asociado a una de estas señales wavelet d_j vienen determinados por la frecuencia de muestreo (f_s) que se utiliza para capturar la señal original y por el nivel de la correspondiente señal j , de la forma:

$$f(d_j) \in [f_s \cdot 2^{-(j+1)}, f_s \cdot 2^{-j}] \text{ Hz} \quad \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (3.18)$$

Por otro lado, como resultado del análisis DWT también se contendrá una señal de aproximación (a_n), que contendrá todas las componentes de baja frecuencia del intervalo:

$$f(a_n) \in [0, f_s \cdot 2^{-(n+1)}] \text{ Hz} \quad (3.19)$$

En conclusión, el análisis DWT de una señal (por ejemplo, la EMF durante el arranque) implicará una descomposición de la misma en señales wavelet asociadas a bandas frecuenciales cuyos límites son bien conocidos ya que dependen de la frecuencia de muestreo y del número de niveles seleccionado. Este proceso se ilustra en la siguiente Figura:

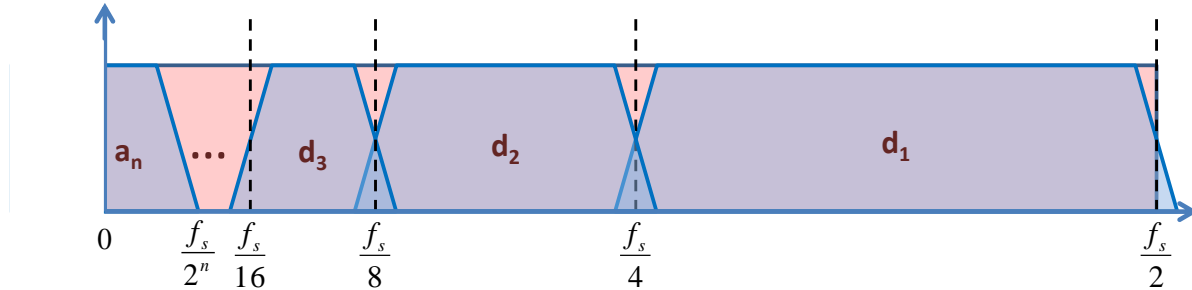


Fig. 24 Proceso de filtrado desarrollado por la DWT

En el caso que nos ocupa, si se aplica la transformada DWT sobre la señal analizada (señal de EMF durante el arranque) las señales wavelet resultantes permitirán la observación de la evolución de las componentes de fallo durante el arranque y, concretamente, del armónico lateral inferior, cuya evolución sigue el patrón en forma de V previamente comentado.

Con tal de ilustrar este hecho, abajo se muestran dos descomposiciones DWT de una señal de corriente de un motor de inducción de jaula de ardilla. En una figura se muestra el análisis de la máquina sana, y en otra el de la máquina con una barra del rotor rota. La componente del *armónico lateral inferior* nos indica con bastante claridad la existencia del fallo:

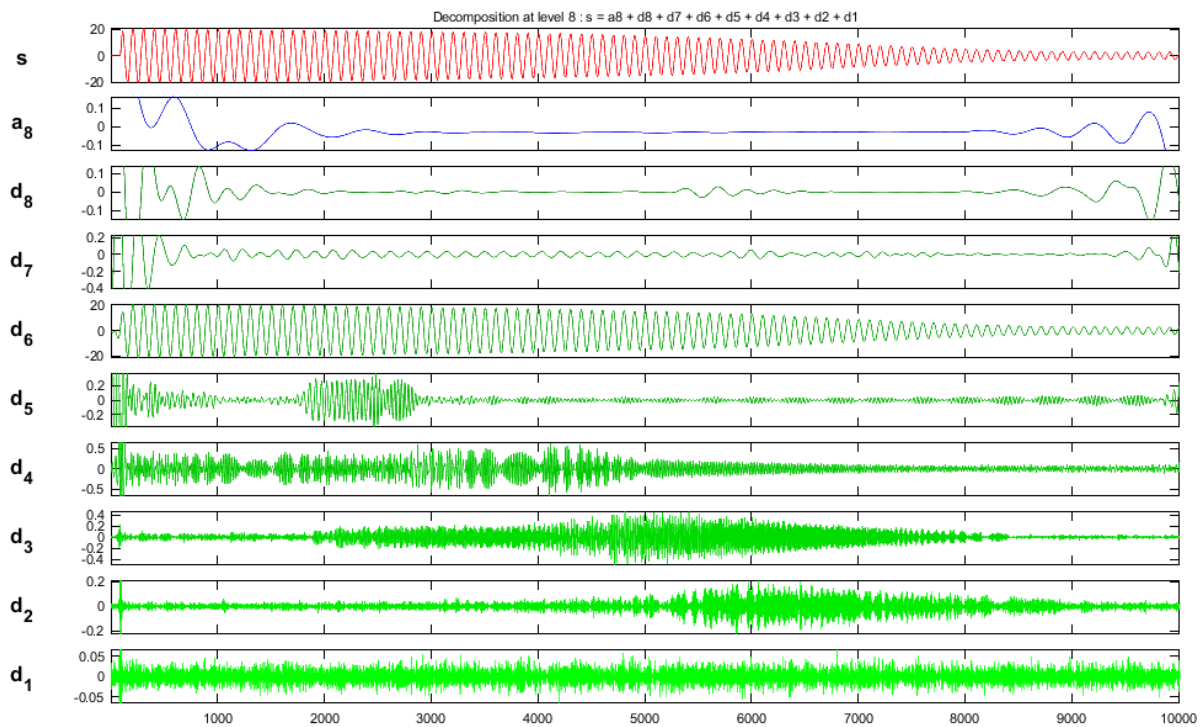


Fig. 25 Descomposició DWT Señal Corriente. Máquina Sana

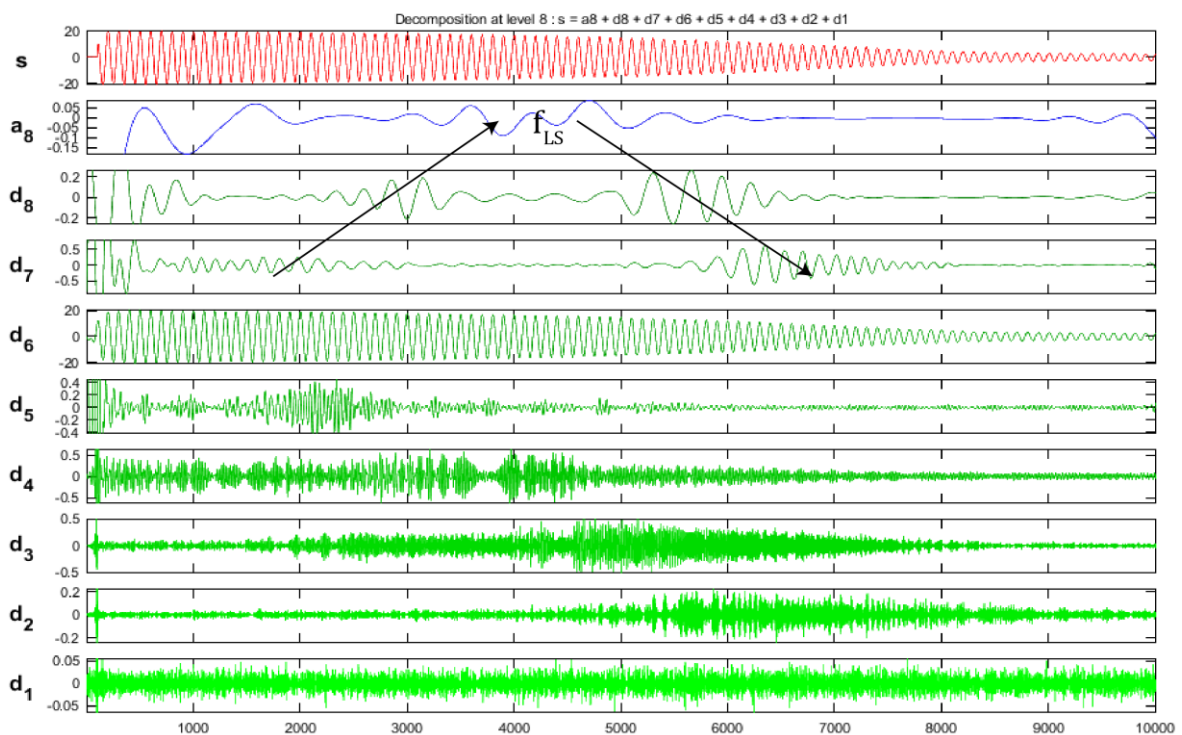


Fig. 26 Descomposició DWT Señal Corriente. Rotor con 1 Barra Rota

4. ENSAYOS EXPERIMENTALES

En este capítulo se describirán los componentes requeridos para los ensayos, así como el procedimiento para su realización y análisis posterior de las señales obtenidas. El objetivo de los ensayos es obtener las señales de flujo necesarias para efectuar los análisis DWT que permitan evaluar la aplicabilidad de la técnica de análisis del flujo de dispersión para la detección de asimetrías rotóricas en máquinas de rotor bobinado.

4.1. ELEMENTOS DEL ENSAYO

4.1.1. Bancada

La bancada utilizada para los ensayos experimentales consiste en un motor de inducción de rotor bobinado de 15 CV (11,19 kW) y 2 pares de polos, que arrastra a una máquina síncrona que actúa como generador. Esta máquina se conecta a un banco de resistencias, que permite la variación de la potencia generada, consiguiendo la operación del motor de inducción ensayado a diferentes niveles de carga (en este trabajo se consideran tres niveles de carga distintos). La potencia requerida por el banco de resistencias varía entre 500 W y 3500 W.

Con tal de obtener una medida de calidad, es decir, una señal con el menor ruido posible, el motor se encuentra fijado a un bastidor metálico acoplado con una unión elástica, para limitar las vibraciones mecánicas.



Fig. 27 Imagen del Montaje en el Laboratorio

4.1.2. Motor Ensayado y Carga Arrastrada

El motor ensayado es un motor de inducción de rotor bobinado del fabricante *Construcciones Electromecánicas Indar*, cuyas características pueden leerse en la siguiente placa de características:



Fig. 28 Placa de Características del Motor Ensayado

- Tensión nominal (estrella): 380 V
- Corriente nominal (estrella): 23 A
- Frecuencia nominal: 50 Hz
- $\cos \varphi$: 0,84
- Velocidad nominal: 1480 rpm
- Potencia nominal: 15 CV | 11,19 kW
- Pares de polos: 2
- Tensión nominal del rotor: 310 V
- Corriente nominal del rotor: 23 A

El motor de rotor bobinado se conecta a un reostato externo de arranque, intercalando una resistencia variable en una de las fases con tal de simular el fallo de asimetría rotórica a distintos niveles. Los niveles empleados en los ensayos serán el 0 (máquina sana), 1 (asimetría pequeña), 5 (asimetría moderada) y 9 (asimetría severa).

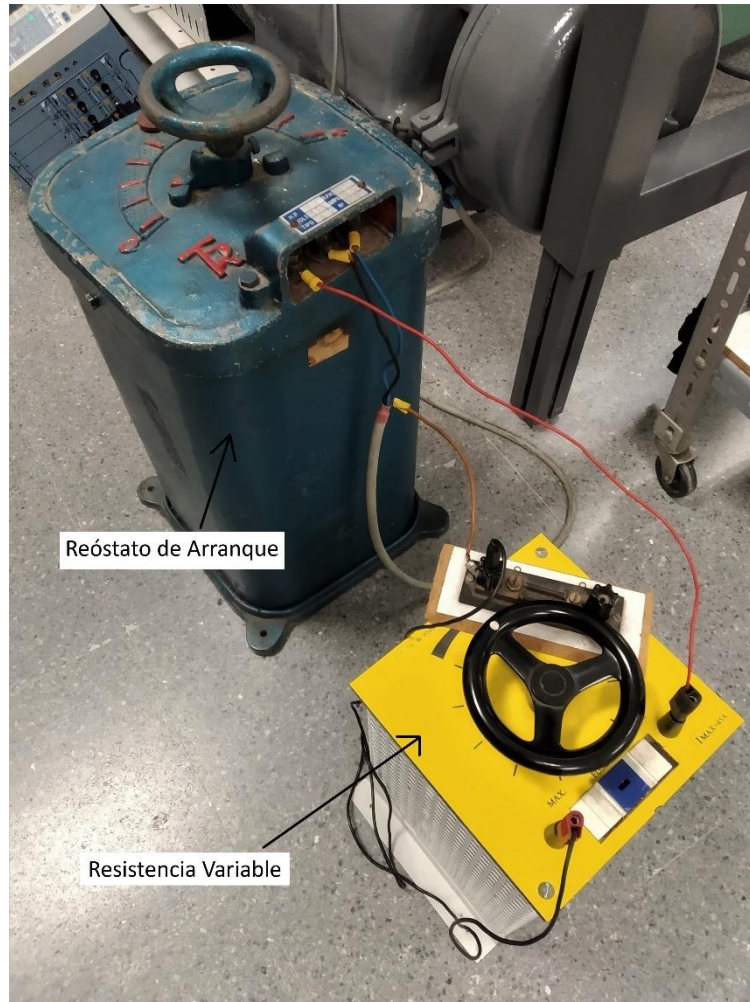


Fig. 29 Reostato de Arranque y Resistencia Variable Intercalada

Como se ha comentado, con el fin de aplicar al motor cierto nivel de carga, se utiliza una máquina síncrona que es arrastrada por el motor ensayado, actuando así esta máquina como generador (alterador). A tal fin, se alimenta el devanado de excitación de esta máquina síncrona con una corriente continua (tensión nominal 50 V). Las fases del estátor alimentan una batería de resistencias con las que se puede variar la potencia exigida al generador, alternando entre 500 y 3500 W.



Fig. 30 Banco de Resistencias

De esta manera, los ensayos se realizarán comenzando con máquina sana, registrando las posiciones con carga leve y con carga alta. Posteriormente, se irá ampliando el nivel de asimetría a 1, 5 y 9, haciendo en cada caso tres medidas, una sin carga, otra para carga leve y otra para carga elevada.

4.1.3. Sondas y Osciloscopio

Para capturar la señal se utiliza una sonda experimental bobinada de geometría plana de 100 espiras, fijada en el exterior del motor en las posiciones de la figura 15.

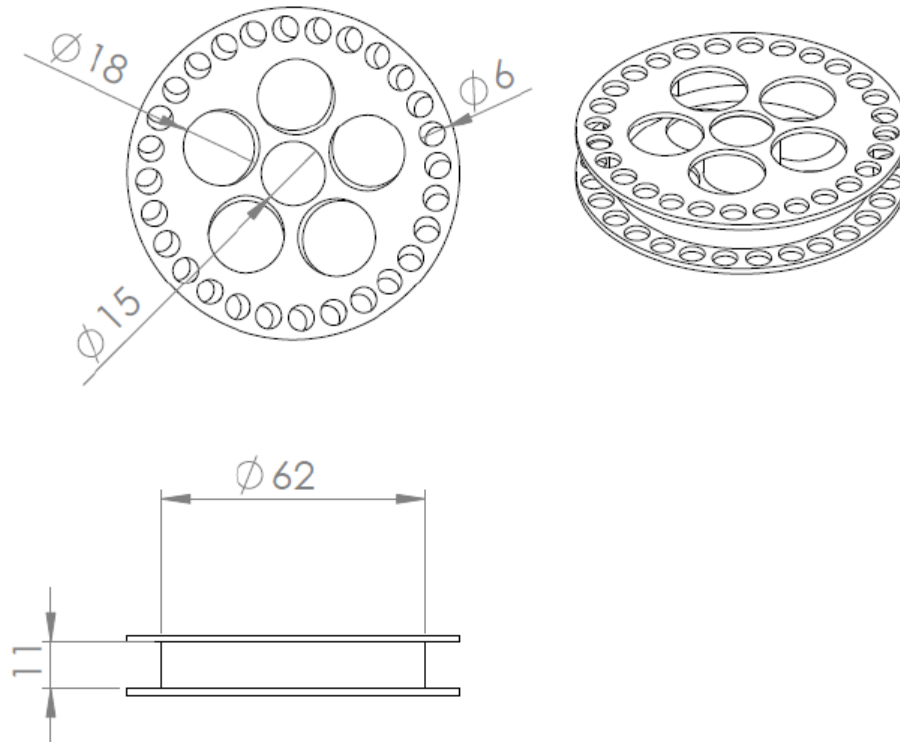


Fig. 31 Sonda Utilizada en los Ensayos. Cotas en **mm**

- Diámetro exterior: 62 mm
- Anchura (bobinado): 11 mm
- Número de espiras: 1000
- Sección hilo de cobre: 0,2 mm
- Clase térmica cable: H (180 °C)
- Tipo de conector: BNC

El osciloscopio usado es un *Yokogawa* modelo *DL850*, que permite el registro de hasta 8 señales de entrada, permitiendo el posterior análisis de las señales en softwares como MATLAB.

4.2. METODOLOGÍA DE ENSAYO

Los ensayos fueron realizados durante varias sesiones en el Laboratorio de Máquinas y Tecnología Eléctrica del Departamento de Ingeniería Eléctrica. La primera sesión se usó a modo de prueba, con tal de realizar un primer estudio de aplicabilidad de la técnica. En esta sesión no se le colocó carga al motor, se ensayó en vacío. Además, con tal de verificar la aplicabilidad, se registraron las corrientes de alimentación de cada fase. La metodología seguida para este primer ensayo fue la siguiente:

- 1º Preparación de la bancada, intercalando la resistencia variable en una de las fases del rotor, desmontando el reostato de arranque. Conexión del motor en estrella.
- 2º Colocación de la sonda de flujo en la posición pertinente: A, B o C.
- 3º Registro de la señal durante el arranque hasta el establecimiento del régimen permanente.
- 4º Parada del motor y subida del escalón de resistencia intercalada, aumentando el nivel de asimetría.
- 5º Repetición de las medidas para los escalones 1, 5 y 9.
- 6º Cambio de la sonda de posición y vuelta al paso 3.
- 7º Una vez realizados todos los escalones de asimetría para las 3 posiciones, deshacer el montaje.

Los resultados de esta primera aproximación fueron favorables, pero se detectaron fallos: la sujeción de la sonda en las posiciones de medida no era buena y se movió durante el ensayo, lo que provocó notables diferencias a lo largo de las medidas; el montaje de la posición C se hizo demasiado lejano a la máquina, por lo que la señal era demasiado débil; y, además, la técnica solo se había ensayado con la máquina en vacío. No obstante, se aprovechó esta sesión para obtener medidas con la máquina trabajando sin carga que también se procedieron a analizar.

Debido a esto, se decidió preparar una segunda sesión. Esta vez, la sujeción de la sonda fue realizada mediante Velcro, de manera que la sonda podía intercambiarse con facilidad entre las posiciones y el material de sujeción no interfería de ninguna manera en la medida del flujo. Para la posición C se montó un soporte con un listón de madera y una base que permitía colocar la sonda muy próxima a la máquina, mejorando así la medida. Además, se comprobó el funcionamiento del generador, tal y como se describe en el anterior punto. De esta manera, el motor alternaría entre dos estados de carga. La metodología del segundo ensayo fue:

- 1º Preparación de la bancada, intercalando la resistencia variable en una de las fases del rotor, desmontando el reostato de arranque. Conexión del motor en estrella.
- 2º Conexión del generador: alimentando con corriente continua la bobina del rotor y conectando las fases al banco de resistencias.
- 3º Colocación de la sonda de flujo en la posición pertinente: A, B ó C.
- 4º Registro de la señal durante el arranque hasta el establecimiento del régimen permanente, con carga baja (banco de resistencias a 500 W).

- 5º Parada del motor y cambio de la carga conectada al generador a 3500 W, volviendo a realizar el análisis.
- 6º Subida de escalón de resistencia intercalada, aumentando así el nivel de asimetría.
- 7º Repetición de las medidas para los escalones 1, 5 y 9, obteniendo para cada escalón una medida en carga baja y otra en carga alta.
- 8º Cambio de la sonda de posición y vuelta al paso 3, repitiendo todos los pasos.
- 9º Una vez realizados todos los escalones de asimetría para las 3 posiciones, con 2 niveles de carga para cada escalón, deshacer el montaje.

Los resultados obtenidos tras esta sesión fueron mucho más satisfactorios. No obstante, hubo un error en las mediciones realizadas para la posición B, la sonda no se colocó en el lugar adecuado. Así pues, fue necesario realizar una tercera sesión para obtener los resultados correctos.

Posteriormente se realizó una cuarta sesión para obtener los valores del motor sano, sin intercalar la resistencia variable. Sin embargo, estos resultaron ser prácticamente idénticos a los del motor con resistencia intercalada en escalón 0. Por ello, los análisis de estas señales no están incluidos en el capítulo de resultados y análisis de este trabajo.



Fig. 32 Registro de la Señal en Posición C

4.3. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

La metodología seguida, en cuanto al tratamiento de la señal es la siguiente:

1º Obtención de la señal transitoria: no es necesaria una frecuencia de muestreo f_s muy elevada, pues según el teorema de Nyquist $f_s > 2 \cdot f_{max}$ y la componente de fallo que queremos observar se encuentra en el espectro de bajas frecuencias. La frecuencia finalmente elegida es de 5 kSamples/s , puesto que de esta manera se tiene suficiente resolución de la señal y la frecuencia fundamental no queda cercana a las bandas de la descomposición de la wavelet.

2º Aplicación de la DWT: se emplea la *Wavelet Toolbox* de MATLAB, una herramienta que permite obtener la descomposición y el posterior tratamiento. Hay dos pasos fundamentales, la selección de la *Mother Wavelet* y el establecimiento del número de niveles de descomposición

La *Wavelet Madre* se relaciona con los tipos de filtro usados en la descomposición de la DWT. Existen distintas formas (*Mexican Hat*, *Gaussiana*, etc.), que dependiendo de la aplicación unas dan mejor resultado que otras. En nuestro caso elegiremos la wavelet de tipo *Dmeyer*, puesto que es la que mejor resultado ha dado tras probar el resto en los análisis.

En cuanto al nivel de descomposición, este viene determinado por las componentes de baja frecuencia que se quieran observar. Cuanta menor sea la frecuencia a observar, mayor número de descomposiciones. En este trabajo se utilizará un nivel $n = 8$.

3º Análisis de las señales wavelet: una vez representadas las señales resultado de la descomposición DWT se deben interpretar. Primero, realizando un análisis cualitativo, observando si aparece el patrón en V característico de la *Lower Frequency Sideband*. Posteriormente, una vez identificada la avería, cuantificar numéricamente el nivel de fallo. Este indicador se basa en la comparación de la energía de la señal wavelet d_8 , donde se producen oscilaciones, y la energía de la señal original en el mismo intervalo. Se sigue la siguiente fórmula:

$$\gamma_{DWT}(dB) = 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{\sum EMF^2}{\sum d_8^2} \right] \quad (4.1)$$

4º Conclusión del diagnóstico: tras los pasos anteriores, se compara el indicador de avería resultado de los análisis, con tal de obtener un orden de magnitud del indicador de fallo: qué valores representan qué nivel de avería. Dado que se trata de una técnica novedosa no se encuentran ejemplos anteriores de ensayos de este tipo.

5. ANÁLISIS Y RESULTADOS

En este apartado, se mostrarán los resultados de los análisis del flujo de dispersión, para distintas posiciones de medida, niveles de carga y niveles de asimetría. Con ello se pretende establecer una valoración de la magnitud del *armónico lateral inferior* en la señal durante el arranque, y comprobar la relación de este con el nivel de fallo, evaluando así la aplicabilidad de la técnica.

Se incluirán en este capítulo únicamente los resultados de los análisis del motor en dos niveles de carga: moderada y elevada, con tal de poder establecer una comparación real con el comportamiento de los motores en Industria. Además, los ensayos en vacío resultaron ser prácticamente idénticos a los de carga baja, por lo que resultarían también redundantes.

Siguiendo la metodología de análisis previamente descrita, aplicaremos la Transformada Wavelet Discreta (DWT) *dmeyer* con 8 niveles de descomposición, con una frecuencia de muestreo $f_s = 5 \text{ kHz}$. Quedando los niveles de descomposición:

$$f(d_1) \in [1250, 2500] \text{ Hz}$$

$$f(d_2) \in [625, 1250] \text{ Hz}$$

$$f(d_3) \in [312.5, 625] \text{ Hz}$$

$$f(d_4) \in [156.25, 312.5] \text{ Hz}$$

$$f(d_5) \in [78.125, 156.25] \text{ Hz}$$

$$f(d_6) \in [39.0625, 78.125] \text{ Hz}$$

$$f(d_7) \in [19.53, 39.0625] \text{ Hz}$$

$$f(d_8) \in [9.765, 19.53] \text{ Hz}$$

$$f(a_8) \in [0, 9.765] \text{ Hz}$$

Quedando de esta manera, la frecuencia fundamental (50 Hz) en el nivel 6. Como en el análisis solo se quiere observar la evolución del *armónico lateral inferior*, que tiene lugar por debajo de 50 Hz; en los siguientes puntos no se incluirán los niveles de descomposición menores que 6.

5.1. SONDA EN POSICIÓN A

Esta posición es la que mayor componente de flujo axial capta y, por tanto, según la bibliografía ([14], [20]), debería ser en la que menos se observara el indicador de fallo, de componente radial. No obstante, cabe señalar que la investigación anterior se ha centrado únicamente en motores de inducción de jaula de ardilla, por lo que los resultados en el motor de rotor bobinado podrían diferir de lo esperado.

5.1.1. Sonda en Posición A: Escalón 0

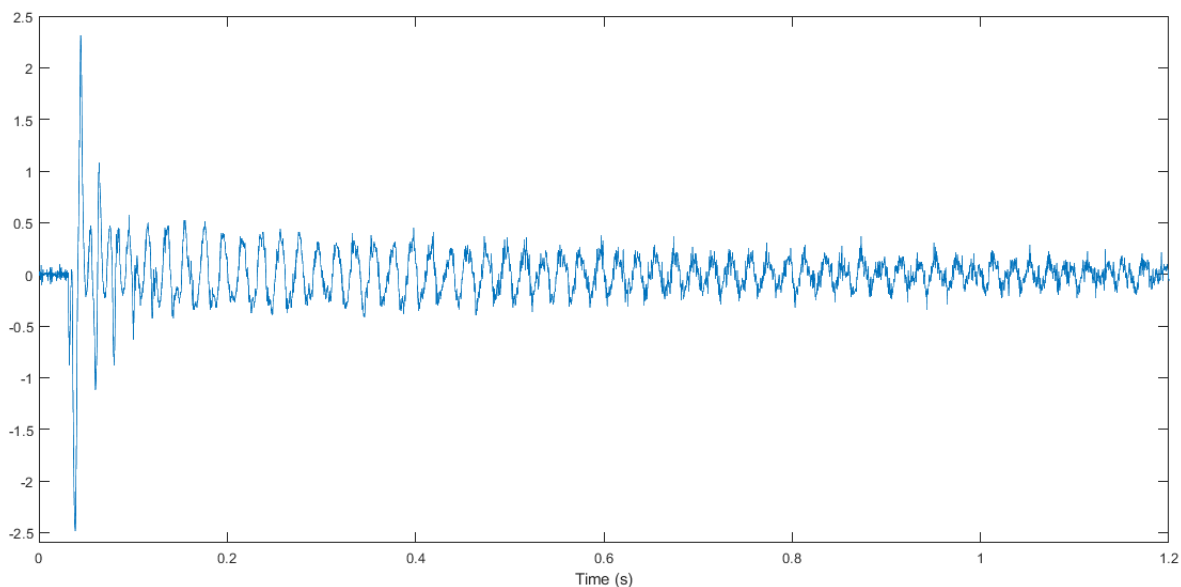


Fig. 33 Evolución del Flujo de Dispersión Axial durante el Arranque. Posición A: Escalón 0

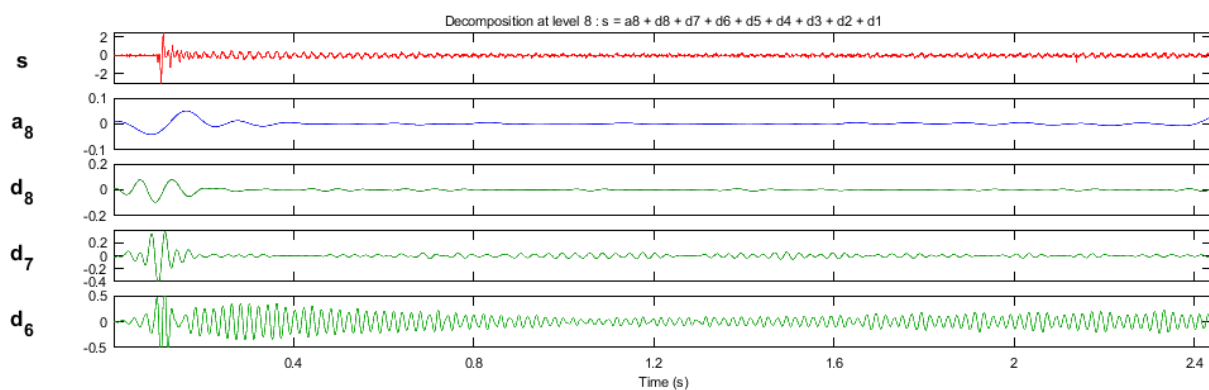


Fig. 34. Descomposición DWT. Posición A: Escalón 0. Carga Moderada

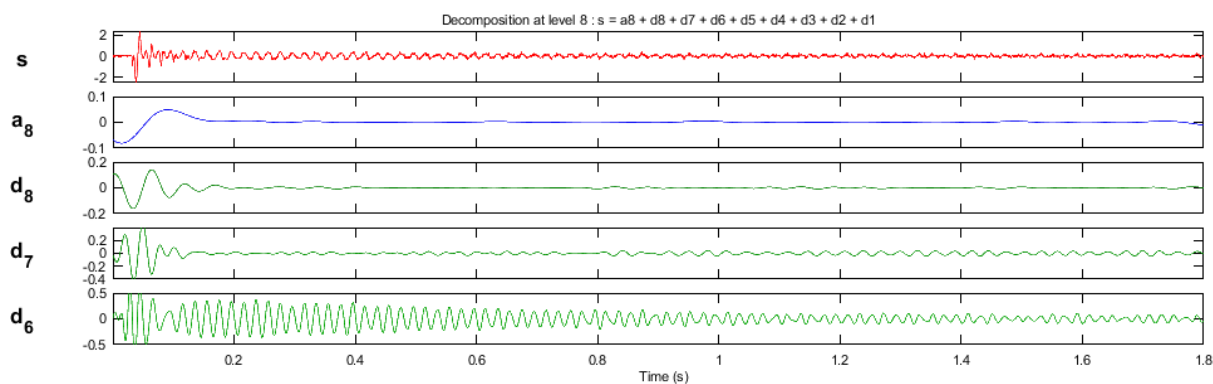


Fig. 35 Descomposición DWT Posición A: Escalón 0. Carga Elevada

Realizando el análisis cuantitativo del fallo en el arranque se obtienen los siguientes indicadores energéticos:

Para la situación sin carga, en el intervalo [1; 1,15] según la ecuación 4.1:

$$\gamma_{DWT}^{SC}(dB) = 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{\sum EMF^2}{\sum d_8^2} \right] = 26,22 \text{ dB}$$

Y para la situación con carga, en el intervalo [0.75, 0.95]:

$$\gamma_{DWT}^{CC} = 28,03 \text{ dB}$$

5.1.2. Sonda en Posición A: Escalón 1

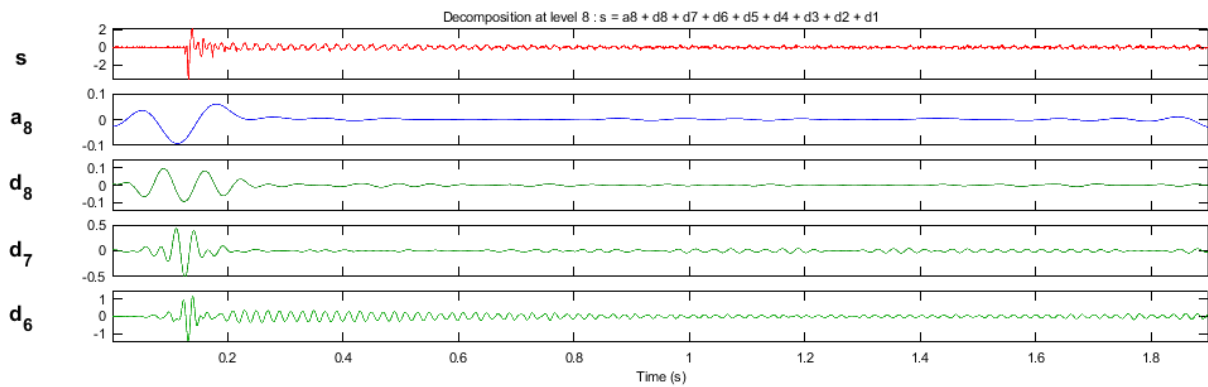


Fig. 36 Descomposición DWT. Posición A: Escalón 1. Carga Moderada

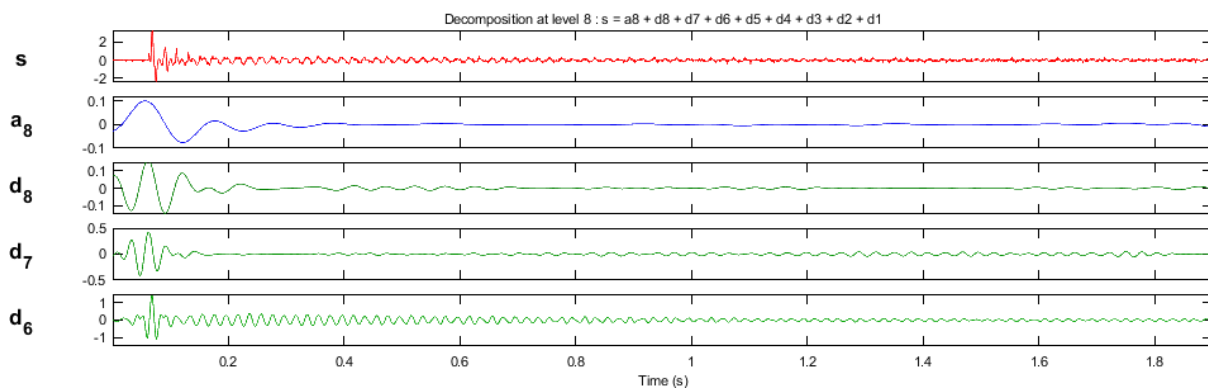


Fig. 37 Descomposición DWT. Posición A: Escalón 1. Carga Elevada

La diferencia visual entre este escalón y el anterior en la descomposición es prácticamente imperceptible. El indicador de fallo:

$$\gamma_{DWT}^{SC} = 26,1 \text{ dB}$$

$$\gamma_{DWT}^{CC} = 27,88 \text{ dB}$$

5.1.3. Sonda en Posición A: Escalón 5

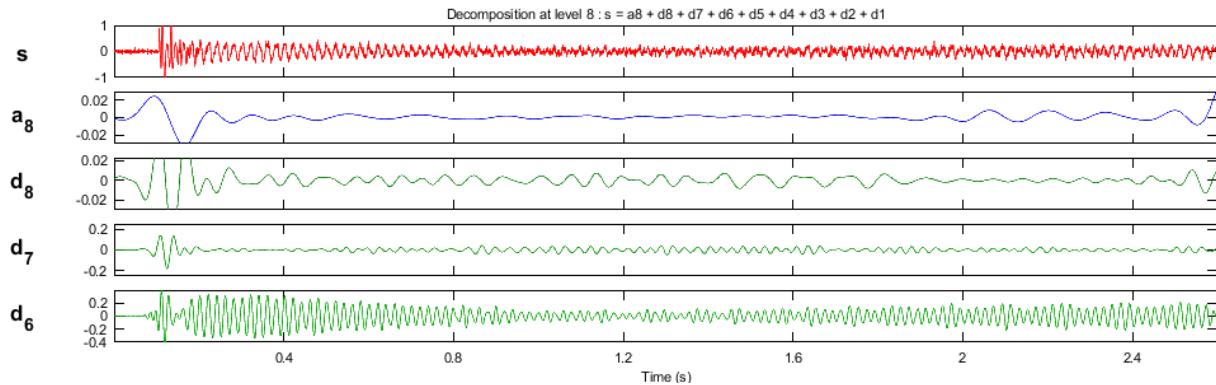


Fig. 38 Descomposición DWT. Posición A: Escalón 5. Carga Moderada

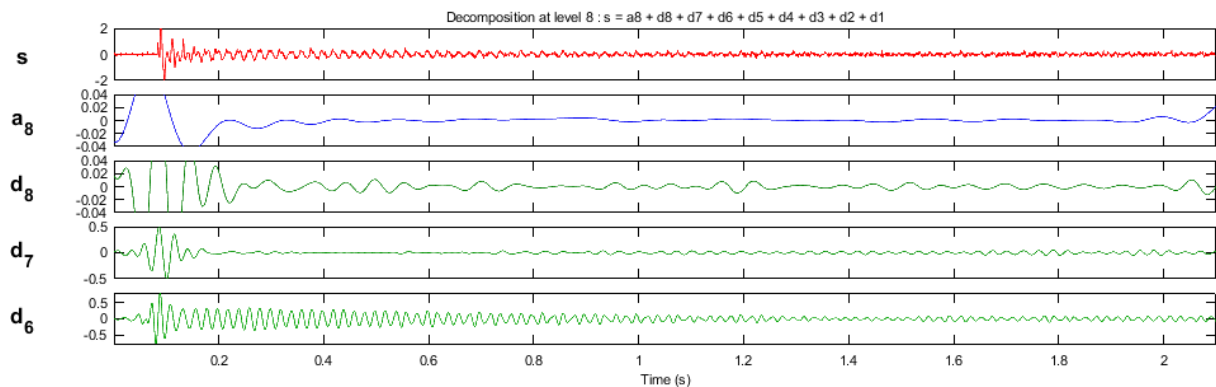


Fig. 39 Descomposición DWT. Posición A: Escalón 5. Carga Elevada

En este escalón ya se advierte el indicador de fallo un poco más, especialmente en la situación con carga alta. Calculando los indicadores:

$$\gamma_{DWT}^{SC} = 25,88 \text{ dB}$$

$$\gamma_{DWT}^{CC} = 27,53 \text{ dB}$$

Los indicadores, poco a poco van disminuyendo su valor conforme se agrava la avería. Aún así, no son muy representativos. Puede deberse a que el reostato intercalado en la fase del rotor no crea suficiente asimetría

5.1.4. Sonda en Posición A: Escalón 9

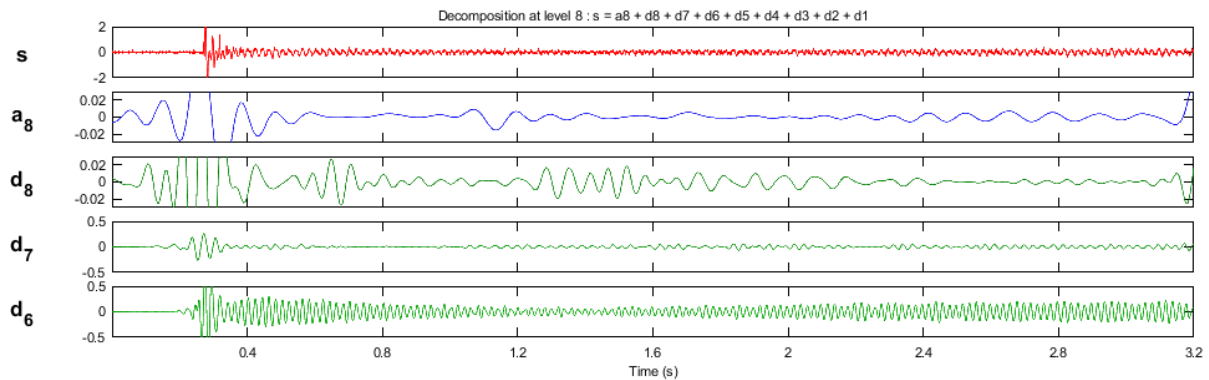


Fig. 40 Descomposición DWT. Posición A: Escalón 9. Carga Moderada

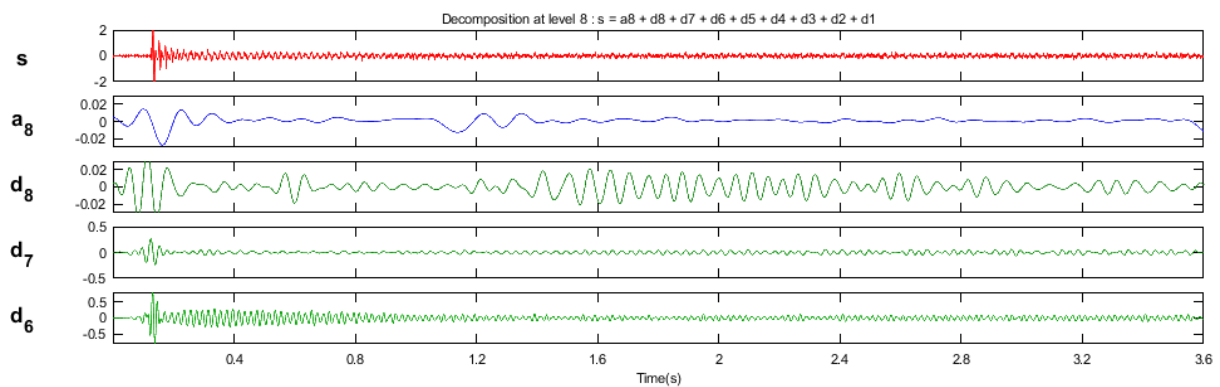


Fig. 41 Descomposición DWT. Posición A: Escalón 9. Carga Elevada

En este escalón se observa claramente la presencia del patrón en V y, por tanto, la existencia de una asimetría rotórica. Calculando los indicadores de fallo:

$$\gamma_{DWT}^{SC} = 18,5 \text{ dB}$$

$$\gamma_{DWT}^{CC} = 16,86 \text{ dB}$$

Los indicadores de fallo se reducen drásticamente, según lo esperado. Si representamos la evolución del indicador conforme avanza la avería observamos los siguiente:

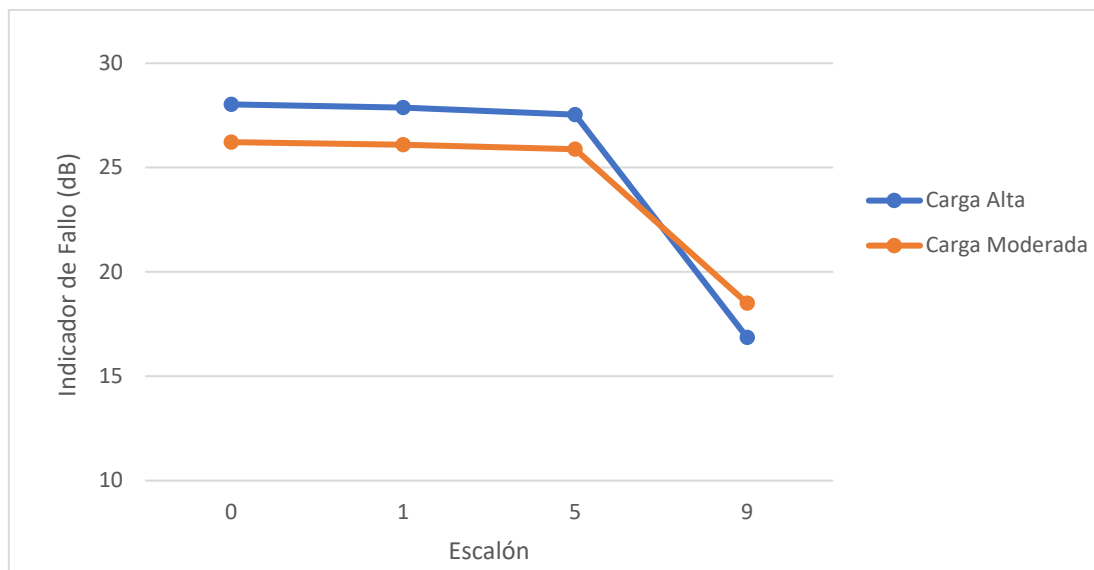


Fig. 42 Evolución del Indicador de Fallo en la Posición A

	Energía d8	Energía Total	γ_{DWT} (dB)
Escalón 0			
Carga alta	0,0184	11,6812	28,0266964
Carga moderada	0,0106	4,4361	26,2169546
Escalón 1			
Carga alta	0,0211	12,9393	27,8762833
Carga moderada	0,0568	23,1465	26,1013699
Escalón 5			
Carga alta	0,0286	16,2034	27,5324012
Carga moderada	0,0178	6,8945	25,8808277
Escalón 9			
Carga alta	0,4095	19,8621	16,8577126
Carga moderada	0,2023	14,3234	18,5005024

Tabla 3 Resultados Indicadores de Fallo en la Posición A

5.2. SONDA EN POSICIÓN B

De ahora en adelante no se mostrarán las descomposiciones DWT para carga baja y alta, puesto ambas suelen guardar bastante parecido, como puede apreciarse en los resultados en la posición A. Así, únicamente se mostrará la descomposición que resulte más representativa visualmente en cada escalón, con tal de aligerar el estudio de las señales.

Colocando la sonda en posición B se capta teóricamente componentes tanto del flujo axial como del radial. Los resultados obtenidos son los siguientes:

5.2.1. Sonda en Posición B: Escalón 0

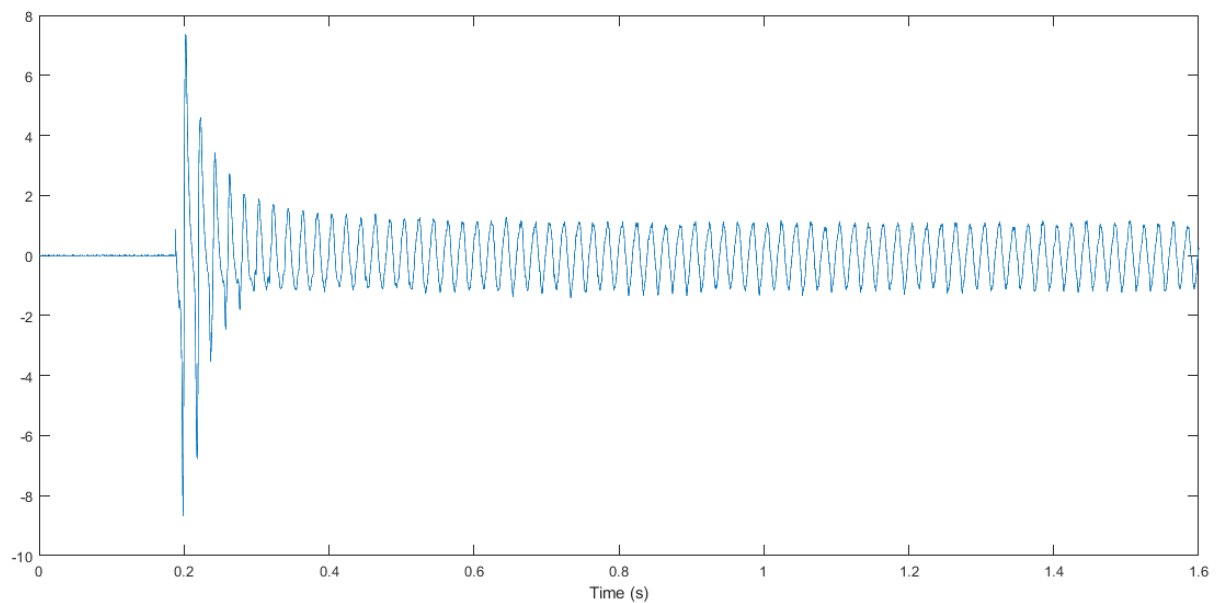


Fig. 43 Evolución del Flujo de Dispersión Mixto durante el Arranque. Posición B: Escalón 0

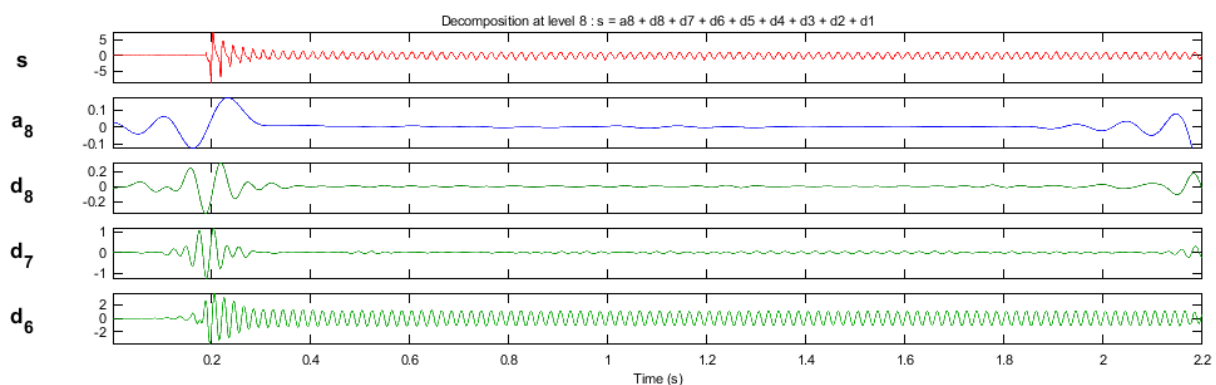


Fig. 44 Descomposición DWT. Posición B: Escalón 0. Carga Elevada

$$\gamma_{DWT}^{SC} = 40.31 \text{ dB}$$

$$\gamma_{DWT}^{CC} = 43.05 \text{ dB}$$

5.2.2. Sonda en Posición B: Escalón 1

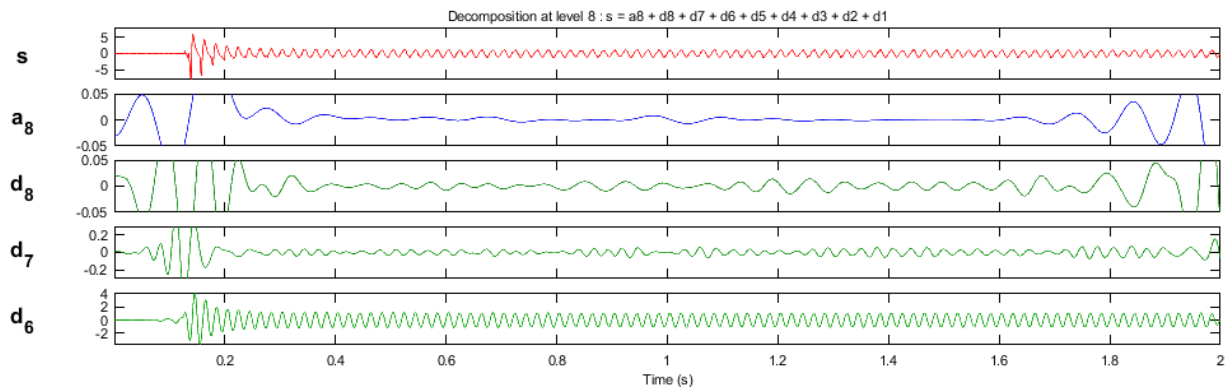


Fig. 45 Descomposición DWT. Posición B: Escalón 1. Carga Elevada

En la descomposición para la situación en carga se comienza a observar levemente el patrón en V, pese a ser únicamente el escalón 1. Los coeficientes quedarán:

$$\gamma_{DWT}^{SC} = 39.65 \text{ dB}$$

$$\gamma_{DWT}^{CC} = 41.73 \text{ dB}$$

5.2.3. Sonda en Posición B: Escalón 5

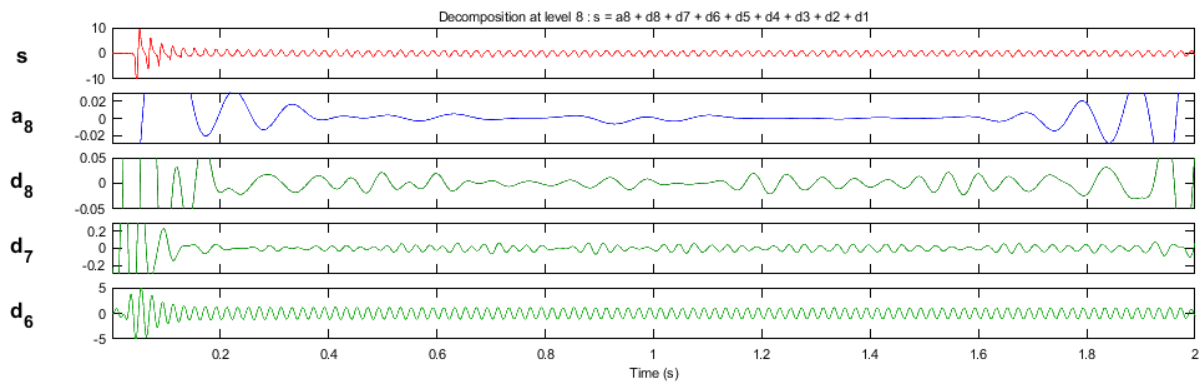


Fig. 46 Descomposición DWT. Posición B: Escalón 5. Carga Elevada

$$\gamma_{DWT}^{SC} = 39,98 \text{ dB}$$

$$\gamma_{DWT}^{CC} = 36,15 \text{ dB}$$

En este escalón, el identificador para el estado sin carga da mayor que el escalón anterior, lo que en teoría debería ser imposible. Debemos achacar esto a un error de medida, o un error al escoger el intervalo de cálculo del identificador.

5.2.4. Sonda en Posición B: Escalón 9

En este escalón, se observa mejor el patrón en la descomposición del estado sin carga:

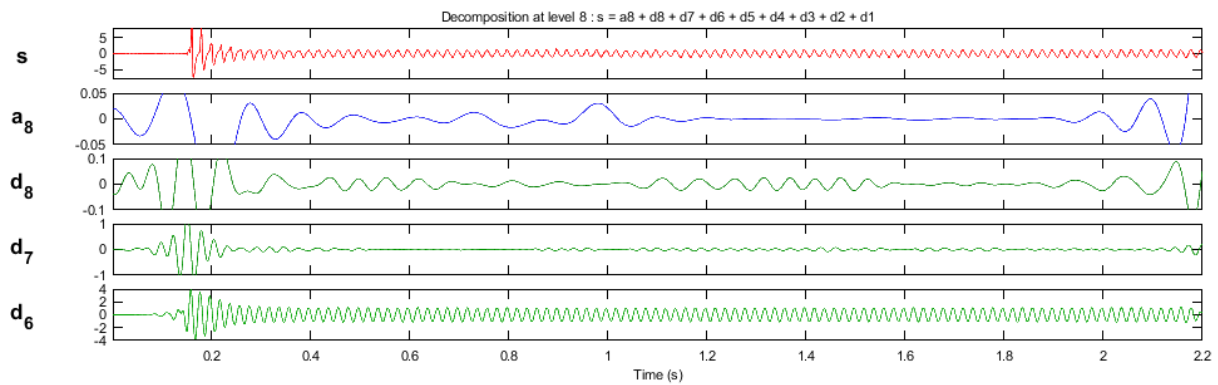


Fig. 47 Descomposición DWT. Posición B: Escalón 9. Carga Moderada

Los coeficientes quedan:

$$\gamma_{DWT}^{SC} = 33.96 \text{ dB}$$

$$\gamma_{DWT}^{CC} = 33,42 \text{ dB}$$

Y la evolución de los indicadores en la posición B conforme aumenta el nivel de fallo es la siguiente:

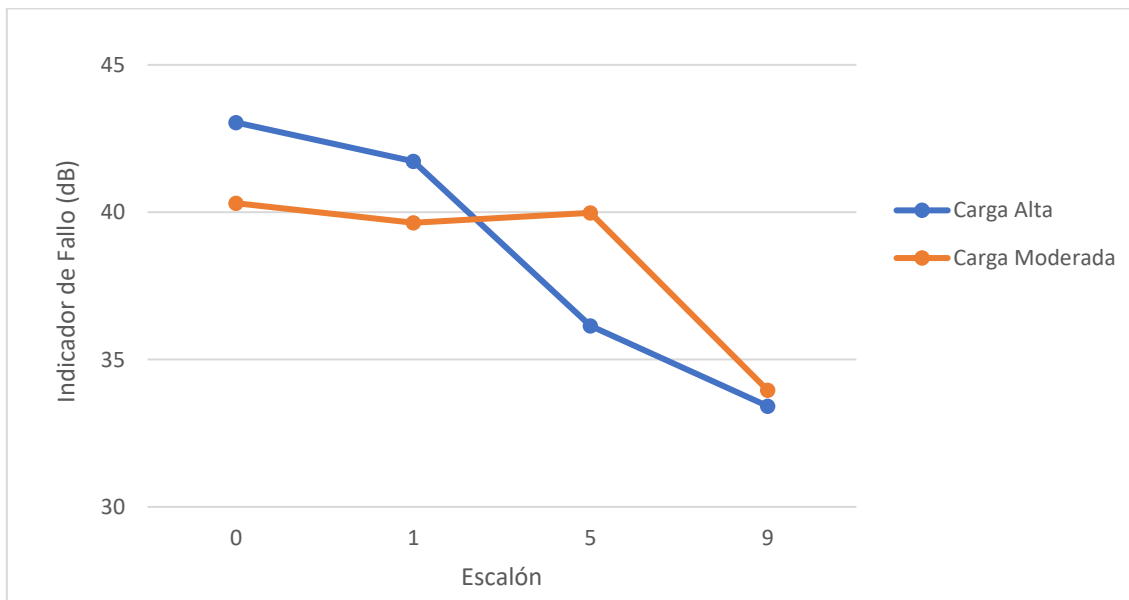


Fig. 48 Evolución del Indicador de Fallo en la Posición B

Siendo los valores obtenidos los siguientes:

	Energía d8	Energía Total	γ_{DWT} (dB)
Escalón 0			
Carga alta	0,0282	568,6063	43,0456256
Carga moderada	0,0484	519,3649	40,3062723
Escalón 1			
Carga alta	0,0357	531,4461	41,7279101
Carga moderada	0,0597	550,153	39,6450915
Escalón 5			
Carga alta	0,1457	600,0702	36,1474251
Carga moderada	0,0507	504,365	39,9773698
Escalón 9			
Carga alta	0,5756	1264,9	33,4193541
Carga moderada	0,4493	1117,1	33,9555563

Tabla 4 Resultados Indicadores de Fallo en la Posición B

Salvo el dato conflictivo del escalón 5, achacable a un error en la medida o un error en la elección del intervalo de cálculo del indicador de fallo, podemos afirmar que en esta posición la evolución de los coeficientes γ_{DWT} es mucho más progresiva que en el caso de la posición A. Esto es debido a que la posición B registra parte del flujo radial, con lo que el *armónico lateral inferior* se vuelve más visible.

5.3. SONDA EN POSICIÓN C

Esta es la posición que mayor flujo radial recoge de las tres y, por tanto, debería ser la que mejor mostrara la componente de fallo estudiada. Los resultados son los siguientes:

5.3.1. Sonda en Posición C: Escalón 0

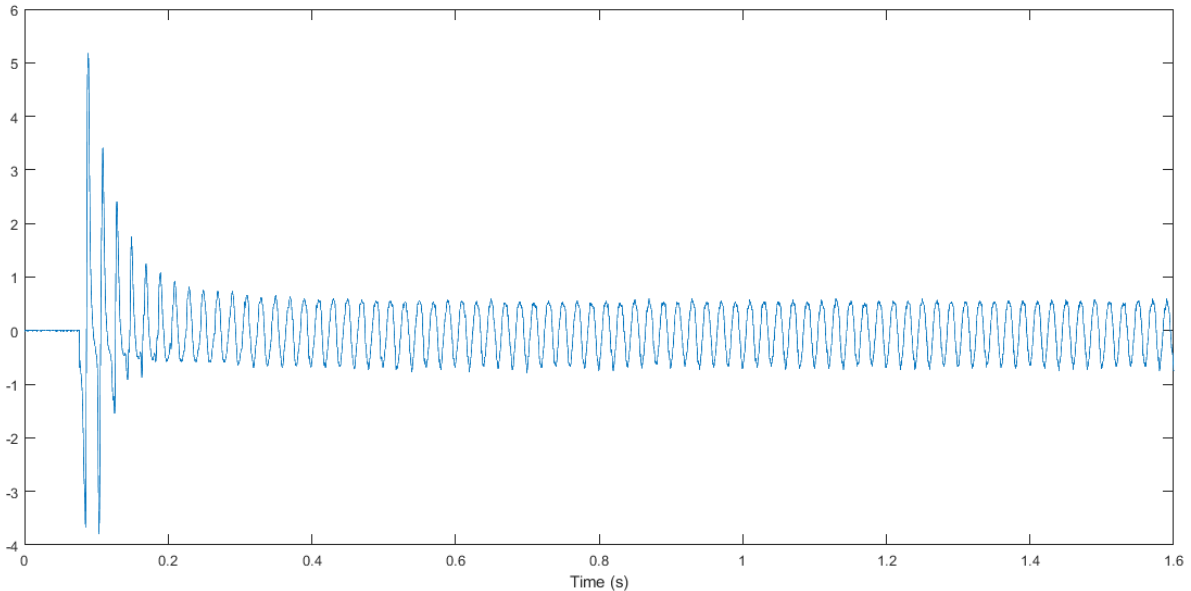


Fig. 49 Evolución del Flujo de Dispersión Radial durante el Arranque. Posición C: Escalón 0

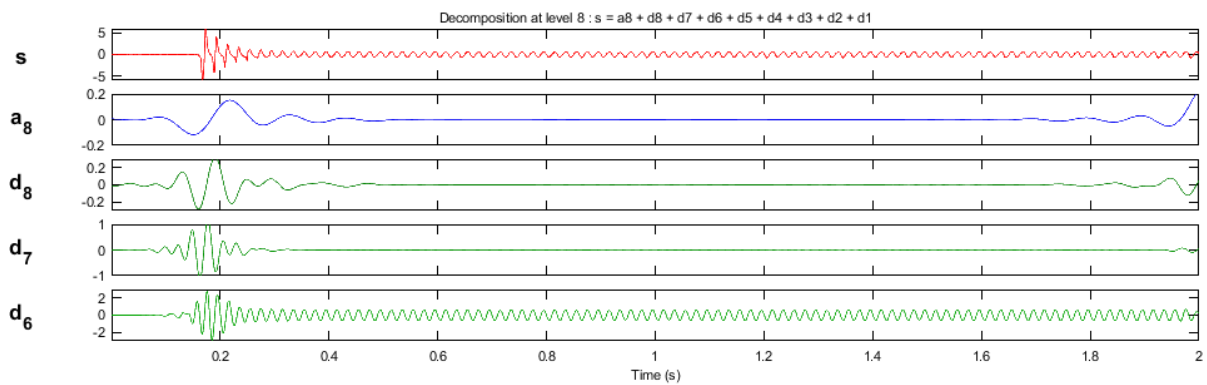


Fig. 50 Descomposición DWT. Posición C: Escalón 0. Carga Moderada

No se observa fallo alguno. Los indicadores muestran:

$$\gamma_{DWT}^{SC} = 48,22 \text{ dB}$$

$$\gamma_{DWT}^{CC} = 48,56 \text{ dB}$$

5.3.2. Sonda en Posición C: Escalón 1

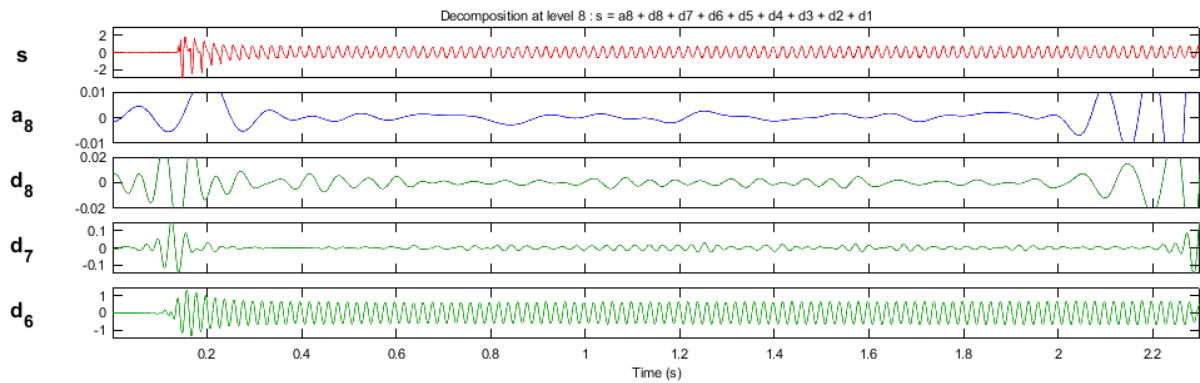


Fig. 51 Descomposición DWT. Posición C: Escalón 1. Carga Moderada

Observamos levemente la aparición del *armónico lateral inferior*. Los coeficientes son:

$$\gamma_{DWT}^{SC} = 46,78 \text{ dB}$$

$$\gamma_{DWT}^{CC} = 44,96 \text{ dB}$$

5.3.3. Sonda en Posición C: Escalón 5

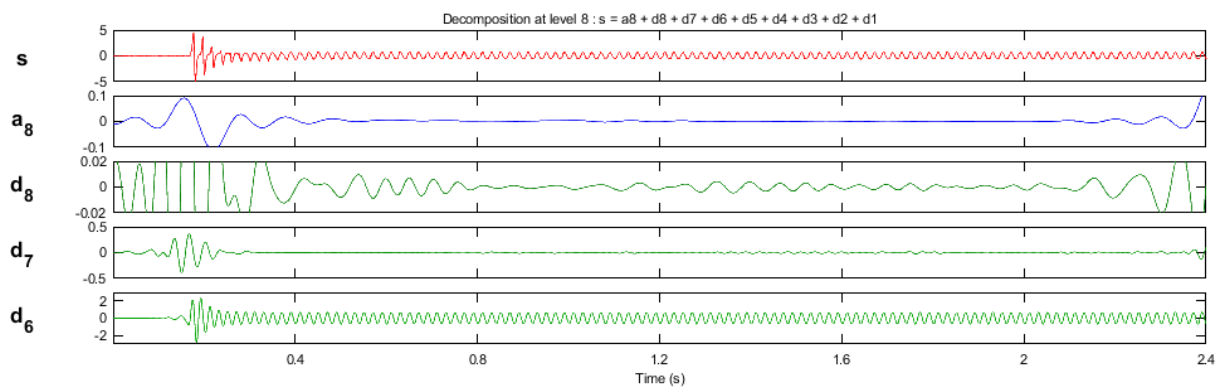


Fig. 52 Descomposición DWT. Posición C: Escalón 5. Carga Elevada

Y los indicadores:

$$\gamma_{DWT}^{SC} = 45,18 \text{ dB}$$

$$\gamma_{DWT}^{CC} = 45,47 \text{ dB}$$

5.3.4. Sonda en Posición C: Escalón 9

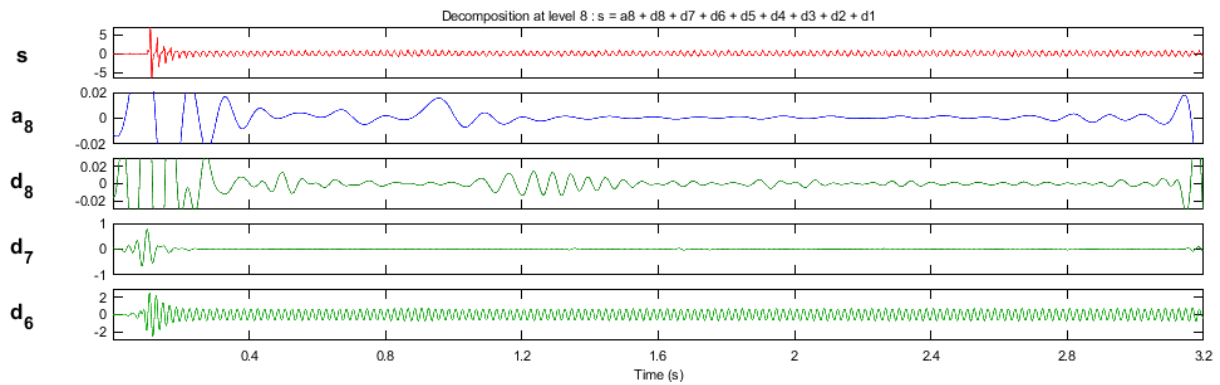


Fig. 53 Descomposición DWT. Posición C: Escalón 9. Carga Moderada

En este escalón, se aprecia sin lugar a duda la presencia de la asimetría rotórica. Calculando los indicadores:

$$\gamma_{DWT}^{SC} = 35,78 \text{ dB}$$

$$\gamma_{DWT}^{CC} = 34.08 \text{ dB}$$

La evolución de los coeficientes en la posición C será:

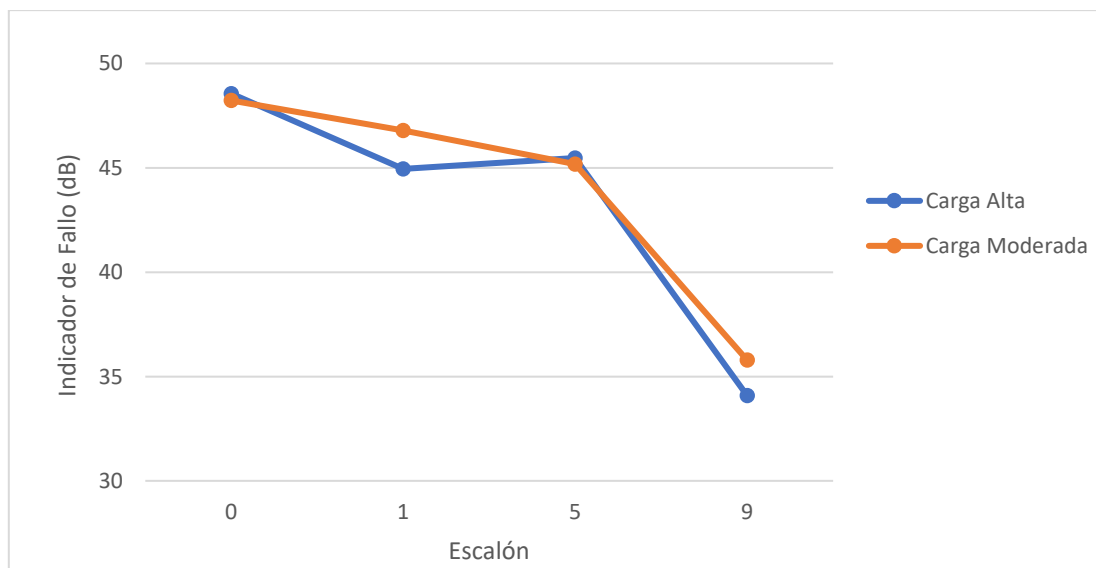


Fig. 54 Evolución del Indicador de Fallo en la Posición C

Y los valores obtenidos:

	Energía d8	Energía Total	γ_{DWT} (dB)
Escalón 0			
Carga alta	0,0045	322,7045	48,5559251
Carga moderada	0,0058	385,3973	48,2248067
Escalón 1			
Carga alta	0,0088	275,4844	44,9561434
Carga moderada	0,0065	309,951	46,7837969
Escalón 5			
Carga alta	0,0107	377,254	45,4725008
Carga moderada	0,0109	359,2565	45,1797814
Escalón 9			
Carga alta	0,2463	630,7724	34,0840827
Carga moderada	0,1265	479,136	35,7836828

Tabla 5 Resultados Indicadores de Fallo en la Posición C

De nuevo, sucede un fallo en el escalón 5, sin mayor relevancia que el del anterior punto: lo achacamos a una mala medida o un cálculo erróneo. De cualquier manera, la relación que tiene el indicador con el nivel de fallo es innegable y, como se pronosticaba, la posición C ha resultado ser la más sensible en los análisis al ser la que recoge mayor flujo radial.

6. RESUMEN Y CONCLUSIONES

A lo largo del presente trabajo se ha enfatizado la importancia que tiene el mantenimiento de los motores eléctricos en la industria, especialmente el mantenimiento predictivo. Se han descrito, además, las técnicas actualmente utilizadas en este ámbito (análisis de vibraciones, corrientes, etc.); así como los problemas que estas pueden ocasionar. Estos problemas, tales como potenciales falsos diagnósticos de las citadas técnicas, pueden devenir en consecuencias catastróficas para la industria. Por ello, cualquier técnica alternativa que proporcione información adicional sobre el estado de salud de la máquina resulta muy valiosa, más aún si esta satisface un requisito indispensable en muchas aplicaciones industriales: que tengan carácter no invasivo.

Con este fin, el trabajo trata de comprobar la viabilidad de la técnica de análisis de flujo magnético de dispersión, apenas explorada hasta ahora, para la detección de averías; centrándose en las asimetrías rotóricas en motores de rotor bobinado. El enfoque utilizado en el trabajo se centra en estudiar el citado flujo de dispersión durante el transitorio de arranque de la máquina, el cual ha mostrado resultados muy prometedores en otros tipos de máquinas (como las de rotor de jaula).

Los análisis realizados arrojan pruebas fehacientes sobre la correspondencia entre el indicador propuesto y el nivel de asimetría en el rotor. En las tablas y figuras siguientes se ilustra la evolución de este indicador de avería en función del nivel de daño en el rotor:

Escalón	A	B	C
0	26,22	40,31	48,22
1	26,10	39,65	46,78
5	25,88	39,98	45,18
9	18,50	33,96	35,78

Tabla 6 Coeficientes de Fallo: Carga Moderada

Escalón	A	B	C
0	28,03	43,05	48,56
1	27,88	41,73	44,96
5	27,53	36,15	45,47
9	16,86	33,42	34,08

Tabla 7 Coeficientes de Fallo: Carga Alta

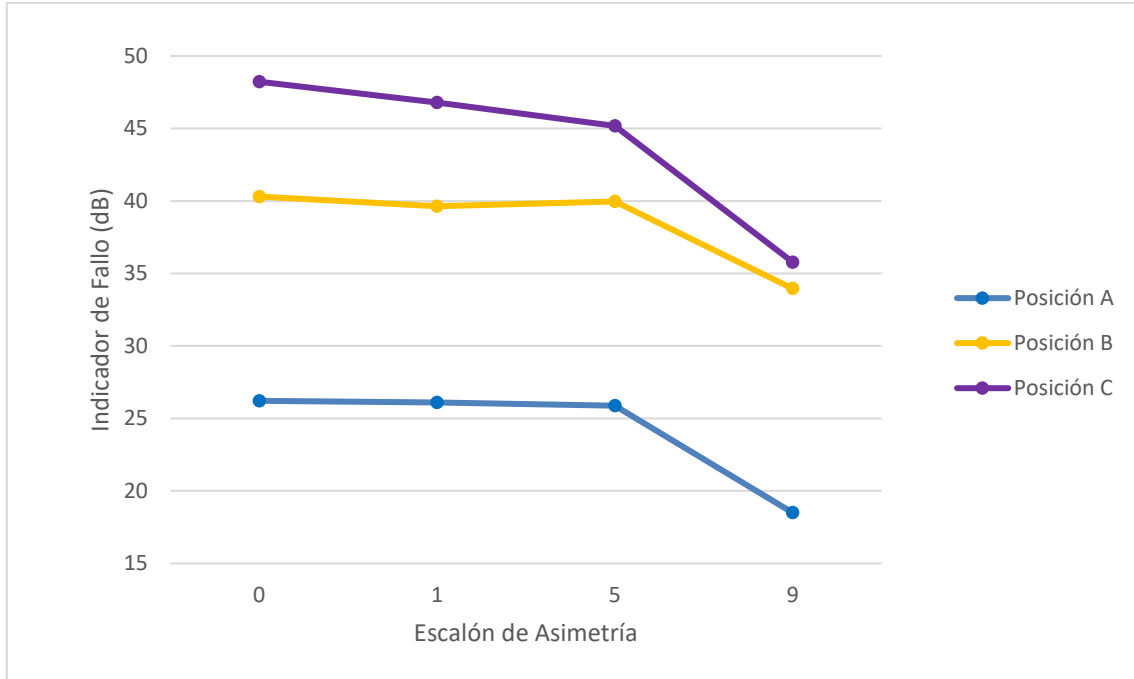


Fig. 55 Evolución Indicador de Fallo en las 3 Posiciones: Carga Baja

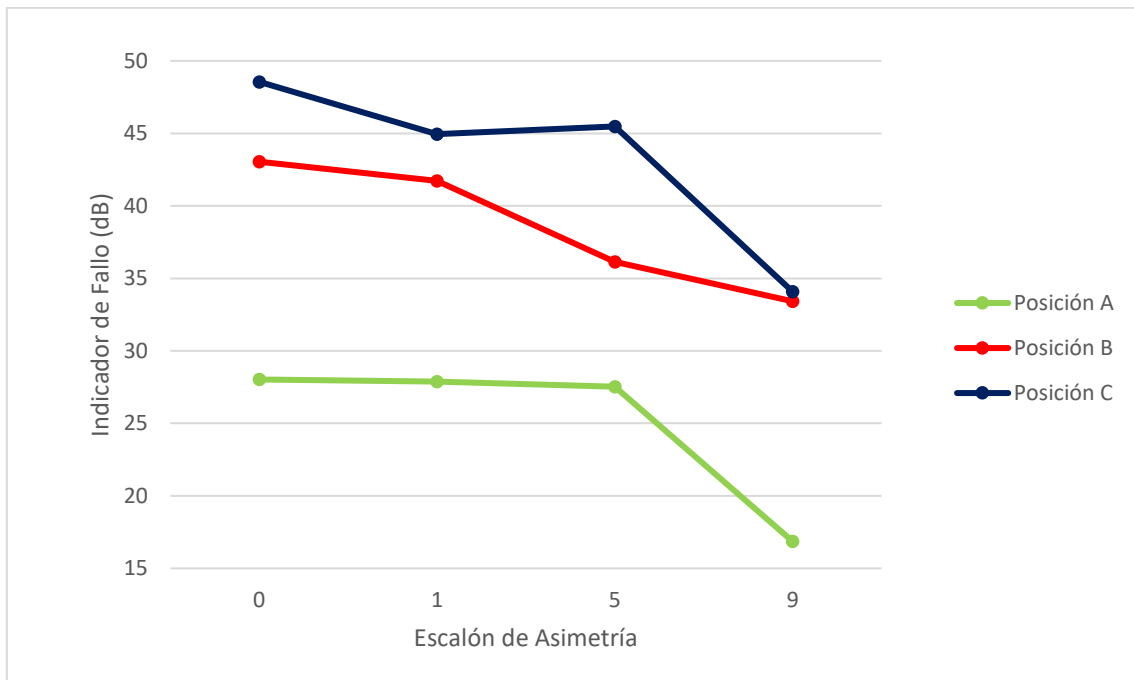


Fig. 56 Evolución Indicador de Fallo en las 3 Posiciones: Carga Alta

De estos resultados extraemos una serie de conclusiones. La primera y más importante: salvo en contadas excepciones, que podemos achacar a errores en la medida o en el análisis, el indicador se comporta según lo esperado, pese a tratarse este trabajo de una primera aproximación para comprobar la validez de la técnica. Todos los indicadores tienden a descender conforme se aumenta el nivel de asimetría. Es en las posiciones que capturan un flujo predominantemente radial donde mejor se observa esta evolución, siendo la más sensible la C.

En B, al ser la posición que mayor flujo recoge, siendo este tanto axial como radial, el indicador evoluciona según lo esperado, aunque mostrando menor sensibilidad al nivel de fallo, es decir, menor pendiente en la gráfica.

El resultado en A, pese a tratarse de una lectura de flujo predominantemente axial, es sorprendentemente bueno. Evidentemente, es el de peor sensibilidad de los anteriores, pero mantiene la tendencia de descenso conforme se agrava la avería.

Sin embargo, el indicador no se comporta de manera lineal en ninguna de las tres posiciones conforme aumenta la resistencia intercalada; entre los escalones 1 a 5 la diferencia es, en el mejor de los casos, de apenas 3 *dB*, mientras que entre niveles extremos esta alcanza valores de hasta 14 *dB*.

Pueden hipotetizarse diferentes motivos por los que se da esta diferencia. Tras analizar con detenimiento esta evolución, puede explicarse en que la máquina ensayada, que apenas ha recibido mantenimiento en los últimos 20 años, tiene cierta asimetría en las fases del rotor per se. Así, si la resistencia añadida entre los escalones 0 y 5 no es lo suficientemente elevada como para destacar sobre esta asimetría inicial, no se observarán variaciones sustanciales en el análisis de la señal recogida. Es principalmente en el escalón 9, cuando se añade una resistencia considerable, que el indicador se dispara. No obstante lo dicho, cabe destacar que este escalón no constituye un nivel de simetría alejado de la realidad, dado que en ejemplos industriales que se han encontrado, se obtuvieron niveles similares sin que el fallo hubiera sido detectado.

Como conclusión, los resultados del trabajo muestran la viabilidad y el potencial que tiene la técnica de análisis de flujo en el campo del mantenimiento predictivo de máquinas eléctricas. Se abre así un amplio campo de investigación apenas explorado, en el que seguramente se produzcan grandes avances en un futuro no muy lejano.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] industrial-electronics.com, *Three-Phase Wound-Rotor Induction Motor*. Recuperado de: http://www.industrial-electronics.com/elec4_17.html.
- [2] Serrano Iribarnegaray L., Martínez Román, J., *Máquinas Eléctricas*. 1ª ed. Valencia: UPV; 2013.
- [3] Antonino Daviu J. A., *Mantenimiento de Máquinas e Instalaciones Eléctricas: Métodos de Arranque de Motores de Inducción*, Máster Universitario en Ingeniería del Mantenimiento, Universitat Politècnica de València.
- [4] allaboutcircuits.com, *Wound Rotor Induction Motor*. Recuperado de: <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/alternating-current/chpt-13/wound-rotor-induction-motors/>
- [5] jayindustrial.com, *Wound Rotor Motors*. Recuperado de: <https://jayindustrial.com/electric-motor-repair/wound-rotor-motors/>
- [6] electricalbaba.com, *Purpose of Slip Rings in an Alternator*. Recuperado de: <https://electricalbaba.com/purpose-of-slip-rings-in-an-alternator/>
- [7] Pastor Osorio P. A., Antonino Daviu J. A., *Análisis del Flujo de Dispersión para la Detección de Fallos Electromecánicos en Motores Asíncronos* (Trabajo Fin de Máster). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España; 2019.
- [8] Thomson W. T., Fenger M., *Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults*, in IEEE Industry Applications Magazine, vol. 7, no. 4, pp. 26-34; July-August 2001.
- [9] EPRI, *Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations, Part I & II*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 21, nº 4, pp. 853-872; 1985.
- [10] SKF, *Bearing Failures and Their Causes*; 1994.
- [11] Climente Alarcón V., Riera Guasp M., *Aportación al Mantenimiento Predictivo de Motores de Inducción mediante Modernas Técnicas de Análisis de la Señal* (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España; 2012.
- [12] Asociación Española de Normalización y Certificación, *Máquinas Eléctricas Rotativas. Parte 18-1: Evaluación Funcional de los Sistemas de Aislamiento. Principios Directores Generales*, UNE-EN 60034-18-1. AENOR, Madrid; 2010.
- [13] Asociación Española de Normalización y Certificación, *Aislamiento Eléctrico. Evaluación y Designación Térmica*, UNE-EN 60085. AENOR, Madrid; 2008.
- [14] Salerno C. H., Camacho J. R., Leite L. C., Martins Nieto L., *Three-Phase Slip-Ring Induction Motor: Effects of Rotor Asymmetry*, IEEE IEMDC 1997.



- [15] Antonino Daviu J. A., Quijano López A., Climente Alarcón V., Garín Abellán C., *Reliable Detection of Rotor Winding Asymmetries in Wound Rotor Induction Motors via Integral Current Analysis*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 53, no.3, pp. 2040-2048; junio 2017.
- [16] Fernández Cabanas M., García Melero M., Alonso Orcajo G., Cano Rodríguez J. M., Solares Sariego J., *Técnicas para el Mantenimiento y Diagnóstico de Máquinas Eléctricas Rotativas*. Barcelona: Marcombo Boixareu Editores; 1998.
- [17] *Manual de Brüel & Kjaer sobre vibraciones*, Brüel & Kjaer.
- [18] Antonino Daviu J. A., Quijano López A., Climente Alarcón V., Garín Abellán C., *Robust Detection of Rotor Winding Asymmetries in Wound Rotor Induction Motors via Integral Current Analysis*, 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE).
- [19] Jokic S., Cincar N., Novakovic B., *The Analysis of Vibration Measurement and Current Signature in Motor Drive Faults Detection*, 17th International Symposium INFOTEH-JAHORINA; marzo 2018.
- [20] Ceban A., Pusca R., Romary R., *Study of rotor faults in induction motors using external magnetic field analysis*, IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 59, no. 5, pp. 2082–2093, May 2012.
- [21] Antonino Daviu J. A., Ramirez Nunez J. A., Climente Alarcón V., Quijano López A., Razik H., Osornio Rios R. A., Romero Troncoso R. J., *Evaluation of the Detectability of Electromechanical Faults in Induction Motors Via Transient Analysis of the Stray Flux*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 54, no. 5, pp. 4324-4332; septiembre 2018
- [22] Kliman G. B., Koegl R. A., *Noninvasive Detection of Broken Rotor Bars in Operating Induction Motors*, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 3, No. 4; Diciembre 1988.
- [23] Polikar R., *The Engineer's Ultimate Guide to Wavelet Analysis: The Wavelet Tutorial*, 3^a Ed.; enero 2001.
- [24] Nyquist H., *Certain Topics in Telegraph Transmission Theory*, Transactions of the AIEE vol. 47, pp. 617-644; febrero 1928.

PRESUPUESTO



Código	Descripción	Uds.	Medición	Rendimiento	Precio (€)	Importe (€)
1	ANÁLISIS DE LAS SEÑALES					1421,50
1.1	HORAS DE MEDICIÓN EN LABORATORIO Registro de las señales de flujo de dispersión en distintas posiciones de la carcasa de la máquina en el laboratorio. Incluye el alquiler de osciloscopio Yokogawa modelo DL850 y una sonda de medición de flujo.	h	6,00		20,25	121,50
TEC	Técnico de Laboratorio	h		1,00	18,00	18,00
OSC	Alquiler de Osciloscopio	h		1,00	2,00	2,00
SON	Sonda de Medición de Flujo	h		1,00	0,25	0,25
1.2	HORAS DE ANÁLISIS Análisis de las señales obtenidas. Incluye licencia software análisis.	h	20,00		65,00	1300,00
ING	Ingeniero Técnico Industrial	h		1,00	25,00	25,00
MAT	Licencia MATLAB	ud.		0,05	800,00	40,00
2	INFORME DE ESTADO DE LA MÁQUINA					500,00
2.1	REDACCIÓN INFORME DE ESTADO Redacción Informe de estado y proposición de mejora en caso de avería o defecto.	ud.	1,00		500,00	500,00
ING	Ingeniero Técnico Industrial	h		20,00	25,00	500,00

Presupuesto de Ejecución Material	1921,50
12% Gastos Generales	230,58
6% Beneficio Industrial	115,29
Presupuesto	2267,37
21% IVA	476,15
PRESUPUESTO + IVA	2743,52

Suma el presente Presupuesto más IVA la cantidad de DOS MIL SETECIENTOS CUARENTA Y TRES EUROS CON 52 CÉNTIMOS (2743,52€)

En Valencia, a 2 de julio de 2019

Firma del Cliente