



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

TRABAJO FIN DE MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

# ANÁLISIS DEL FLUJO DE DISPERSIÓN PARA LA DETECCIÓN DE FALLOS ELECTROMECAÑICOS EN MOTORES DE ASÍNCRONOS

AUTOR: PEDRO ALBERTO PASTOR OSORIO

TUTOR: JOSE ALFONSO ANTONINO DAVIU

Curso Académico: 2018-19









## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero dedicar éste trabajo a la memoria de mi padre, como culminación a mi etapa de estudiante que tanto esfuerzo y sacrificio ha costado. Manteniendo siempre al mismo tiempo el rumbo y las riendas del negocio familiar tal como en su día él me enseñó.

Agradezco además la paciencia y comprensión que ha volcado mi familia en mí, pudiendo hacer posible éste pequeño éxito personal.

A Sofía, que día tras día me brinda su apoyo.

Por último agradecer a mi profesor y tutor, José Alfonso, toda la ayuda, orientación, medios y sobretodo el interés que hizo generar en mí por ésta rama del mantenimiento eléctrico.



## RESUMEN

En este Trabajo Fin de Master se pretende comprobar la validez de la técnica basada en el análisis de flujo de dispersión para el diagnóstico de averías electromecánicas en motores asíncronos.

La técnica de diagnóstico basada en análisis de flujo, si bien conocida desde hace años, ha concitado reciente interés en la industria debido al progresivo abaratamiento de los sensores de flujo y a las ventajas inherentes de la misma (simplicidad, carácter no invasivo...). Sin embargo, la literatura relativa a su aplicación con fines de diagnóstico es todavía limitada y su uso se ha visto relegado hasta la fecha a aplicaciones concretas en régimen estacionario.

El objetivo de este Trabajo Fin de Master es profundizar en la aplicación de la técnica en lo que respecta a su uso para la detección de fallos en el rotor y otras averías electromecánicas. El objeto es no solamente aplicar técnicas basadas en el análisis de señales en régimen permanente, sino también extender el análisis al estudio de señales en régimen transitorio, tales como señales capturadas durante el arranque.

A tal efecto, tras una revisión de la literatura técnica en el área, se desarrollan múltiples ensayos de laboratorio en motores con diferentes niveles de avería en el rotor, así como motores con otros fallos. En cada ensayo, se registra la señal de fuerza electromotriz inducida en una bobina externa colocada en diferentes posiciones sobre la carcasa del motor. Las señales se registran tanto durante el arranque como en régimen permanente.

Las señales capturadas se analizan posteriormente con herramientas aptas para cada régimen (transformada de Fourier para permanente y transformadas wavelet en régimen transitorio). Posteriormente se interpretan los resultados obtenidos, evaluando la fiabilidad de cada análisis y la idoneidad de cada posición estudiada.

**Palabras clave:** Máquinas Asíncronas, Motores de Inducción, Mantenimiento Predictivo, Asimetrías Rotóricas, Rotura de Barras, Análisis de Flujo de Dispersión, Transformada de Wavelet Discreta, transformada de Fourier.



## ABSTRACT

The aim of this Final Master's Thesis is to verify the validity of the technique based on stray flux analysis for the diagnosis of electromechanical faults in asynchronous motors.

The diagnostic technique based on magnetic flux analysis, although well known for years, has attracted recent interest in the industry due to the progressive cheapening of flux sensors and their inherent advantages (simplicity, non-invasive nature ...). However, the literature regarding its application for diagnostic purposes is still limited and its use has been relegated to specific applications at steady state.

The objective of this Master's Thesis is to deepen the application of the technique with regard to its application for the detection of rotor failures and other electromechanical failures. The goal is not only to apply techniques based on the analysis of signals at steady state, but also to extend the analysis to the study of signals under transient regime, such as signals captured during startup.

To this end, after a review of the technical literature in the area, we develop multiple laboratory tests on motors with different levels of rotor failure, as well as motors with other failures. In each test, the induced electromotive force signal is captured using an external coil attached to different positions on the motor frame. Signals are recorded during both start-up and steady-state.

The captured signals are analyzed later with tools suitable for each regime (Fourier transform for steady-state and wavelet transforms for transient regime). Subsequently, the results obtained are interpreted, evaluating the reliability of each analysis and the suitability of each of the studied positions.

**Keywords:** Asynchronous Machines, Induction Motors, Predictive Maintenance, Rotor Asymmetries, Broken Bars, Stray Flux Analysis, Discrete Wavelet Transform, Fourier Transform.



# INDICE

## DOCUMENTOS CONTENIDOS EN EL TFM

- Memoria
- Anexo: Ensayos y comparativa de sondas
- Presupuesto

## INDICE DE LA MEMORIA

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 1.      | INTRODUCCIÓN .....  | 13 |
| 1.1     | EVOLUCIÓN NECESARIA DEL MANTENIMIENTO CORRECTIVO AL PREDICTIVO .....    | 13 |
| 2.      | MANTENIMIENTO PREDICTIVO EN EL MOTOR DE INDUCCIÓN .....                 | 15 |
| 2.1     | DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL MOTOR ASÍNCRONO .....                | 15 |
| 2.2     | CLASIFICACIÓN DE LAS AVERÍAS DEL MOTOR ASÍNCRONO .....                  | 18 |
| 2.2.1   | FALLOS EN RODAMIENTOS.....  | 19 |
| 2.2.2   | ASIMETRÍAS ROTÓRICAS .....  | 20 |
| 2.2.2.1 | Rotura de barras.....   | 20 |
| 2.2.2.2 | Excentricidades .....   | 21 |
| 2.2.3   | DEFECTOS EN EL SISTEMA AISLANTE .....                                   | 23 |
| 2.2.4   | FALLOS EN EL PAQUETE MAGNÉTICO .....                                    | 24 |
| 2.3     | TÉCNICA DE DIAGNÓSTICO ACTUAL BASADA EN ANÁLISIS ESPECTRAL.....         | 25 |
| 2.3.1   | ANÁLISIS DE CORRIENTES.....   | 25 |
| 2.3.1.1 | Detección de rotura de barras .....                                     | 28 |
| 2.3.1.2 | Detección de excentricidades .....                                      | 31 |
| 2.3.1.3 | Detección de fallos en rodamientos.....                                 | 32 |
| 2.3.1.4 | Detección de espiras estatóricas cortocircuitadas.....                  | 33 |
| 2.3.1.5 | Evaluación de la desalineación entre motor y carga.....                 | 34 |
| 3.      | DIAGNOSTICO DE FALLOS MEDIANTE EL ANÁLISIS DEL FLUJO DE DISPERSIÓN..... | 36 |
| 3.1     | INTRODUCCIÓN .....  | 36 |
| 3.2     | ANÁLISIS DEL FLUJO DE DISPERSIÓN.....                                   | 37 |
| 3.2.1   | FUNDAMENTO TEÓRICO .....  | 37 |
| 3.3.2   | FLUJO AXIAL.....  | 39 |
| 3.2.3   | FLUJO RADIAL .....  | 40 |





|         |   |    |
|---------|---|----|
| 3.3     | ANÁLISIS EN RÉGIMEN PERMANENTE.....                         | 42 |
| 3.3.1   | INDICADORES DE AVERÍA EN RÉGIMEN PERMANENTE .....           | 42 |
| 3.3.1.1 | COMPONENTES DE ROTURA DE BARRAS .....                       | 42 |
| 3.3.1.2 | COMPONENTES DE EXCENTRICIDAD O DESALINEACIÓN .....          | 44 |
| 3.3.1.3 | COMPONENTES DE FALLO EN RODAMIENTOS.....                    | 45 |
| 3.4     | ANÁLISIS EN RÉGIMEN TRANSITORIO .....                       | 46 |
| 3.4.1   | INDICADORES DE AVERÍA EN RÉGIMEN TRANSITORIO .....          | 52 |
| 3.4.1.1 | MÁQUINA SANA .....  | 53 |
| 3.4.1.2 | COMPONENTES DE ROTURA DE BARRA .....                        | 54 |
| 3.4.1.3 | COMPONENTES DE EXCENTRICIDADES MIXTAS O DESALINEACIÓN ..... | 54 |
| 4       | ENSAYOS EXPERIMENTALES .....                                | 55 |
| 4.1     | BANCADA.....  | 55 |
| 4.2     | MOTOR ENSAYADO Y CARGA ARRASTRADA .....                     | 56 |
| 4.3     | OSCILOSCOPIO Y SONDAS .....                                 | 58 |
| 4.4     | METODOLOGÍA DE ENSAYOS .....                                | 60 |
| 5       | RESULTADOS Y ANÁLISIS .....                                 | 63 |
| 5.1     | MOTOR SANO.....   | 63 |
| 5.1.1   | ANÁLISIS EN RÉGIMEN PERMANENTE. MOTOR SANO.....             | 63 |
| 5.1.1.1 | FLUJO AXIAL. RÉGIMEN PERMANENTE. MOTOR SANO .....           | 64 |
| 5.1.1.2 | FLUJO MIXTO. RÉGIMEN PERMANENTE. MOTOR SANO.....            | 66 |
| 5.1.1.3 | FLUJO RADIAL. RÉGIMEN PERMANENTE. MOTOR SANO.....           | 67 |
| 5.1.2   | ANÁLISIS EN RÉGIMEN TRANSITORIO. MOTOR SANO .....           | 68 |
| 5.1.2.1 | FLUJO AXIAL. RÉGIMEN TRANSITORIO. MOTOR SANO .....          | 69 |
| 5.1.2.2 | FLUJO MIXTO. RÉGIMEN TRANSITORIO. MOTOR SANO .....          | 70 |
| 5.1.2.3 | FLUJO RADIAL. RÉGIMEN TRANSITORIO. MOTOR SANO.....          | 72 |
| 5.2     | MOTOR CON 1 BARRA ROTA.....                                 | 73 |
| 5.2.1   | ANÁLISIS EN RÉGIMEN PERMANENTE. 1 BARRA ROTA.....           | 73 |
| 5.2.1.1 | FLUJO AXIAL. RÉGIMEN PERMANENTE. 1 BARRA ROTA .....         | 73 |
| 5.2.1.2 | FLUJO MIXTO. RÉGIMEN PERMANENTE. 1 BARRA ROTA.....          | 74 |
| 5.2.1.3 | FLUJO RADIAL. RÉGIMEN PERMANENTE. 1 BARRA ROTA.....         | 74 |
| 5.2.2   | ANÁLISIS EN RÉGIMEN TRANSITORIO. 1 BARRA ROTA .....         | 75 |
| 5.2.2.1 | FLUJO AXIAL. RÉGIMEN TRANSITORIO. 1 BARRA ROTA .....        | 75 |
| 5.2.2.2 | FLUJO MIXTO. RÉGIMEN TRANSITORIO. 1 BARRA ROTA .....        | 77 |
| 5.2.2.3 | FLUJO RADIAL. RÉGIMEN TRANSITORIO. 1 BARRA ROTA.....        | 78 |
| 5.3     | MOTOR CON 2 BARRAS ROTAS ADYACENTES.....                    | 79 |



|         |   |     |
|---------|---|-----|
| 5.3.1   | ANÁLISIS EN RÉGIMEN PERMANENTE. 2 BARRAS ROTAS ADYACENTES.....    | 79  |
| 5.3.1.1 | FLUJO AXIAL. RÉGIMEN PERMANENTE. 2 BARRAS ROTAS ADYACENTES.....   | 79  |
| 5.3.1.2 | FLUJO MIXTO. RÉGIMEN PERMANENTE. 2 BARRAS ROTAS ADYACENTES.....   | 80  |
| 5.3.1.3 | FLUJO RADIAL. RÉGIMEN PERMANENTE. 2 BARRAS ROTAS ADYACENTES.....  | 81  |
| 5.3.2   | ANÁLISIS EN RÉGIMEN TRANSITORIO. 2 BARRAS ROTAS ADYACENTES.....   | 82  |
| 5.3.2.1 | FLUJO AXIAL. RÉGIMEN TRANSITORIO. 2 BARRAS ROTAS ADYACENTES.....  | 82  |
| 5.3.2.2 | FLUJO MIXTO. RÉGIMEN TRANSITORIO. 2 BARRAS ROTAS ADYACENTES.....  | 83  |
| 5.3.2.3 | FLUJO RADIAL. RÉGIMEN TRANSITORIO. 2 BARRAS ROTAS ADYACENTES..... | 84  |
| 5.5     | MOTOR CON 9 BARRAS ROTAS ADYACENTES.....                          | 85  |
| 5.5.1   | ANÁLISIS EN RÉGIMEN PERMANENTE. 9 BARRAS ROTAS ADYACENTES.....    | 85  |
| 5.5.1.1 | FLUJO AXIAL. RÉGIMEN PERMANENTE. 9 BARRAS ROTAS ADYACENTES.....   | 85  |
| 5.5.1.2 | FLUJO MIXTO. RÉGIMEN PERMANENTE. 9 BARRAS ROTAS ADYACENTES.....   | 86  |
| 5.5.1.3 | FLUJO RADIAL. RÉGIMEN PERMANENTE. 9 BARRAS ROTAS ADYACENTES.....  | 87  |
| 5.5.2   | ANÁLISIS EN RÉGIMEN TRANSITORIO. 9 BARRAS ROTAS ADYACENTES.....   | 88  |
| 5.5.2.1 | FLUJO AXIAL. RÉGIMEN TRANSITORIO. 9 BARRAS ROTAS ADYACENTES.....  | 88  |
| 5.5.2.2 | FLUJO MIXTO. RÉGIMEN TRANSITORIO. 9 BARRAS ROTAS ADYACENTES.....  | 89  |
| 5.5.2.3 | FLUJO RADIAL. RÉGIMEN TRANSITORIO. 9 BARRAS ROTAS ADYACENTES..... | 90  |
| 5.6     | MOTOR EN DESALINEACIÓN CON LA CARGA.....                          | 91  |
| 5.6.1   | ANÁLISIS EN RÉGIMEN PERMANENTE. DESALINEACIÓN CARGA.....          | 91  |
| 5.6.1.1 | FLUJO AXIAL. RÉGIMEN PERMANENTE. DESALINEACIÓN CARGA.....         | 91  |
| 5.6.1.2 | FLUJO MIXTO. RÉGIMEN PERMANENTE. DESALINEACIÓN CARGA.....         | 92  |
| 5.6.1.3 | FLUJO RADIAL. RÉGIMEN PERMANENTE. DESALINEACIÓN CARGA.....        | 93  |
| 5.6.2   | ANÁLISIS EN RÉGIMEN TRANSITORIO. DESALINEACIÓN CARGA.....         | 94  |
| 5.6.2.1 | FLUJO AXIAL. RÉGIMEN TRANSITORIO. DESALINEACIÓN CARGA.....        | 94  |
| 5.6.2.2 | FLUJO MIXTO. RÉGIMEN TRANSITORIO. DESALINEACIÓN CARGA.....        | 96  |
| 5.6.2.3 | FLUJO RADIAL. RÉGIMEN TRANSITORIO. DESALINEACIÓN CARGA.....       | 97  |
| 6       | CONCLUSIONES.....   | 98  |
| 6.1     | ANÁLISIS EN RÉGIMEN PERMANENTE.....                               | 98  |
| 6.2     | ANÁLISIS EN RÉGIMEN TRANSITORIO.....                              | 102 |
| 7       | BIBLIOGRAFÍA.....   | 105 |

**INDICE DE ILUSTRACIONES**

|   |    |
|---|----|
| Fig. 1 Despiece motor de inducción .....  | 15 |
| Fig. 2 Sección de la chapa magnética [1].....   | 17 |
| Fig. 3 Rotor bobinado (con anillos rozantes) [20] .....   | 17 |
| Fig. 4 Gráfico de averías de un estudio de Thorsen & Dalva y Allianz respectivamente .....  | 18 |
| Fig. 5 Rodamiento de bolas con signos de desgaste externos .....  | 19 |
| Fig. 6 Esquema de tipos de excentricidad .....  | 22 |
| Fig. 7 Bobinado estatórico sano (izq.) Fallo severo en el aislamiento (Der.) .....  | 23 |
| Fig. 8 Paquete de chapa magnética de rotor y estator respectivamente [21].....  | 24 |
| Fig. 9 Espectro en frecuencia de la corriente por una fase del estator .....  | 26 |
| Fig. 10 Espectro en frecuencia con identificación de la componente fundamental (CF), armónicos de devanado (AD), armónicos principales de ranura (APR) .....                                  | 27 |
| Fig. 11 Armónicos laterales. Superior e inferior.....   | 29 |
| Fig. 12 Espectro de corrientes entorno al armónico fundamental, con presencia de armónicos de excentricidad de la primera familia.....  | 31 |
| Fig. 13 Esquema de parámetros del rodamiento [10] .....   | 33 |
| Fig. 14 Detalle de los tipos de desalineación. Izq. Desalineación radial. Der. Desalineación angular .....  | 34 |
| Fig. 15 Espectro de corriente para un acoplamiento con una desalineación radial de 1,5mm [16] .....   | 35 |
| Fig. 16 Esquema de la distribución del flujo axial de dispersión en una máquina de inducción  | 37 |
| Fig. 17 Esquema de posición de sondas. [5].....   | 38 |
| Fig. 18 Geometría simplificada para motor de inducción [4].....   | 40 |
| Fig. 19 Sentidos de giro de los campos magnéticos de rotor y estator para a) Máquina sana y b) Máquina con fallo en el rotor [15] .....   | 43 |
| Fig. 20 Proceso de filtrado de la transformada DWT. [12].....   | 48 |
| Fig. 21 Evolución de las señales DWT para una máquina con una barra rota .....  | 50 |
| Fig. 22 Ejemplo señales wavelet: a) EMF total. b) Señal d8 para fallo en el rotor. c) Señal d8 para motor sano [5].....   | 51 |
| Fig. 23 Evolución teórica durante el arranque para las componentes de fallo de rotura de barra (flujo axial y radial) y excentricidad.....  | 52 |
| Fig. 24 Superposición de bandas de señales wavelet para una DWT de 8 niveles de descomposición y $f_s=5\text{kHz}$ , sobre la evolución teórica de componentes de avería en el arranque. .... | 53 |
| Fig. 25 Imagen del montaje en laboratorio .....   | 55 |
| Fig. 26 Placa de características del motor ensayado. ....   | 56 |
| Fig. 27 Imagen de rotor con avería forzada. Rotura de dos barras no adyacentes .....  | 57 |
| Fig. 28 Placa de características de la carga arrastrada.....  | 57 |
| Fig. 29 Geometría de la envolvente de la sonda. Cotas en mm.....  | 58 |
| Fig. 30 Posiciones de medida de la sonda .....  | 59 |
| Fig. 31 Modelo 3D útil soporte sonda POS A .....  | 61 |
| Fig. 32 Modelo 3D útil soporte sonda POS B .....  | 61 |
| Fig. 33 Modelo 3D útil soporte sonda POS C .....  | 61 |
| Fig. 34 Espectro de Fourier para máquina sana. Sonda en posición A. Flujo axial. ....   | 64 |
| Fig. 35 Detalle de las componentes de desalineación. Sonda en posición A. Flujo axial .....   | 64 |
| Fig. 36 Detalle de los componentes de fallo en el rotor. Sonda en posición A. Flujo axial.....  | 65 |



Fig. 37 Espectro de Fourier para máquina sana. Sonda en posición B. Flujo mixto. .... 66

Fig. 38 Espectro de Fourier para máquina sana. Sonda en posición C. Flujo radial..... 67

Fig. 39 Evolución del flujo de dispersión axial durante el arranque. Motor sano. Sonda en posición A. .... 69

Fig. 40 Señales de descomposición DWT. Arranque en motor sano. Sonda en posición A. Flujo axial ..... 69

Fig. 41 Evolución del flujo de dispersión mixto durante el arranque. Motor sano. Sonda en posición B. .... 70

Fig. 42 Señales de descomposición DWT. Arranque en motor sano. Sonda en posición B. Flujo mixto ..... 71

Fig. 43 Evolución del flujo de dispersión mixto durante el arranque. Motor sano.Sonda en posición B. .... 72

Fig. 44 Señales de descomposición DWT. Arranque en motor sano. Sonda en posición B. Flujo mixto ..... 72

Fig. 45 Detalle de los componentes de fallo en el rotor. Sonda en posición A. Flujo axial..... 73

Fig. 46 Detalle de los componentes de fallo en el rotor. Sonda en posición B. Flujo mixto ..... 74

Fig. 47 Detalle de los componentes de fallo en el rotor. Sonda en posición C. Flujo radial ..... 74

Fig. 48 Evolución del flujo de dispersión axial durante el arranque. 1 Barra rota. Sonda en posición A. .... 75

Fig. 49 Señales de descomposición DWT. Motor con 1 barra rota. Sonda en posición A. Flujo axial. .... 75

Fig. 50 Evolución del flujo de dispersión mixto durante el arranque. 1 Barra rota. Sonda en posición B. .... 77

Fig. 51 Señales de descomposición DWT. Motor con 1 barra rota. Sonda en posición B. Flujo mixto. .... 77

Fig. 52 Evolución del flujo de dispersión radial durante el arranque. 1 Barra rota. Sonda en posición C. .... 78

Fig. 53 Señales de descomposición DWT. Motor con 1 barra rota. Sonda en posición C. Flujo radial..... 78

Fig. 54 Detalle de los componentes de fallo en el rotor. Sonda en posición A. Flujo axial..... 79

Fig. 55 Detalle de los componentes de fallo en el rotor. Sonda en posición B. Flujo mixto. .... 80

Fig. 56 Detalle de los componentes de fallo en el rotor. Sonda en posición C. Flujo radial ..... 81

Fig. 57 Evolución del flujo de dispersión axial durante el arranque. 2 Barras rotas. Sonda en posición A. .... 82

Fig. 58 Señales de descomposición DWT. Motor con 2 barras rotas. Sonda en posición A. Flujo radial..... 82

Fig. 59 Evolución del flujo de dispersión mixto durante el arranque. 2 Barras rotas. Sonda en posición B. .... 83

Fig. 60 Señales de descomposición DWT. Motor con 2 barras rota. Sonda en posición B. Flujo mixto. .... 83

Fig. 61 Evolución del flujo de dispersión radial durante el arranque. 2 Barras rotas. Sonda en posición C. .... 84

Fig. 62 Señales de descomposición DWT. Motor con 2 barras rotas. Sonda en posición C. Flujo radial..... 84

Fig. 63 Detalle de los componentes de fallo en el rotor. Sonda en posición A. Flujo axial..... 85

Fig. 64 Detalle de los componentes de fallo en el rotor. Sonda en posición B. Flujo mixto. .... 86

Fig. 65Detalle de los componentes de fallo en el rotor. Sonda en posición C. Flujo radial. .... 87



Fig. 66 Evolución del flujo de dispersión radial durante el arranque. 9 Barras rotas. Sonda en posición A. .... 88

Fig. 67 Señales de descomposición DWT. Motor con 9 barras rotas. Sonda en posición A. Flujo axial. .... 88

Fig. 68 Evolución del flujo de dispersión mixto durante el arranque. 9 Barras rotas. Sonda en posición B. .... 89

Fig. 69 Señales de descomposición DWT. Motor con 9 barras rotas. Sonda en posición B. Flujo mixto ..... 89

Fig. 70 Evolución del flujo de dispersión radial durante el arranque. 9 Barras rotas. Sonda en posición C. .... 90

Fig. 71 Señales de descomposición DWT. Motor con 9 barras rotas. Sonda en posición C. Flujo radial..... 90

Fig. 72 Detalle de los componentes de fallo en el rotor. Sonda en posición A. Flujo axial..... 91

Fig. 73 Detalle de los componentes de fallo en el rotor. Sonda en posición B. Flujo mixto ..... 92

Fig. 74 Detalle de los componentes de fallo en el rotor. Sonda en posición C. Flujo radial. .... 93

Fig. 75 Evolución del flujo de dispersión axial durante el arranque. Desalineación. Sonda en posición A. .... 94

Fig. 76 Señales de descomposición DWT. Desalineación. Sonda en posición A. Flujo axial. .... 94

Fig. 77 Evolución del flujo de dispersión mixto durante el arranque. Desalineación. Sonda en posición B. .... 96

Fig. 78 Señales de descomposición DWT. Desalineación. Sonda en posición B. Flujo mixto. .... 96

Fig. 79 Evolución del flujo de dispersión radial durante el arranque. Desalineación. Sonda en posición C ..... 97

Fig. 80 Señales de descomposición DWT. Desalineación. Sonda en posición C. Flujo radial..... 97



## INDICE DE TABLAS

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 1: Clases térmicas .....  | 23  |
| Tabla 2: Tabla de severidad para análisis de corrientes .....   | 30  |
| Tabla 3: Componentes de rotura de barra en flujo de dispersión en análisis en régimen permanente.....   | 44  |
| Tabla 4: Plantilla de planificación de ensayos.....   | 62  |
| Tabla 5: Configuración para medida en régimen permanente .....  | 63  |
| Tabla 6: Tablas resumen de amplitud de componentes de avería en régimen permanente .....  | 98  |
| Tabla 7: Tabla de severidad propuesta para análisis de flujo de dispersión.....   | 101 |
| Tabla 8: Tablas de resumen de coeficiente energético basado en la señal Wavelet d8 para análisis en régimen transitorio .....   | 102 |
| Tabla 9: Tablas de resumen de coeficiente energético propuesto basado en la señal Wavelet d7 para detección de excentricidad/desalineación mediante análisis en régimen transitorio ..... | 103 |





# MEMORIA







# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 EVOLUCIÓN NECESARIA DEL MANTENIMIENTO CORRECTIVO AL PREDICTIVO

En el ámbito industrial conviven ciencia y tecnología fruto de la ingeniería aplicada al uso cotidiano para el cual ha sido prevista cierta máquina o mecanismo.

Si bien está interiorizado el hecho de que en general las máquinas requieren de mantenimiento, cobra mayor importancia en una industrialización en serie, donde la ventaja comparativa (y en ocasiones absoluta) en términos económicos recae sobre la disponibilidad en el uso de las líneas de producción. Es por ello que en la industria se llevan a cabo planes de mantenimiento donde se recogen protocolos de actuación con la periodicidad requerida.

Estos planes de actuación se conocen en la industria como mantenimiento preventivo y recogen operaciones tales como sustitución de rodamientos, limpieza de las partes activas, etc.

Un correcto mantenimiento preventivo asegura en cierta manera que una máquina alargue su vida útil y así se reduzca la probabilidad de fallo ciclo tras ciclo de mantenimiento, considerando reiniciado el tiempo estadístico de fallo tras cada ciclo de actuación.

Teniendo en cuenta que en éste tipo de mantenimiento no se tiene la capacidad de conocer el estado verdadero de la máquina en cuestión, el hecho de acabar de aplicar un ciclo de mantenimiento a una máquina no asegura que no pueda aparecer un fallo a las pocas horas de funcionamiento.

Por ello nace la necesidad de conocer de alguna forma el “estado de salud” de los componentes susceptibles de fallo de una máquina. La piedra angular del mantenimiento predictivo es precisamente la monitorización de los fallos desde su origen hasta su punto crítico para poder planificar la reparación o sustitución fuera del ciclo operativo de la máquina.

De esta forma, mediante herramientas de análisis tanto en máquina parada como en funcionamiento, el mantenimiento predictivo brinda a una industria cada vez más competitiva la capacidad de controlar y prevenir los fallos presentes, permitiendo integrar dentro del mantenimiento preventivo las medidas correctivas necesarias a fin de mitigar las paradas no previstas por avería.

En resumen pues, se puede dividir el mantenimiento de los motores en la industria atendiendo a tres grupos principales:

- **Mantenimiento Correctivo:** Consiste en la reparación o sustitución de componentes una vez ha tenido lugar la avería. Dicho mantenimiento es el más clásico de ellos, siendo de aplicación en aquellos procesos no críticos cuya disponibilidad no es primordial
- **Mantenimiento Preventivo:** Consiste en el establecimiento de un plan de revisiones y sustitución de los elementos de desgaste dentro de un eje de tiempos marcado por el fabricante y que se debe ajustar a los ciclos de uso y el ambiente donde está funcionando cierto motor.



- **Mantenimiento Predictivo:** En este caso se trata de establecer un plan de medidas no invasivas, de diferentes magnitudes, que sea capaz de detectar fallos incipientes de forma que se pueda actuar previamente a la parada no prevista de la máquina.

## 2. MANTENIMIENTO PREDICTIVO EN EL MOTOR DE INDUCCIÓN

### 2.1 DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL MOTOR ASÍNCRONO

Como prefacio para la descripción de los tipos de avería más usuales en los motores asíncronos se revisan los diferentes componentes que por norma general lo integran.

Las máquinas asíncronas se conforman básicamente de un devanado estatórico alimentado por un sistema polifásico de tensiones el cual genera un campo magnético giratorio, y un rotor, parte móvil, formado por espiras cortocircuitadas.

Debido al giro del campo magnético estatórico a la misma frecuencia de alimentación que las corrientes que lo producen, el flujo magnético concatenado por las espiras del rotor será variable y por lo tanto en él se inducirá fuerza electromotriz, tal y como indica la ley de Lenz.

Al estar las espiras en cortocircuito, por ellas circula corriente, dando lugar a la presencia de conductores recorridos por una corriente en el seno de un campo magnético, lo cual dará lugar a la aparición de una fuerza tangencial sobre cada una de las espiras del rotor según se expresa en la ley de Biot y Savart:

$$d\vec{F} = i \cdot [d\vec{l} \wedge \vec{B}]$$

(ec. 2.1)

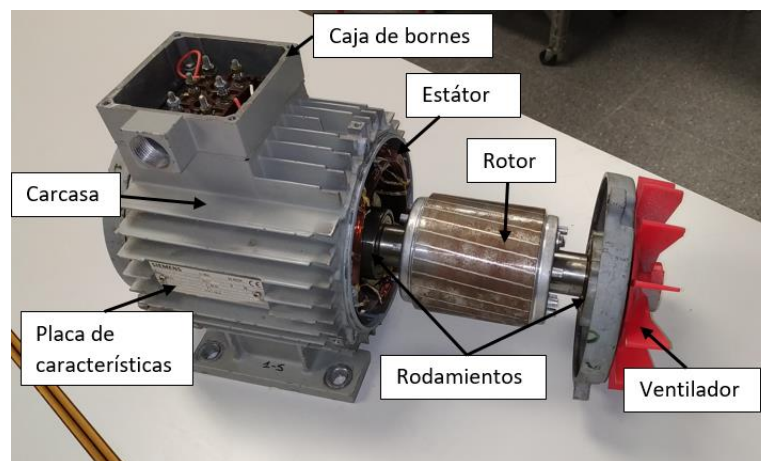


Fig. 1 Despiece motor de inducción

Dicha fuerza tratará de oponerse a la variación de flujo, provocando por tanto un par de giro aplicado en el rotor incluso cuando la máquina está parada.

Atendiendo al anterior principio, la máquina de inducción siempre girará a una velocidad inferior a la del campo giratorio, puesto que si llegasen a igualarse, desaparecería la fuerza electromotriz inducida y en consecuencia el par motor. Es por ello que reciben el nombre de máquinas asíncronas.



Se denomina velocidad de sincronismo ( $n_s$ ) a la velocidad de giro del campo, y depende únicamente de la velocidad de giro del motor y el número de polos de la máquina. Ésta viene dada por la ecuación 2.2, en la que  $f_{est}$  es la frecuencia de alimentación del motor y  $p$  es el número de pares de polos.

$$n_s = \frac{60 \cdot f_{est}}{p} \text{ [min}^{-1}\text{]}$$

(ec. 2.2)

La velocidad nominal de un motor de inducción ( $n_{rot}$ ) suele estar comprendida entre el 92 y 99% de la velocidad de sincronismo, siendo usual expresar esta diferencia como deslizamiento ( $s$ ), según la ecuación 2.3.

$$s = \frac{n_s - n_{rot}}{n_s}$$

(ec. 2.3)

En el funcionamiento normal se observa según la ecuación 2.3 que para la máquina parada se tiene en el instante inicial un valor de deslizamiento igual a la unidad ( $s=1$ ), mientras que funcionando en vacío se tendrán valores cercanos a cero ( $s\approx 0$ ), siendo que el grado de carga hace aumentar el deslizamiento hasta valores usualmente en torno al 2-5% cuando la máquina se encuentra a plena carga.

En el despiece de la figura 1 se pueden observar las partes internas de un motor de inducción industrial.

En la parte superior se encuentra la caja de conexiones; habitualmente se dispone de un conexionado equipado con pletinas de cambio de esquema, para poder conectar los devanados en configuración estrella o en triángulo.

Para ello, se dispone de acceso eléctrico a las 6 cabezas de bobina, pudiendo hacer el cambio de conexionado mediante el cambio de posición de las pletinas.

Se puede observar el bobinado estatórico junto a la chapa magnética del estator. Ambos están unidos solidariamente con la envolvente exterior, sirviendo como medio de transferencia de calor la superficie cilíndrica existente entre la parte exterior de la chapa magnética y la interior de la carcasa del motor.

La principal fuente de disipación de calor en motores de inducción de pequeño tamaño ( $\leq 3\text{kW}$ ) consiste en un rodete unido al propio eje del motor, de forma que al girar crea una corriente de aire que aumenta el coeficiente de película  $h$  en torno a las aletas exteriores de la carcasa.

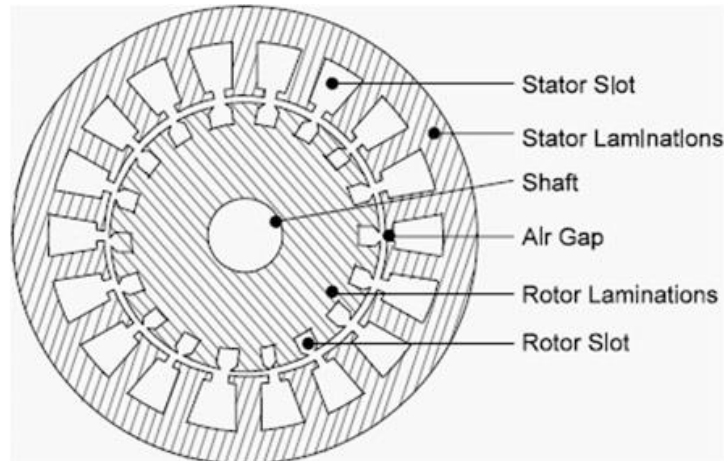


Fig. 2 Sección de la chapa magnética [1]

Con respecto a la parte móvil del motor de inducción, el rotor, existen dos tipologías funcionales:

- **Rotor de Jaula de ardilla:** Se compone de barras, normalmente de aluminio para motores de potencias usualmente menores a unos 3kW (si bien no existe un límite estricto), o de cobre para motores de mayor tamaño. Como se observa en la figura 2, tanto la chapa del rotor como la del estátor tienen diferentes cavidades para alojar los distintos conductores que conforman los devanados. En el caso de rotor de jaula de ardilla de pequeña potencia, el conformado de las barras se hace mediante inyección de aluminio fundido en el interior de los huecos, dejando espacio libre para los anillos de cortocircuito, que se formarán mediante el aluminio de la inyección.
- **Rotor bobinado:** En éste tipo de rotores el devanado es conformado por espiras de material conductor arrolladas en el interior de los huecos. Como se ha comentado previamente, es necesario producir un cortocircuito entre las bobinas que forman el devanado estatórico, para ello se hacen llegar las cabezas de bobina a unos anillos rozantes, a través de los cuales se efectuará de forma externa el cortocircuito. (también se pueden utilizar estas tomas para obtener mayores pares de arranque, mediante la adición de resistencias rotóricas).



Fig. 3 Rotor bobinado (con anillos rozantes) [20]

Por último y como nexo mecánico entre estator y rotor se encuentran los rodamientos, normalmente de cilindros o bolas para motores de pequeña potencia.

## 2.2 CLASIFICACIÓN DE LAS AVERÍAS DEL MOTOR ASÍNCRONO

Pese a la naturaleza especialmente robusta de éste tipo de máquinas, la persistente política de reducción de costes y abaratamiento de los materiales acaba afectando en cierto grado a la fiabilidad de las máquinas.

Para motores de pequeño tamaño (hasta 4kV) aparece una distribución del tipo de avería más común, mostrado en la figura 4, fruto de un estudio elaborado por Thorsen&Dalva y Allianz.

Es interesante hacer hincapié en tres factores fundamentales para éste rango de motores:

En primer lugar la amplia disponibilidad de elementos tales como los rodamientos, cuyo tamaño suele ser estándar y es altamente producido en la industria, lo cual facilita la entrada en circulación de elementos dimensionalmente equivalentes, pero con un control de calidad diferente (o no existente en su caso más extremo).

En segundo lugar y siendo un factor inherente a motores de jaula de ardilla de pequeño tamaño, las barras y anillos de cortocircuito se inyectan a presión en el alojamiento previsto en los huecos del núcleo rotórico.

Dicho factor aglutina dos características, por una parte la inevitable solidificación dendrítica que afecta al aluminio durante su enfriamiento, y por otra su baja resistencia a fatiga lo cual propicia la aparición de grietas de evolución normalmente en las uniones entre barra y anillo.

Por último, y en relación a la clase de servicio del motor y más concretamente en su uso final, éste sufre arranques y paradas, cuya criticidad aumenta si no se respetan las condiciones de diseño en ciclo y temperatura de uso, originando esfuerzos térmicos y de otra índole en el aislante del devanado del estator, pudiendo propiciar la aparición de defectos en el sistema aislante del mismo.

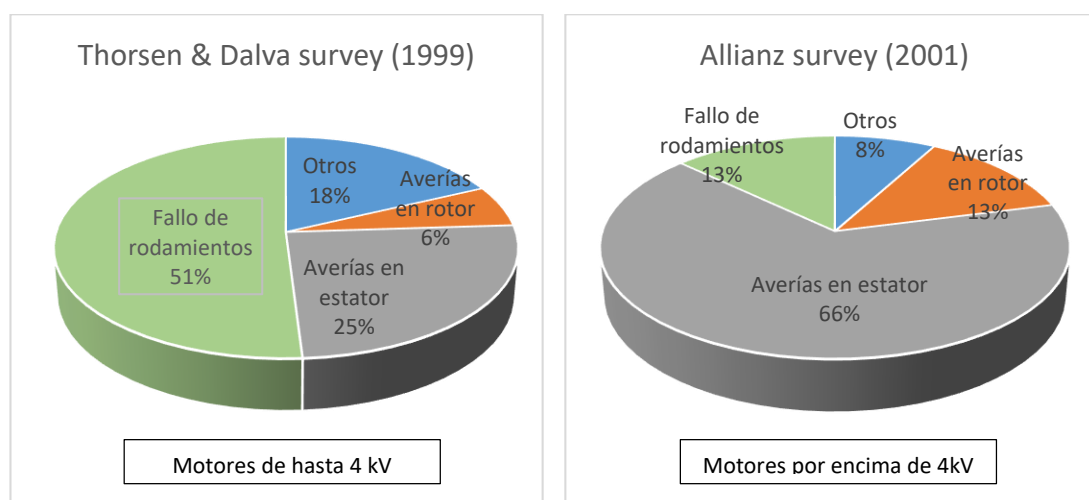


Fig. 4 Gráfico de averías de un estudio de Thorsen & Dalva y Allianz respectivamente

## 2.2.1 FALLOS EN RODAMIENTOS

Normalmente en motores de inducción de pequeña potencia se dispone de un rodamiento en cada extremo del eje, profiriendo la sujeción necesaria así como disminuyendo la fricción durante su funcionamiento.



*Fig. 5 Rodamiento de bolas con signos de desgaste externos*

Las causas de fallo de este componente se pueden describir según las siguientes casuísticas:

- **Carga excesiva, ajustes incorrectos y excesos de temperatura:** degradan el lubricante, pudiendo llegar a la eliminación del mismo ocasionando un gripado de las partes en contacto.
- **Fallo a fatiga:** el fallo a fatiga en rodamientos es progresivo una vez tiene comienzo. Originariamente comienza con la erosión de las pistas por motivos muy diversos como pueden ser las corrientes parásitas por el uso de variadores de frecuencia. Normalmente viene asociado a esta forma de fallo un aumento de las vibraciones y ruido producidos por el motor.
- **Corrosión:** puede resultar de la exposición a diferentes medios corrosivos que atacan tanto a los elementos rodantes como a las pistas, pudiendo desencadenar el origen de un proceso de fatiga. Normalmente los rodamientos de los motores eléctricos son de tipo sellado o con lubricación externa, siendo más habitual que no estén expuestas a la atmosfera las partes móviles.
- **Contaminación:** tiene lugar cuando debido al ambiente en el que se encuentra operando una máquina facilita la deposición en sus resquicios de restos de polvo o partículas que acaban mezclándose con el lubricante. Dicho fenómeno inicia procesos de desgaste que finalizan por dotar de holgura a los rodamientos.





- **Fallo de lubricación:** tiene lugar cuando las condiciones de lubricación no son adecuadas. Se encuentran tabuladas las características de uso de cada rodamiento y el correspondiente lubricante, de forma que si se exceden las condiciones de trabajo, temperatura, revoluciones, etc. se puede producir una degradación del lubricante ocasionando holgura excesiva y desgaste de las partes rodantes. Es habitual encontrar pistas y elementos rodantes decolorados en éste tipo de fallo.
- **Desalineación:** un montaje incorrecto, o un mecanizado fuera de tolerancia del alojamiento del rodamiento puede ocasionar un funcionamiento forzado del mismo, ocasionando usualmente un aumento notable de la temperatura de funcionamiento.

## 2.2.2 ASIMETRÍAS ROTÓRICAS

Una fuente de fallos importante dentro de la máquina asíncrona está relacionada con asimetrías en el rotor.

En la literatura se interpreta una máquina sana como aquella que presenta una simetría total en el rotor. Dicha condición es una herramienta puramente operacional, pues simplemente considerando el ranurado constructivo, ya se rompe en cierto modo la simetría. Sin embargo, nos ayuda a entender la relación entre asimetría y algún tipo de “mal funcionamiento” que se manifiesta como asimetría en las diferentes magnitudes que permiten el funcionamiento de la máquina (corriente por el estator, por el rotor, campo magnético de entrehierro, flujo de dispersión, etc.)

Durante el arranque, debido al paso de corrientes de valores mayores a las de funcionamiento, se somete a las barras a un esfuerzo superior.

Por otra parte durante el proceso de fabricación o montaje y con el nivel de tolerancia dimensional logrado, el entrehierro de la máquina puede no ser uniforme, dando lugar a variaciones en la anchura del entrehierro (y por ende su reluctancia) originando componentes pulsantes y en su caso más extremo llegando al rozamiento entre rotor y estator.

### 2.2.2.1 Rotura de barras

Tal y como se comenta en apartados anteriores, la jaula rotórica es un elemento mecánicamente sensible a su fabricación y composición metalúrgica.

Es por ello que se convierte en cierto modo un elemento débil, dentro de una máquina que por su concepción y funcionamiento resulta de una robustez y durabilidad notable.

A continuación se detallan una serie de factores de avería en el rotor:

- **Defectos de fabricación:** Desde una mala colada del aluminio dentro de los huecos de rotor, donde se produce inclusión de burbujas de aire hasta una mala

soldadura del anillo de cortocircuito en caso de rotor con espiras conformadas pueden ser el origen de una avería incipiente que se magnifica con los efectos térmicos en su uso normal.

- **Esfuerzos térmicos:** Un número excesivo de arranques consecutivos, unido a una mala refrigeración del motor debido al ambiente al que se encuentra sometido, pueden ser causas de avería en el rotor, facilitando normalmente la progresión a fatiga térmica de elementos del rotor.
- **Esfuerzos mecánicos por fallo de rodamientos:** Cuando tiene lugar una avería en un rodamiento, puede ser catastrófica, con la pérdida de sello, jaula y elementos rodantes o por el contrario comenzar con la inducción de una holgura que puede originar el contacto mecánico entre el rotor y el estator.
- **Fatiga de materiales:** Tal y como se ha indicado, el aluminio es especialmente sensible al trabajo a fatiga, por lo que siempre habrá que añadir éste a la lista de factores a tener en cuenta, sobretodo en máquinas con un número de ciclos de funcionamiento elevado.
- **Esfuerzos electrodinámicos:** Además de los que propician el fallo en la unión entre barras y anillo de cortocircuito en rotores de jaula de ardilla, tienen especial criticidad los esfuerzos electrodinámicos en las cabezas de bobina de los rotores bobinados, que junto a las fuerzas centrífugas, pueden ocasionar la rotura en la zona de contacto con la chapa magnética del rotor.

### 2.2.2.2 Excentricidades

La excentricidad se define como la existencia de un entrehierro no uniforme. Debido a la reducida anchura que presenta el entrehierro, el nivel de excentricidad es un parámetro a controlar desde la producción de cada motor.

Dicho nivel puede llegar a ser significativo debido a diferentes factores, desde una ovalidad de estator o rotor, hasta un defecto de fabricación a la hora de mecanizar el alojamiento de los cojinetes.

En un valor contenido, no origina más allá de vibraciones indeseadas, y cierto componente en los espectros de corriente y flujo magnético de dispersión, pero en un grado avanzado, puede ocasionar esfuerzos asimétricos excesivos e incluso llegar a provocar fricción entre estator y rotor, dañando el núcleo estatórico o el aislamiento.

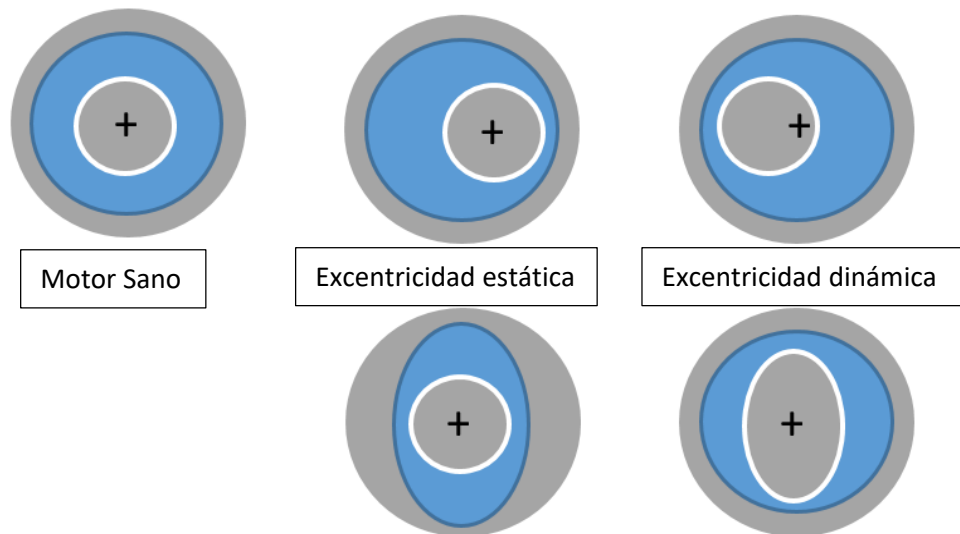


Fig. 6 Esquema de tipos de excentricidad

Existen diferentes tipos de excentricidad:

- **Excentricidad estática:** Esta asimetría tiene lugar cuando la posición de mínimo entrehierro se mantiene fija en el espacio. Posibles causas son la ovalidad del estator o que el centro de giro del rotor no coincida con el centro geométrico del estator, lo cual puede deberse a un defecto constructivo en el alojamiento de los cojinetes.
- **Excentricidad dinámica:** Tiene lugar cuando la posición de mínimo entrehierro se mueve solidariamente con el rotor, pero en cualquier posición del rotor la anchura de mínimo entrehierro siempre es igual. Puede deberse a que el centro de giro del rotor no coincida con su centro geométrico, pero sí con el del estator (debido a deformación del rotor, mal mecanizado del eje, etc.) o también puede ser provocada por una ovalidad del rotor.
- **Excentricidad mixta:** Corresponde a la conjunción de ambos tipos de excentricidad, y es normalmente la que se encuentra presente en la máquina. La posición de mínimo entrehierro se mueve solidariamente con el rotor, pero la anchura de mínimo entrehierro es diferente para cada posición del rotor. En este caso existe una discrepancia entre el centro geométrico del rotor, su centro de giro y en centro geométrico del estator.

### 2.2.3 DEFECTOS EN EL SISTEMA AISLANTE

En máquinas de menor tensión, el aislamiento suele basarse en barnices tipo resina epoxy, mientras que en máquinas de media tensión se emplean compuestos a base de mica, con soportes diversos (fibra de vidrio, poliéster) para dotar de consistencia mecánica.

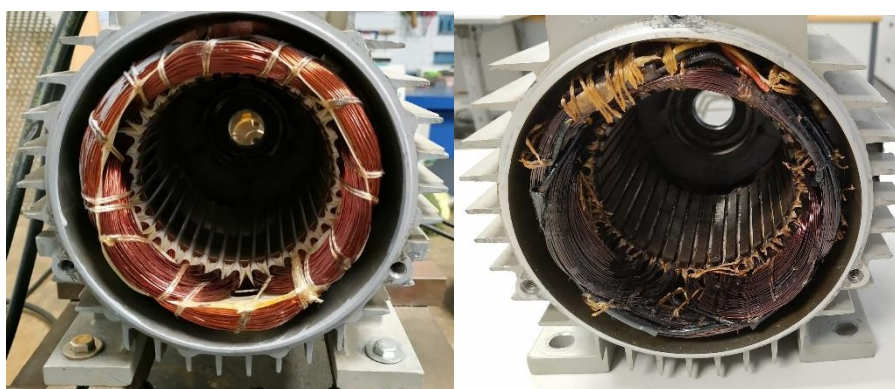
En la industria [1] dada la gran variedad de materiales aislantes empleados, se establecen diversas clasificaciones. Una de ellas se basa en la norma EN 60034-18-1:2010, que clasifica a los aislantes según su **clase térmica**, la cual hace referencia a la máxima temperatura que puede soportar dicho aislante en el punto más caliente. Las diferentes clases térmicas disponibles, así como sus respectivas temperaturas, se muestran en la Tabla 1:

| Clase térmica              | A   | E   | B   | F   | H   |
|----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Temperatura de clase en °C | 105 | 120 | 130 | 155 | 180 |

**Tabla 1: Clases térmicas**

Las averías en el sistema aislante se producen cuando el sistema empleado para tal fin pierde las propiedades que lo caracterizan. Estas averías son consecuencia de los esfuerzos de índole eléctrica, mecánica, térmica y ambiental a los que se ve sometido e aislamiento del motor. Entre los múltiples factores que pueden contribuir al deterioro de este sistema se pueden por tanto citar: efectos térmicos (sobrecargas en los conductores, tensiones desequilibradas...), efectos mecánicos (impactos, vibraciones excesivas...), efectos eléctricos (descargas parciales, sobretensiones) y ambientales (presencia de contaminación o humedad, ataques químicos...).

Dentro de las técnicas existentes para el diagnóstico de éste tipo de avería se encuentran el método de las descargas parciales, ensayos de tangente de delta, ensayos de ondas de choque, ensayos con tensión continua y ensayos de sobretensión.



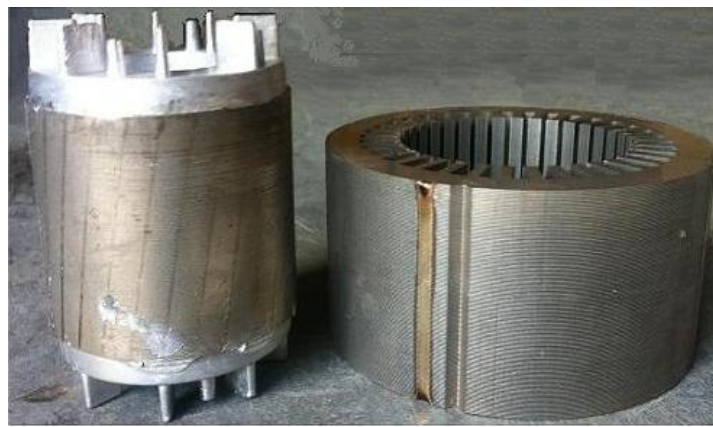
*Fig. 7 Bobinado estatórico sano (izq.) Fallo severo en el aislamiento (Der.)*

## 2.2.4 FALLOS EN EL PAQUETE MAGNÉTICO

Para limitar las corrientes parásitas de Foucault, además de laminar los núcleos magnéticos en dirección paralela al campo y utilizar aceros al silicio de alta resistencia eléctrica, se aplica una capa de aislamiento entre cada una de las chapas.

El fallo de esta pátina, origina la circulación de corrientes eléctricas que por efecto Joule devienen en un calentamiento del núcleo, pudiendo originar averías adicionales.

Para detectar este tipo de fallo, existe un ensayo off-line que se basa en la utilización de termografía infrarroja (core ring test o loop test).



*Fig. 8 Paquete de chapa magnética de rotor y estator respectivamente [21]*

## 2.3 TÉCNICA DE DIAGNÓSTICO ACTUAL BASADA EN ANÁLISIS ESPECTRAL

### 2.3.1 ANÁLISIS DE CORRIENTES

La técnica de análisis de la señal de la corriente en motores eléctricos (conocida en su versión clásica como *Motor Current Signature Analysis*, **MCSA**) es una técnica basada en la monitorización de la señal de corriente en una de las fases de alimentación del motor y el posterior análisis de su espectro en frecuencias.

Se aplica la transformada de Fourier (con la ventana de medida adecuada) para obtener el espectro de frecuencias que conforman la onda registrada, de acuerdo con la definición matemática dada por la ecuación 2.4:

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

(ec. 2.4)

Para ello se discretiza la expresión anterior en el dominio de la frecuencia, según la expresión 2.5:

$$X[m] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j2\pi mnFT} \quad m = 0, 1, \dots, N - 1$$

(ec. 2.5)

Siendo T el intervalo de tiempo entre muestras, N el número de muestras de la señal discreta y F el intervalo entre las frecuencias que corresponde con la inversa del tiempo de muestreo  $t_s$ .

Una forma de indicar las amplitudes de los distintos armónicos presentes en la señal analizada consiste en expresar dichas amplitudes en decibelios (dB), computándolas en términos de diferencia respecto a la amplitud de la componente fundamental ( $A_0$ ). De esta manera, la amplitud de un armónico genérico  $A_i$  vendría expresada según la fórmula 2.6.

$$A(dB) = 20 \cdot \log\left(\frac{A_i}{A_0}\right)$$

(ec. 2.6)

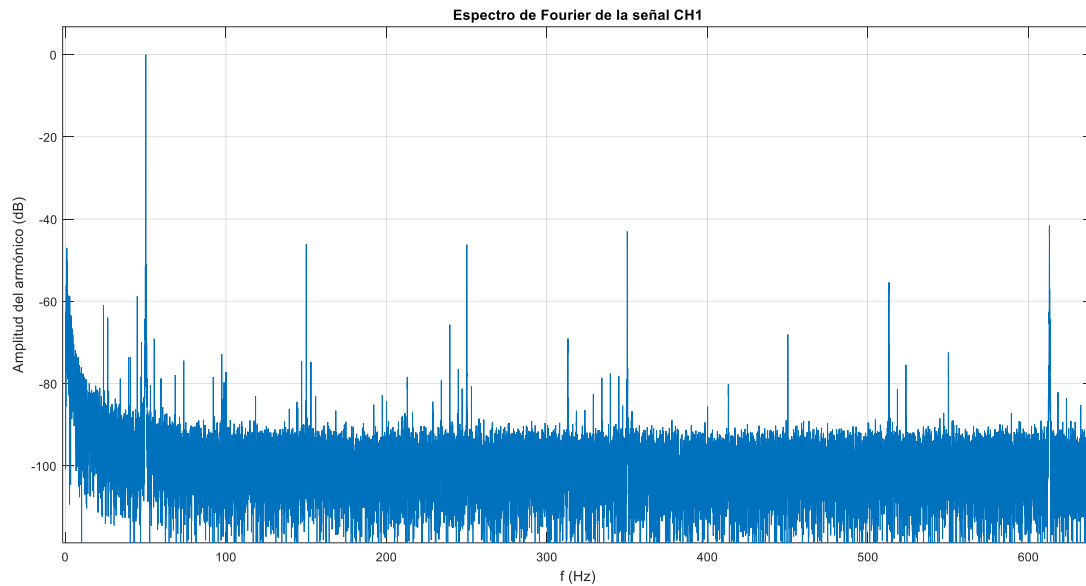


Fig. 9 Espectro en frecuencia de la corriente por una fase del estator

Previamente a la caracterización de las averías mostradas en el espectro, es necesario conocer las componentes intrínsecas a cualquier motor, independientemente de su estado.

**a) Componente Fundamental (CF):** Es la componente correspondiente a la frecuencia de alimentación de las tensiones aplicadas al estator del motor de inducción, dicha componente produce el par mecánico del motor. Su valor es el máximo del espectro. En alimentaciones directas a la red, la frecuencia de dicha componente será de 50 Hz en Europa y 60 Hz en EE.UU y otros países. En el caso de utilizar variadores de frecuencia corresponderá a la frecuencia a la que el variador alimenta al motor.

**b) Armónicos de Devanado (AD):** Son fruto de la conjunción de dos factores: los armónicos presentes en las tensiones de suministro y del hecho de que la distribución de conductores en el estator, en vez de ser continua, se realiza en un número finito de ranuras, de tal forma que el campo generado no es perfectamente sinusoidal.

*Frecuencia:* Los AD tienen una frecuencia que es múltiplo impar de la frecuencia fundamental (Ej.: Si la frecuencia fundamental es de 50 Hz, los AD tienen frecuencias de 150 Hz (AD3: por 3), 250 Hz (AD5: por 5), 350 Hz (AD7: por 7), 450 Hz (AD9: por 9), etc...

*Amplitud:* Decece con el orden del armónico.

En motores trifásicos, los AD de orden múltiplo de 3 suelen tener una menor amplitud (en el ejemplo de la Figura 10, AD3 es significativo, pero AD9 es inferior y el AD15 tiene todavía menor amplitud).

**c) Armónicos Principales de Ranura (APR):** El ranurado del motor provoca que la permeabilidad del circuito magnético cambie en las distintas direcciones radiales, introduciendo una familia de armónicos llamados Armónicos Principales de Ranura.

La frecuencia a la que aparecen estos armónicos depende de diferentes parámetros constructivos y de funcionamiento:

$$f_{APR} = \left[ k \cdot \left( \frac{R}{p} \right) \cdot (1 - s) \pm \gamma \right] \cdot f_{red}$$

(ec. 2.7)

siendo  $f_{red}$  la frecuencia fundamental de la tensión aplicada al estátor,  $\gamma$  el orden considerado del armónico de la tensión de alimentación (nº impar),  $k$  es un número natural (1; para  $k > 1$  las amplitudes de los APR suelen ser bajas),  $s$  el deslizamiento,  $R$  es el número de ranuras del rotor y  $p$  los pares de polos del motor.

El APR generado por el armónico de tensión de alimentación de orden  $\gamma$  se denomina APR  $\gamma$  (+) o APR  $\gamma$  (-) en función de si se ha tomado signo positivo o negativo en la ecuación anterior.

En función de las características del motor, éstos pueden no presentar APR; no todas las frecuencias previstas por la fórmula se encuentran en todos los motores, pudiendo un APR tener una elevada presencia en la corriente de un motor y no estar presente en la de otro. En términos de amplitud, la componente APR1(-) es uno de los que habitualmente tiene mayor relevancia.

En la siguiente ilustración pueden observarse estas componentes para un motor de inducción tetrapolar con 28 ranuras, trabajando con un deslizamiento de 0,0451:

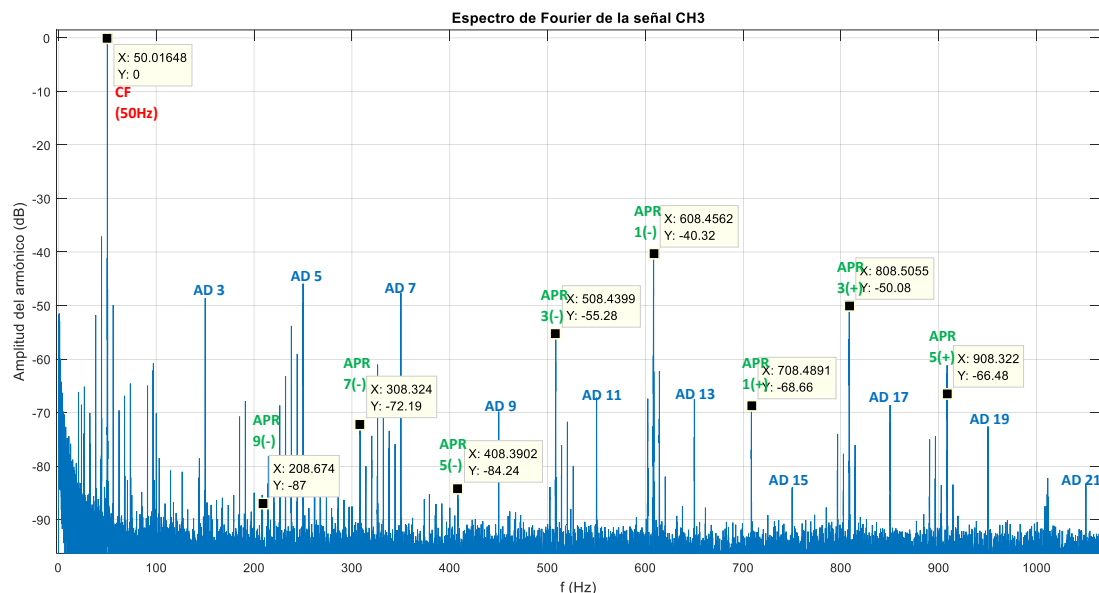


Fig. 10 Espectro en frecuencia con identificación de la componente fundamental (CF), armónicos de devanado (AD), armónicos principales de ranura (APR)





### 2.3.1.1 Detección de rotura de barras

La rotura de barras puede ser detectada monitorizando cualquier anomalía en la amplitud de los espectros de corriente y flujo magnético para una serie de frecuencias características situadas cerca del armónico principal.

Tal y como se ha descrito con anterioridad, la corriente en el estator contiene una variedad de armónicos característicos fruto de diferentes casuísticas constructivas del motor. Sobre los diferentes armónicos destaca el uso de los APR para la detección de fallos en el motor [8].

Recordamos que la presencia de APR en una máquina depende fundamentalmente de dos factores, a) los armónicos en la fuerza magnetomotriz en estátor y rotor y b) la permeabilidad magnética de las ranuras de rotor y estator. Su amplitud depende también de los efectos de saturación del circuito magnético y del tamaño del entrehierro en cada región.

Para comprender el efecto sobre las corrientes en el rotor originadas tras una rotura de barra, diversos autores [1,8] evalúan dicha distribución de corrientes como la superposición de dos efectos, por una parte la corriente que circularía por la jaula sin avería y por otra una fuente de intensidad del mismo valor y sentido contrario al que circularía por la barra rota, de esta forma se obtiene una corriente nula por la barra averiada.

En general, no hay diferencia con respecto al lugar donde se produzca la rotura efectiva, siendo por efectos mecánicos y térmicos más probable que suceda en la unión con el anillo de cortocircuito.

Se utiliza el modelo mallado de la jaula con las resistencias y reactancias de barras y anillos para la obtención del segundo término de la superposición [1].

Teniendo en cuenta el campo creado por las corrientes de las barras del modelo anterior, se extrae su naturaleza no senoidal, debido al número finito de barras, y pulsante de eje fijo a la frecuencia de deslizamiento.

Por otra parte, las corrientes circulantes por cada malla irán decreciendo en amplitud, y variando su ángulo de fase conforme a un factor de escalonamiento constante a medida que nos alejamos de la barra. Este concepto es importante, pues remarca la propensión al fallo de las barras contiguas a la averiada.

Dicho campo complejo se puede expresar como suma de campos senoidales según la transformada de Fourier. Por otra parte, a cada uno de los campos se les puede aplicar el teorema de Leblanc, siendo que indica la posibilidad de descomponer un campo pulsante de eje fijo como suma de dos campos magnéticos simétricos y de sentido de giro opuesto cuya amplitud es la mitad que el pulsante y su velocidad de giro corresponde con la frecuencia del original.

Se obtiene así diferentes conjuntos (familia) de campos magnéticos que giran en el mismo sentido y en el contrario que el del rotor. La frecuencia de los armónicos de rotura de barra responde a la siguiente ecuación:

$$f_{ARB} = \left[ \frac{k}{p} \cdot (1 - s) \pm s \right] \cdot f_{red}$$

(ec. 2.8)

Donde  $k$  es el nivel del armónico seleccionado,  $p$  son los pares de polos y  $s$  el deslizamiento. El signo dependerá del sentido de giro con respecto al rotor de cada grupo de armónicos.

La otra familia de frecuencias de los ARB corresponde a la siguiente expresión:

$$f_{ARB} = [1 \pm 2ks] \cdot f_{red}$$

(ec. 2.9)

Para el valor de  $k=1$  se obtienen los conocidos como armónicos laterales.

El armónico lateral inferior es el producido por el giro en sentido contrario (en literatura anglosajona "Lower Sideband Harmonic"):

$$f_{LSH} = [1 - 2s] \cdot f_{red}$$

(ec. 2.10)

El armónico lateral superior ("Upper Sideband Harmonic"):

$$f_{USH} = [1 + 2s] \cdot f_{red}$$

(ec. 2.11)

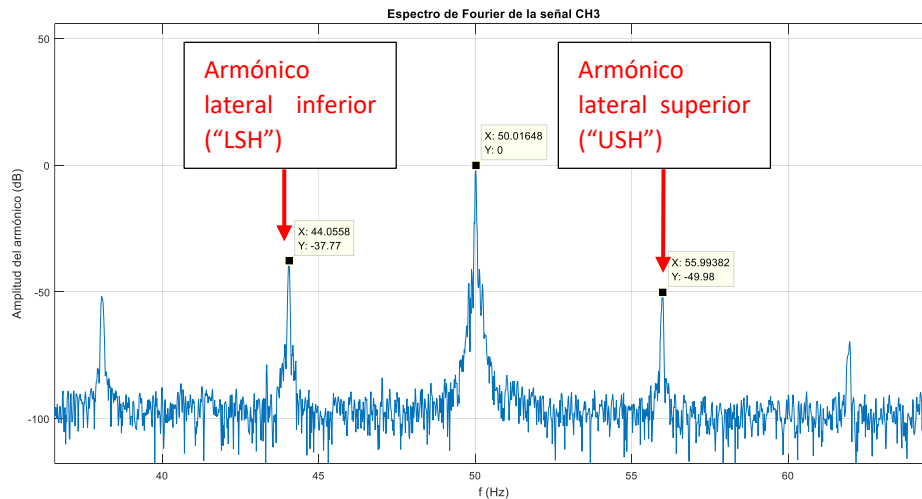


Fig. 11 Armónicos laterales. Superior e inferior.

No obstante, el seguimiento de estos componentes posee ciertas limitaciones. Como se ha visto, dichos armónicos están presentes también en el espectro motor sano, y sus amplitudes son el resultado de la asimetría propia del rotor.

Por otra parte la distancia de estos armónicos al fundamental, es función del deslizamiento del rotor, y por tanto del nivel de carga de la máquina, siendo complicado distinguir para grados de carga muy bajos.

Por tanto, se recomienda realizar la medición con niveles de carga superiores al 50% y comprobar los grupos de frecuencias entorno al 5º y 7º armónico.

Como se detalla en apartados anteriores, la solución para esta casuística es la normalización de las amplitudes, es decir la aplicación de un método que permita medir la evolución de los armónicos independientemente de la carga y del motor evaluado, por ello se emplea la medición de la amplitud relativa referida a la fundamental mediante una escala logarítmica y adicionalmente se establece un umbral para cada tipo de avería.

En la bibliografía se encuentran tablas de severidad en función de la amplitud diferencial de estos componentes con respecto al fundamental.

| CATEGORÍA | AMPLITUD LSH USH (dB) | ESTADO DEL ROTOR   | ACCION RECOMENDADA                |
|-----------|-----------------------|--|-----------------------------------|
| 1         | >60 dB                | Excelente  | Ninguna                           |
| 2         | 54-60 dB              | Buena  | Ninguna                           |
| 3         | 48-54 dB              | Moderada   | Ver Tendencias                    |
| 4         | 42-48 dB              | Puede estar desarrollando barra partida o juntas de alta resistencia | Reducir intervalo de inspección   |
| 5         | 36-42 dB              | Dos barras partidas y alta resistencia que generan vibración         | Analizar vibración para confirmar |
| 6         | 30-36 dB              | Múltiples barras rotas y anillos sueltos                             | Revisar urgentemente el motor     |
| 7         | <30 dB                | Múltiples barras y anillos de cortocircuito. Severo                  | Revisar – Cambiar motor           |

**Tabla 2: Tabla de severidad para análisis de corrientes**

### 2.3.1.2 Detección de excentricidades

Con respecto a la detección de excentricidades, las componentes asociadas a esta avería aparecen reflejadas en el espectro de corrientes a través de armónicos de baja y alta frecuencia que se agrupan en dos familias. La **primera familia** permite la detección de armónicos asociados a una excentricidad mixta o desalineamiento y se corresponde con la expresión:

$$f_{AE} = \left[ 1 \pm \frac{k}{p} \cdot (1 - s) \right] \cdot f_{red}$$

(ec. 2.12)

Donde  $f_{red}$  es la frecuencia fundamental de la tensión aplicada al estator,  $s$  el deslizamiento,  $k$  un número natural y  $p$  el número de pares de polos. En la literatura se denominan a estas componentes  $Ek(+)$  o  $Ek(-)$ , en función de si se ha tomado signo positivo o negativo en la citada expresión.

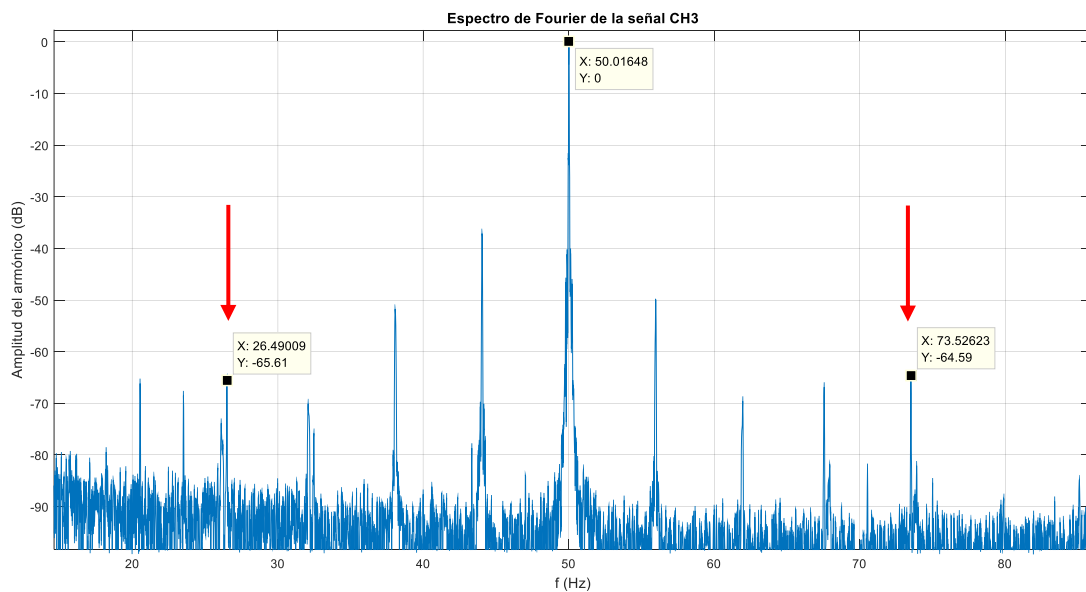


Fig. 12 Espectro de corrientes entorno al armónico fundamental, con presencia de armónicos de excentricidad de la primera familia

La **segunda familia** corresponde a armónicos de alta frecuencia conforme a la siguiente expresión:

$$f_{AE} = \left[ (R \pm n_d) \frac{k}{p} (1 - s) \pm v \right] \cdot f_{red}$$

(ec. 2.13)

Donde  $\nu$  es el orden considerado del armónico de la tensión de alimentación (número impar),  $R$  es el número de ranuras del rotor y  $n_d$  el orden de excentricidad (estática: 0, dinámica: 1,2,3).

En la literatura el armónico de excentricidad generado al tomar  $k/p$  en la ecuación se denomina  $ek/p(+)$  o  $ek/p(-)$  en función de si se ha tomado signo positivo o negativo.

Esta segunda familia de armónicos permite, en teoría, discriminar entre las componentes debidas a la excentricidad estática y a aquellas debidas a excentricidad dinámica.

### 2.3.1.3 Detección de fallos en rodamientos

En la literatura [10] se clasifican los fallos en rodamientos atendiendo a los siguientes criterios:

- Ubicación del fallo: pista interior, pista exterior, elementos rodantes y jaula.
- Naturaleza del fallo: puntual, generalizado para todo el recorrido

Los fallos puntuales originan impulsos periódicos que producen diferentes frecuencias características de fallo en el espectro en frecuencias de las corrientes de la máquina.

La amplitud y periodo de estos impulsos está determinada por la velocidad angular del eje, la ubicación del fallo y las dimensiones del rodamiento. Por tanto, se puede establecer una frecuencia específica para cada componente del rodamiento:

Para fallos en la pista externa:

$$f_o = \frac{N_b}{2} \cdot f_r \cdot \left(1 - \frac{D_b}{D_p} \cdot \cos \beta\right) \quad (\text{ec. 2.14})$$

Para fallos en la pista interna:

$$f_i = \frac{N_b}{2} \cdot f_r \cdot \left(1 + \frac{D_b}{D_p} \cdot \cos \beta\right) \quad (\text{ec. 2.15})$$

Para fallos en los elementos rodantes:

$$f_B = \frac{D_p}{D_b} \cdot f_r \cdot \left(1 - \frac{D_b^2}{D_p^2} \cdot \cos^2 \beta\right) \quad (\text{ec. 2.16})$$

Para fallos en la jaula:

$$f_c = \frac{1}{2} \cdot f_r \cdot \left(1 + \frac{D_b}{D_p} \cdot \cos \beta\right) \quad (\text{ec. 2.17})$$

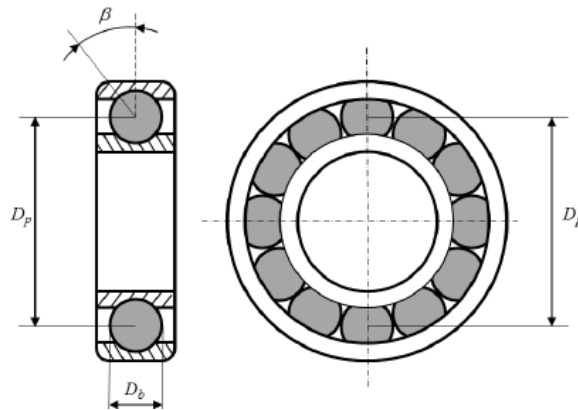


Fig. 13 Esquema de parámetros del rodamiento [10]

Donde  $N_b$  es el número de bolas,  $D_b$  y  $D_p$  son los diámetros de las bolas y diámetro de rodadura (pitch),  $f_r$  es la frecuencia mecánica del rotor y  $\beta$  es el ángulo de contacto entre elemento rodante y pista.

Dichas frecuencias se traducen en las siguientes componentes en el espectro de frecuencias:

$$f_{ARod} = |f_s \pm m \cdot f_i| \quad (ec. 2.18)$$

Siendo  $m=1,2,3, \dots$ ,  $f_s$  la frecuencia de las tensiones de suministro y  $f_i$  es una de las frecuencias características anteriormente descritas.

#### 2.3.1.4 Detección de espiras estáticas cortocircuitadas

Para la detección de espiras en cortocircuito, existe un ensayo off-line que resulta especialmente idóneo denominado Surge Test o Ensayo de Impulso. Asimismo, la técnica de monitorización de descargas parciales ha mostrado también buenos resultados para la detección de este tipo de fallo.

Algunos autores han apuntado que la técnica de análisis de corrientes también podría utilizarse para detectar este tipo de avería. Sin embargo, dada la rápida progresión de este tipo de fallo, la aplicabilidad práctica de la técnica de corrientes para su detección es limitada, ya que antes se detectaría la avería por otros síntomas como el colapso del aislamiento o el disparo de las protecciones.

A este respecto, un cortocircuito en el devanado estático, ya sea entre espiras de una misma fase o bien entre bobinas diferentes de una misma fase produce una reducción de la impedancia de dicha fase, originando una asimetría en el campo magnético giratorio resultante. Según se extrae de [11], varios estudios demuestran que se pueden modelar los componentes en frecuencia de la inducción magnética en el entrehierro para el caso de cortocircuitos en el devanado:

$$f_{ec} = f_s \cdot \left[ \frac{n}{p} \cdot (1 - s) \pm k \right]$$

(ec. 2.19)

Donde  $f_s$  es la frecuencia de la tensión de suministro,  $n=1,2,3,\dots$ ,  $p$  son los pares de polos,  $s$  el deslizamiento y  $k=1,3,5,\dots$

### 2.3.1.5 Evaluación de la desalineación entre motor y carga

La desalineación entre motor y carga arrastrada es un fenómeno común en la industria [16] donde el tipo de acoplamiento entre ambos componentes juega un papel fundamental.

Principalmente este fenómeno se puede clasificar en dos tipos, por una parte la desalineación angular, donde existe un ángulo entre los ejes de los dos elementos, y por otra la desalineación radial (descentramiento) donde los ejes son perfectamente paralelos, pero no contenidos en la misma línea.

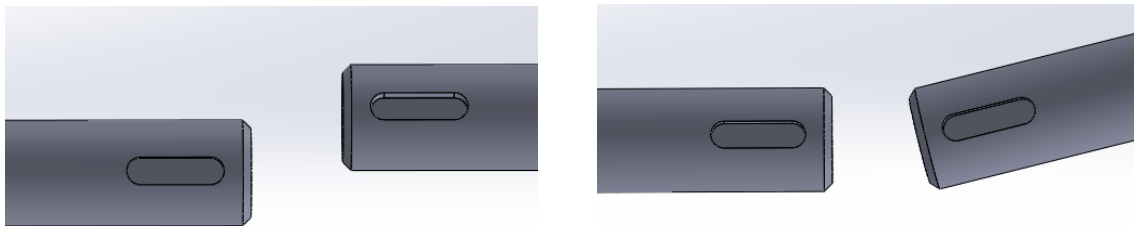


Fig. 14 Detalle de los tipos de desalineación. Izq. Desalineación radial. Der. Desalineación angular

En la práctica, se encuentra una combinación de ambos tipos de desalineación, ya que entran en juego las tolerancias dimensionales en toda la cadena cinemática de la transmisión de fuerzas y pares, es decir desde la bancada del motor pasando por los rodamientos, eje y acoplamiento, hasta llegar finalmente a la bancada del elemento arrastrado.

La mayoría de los acoplamientos elásticos limitan en gran medida las variaciones de par, evitando golpes y vibraciones en trenes de engranajes, además de absorber cierto nivel de desalineación dentro de su horquilla de funcionamiento.

Según la bibliografía al respecto, los acoplamientos producen unas componentes frecuenciales en forma de bandas que se corresponden con la siguiente expresión:

$$f_{desal} = f \pm n \cdot f_r$$

(ec. 2.20)

Siendo  $f$  la frecuencia de suministro,  $f_r$  la frecuencia de giro del rotor y  $n$  un entero no nulo.

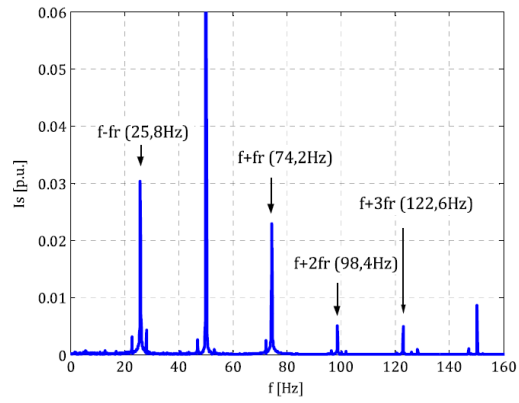


Fig. 15 Espectro de corriente para un acoplamiento con una desalineación radial de 1,5mm [16]





### 3. DIAGNOSTICO DE FALLOS MEDIANTE EL ANÁLISIS DEL FLUJO DE DISPERSIÓN

#### 3.1 INTRODUCCIÓN

La idea principal de la medida del flujo de dispersión de la máquina como herramienta para el diagnóstico predictivo del motor asíncrono resulta de gran interés entre otros factores debido a su bajo coste y a la naturaleza no invasiva del método, argumento fundamental de éste tipo de mantenimiento.

Si bien ya está introducido en la industria el análisis de corrientes, con el método y los procedimientos detallados con anterioridad, el análisis del flujo de dispersión comparte bastantes características con el anterior.

Por una parte, es suficiente con colocar sondas en varias posiciones de medida y registrar la información obtenida, ya sea en régimen permanente o transitorio.

En segundo lugar, se extrae la información contenida en el espectro en frecuencias de las señales para analizar su contenido en componentes indicativas de avería.

En la literatura se constata el hecho de que existe mayor presencia en componentes frecuenciales en la señal captada durante la medida el flujo magnético de dispersión que en las corrientes de alimentación del motor.

Adicionalmente, y como se demuestra en éste trabajo, el espectro obtenido de la medida del flujo de dispersión muestra una gran resolución para las bandas de muy baja frecuencia (0-10Hz), banda que en ocasiones se muestra distorsionada en el análisis de corrientes.

A continuación se detalla el fundamento del método, así como los indicadores de avería para régimen transitorio y permanente.

## 3.2 ANÁLISIS DEL FLUJO DE DISPERSIÓN

### 3.2.1 FUNDAMENTO TEÓRICO

El campo magnético externo de dispersión de una máquina asíncrona, puede entenderse como su descomposición en flujo radial y flujo axial.

El **flujo axial** es el contenido en un plano que incluye al eje de la máquina, y es generado por las corrientes que circulan por las cabezas de bobina estatóricas y por el anillo de cierre en el caso de rotor de jaula de ardilla.

Dicho flujo axial de dispersión en los albores de una máquina eléctrica está presente debido a la imposibilidad de ser fabricadas con una simetría perfecta. Bien sea por pequeñas asimetrías en los circuitos eléctricos y magnéticos debidas a las tolerancias dimensionales del proceso de fabricación, o por la anisotropía de los materiales utilizados.

Estas asimetrías dan lugar a pequeñas variaciones de las corrientes que circulan por las bobinas de la máquina, propiciando que aparezca una diferencia de corriente neta entre la zona de las cabezas de bobina estatóricas y las de la zona diametralmente opuesta, dando lugar a un flujo axial neto [2].

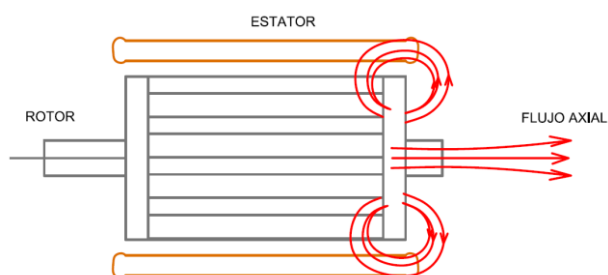


Fig. 16 Esquema de la distribución del flujo axial de dispersión en una máquina de inducción

Estas pequeñas variaciones de corriente se ven incrementadas en el caso de aparición de un fallo incipiente en la máquina pues la asimetría inicial (inherente a la máquina sana) se ve acentuada, siendo la principal baza de éste método, que radica en la detección precoz de los fallos de una forma no invasiva, cumpliendo con el criterio principal del mantenimiento predictivo.

El flujo axial neto contiene componentes debidas al estator, pero también debidas al rotor, por tanto su contenido en armónicos está relacionado con el contenido en armónicos de ambas corrientes, y como ambas corrientes de modifican durante el fallo, es posible detectar los cambios que sufre el flujo neto axial [2].

Por otra parte el **flujo radial** se presenta como la imagen de la inducción magnética en el entrehierro a su vez atenuada por el paquete de chapa magnética del estator y por la envolvente metálica del motor [4].

Existe una elevada complejidad para establecer un modelo matemático del campo de dispersión de una máquina, pues su valor depende fuertemente del paquete de chapa estatórica, como de la carcasa del motor, que generan un importante apantallamiento. Además, se requeriría de un modelo de las fuentes internas de dicho campo, para posteriormente conocer su atenuación y finalmente caracterizar el flujo que se percibe desde el exterior de la máquina.

A continuación se muestra el esquema de sondeo con las posiciones de las bobinas para según qué flujo se desea captar. Dicho esquema es el de partida para diversos autores en la materia:

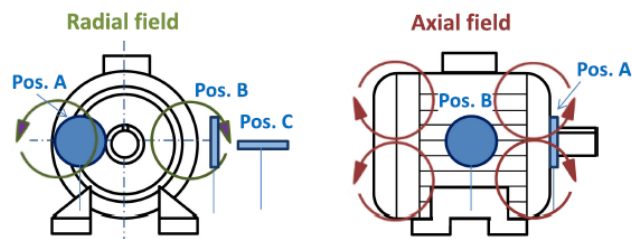


Fig. 17 Esquema de posición de sondas. [5]

En la posición A, el flujo axial concatenado con la bobina de sondeo es máximo, ya que el vector superficie de la bobina en A es paralelo a la dirección principal de dicho flujo, por tanto se utilizará para registrar la señal del flujo axial.

En la posición C la bobina es paralela al eje de la máquina (vector superficie de la sonda perpendicular) por tanto la cantidad de flujo axial concatenado con C es prácticamente nulo, por tanto se medirá únicamente parte del flujo radial.

Por último en la posición B se medirá parte del flujo axial y parte del flujo radial. Según lo mostrado en [5], con el registro de las tres posiciones se obtiene una información muy completa para averías rotóricas.

### 3.3.2 FLUJO AXIAL

Para determinar el flujo axial de dispersión en una máquina asíncrona, es necesario conocer la inducción magnética en el entrehierro, cuyo carácter será no senoidal debido a la distribución del devanado en el estator:

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

Esta expresión representa un conjunto de armónicos giratorios de orden  $6k \pm 1$  expresados en el sistema de referencia del estator [2]. Cabe destacar que mediante el acortamiento de paso y la distribución, alguno de estos armónicos puede ser anulado, no obstante en ésta introducción se considerará devanado diametral.

La ecuación anterior se puede expresar en un sistema de referencia rotórico simplemente añadiendo la velocidad del rotor en el sistema del estator:

$$\theta = \phi + \Omega_r \cdot t \quad (ec. 3.2)$$

Donde  $\Omega_r$  es la velocidad angular del rotor y  $\phi$  es su posición inicial en el instante  $t=0$ . Teniendo en cuenta que el deslizamiento en una máquina de inducción es  $s = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s}$ ; donde  $\Omega_s = \frac{\omega}{p}$  es la velocidad de sincronismo.

Despejando:

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

Por tanto la expresión general para un armónico de la densidad de flujo en el entrehierro referido al estator será:

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

Se puede expresar de la siguiente forma:

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

Si de desarrolla la ecuación 3.5 para los primeros armónicos, se obtiene el siguiente desarrollo:

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

(ec. 3.6)

La anterior 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 (devanado trifásico simétrico alimentado de forma equilibrada).

Estos armónicos de corrientes darán lugar a los consiguientes armónicos de flujo axial, a los que habrá que superponer los correspondientes a la frecuencia de alimentación.

Se muestra por tanto que existen armónicos en el flujo axial que existen independientemente del estado de la máquina, deduciéndose que en caso de aparecer asimetrías o defectos de fabricación y en su caso más acentuado, aparición del fallo, se producirá una variación en la distribución de los armónicos en la inducción en el entrehierro que dará lugar a su vez a una variación en los armónicos del flujo axial de dispersión [2]. Pudiendo por tanto ser utilizados como marcadores para la detección precoz de fallos.

### 3.2.3 FLUJO RADIAL

Como se ha comentado en apartados anteriores, el flujo radial es el resultante después de la atenuación sobre la inducción en el entrehierro.

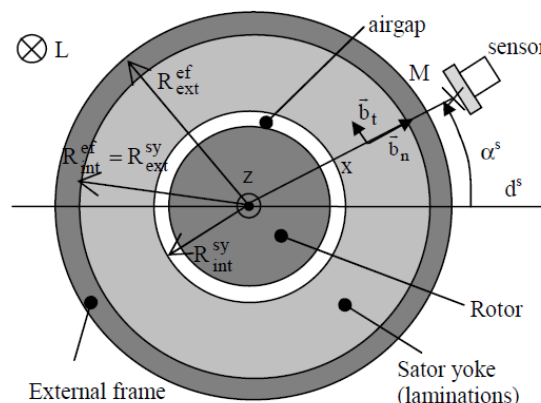


Fig. 18 Geometría simplificada para motor de inducción [4]

Diversos autores proponen una serie de modelos para caracterizar dicha atenuación (por ejemplo, R. Romary, R. Pusca, J. P. Lecoïnte and J. F. Brudny, "Electrical machines fault diagnosis by stray flux analysis,"), planteando sistemas simplificados de la sección del motor de inducción, y tomando simplificaciones en relación a las corrientes parásitas de Foucault, etc.

Para caracterizar dicha atenuación se descompone en tres componentes, en primer lugar la atenuación en el núcleo de chapa estática  $C^{est}$ , en la envolvente metálica del motor  $C^{env}$ , y finalmente en el tramo de aire hasta la sonda  $C^a$  resultando:

$$C = C^{est} \cdot C^{env} \cdot C^a \quad (ec. 3.7)$$

Generalmente debido a la ubicación tan cercana de las sondas de flujo al núcleo del estator se considera el coeficiente de atenuación como el valor que adopta la componente  $C^{est}$ .

Para el caso simplificado donde no se consideran las corrientes parásitas de Foucault, dicho coeficiente adopta el valor de:

$$C^{est} = \frac{2}{\mu_r^{est} \left( \left( \frac{R_{int}^{est}}{R_{ext}^{est}} \right)^{-|H|-1} - \left( \frac{R_{int}^{est}}{R_{ext}^{est}} \right)^{|H|-1} \right)} \quad (ec. 3.8)$$

Correspondiendo los radios a los mostrados en la figura 18.

De esta forma, la inducción magnética se corresponde con la siguiente expresión:

$$\hat{b}_v^x = \left| \sum_H C^{est} \hat{b}_{v,H} e^{-j(H\alpha_0^s + \varphi_{v,H})} \right| \quad (ec. 3.9)$$

Siendo  $\hat{b}_v^x$  la inducción magnética de orden  $v$  en el exterior del núcleo del estator en la dirección marcada por el eje  $x$  en la figura 18, correspondiente con la paralela al vector superficie de la sonda.

Dada la gran variedad de geometrías y características constructivas de éste tipo de motores en la industria, no sería operativo caracterizar matemáticamente el flujo radial esperado para según qué máquina se trate.

Por tanto, la tendencia para el estudio del método se basa en el análisis de la máquina en condiciones de funcionamiento normales y el posterior establecimiento de órdenes de magnitud para aquellos armónicos característicos, sirviendo para monitorizar los posibles fallos que puedan aparecer en la máquina.



### 3.3 ANÁLISIS EN RÉGIMEN PERMANENTE

Para la medida del flujo de dispersión en el entorno de la envolvente de la máquina se utilizan sondas formadas por bobinas con cierta geometría y número de espiras, que captan un flujo (obviamente pulsante) que origina una fuerza electromotriz en bornes de la misma.

Dicha fuerza electromotriz correctamente instrumentada tiene un contenido en armónicos que se puede expresar como suma de funciones senoidales de diferente frecuencia, tal y como se expresa en el apartado correspondiente al análisis de corrientes.

Partiendo de la metodología empleada en el análisis de corrientes, el análisis del flujo de dispersión en régimen permanente se basa en la identificación y cuantificación de componentes frecuenciales que se magnifican en la presencia de según qué tipo de avería.

#### 3.3.1 INDICADORES DE AVERÍA EN RÉGIMEN PERMANENTE

En la bibliografía al respecto, diversos autores detallan componentes de fallo para el análisis en régimen permanente, concretando las expresiones que las modelan.

En referencia a las averías relacionadas con el estado del rotor, la bibliografía muestra componentes de baja frecuencia mediante el análisis en régimen permanente.

A continuación se detallan las diferentes frecuencias relacionadas con cada tipo de avería.

##### 3.3.1.1 COMPONENTES DE ROTURA DE BARRAS

En condiciones de funcionamiento normales, un sistema trifásico equilibrado de corrientes en el estator origina un campo magnético giratorio en sentido directo. Dicho campo induce corrientes en el rotor con una frecuencia proporcional al deslizamiento  $s$ .

A su vez, las corrientes en el rotor originan un campo giratorio también directo, cuya expresión en un sistema de referencia rotórico se corresponde con  $s \cdot \Omega_s$ , siendo ésta la velocidad angular de sincronismo.

En una máquina sana que idealmente se considera como motor perfectamente simétrico, no existen campos de sentido de giro inverso.

En cambio, cuando existen fallos en el rotor, adicionalmente al campo directo, aparecen campos de sentido inverso  $-s \cdot \Omega_s$ , tal y como se muestra en la figura 14.

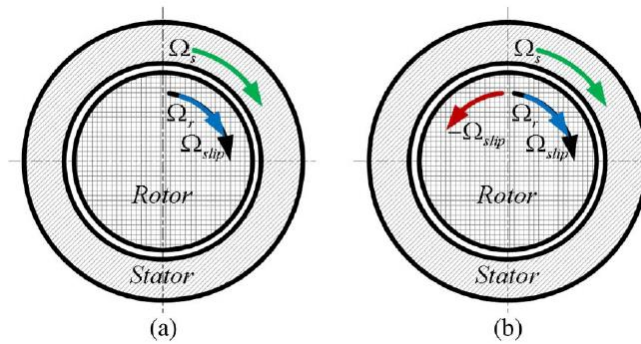


Fig. 19 Sentidos de giro de los campos magnéticos de rotor y estator para a) Máquina sana y b) Máquina con fallo en el rotor [15]

De esta forma, a este campo giratorio de sentido inverso se podría asociar una corriente también de secuencia inversa superpuesta a la corriente en el rotor.

Por tanto, aparece una componente de avería en el campo magnético que se puede expresar en el sistema de referencia estático de la forma:

$$\Omega_{fallo} = \Omega_r - s\Omega_s = \Omega_s(1 - 2s) \tag{ec. 3.10}$$

La expresión anterior nos lleva a la componente de fallo que aparece en el flujo radial de dispersión (y también en el espectro de corrientes) conocida en la literatura como:

$$f_{fallo} = (1 - 2s)f \tag{ec. 3.11}$$

Debido a las corrientes (y campos) de sentido inverso, se originan unas oscilaciones en el par cuya frecuencia característica es  $2 \cdot s \cdot f$  que generan, a su vez, oscilaciones en la velocidad a dicha frecuencia, cuya amplitud depende de la asimetría del rotor, de la carga del motor y del momento de inercia total.

En la literatura al respecto se determina que dicha oscilación en la velocidad genera componentes en el flujo magnético en el entrehierro cuya expresión es  $(1 + 2s)f$ .

Por otra parte y haciendo uso de un modelo de permeancias magnéticas [15] se constata la presencia de un componente en el flujo axial de dispersión de valor  $s \cdot f$  cuya magnitud en el caso de máquina sana suele ser bastante bajo.

Dicha componente se amplifica en presencia de averías en el rotor, pero según la teoría aparece únicamente en caso de excentricidad dinámica, estando presente en ciertos motores debido a imperfecciones inherentes al proceso de fabricación.

Adicionalmente en presencia de variación de velocidad, aparece en el espectro del flujo axial una componente de valor  $3 \cdot s \cdot f$ . Diferentes estudios constatan que pequeñas variaciones en la velocidad producen grandes aumentos de la magnitud de ésta componente.



| COMPONENTE DE AVERÍA EN ROTURA DE BARRA | DIRECCIÓN MAYORITARIA DEL FLUJO | CARACTERÍSTICAS                                  |
|---|---------------------------------|--|
| $s \cdot f$                             | AXIAL                           | Puede ser influido por excentricidades dinámicas |
| $3 \cdot s \cdot f$                     | AXIAL                           | Rotura de barra                                  |
| $f \pm 2 \cdot s \cdot f$               | RADIAL                          | Armónicos laterales                              |

**Tabla 3: Componentes de rotura de barra en flujo de dispersión en análisis en régimen permanente**

### 3.3.1.2 COMPONENTES DE EXCENRICIDAD O DESALINEACIÓN

Tal y como se detalla en apartados anteriores, la excentricidad se caracteriza por la no uniformidad en la anchura del entrehierro a lo largo de toda su extensión.

La evolución del espectro de corrientes y del flujo de dispersión en una máquina con asimetría es similar pero no exactamente igual [9]

Algunas de las frecuencias presentes en el espectro del flujo magnético son iguales a las encontradas en el espectro de corrientes, pero no todas las frecuencias presentes en el flujo de magnético del entrehierro son capaces de inducir tensiones en el bobinado estático y éste es el motivo principal de la diferencia entre ambos espectros.

Por las dificultades inherentes y su naturaleza invasiva, no resulta práctica la medida de flujo de entrehierro, es por ello que en la bibliografía se recurre al análisis de las bandas laterales presentes en el flujo de dispersión que se corresponden con la siguiente expresión:

$$f_{exc} = f \cdot \left( 1 \pm m \cdot \left( \frac{1-s}{p} \right) \right)$$

(ec. 3.12)

Siendo  $m$  un entero,  $f$  la frecuencia de suministro y  $p$  el número de pares de polos de la máquina.

En la bibliografía, se observa que el espectro de corrientes es prácticamente igual en el caso del motor sano que cuando hay excentricidades puramente estáticas o puramente dinámicas [9] mientras que para las excentricidades dinámicas el espectro del flujo magnético sufre una variación importante con respecto al motor sano, siendo preferible su uso frente al análisis de corrientes para detectar este tipo de excentricidad.

En el caso de excentricidades mixtas (estáticas + dinámicas) ambos espectros suelen mostrar variaciones importantes con respecto al motor sano. Teniendo en cuenta que lo más

usual es encontrarse con éste tipo de excentricidades, resulta especialmente interesante para el uso del análisis del flujo de dispersión.

Adicionalmente, la presencia de desalineación entre el motor y la carga produce componentes frecuenciales proporcionales a la velocidad de rotación, pues la transmisión del par no es constante a lo largo de un giro completo del rotor. Por tanto, se prevé el aumento de las componentes previstas en la ec. 3.12.

### 3.3.1.3 COMPONENTES DE FALLO EN RODAMIENTOS

Para el caso del fallo en rodamientos, se constata en la bibliografía [10] la validez de las componentes utilizadas para el análisis de corrientes cuyas expresiones vienen dadas por:

Para fallos en la pista externa:

$$f_o = \frac{N_b}{2} \cdot f_r \cdot \left(1 - \frac{D_b}{D_p} \cdot \cos \beta\right)$$

(ec. 3.13)

Para fallos en la pista interna:

$$f_i = \frac{N_b}{2} \cdot f_r \cdot \left(1 + \frac{D_b}{D_p} \cdot \cos \beta\right)$$

(ec. 3.14)

Para fallos en los elementos rodantes:

$$f_B = \frac{D_p}{D_b} \cdot f_r \cdot \left(1 - \frac{D_b^2}{D_p^2} \cdot \cos^2 \beta\right)$$

(ec. 3.15)

Para fallos en la jaula:

$$f_c = \frac{1}{2} \cdot f_r \cdot \left(1 + \frac{D_b}{D_p} \cdot \cos \beta\right)$$

(ec. 3.16)



### 3.4 ANÁLISIS EN RÉGIMEN TRANSITORIO

Queda patente el potencial del análisis en régimen permanente del flujo de dispersión como método para diagnosticar cierto tipo de averías en motores de inducción.

No obstante, la medida en régimen permanente presenta una serie de inconvenientes, como son su aplicación bajo condiciones de velocidad o frecuencia de alimentación variables y la posible aparición de falsos positivos o falsos negativos.

En el análisis de corrientes existen una serie de factores que pueden propiciar ésta casuística. Varios de estos factores pueden ser extrapolados a los presentados en el análisis del flujo de dispersión en régimen permanente:

- Falsos positivos
  - Oscilaciones en el par de la carga
  - Existencia de conductos axiales de refrigeración
  - Problemas de anisotropía magnética

Un falso positivo es un diagnóstico de avería cuando realmente no tiene lugar originando como consecuencias la parada innecesaria de la máquina y su desmontaje, costes asociados a su transporte e inspección, pérdidas por la parada de producción, y mala reputación para el profesional que hace el diagnóstico.

El efecto causado por conductos de refrigeración en el rotor, así como la presencia de anisotropía en su núcleo, se ve reducido por la limitación de la penetración del flujo magnético en el paquete de chapa magnética durante el arranque, debido al efecto de rechazo de las corrientes parásitas de Foucault.

- Falsos negativos
  - Diagnóstico en condiciones de vacío o carga reducida (recordamos la dependencia del deslizamiento en las diferentes expresiones de frecuencias características de fallo)
  - Roturas en la jaula externa en rotores de doble jaula
  - Roturas de barra no adyacentes
  - Estimación errónea de la velocidad

Cuando no se diagnostica una avería las consecuencias son si caben más graves, pues se puede tener una parada intempestiva no planificada, con lo cual se compromete la seguridad de los usuarios. Nuevamente se pone en entredicho la capacidad del profesional que efectúa el diagnóstico.

Los inconvenientes hallados en el análisis de variables de funcionamiento en régimen permanente han propiciado la búsqueda de alternativas para la medida de dichas variables en régimen transitorio.

El análisis basado en el régimen transitorio aporta ciertas ventajas, por una parte las amplitudes de las componentes de fallo son generalmente mayores (debido a las mayores corrientes) y por otra, mediante este tipo de análisis se puede obtener información adicional no basada únicamente en la magnitud de ciertas frecuencias características. Por ejemplo, en aquellos fallos que presentan una naturaleza cuya magnitud es dependiente del deslizamiento  $s$  de la máquina y que por ello magnifican su detectabilidad durante el arranque ( $s \in [1, a]$ ,  $a \approx 0$ )[12].

En contrapartida, el análisis en régimen transitorio presenta el inconveniente de la necesidad de un análisis más complejo de la señal, esto es con métodos más elaborados (p.e. Transformada de Fourier de tiempo reducido (STFT), Transformada discreta de Wavelet, etc.).

Para llevar a cabo el análisis de la información obtenida mediante el análisis del flujo de dispersión durante el arranque, se va a hacer uso de la transformada de Wavelet discreta (en inglés DWT).

La DWT es una herramienta para el análisis funcional basada en el filtrado en bandas de la señal muestreada, de forma que se descompone en varias señales denominadas wavelet (una de aproximación  $a_n$  y  $n$  señales de detalle  $d_j$ ), de forma que para cada una de las anteriores se corresponde con una banda de frecuencias.

Cada señal wavelet refleja la evolución de los componentes frecuenciales de la señal original que se encuentran contenidos en la banda de frecuencia correspondiente.

Se establece un nivel de descomposición de la señal original, de forma que se divide en subseñales que aglutinan aquellas cuya frecuencia se encuentra contenida en su rango (banda).

El subíndice  $n$  marca dicho nivel de descomposición de la señal,  $f_s$  corresponde con la frecuencia de muestreo y  $d_j$  es la señal de detalle que contiene los componentes incluidos en su intervalo:

$$f(d_j) \in [f_s \cdot 2^{-(j+1)}, f_s \cdot 2^{-j}] \text{ Hz} \quad (\text{ec. 3.17})$$

La señal de aproximación  $a_n$  contiene los componentes de baja frecuencia contenidos en el intervalo:

$$f(a_n) \in [0, f_s \cdot 2^{-(n+1)}] \text{ Hz} \quad (\text{ec. 3.18})$$

De esta forma DWT lleva a cabo el proceso de filtrado que se muestra en la siguiente ilustración, y que tal y como se indica en [12] es un proceso no ideal debido al solapamiento entre las bandas de frecuencia adyacentes que origina cierta distorsión en las zonas cercanas al límite entre cada una de las bandas:

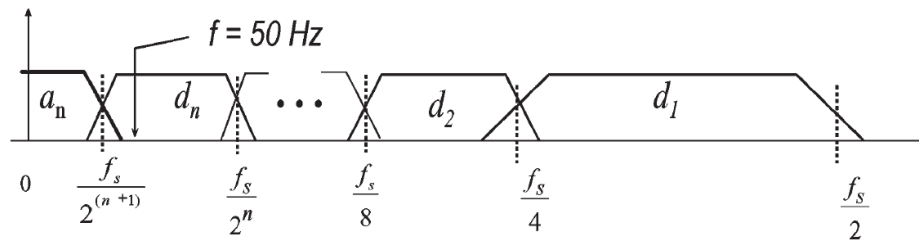
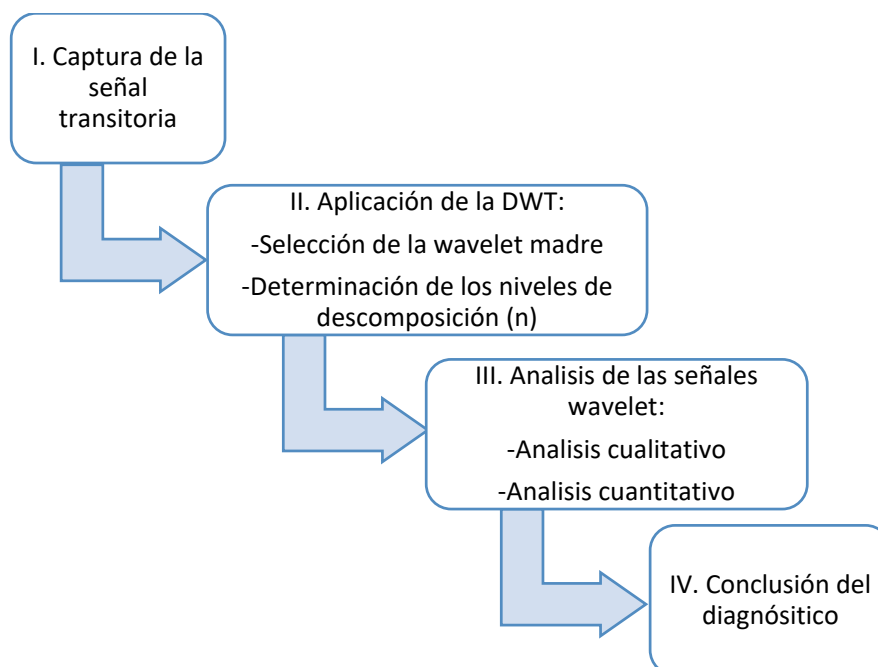


Fig. 20 Proceso de filtrado de la transformada DWT. [12]

Como se ha comentado anteriormente, la visualización de todas las señales DWT, pone de manifiesto la variación de aquellas magnitudes dependientes del deslizamiento ('slip-dependent components') que se ven magnificadas durante los cambios de régimen, no exclusivamente en arranques.

Por ejemplo el deslizamiento pasa de un valor cercano a  $s=2$  (velocidad del rotor cercana a la inversa de sincronismo) a un valor de  $s=1$  para el rotor parado durante un proceso de frenado con inversión de las fases en el estator.

A continuación se indica con detalle el método establecido para la aplicación de esta técnica, que se expresa claramente en el siguiente esquema:



## I. Captura de la señal transitoria

Se debe considerar que la frecuencia de muestreo  $f_s$  juega un papel importante, pues teniendo en cuenta el teorema de Nyquist ( $f_i \leq \frac{f_s}{2}$ ), no es necesaria una frecuencia de muestreo demasiado grande, ya que los componentes de fallo normalmente tienen lugar a bajas frecuencias.

Alrededor de 5 ksamples/s brindan suficiente resolución de muestreo, sin embargo frecuencias mayores pueden facilitar una mejor visualización de las componentes de alta frecuencia que pudieran resultar de interés.

Se debe tener en cuenta la naturaleza no lineal del filtrado llevado a cabo por las señales de wavelet, de forma que la frecuencia fundamental no debe quedar en la zona cercana al límite entre dos bandas adyacentes, por lo que se suelen utilizar múltiplos de alrededor de unos 40Hz, siendo recomendable la citada frecuencia de muestreo de 5 ksamples/s.

## II. Aplicación de la DWT

Existen diversos paquetes de software que contienen la herramienta de análisis necesaria para aplicar el método, no obstante MATLAB® permite hacer uso de esta herramienta denominada Wavelet Toolbox.

Hay dos pasos fundamentales, que se corresponden con la selección de la *Wavelet madre* y el establecimiento de los niveles de descomposición ( $n$ ):

- a) **Selección de la Wavelet madre:** Está relacionada con los coeficientes de los filtros utilizados en el proceso de filtrado inherente al método DWT. Existen variedad de ellas (Gaussiana, Mexican Hat, Meyer, etc.) y dependiendo del campo de investigación unas pueden propiciar mejores resultados que otras. Se ha demostrado que el tipo de wavelet madre influye en el filtrado más o menos ideal entre bandas de frecuencia adyacente. A este respecto, empíricamente, se han demostrado buenos resultados en esta aplicación cuando se utilizan wavelets madre de tipo dMeyer o Daubechies de alto orden.
- b) **Determinación del número de niveles de descomposición ( $n$ ):** El número de niveles de descomposición viene determinado por las componentes de baja frecuencia que se quieren representar. Cuanta menor sea la frecuencia de las componentes a visualizar, mayor debe ser el número de niveles de descomposición de DWT.

Normalmente para los componentes originados por asimetrías rotóricas y excentricidades, el número de niveles de descomposición debe ser igual o mayor al que permita que una de las bandas de detalle contenga la frecuencia fundamental, por ello se hace uso de la expresión:

$$n_f = \text{entero} \left[ \frac{\log(f_s/f)}{\log(2)} \right]$$

(ec. 3.16)

### III. Análisis de las señales wavelet

Una vez representadas las funciones en las diferentes bandas de DWT, se debe analizar la información obtenida, y para ello hay dos tipos de interpretación:

- a) **Análisis cualitativo:** Trata de observar patrones característicos de la evolución de los fallos cuya magnitud es dependiente del deslizamiento. En la literatura al respecto se caracteriza la evolución de algunas componentes de fallo, obteniendo gráficas de evolución teórica de las mismas.

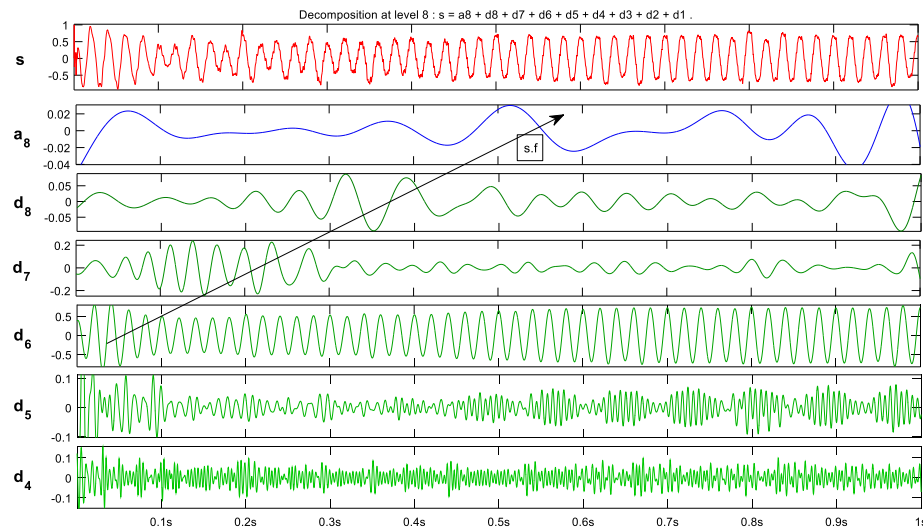


Fig. 21 Evolución de las señales DWT para una máquina con una barra rota

- b) **Análisis cuantitativo:** Una vez detectado un patrón de fallo en la máquina, el siguiente paso es caracterizar numéricamente el grado de avería presente. Para ello se propone el uso de un indicador empírico detallado entre otros en [5] [6]. Dicho indicador se basa en la energía de las señales wavelet, concretamente en la diferencia de energía que existe entre la señal wavelet en la banda donde presenta aumento de oscilaciones y la energía contenida para el mismo intervalo (intervalo donde se produce el aumento de la oscilación en la banda de detalle) de la onda total medida.

$$\gamma_{DWT}(dB) = 10 \cdot \log \left[ \frac{\sum_{j=Nb}^{Ns} EMF_j^2}{\sum_{j=Nb}^{Ns} [d_8(j)]^2} \right]$$

(ec. 3.19)

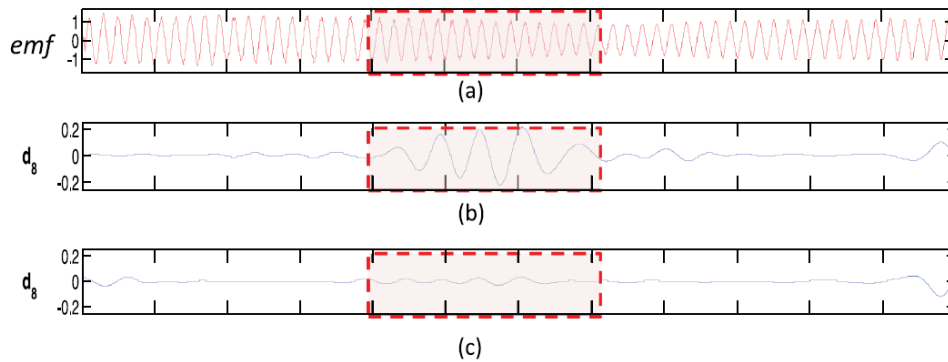


Fig. 22 Ejemplo señales wavelet: a) EMF total. b) Señal d8 para fallo en el rotor. c) Señal d8 para motor sano [5]

Debido a las perturbaciones que sufre la señal d8 en los extremos del transitorio, es decir en las zonas próximas al comienzo y final del análisis de la señal, se debe evitar el cálculo del indicador en dichas zonas.

Con ello se pretenden minimizar los efectos de concentración, es decir de reducción del coeficiente anterior por la consideración de únicamente valores altos de la perturbación. En los análisis llevados a cabo en este trabajo se seleccionará un intervalo fijo de comparación, establecido entre 1/6 y 5/6 del transitorio.

#### IV. Conclusión del diagnóstico

Una vez ejecutados los pasos anteriores, se dispone de la información necesaria para evaluar los diferentes indicadores de avería y expresar sus valores de forma normalizada frente a la componente fundamental.

Al tratarse de una técnica relativamente novedosa, con pocos estudios al respecto, todavía no se dispone de un criterio (nivel de severidad) para la evaluación de cada componente.

Por ello es parte del objetivo de este trabajo presentar los valores obtenidos para cada componente partiendo del conocimiento preciso del grado de avería en cada evaluación.



### 3.4.1 INDICADORES DE AVERÍA EN RÉGIMEN TRANSITORIO

Tal y como se ha expuesto en el apartado anterior, la potencia de éste tipo de análisis reside en la capacidad de identificar las evoluciones de aquellas componentes de naturaleza dependiente del deslizamiento.

Prestando atención a las diferentes expresiones para cada componente de avería, se puede representar la evolución teórica de cada una de ellas en un diagrama tiempo-frecuencia.

Como se observará más adelante, resulta crucial el conocimiento de la evolución prevista para las diferentes componentes cuya naturaleza es dependiente del deslizamiento.

Por ello, partiendo de los valores de deslizamiento para un arranque genérico se ha elaborado el siguiente gráfico para la interpretación de las componentes:

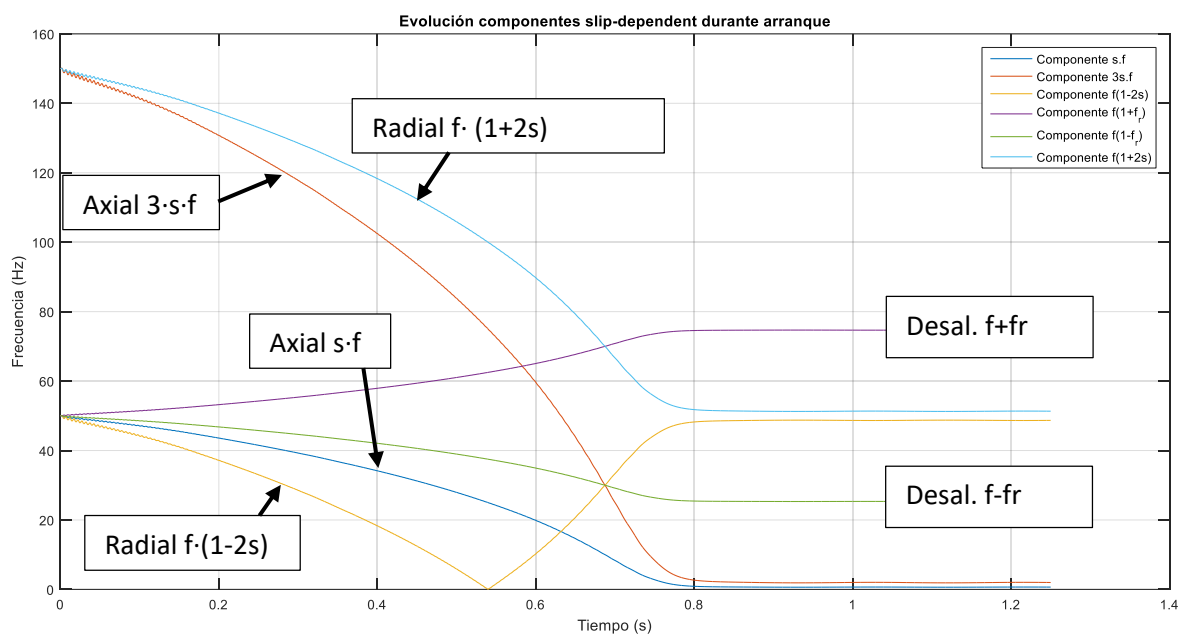


Fig. 23 Evolución teórica durante el arranque para las componentes de fallo de rotura de barra (flujo axial y radial) y excentricidad

En la captura del flujo de dispersión durante regímenes transitorios como el del arranque se puede registrar la evolución de las componentes del flujo que tienen una naturaleza dependiente del deslizamiento, ya sean relacionadas con la rotura de barras (en flujo axial como en radial) o bien con excentricidades y desalineaciones.

Concretamente, dichas componentes evolucionan de una forma característica durante el cambio del deslizamiento desde su valor  $s=1$  (conexión del motor) hasta un valor cercano a cero cuando se alcanza el régimen permanente, tal y como se observa en la figura 23.

Para realizar el análisis cualitativo de las señales de Wavelet, es también de suma importancia conocer los diferentes trazados de las diferentes componentes expresados en el sistema de bandas de frecuencia determinado por la DWT.

Por ello, en la figura siguiente se presenta de forma ilustrativa la superposición de las evoluciones de las componentes sobre las bandas de señales Wavelet de detalle para la descomposición DWT en 8 niveles, considerando una frecuencia de muestreo ( $f_s$ ) de 5 kHz:

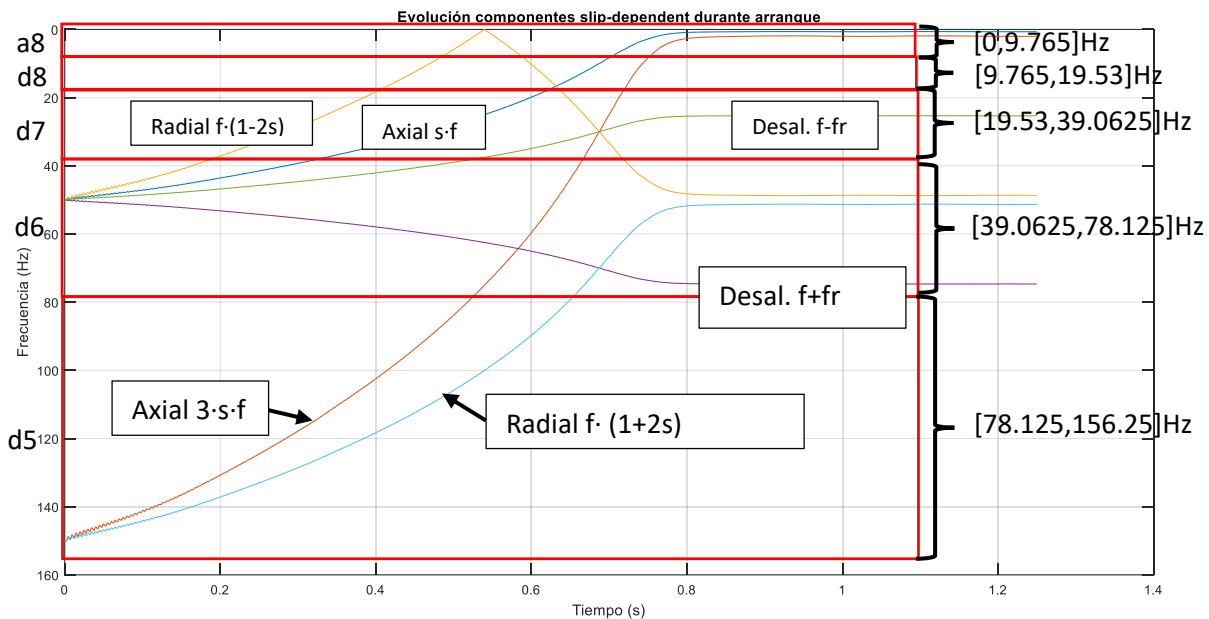


Fig. 24 Superposición de bandas de señales wavelet para una DWT de 8 niveles de descomposición y  $f_s=5\text{kHz}$ , sobre la evolución teórica de componentes de avería en el arranque.

La figura anterior muestra claramente la evolución y paso por las diferentes bandas de cada componente. La simulación se ha realizado con un arranque genérico, de forma que sirva de plantilla para el posterior análisis de cada ensayo realizado.

### 3.4.1.1 MÁQUINA SANA

En éste caso, solo se espera la presencia de la componente fundamental manteniendo su frecuencia constante durante la duración del transitorio. En un gráfico de tiempo-frecuencia como el mostrado en la figura 24 se correspondería con una evolución íntegramente incluida en la banda de detalle d6, banda que contiene la frecuencia fundamental de 50Hz.

Adicionalmente hay ciertos armónicos que pueden aparecer, como son los armónicos de ranura. Estos armónicos presentan dos familias diferentes: una familia *inversa*, cuyas frecuencias decrecen a cero para luego ascender hasta alcanzar sus valores de frecuencia finales en régimen permanente y otra *directa*, cuyas frecuencias crecen desde la frecuencia inicial (fundamental) hasta la correspondiente frecuencia final en permanente. En cualquier caso, estas evoluciones suelen ser mucho menos apreciable que la de las componentes de fallo, sobre todo debido a su reducida amplitud en los instantes iniciales del arranque.

### 3.4.1.2 COMPONENTES DE ROTURA DE BARRA

Con relación a este tipo de armónicos existen dos grupos, los relacionados con el flujo axial y con el flujo radial.

- Componente axial  $s \cdot f$ : Su evolución parte de los 50 Hz cuando el valor del deslizamiento es igual a la unidad hasta un valor prácticamente nulo cuando la máquina alcanza el régimen permanente ( $s \approx 0$ ).
- Componente axial  $3 \cdot s \cdot f$ : Sigue una evolución análoga a la anterior, pero partiendo de los 150 Hz cuando el valor del deslizamiento es igual a la unidad hasta un valor prácticamente nulo cuando la máquina alcanza el régimen permanente ( $s \approx 0$ ).
- Componente radial  $f \cdot (1 - 2 \cdot s)$ : Esta componente presenta dos zonas claramente visibles en su evolución, en primer lugar presenta un tramo de bajada hasta alcanzar el valor de cero (obviamente cuando el deslizamiento  $s=0,5$ ) para posteriormente llegar a valores cercanos a la frecuencia de suministro cuando el deslizamiento toma valores cercanos a cero. Su patrón en forma de V es similar al seguido por el armónico lateral inferior en el análisis de corrientes en régimen transitorio.

### 3.4.1.3 COMPONENTES DE EXCENTRICIDADES MIXTAS O DESALINEACIÓN

Se habla de la presencia de la combinación de ambos tipos de excentricidad o bien de desalineación debido a que hay estudios que constatan que la presencia de desalineación aumenta las amplitudes de los componentes en  $f \pm f_r$  en el espectro de corrientes, siendo  $f_r$  la frecuencia del rotor, mientras que por otra parte, dichas componentes pueden ser también amplificadas por la presencia de excentricidades mixtas.

- Componente de excentricidad  $f_{exc} = f \cdot (1 \pm m \cdot \frac{1-s}{p})$ : En la bibliografía al respecto [14], se considera dicha expresión para la componente de excentricidad, siendo  $m$  un entero y  $p$  el número de pares de polos de la máquina.

Dicha expresión, también se corresponde con las de las componentes debidas al desalineamiento que podríamos denominar como  $f_{desal}(+)$  y  $f_{desal}(-)$  para los valores de  $m=1$  y signo positivo y negativo en la expresión previa, respectivamente. Si se considera por ejemplo la componente negativa ( $f_{desal}(-)$ ) para el caso de  $p=2$  se tendrá una evolución como la mostrada en la figura 24, donde termina con un valor cercano a los 25 Hz. Por su parte, la componente de signo positivo ( $f_{desal}(+)$ ) para el caso considerado terminaría alcanzando una frecuencia cercana a los 75 Hz.

Cabe mencionar que existen trabajos en la literatura al respecto que revelan que si en una máquina coexisten fallos en el rotor y excentricidades, el análisis en régimen transitorio tiene, en general, problemas para detectar excentricidades o desalineación debido a la preponderancia de la evolución de componentes de fallo en el rotor en el espectro tiempo-frecuencia.

## 4 ENSAYOS EXPERIMENTALES

### 4.1 BANCADA

La bancada utilizada para los ensayos experimentales que se realizaron para evaluar la aplicabilidad de la técnica basada en análisis del flujo para la detección de diversos fallos, consistía en un motor de inducción de 1,1 kW y 4 polos que arrastraba una máquina de corriente continua actuando como generador (ver figura 25).

Esta máquina de corriente continua alimentaba un banco de resistencias habilitado con el fin de disipar la potencia generada. Variando la corriente de excitación de esta máquina de corriente continua se conseguía la operación del motor a los diferentes niveles de carga ensayados (desde vacío hasta carga nominal).

La fijación de mayores niveles de carga permitía la operación del motor con un mayor deslizamiento pudiéndose, de esta manera, distinguir mejor los armónicos laterales en el espectro de Fourier de la señal en régimen permanente.

Además, mayores niveles de carga permitían arranques más largos y, con ello, una mejor visualización de los patrones resultantes del análisis DWT.

Con tal de mejorar la mayor parte de factores para obtener una medición de calidad, era conveniente limitar las vibraciones mecánicas externas al motor, por ende se fijó la envolvente del motor a un bastidor de acero.

Para limitar las vibraciones mecánicas transmitidas entre el motor ensayado y la carga, se proveía de un acople con unión elástica.

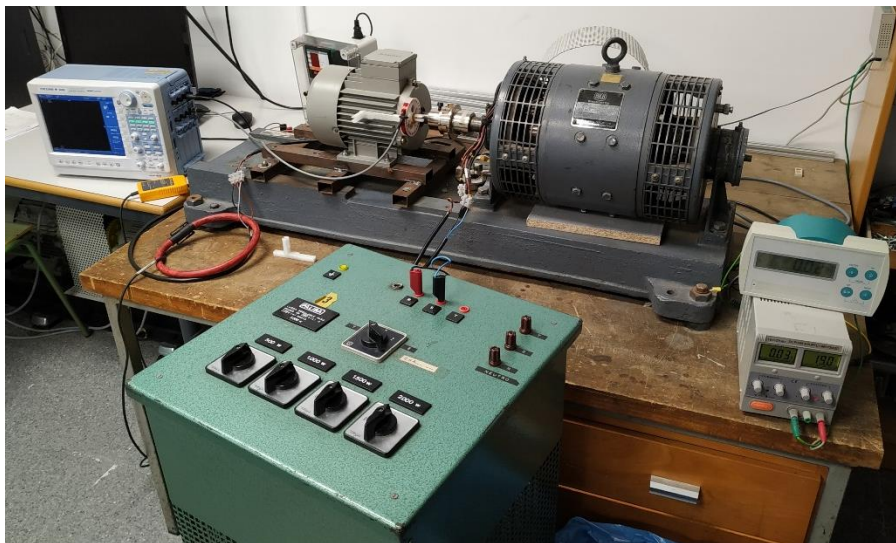


Fig. 25 Imagen del montaje en laboratorio

En la Figura 25, de izquierda a derecha, se observa un osciloscopio mediante el cual se registra la señal de fuerza electromotriz inducida en la sonda de flujo, así como la señal de corriente de una de las fases de alimentación del motor (que se registró a efectos comparativos).

A continuación, se encuentra el motor asíncrono unido al generador de corriente continua cuyas características se detallarán a continuación.

A la derecha de la imagen se encuentra un medidor de par sobre la fuente de tensión de la cual se alimenta. En la parte inferior se puede observar el banco de resistencias que actúa como consumo de la potencia transmitida por el eje.

## 4.2 MOTOR ENSAYADO Y CARGA ARRASTRADA

El motor utilizado para los diferentes ensayos fue un motor de inducción del fabricante SIEMENS, cuyas características de pueden leer de su placa de características a continuación mostrada, y se corresponden (a 50Hz) con:

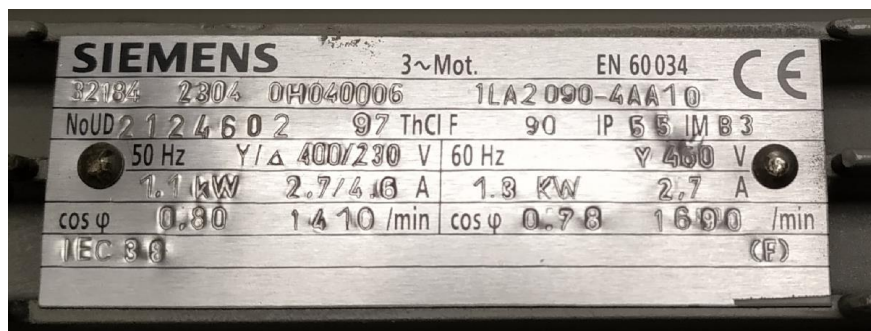


Fig. 26 Placa de características del motor ensayado.

- Tensión nominal (estrella): 400 V
- Corriente nominal (estrella): 2,7 A
- Frecuencia nominal: 50 Hz
- Velocidad nominal: 1410 r.p.m.
- Potencia nominal: 1,1 kW
- Pares de polos:  $p=2$
- Nº Barras del rotor: 28
- Nº Ranuras estator: 36

Para simular la avería de rotura de barra, se utilizaron rotores en los que previamente se habían practicado agujeros en la unión entre la barra o barras seleccionadas y el anillo de cortocircuito. Tal y como se ha detallado con anterioridad, las uniones entre barras y anillos de cortocircuitos suelen ser las zonas más propensas para el inicio de grietas y consiguientes roturas en motores industriales.



Fig. 27 Imagen de rotor con avería forzada. Rotura de dos barras no adyacentes

Por otro lado, para simular la desalineación se colocaron calzas bajo dos de los cuatro puntos de anclaje del motor a la bancada, obteniendo así un ángulo entre ejes.

Como se ha comentado, con objeto de aplicar cierto nivel de carga de forma que se aumentara el nivel de corriente consumida, así como de flujo de dispersión se utilizó un generador de corriente continua de las características que se detallan a continuación.



Fig. 28 Placa de características de la carga arrastrada

- Tensión nominal 220 V
- Potencia nominal 3 kW
- Corriente nominal de excitación: 0,4 A
- Corriente nominal de inducido: 13,6 A
- Número de pares de polos: 1

### 4.3 OSCILOSCOPIO Y SONDAS

Para realizar las medidas se ha hecho uso de una sonda experimental elaborada en laboratorio, consistente en una bobina de geometría plana con 1000 espiras, fijada en el exterior del motor, según las posiciones detalladas en las ilustraciones.

En el anexo se detalla el diseño, pruebas y selección de diferentes sondas, cuyas características constructivas así como geométricas se fueron variando hasta obtener la suficiente resolución en magnitud (además de la resolución en frecuencia que se ha comentado en apartados anteriores).

Las dimensiones de la sonda finalmente utilizada se especifican en el detalle:

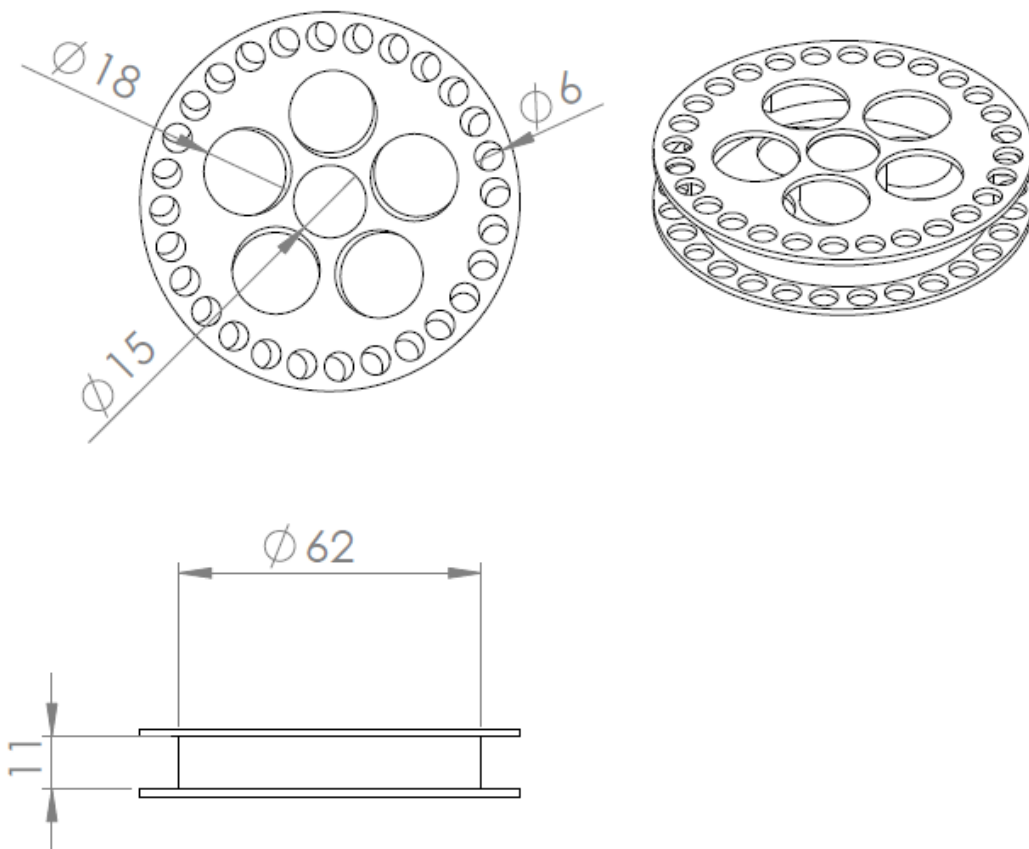


Fig. 29 Geometría de la envoltura de la sonda. Cotas en mm

- Diámetro interior (bobinado) = 62mm
- Diámetro exterior (bobinado) = 74mm
- Anchura (bobinado) = 11mm
- Número de espiras = 1000
- Sección de hilo de cobre = 0,2mm
- Clase térmica del aislamiento = H (180°C)
- Tipo de conector = BNC

Para capturar los flujos de dispersión en cada dirección preferente se colocó la sonda en diferentes posiciones, las cuales se detallan en la figura 30.

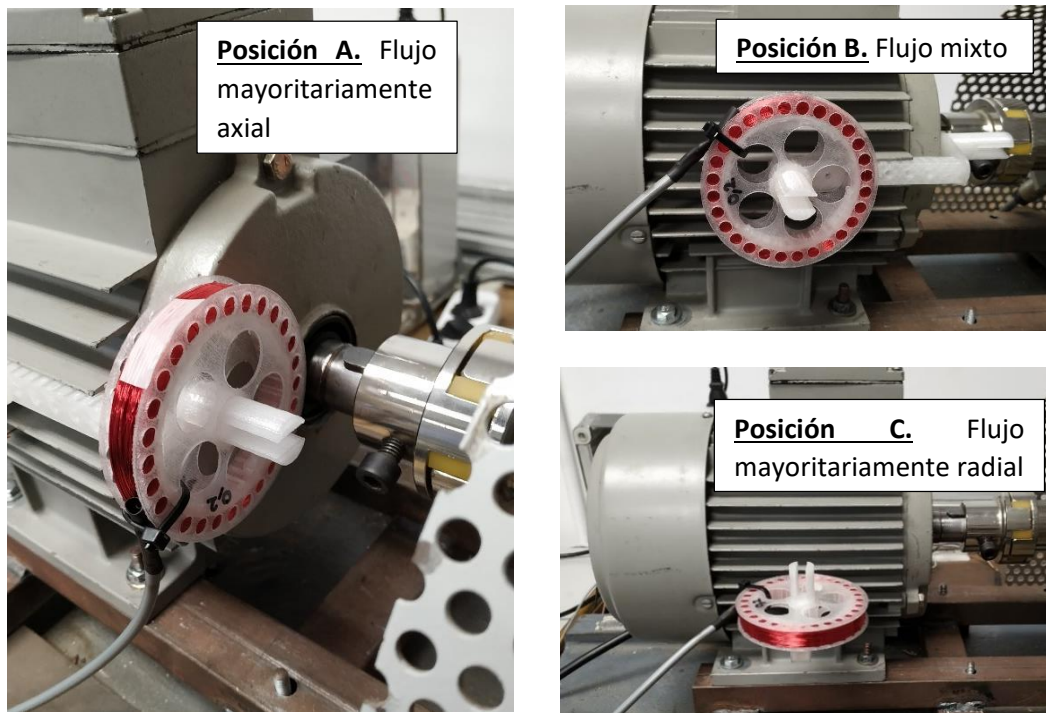


Fig. 30 Posiciones de medida de la sonda

Se realizaron diferentes ensayos con diferentes averías así como severidades de las mismas para poder evaluar la validez del método (tanto en permanente como en transitorio). Concretamente se han considerado los siguientes casos:

- Máquina sana, (con excentricidad y desalineación inherentes)
- Rotor con 1 barra rota
- Rotor con 2 barras adyacentes rotas
- Rotor con 9 barras adyacentes rotas
- Desalineación con la carga

En cada medida, se capturó la FEM inducida en bornes de la sonda, con ayuda de un registrador de señal tanto en régimen transitorio (arranque) como en régimen permanente.

Se utilizó una frecuencia de muestreo de 5kHz. Posteriormente, se llevó la señal registrada a un PC donde se aplicó el conveniente procesado y análisis de la señal mediante el procedimiento detallado con anterioridad para cada régimen.





## 4.4 METODOLOGÍA DE ENSAYOS

En el momento de establecer un procedimiento de ensayo se consideraron los siguientes condicionantes:

- Repetitividad
- Simplicidad
- Robustez
- Precisión
- Tiempo de ejecución

De esta forma, se optó por realizar una primera sesión de medidas a modo de evaluación de las posibles mejoras, encontrando ciertos matices a mejorar.

Las deficiencias encontradas fueron:

- D1. Dificultad para estabilizar la carga (generador DC unido a banco de resistencias).
- D2. Elevado tiempo empleado en desmontar el motor ensayado de la bancada, para hacer cambio de rotor y/o rodamientos frente a la simplicidad del cambio de la sonda entre sus tres puntos de medida.
- D3. Ruido excesivo en la sonda de flujo en las primeras capturas.
- D4. Punto de anclaje de la carga no fijo, lo cual originaba un impacto en el arranque.
- D5. Necesidad de parar el motor para cada posición de la sonda.
- D6. Necesidad de disponer de utillaje para la sujeción de la sonda.

Una vez enumeradas las deficiencias observadas, se decidió aplicar una serie de medidas correctivas:

- C1. Revisar el estado y colocación de los aparatos para controlar el nivel de carga, que en este caso eran: voltímetro para medir la excitación de la máquina de corriente continua, transductor de par, tacómetro óptico.
- C2. Agrupar todas las posiciones de la sonda, así como los dos regímenes de medida para cada tipo de avería simulada.
- C3. Elaborar una segunda sonda para contrastar el origen del ruido de medida.
- C4. Modificar el tipo de anclaje para limitar el impacto durante el arranque.
- C5. Solución aportada en la medida correctiva C2.
- C6. Elaboración de modelo en software 3D de utillaje en material no magnético para evitar la alteración de la medida. Se escogió impresión por adición en poliácido

lástico (PLA). Su fijación se basa en la interferencia geométrica con los huecos de uno de los canales de ventilación (entre dos aletas de la envolvente).

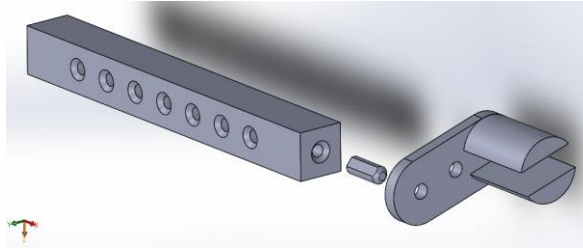


Fig. 31 Modelo 3D útil soporte sonda POS A

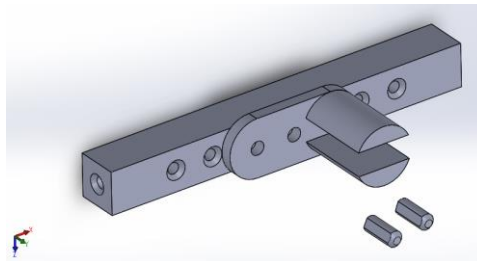


Fig. 32 Modelo 3D útil soporte sonda POS B

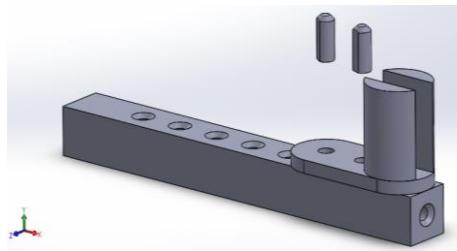


Fig. 33 Modelo 3D útil soporte sonda POS C

En base a lo anterior, se decidió establecer la siguiente metodología de ensayos:

- 1º Colocación de la sonda en la posición "X".
- 2º Medida durante el transitorio de arranque.
- 3º Medida durante el régimen permanente sin parar el motor.
- 4º Parada del motor y cambio de posición de la sonda.
- 5º Repetir hasta medir en cada una de las tres posiciones (total de 6 medidas).
- 6º Desmontar el motor y hacer el cambio de rotor/de rodamiento/desalineación en la bancada.
- 7º Repetir la secuencia de ensayos.

Los ensayos se planificaron según la secuencia previa, la cual se tradujo a las plantillas con el formato que se expresa a continuación. Se detallan los parámetros controlados para cada tipo de avería y régimen de los ensayos realizados:

**SETTINGS OSCILOSCOPIO**

|    | MAGNITUD         | RESOLUCIÓN |
|----|------------------|------------|
| C1 | corriente fase 1 | 500mV/div  |
| C2 | corriente fase 2 | 500mV/div  |
| C3 | corriente fase 3 | 500mV/div  |
| C4 | sonda flujo      | 100mV/div  |

| FRECUENCIA DE MUESTREO |  |
|------------------------|--|
| 5ks/s                  |  |

| RESOLUCIÓN EJE X |        |
|------------------|--------|
| TRANSITORIO      | 1s/div |
| PERMANENTE       | 6s/div |

**SETTINGS CARGA**

| PLENA CARGA                                     | OBJETIVO | MEDIDA |         |
|---|----------|--------|---------|
| TENSIÓN EXCITACIÓN                              | 185      |        | [V]     |
| PAR MECÁNICO                                    | 8        |        | [Nm]    |
| VELOCIDAD ROTOR                                 | 1410     |        | [r.p.m] |
| POSICIÓN SELECTORES BANCO RESISTENCIAS: 1,1,1,T |          |        |         |

| VACÍO           | OBJETIVO | MEDIDA |         |
|-----------------|----------|--------|---------|
| VELOCIDAD ROTOR | 1490     |        | [r.p.m] |

**Tabla 4: Plantilla de planificación de ensayos**

## 5 RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 5.1 MOTOR SANO

A continuación, se va a analizar el flujo de dispersión en diferentes regímenes y direcciones. Con ello se pretende establecer una valoración de la magnitud de las diferentes componentes armónicas, así como de su evolución, con el objetivo de poder comparar más adelante los diferentes tipos y grados de avería forzados.

#### 5.1.1 ANÁLISIS EN RÉGIMEN PERMANENTE. MOTOR SANO

Las medidas se realizan con los siguientes parámetros:

| <b>SETTINGS CARGA</b>                           |          |        |         |
|---|----------|--------|---------|
| PLENA CARGA                                     | OBJETIVO | MEDIDA |         |
| TENSIÓN EXCITACIÓN                              | 185      | 195    | [V]     |
| PAR MECÁNICO                                    | 8        | 8.56   | [N·m]   |
| VELOCIDAD ROTOR                                 | 1410     | 1410   | [r.p.m] |
| POSICIÓN SELECTORES BANCO RESISTENCIAS: 1,1,1,T |          |        |         |

**Tabla 5: Configuración para medida en régimen permanente**

Para lograr una medida de motor sano sin interferencias se tuvieron que realizar diversas medidas, con comprobación y posterior reajuste de la alineación con la carga.

Habitualmente existe cierto nivel de desalineación entre el motor y la carga arrastrada, así como cierto nivel de excentricidad.

No obstante, uno de los objetivos del presente trabajo es el de establecer niveles de severidad (por otra parte, todavía no consensuados en la literatura). Por ello se requiere la caracterización de los diferentes componentes de avería, lo que implica su comparación con un nivel lo más cercano posible al de funcionamiento perfecto.

En la aplicación del método en un mantenimiento real, no es necesario éste nivel de calibración, pues se prevé una monitorización continuada de las diferentes componentes, a fin de detectar el inicio de la avería.

### 5.1.1.1 FLUJO AXIAL. RÉGIMEN PERMANENTE. MOTOR SANO

Para medir el flujo axial se colocó la sonda en la posición A, con el nivel de carga para este grupo de ensayos. El espectro obtenido es el de la figura 34.

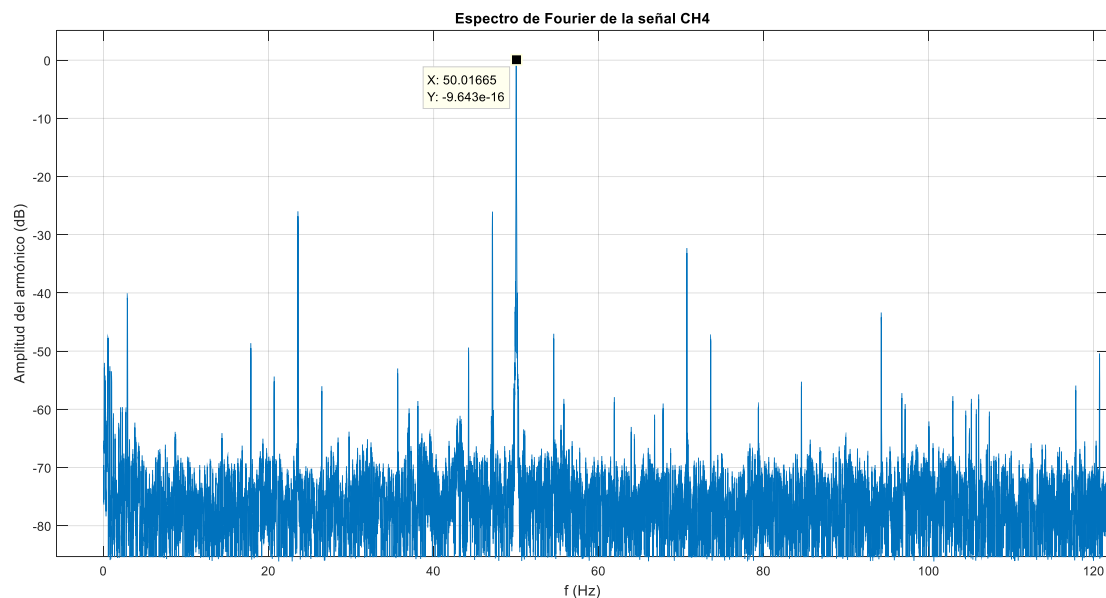


Fig. 34 Espectro de Fourier para máquina sana. Sonda en posición A. Flujo axial.

El primer paso a seguir, consiste en la localización de la frecuencia fundamental. Para las componentes de avería estudiadas se considera el espectro hasta los 100Hz, banda de frecuencias que contiene a las componentes anteriormente detalladas.

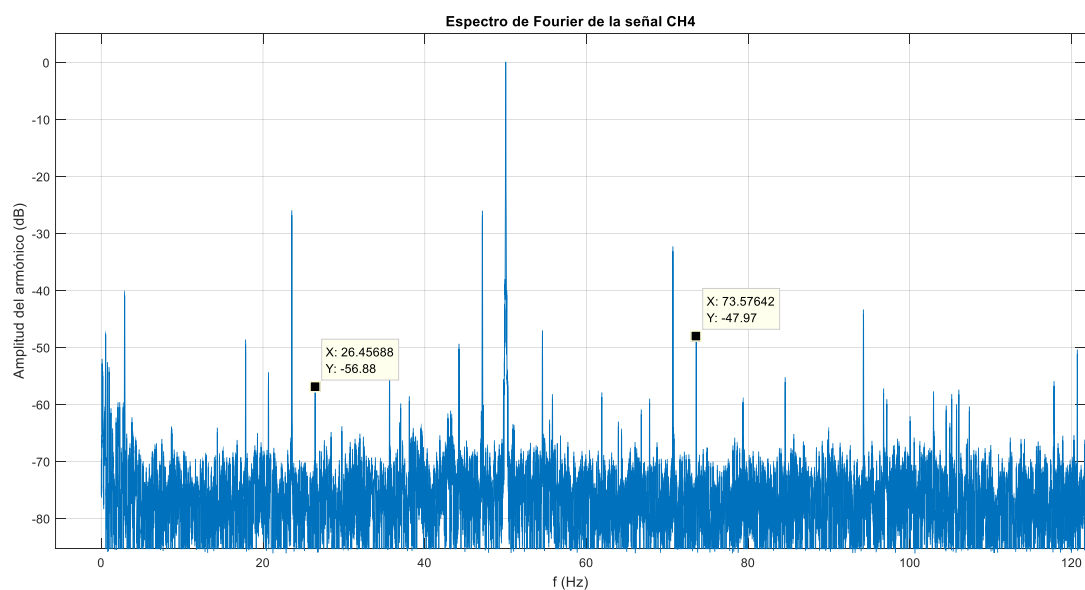


Fig. 35 Detalle de las componentes de desalineación. Sonda en posición A. Flujo axial

**Análisis de la excentricidad/desalineación:** Para establecer el nivel de deslizamiento exacto, se parte del conocimiento del nivel de carga que, para la velocidad medida en el rotor, debe ser aproximadamente  $s=0,06$ .

Se comprueba su valor exacto mediante la identificación de las componentes de excentricidad, que para un motor de  $p=2$  pares de polos se encuentran entorno a los 25 y 75Hz respectivamente. Mediante iteraciones se obtiene un nivel de deslizamiento  $s=0,05792$ .

Se elabora una hoja de cálculo mediante la cual se generan los valores frecuenciales de cada componente para cada valor de deslizamiento y frecuencia fundamental. Para ello se hace uso de la herramienta Solver del paquete Excel®.

Resulta conveniente crear un 'Text Update Function' dentro de la opción gráfica de MATLAB®, función que permite aumentar el número de decimales, a fin de caracterizar correctamente la amplitud de cada componente.

Atendiendo a dichas componentes, se observa cierto nivel elevado de la amplitud para la componente  $f \cdot f_r$ , lo cual es síntoma de la presencia de cierto nivel de desalineación entre motor y carga.

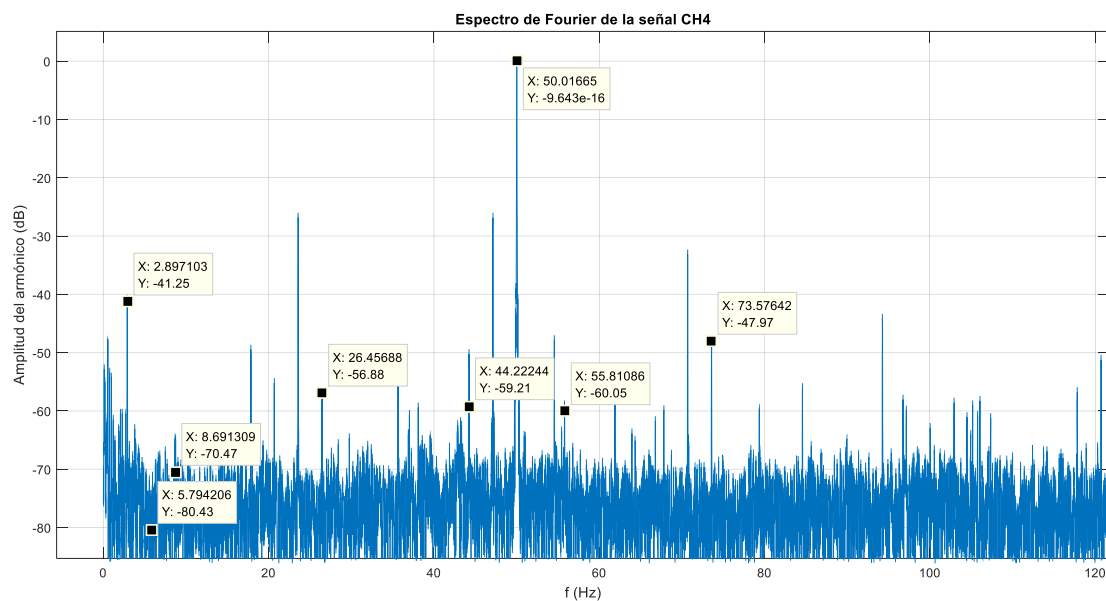


Fig. 36 Detalle de los componentes de fallo en el rotor. Sonda en posición A. Flujo axial

**Análisis del estado del rotor:** Se comprueba la presencia de las componentes previstas por la teoría, detalladas en el apartado correspondiente. Se remarca la amplificación de la componente  $s \cdot f$ , lo cual hace sospechar que la componente de desalineación/excentricidad anteriormente mostrada, tenga naturaleza de excentricidad dinámica en el rotor. Por lo general, y como se espera, el nivel del resto de componentes es relativamente bajo.

### 5.1.1.2 FLUJO MIXTO. RÉGIMEN PERMANENTE. MOTOR SANO

Para el mismo nivel de carga, pero en la posición de medida B, se capta el flujo radial y parte del flujo axial. Se obtiene el siguiente espectro:

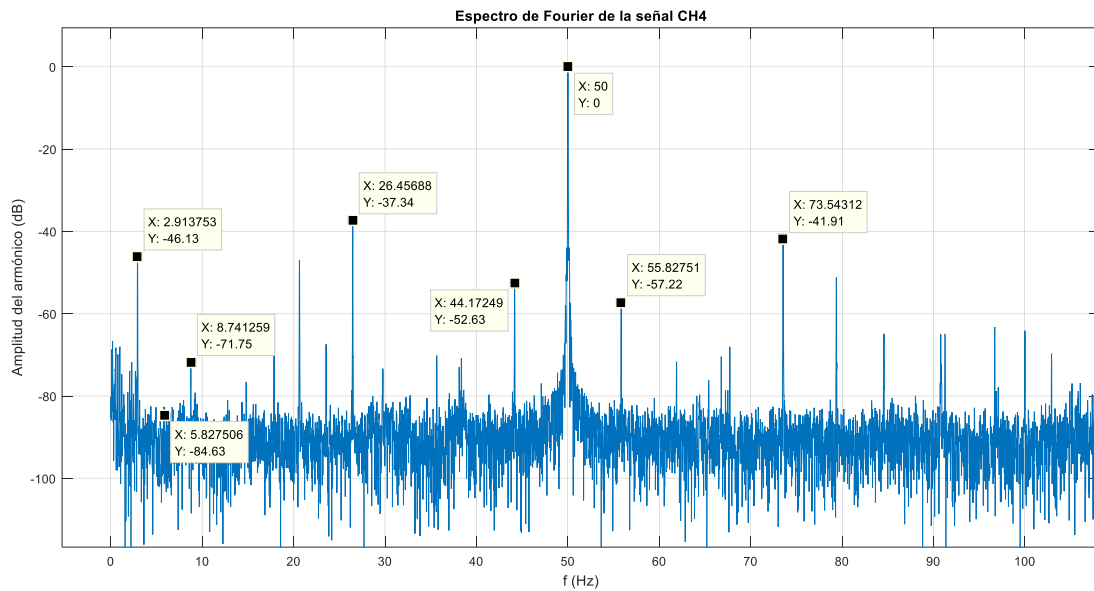


Fig. 37 Espectro de Fourier para máquina sana. Sonda en posición B. Flujo mixto.

Se comprueba cierto nivel de desalineación/excentricidad mediante las componentes  $f \pm f_r$  (26,37Hz y 73,63Hz). El deslizamiento para este ensayo es de  $s=0,05827$ .

### 5.1.1.3 FLUJO RADIAL. RÉGIMEN PERMANENTE. MOTOR SANO

Para captar el flujo mayoritariamente radial, se coloca la sonda en la Posición C. Se sigue el mismo procedimiento de caracterización del deslizamiento y las componentes frecuenciales. Se estima un deslizamiento de valor  $s=0,05659$ .

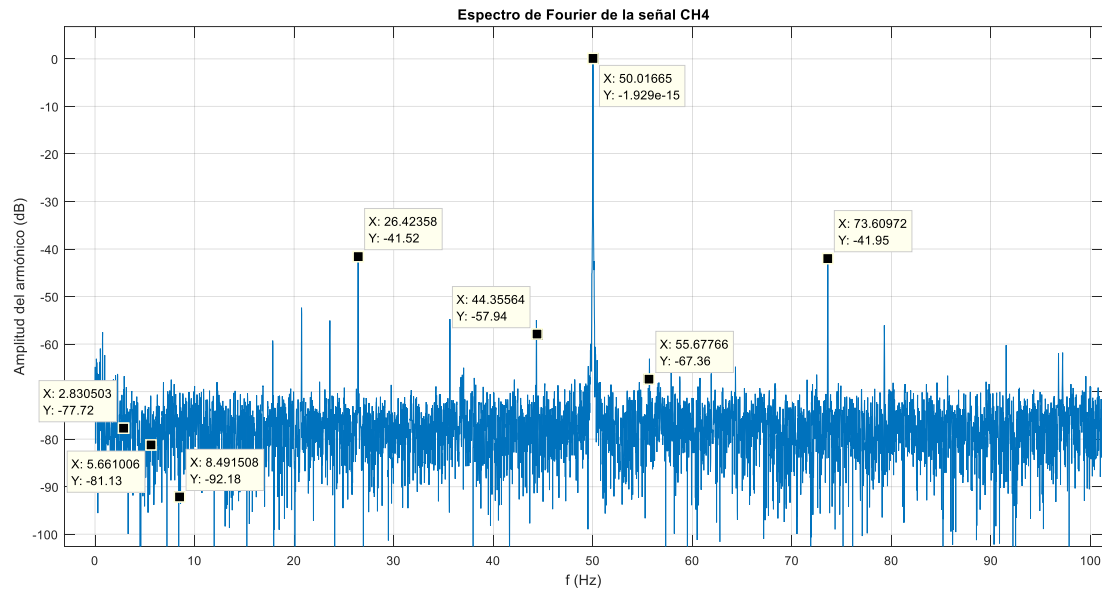


Fig. 38 Espectro de Fourier para máquina sana. Sonda en posición C. Flujo radial

De nuevo se observan niveles destacables para las componentes  $f-f_r$  y  $f+f_r$ , siendo el resto relativamente bajas. Se refuerza la posibilidad de presencia de desalineación entre motor y carga.



### 5.1.2 ANÁLISIS EN RÉGIMEN TRANSITORIO. MOTOR SANO

Siguiendo la metodología de aplicación de la transformada discreta de Wavelet (DWT), se utilizan 8 niveles de descomposición ( $n=8$ ), de forma que la frecuencia fundamental (50Hz) queda siempre contenida en una zona centrada de una banda de frecuencias. Se realizan todas las medidas con frecuencia de red y  $f_s=5\text{kHz}$ :

$$n_f = \text{entero} \left[ \frac{\log(f_s/f)}{\log(2)} \right] = \text{entero} \left[ \frac{\log(5000/50)}{\log(2)} \right] = 6$$

(ec. 5.1)

Quedando los siguientes intervalos de descomposición:

$$f(d_1) \in [f_s \cdot 2^{-(j+1)}, f_s \cdot 2^{-j}] = [5000 \cdot 2^{-(1+1)}, 5000 \cdot 2^{-1}] = [1250, 2500] \text{ Hz}$$

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

$$f(d_3) \in [321.5, 625] \text{ Hz}$$

$$f(d_4) \in [156.25, 321.5] \text{ Hz}$$

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

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

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

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

$$f(a_n) \in [0, f_s \cdot 2^{-(n+1)}] = [0, 9.765] \text{ Hz}$$

### 5.1.2.1 FLUJO AXIAL. RÉGIMEN TRANSITORIO. MOTOR SANO

Se evalúa para la posición A de la sonda, en un transitorio de arranque en carga, con las condiciones detalladas en apartados anteriores. Se obtiene la siguiente forma de onda para la señal de fuerza electromotriz inducida (figura 39):

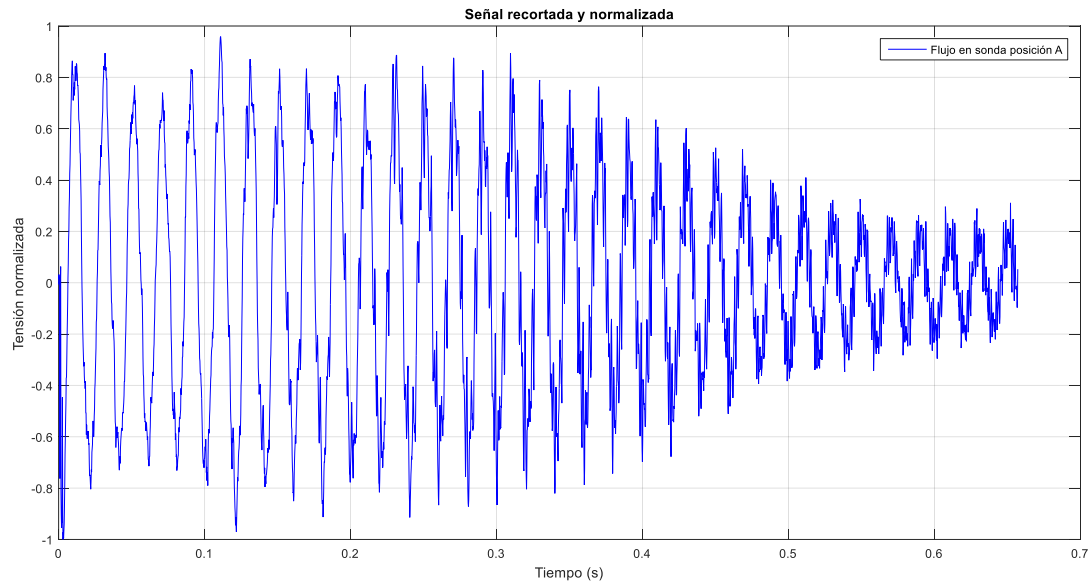


Fig. 39 Evolución del flujo de dispersión axial durante el arranque. Motor sano. Sonda en posición A.

Tras realizar el análisis de las señales de aproximación y de detalle para un arranque en carga con la sonda en posición A, se obtiene la siguiente descomposición.

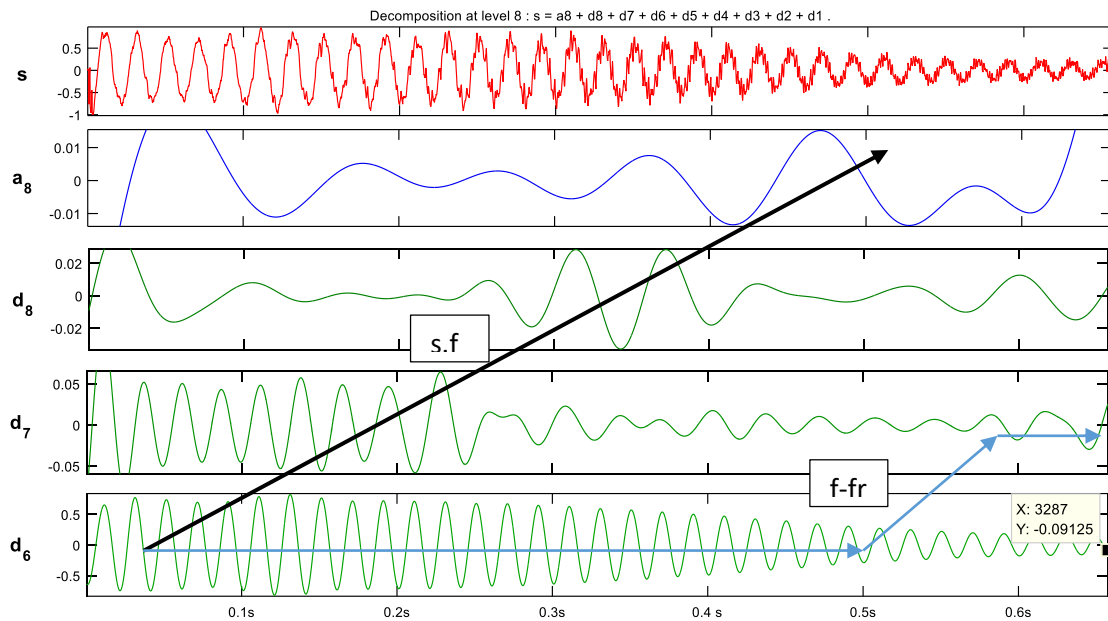


Fig. 40 Señales de descomposición DWT. Arranque en motor sano. Sonda en posición A. Flujo axial

De nuevo se observa la presencia de la componente  $s \cdot f$ , lo cual hace sospechar que la componente de desalineación/excentricidad tenga naturaleza de excentricidad dinámica en el rotor.

Se percibe levemente la presencia de la componente  $f - f_r$ , lo cual refuerza la posibilidad de existencia de desalineación/excentricidad inherentes.

Realizando el análisis cuantitativo para el intervalo [1/6,5/6] del arranque se obtiene un indicador energético de:

$$\gamma_{DWT}(dB) = 10 \cdot \log \left[ \frac{\sum_{j=Nb}^{Ns} EMF_j^2}{\sum_{j=Nb}^{Ns} [d_8(j)]^2} \right] = 29.87 \text{ dB} \quad (\text{ec. 5.2})$$

Dicha magnitud se registra para posteriormente establecer un nivel de severidad. Conviene remarcar la presencia de excentricidad y desalineación inherentes al estado de máquina y acoplamiento sanos.

### 5.1.2.2 FLUJO MIXTO. RÉGIMEN TRANSITORIO. MOTOR SANO

En la posición B se obtiene la siguiente forma de onda de la señal de f.e.m. (figura 41). Su forma característica es fruto de la interacción entre ambos flujos, axial y radial, teniendo una primera zona de amplitud superior seguida de una reducción en la amplitud, para posteriormente alcanzar el valor en régimen permanente.

A diferencia de los flujos axial y radial, la amplitud inicial en el arranque no presenta valores tan altos con respecto al régimen permanente.

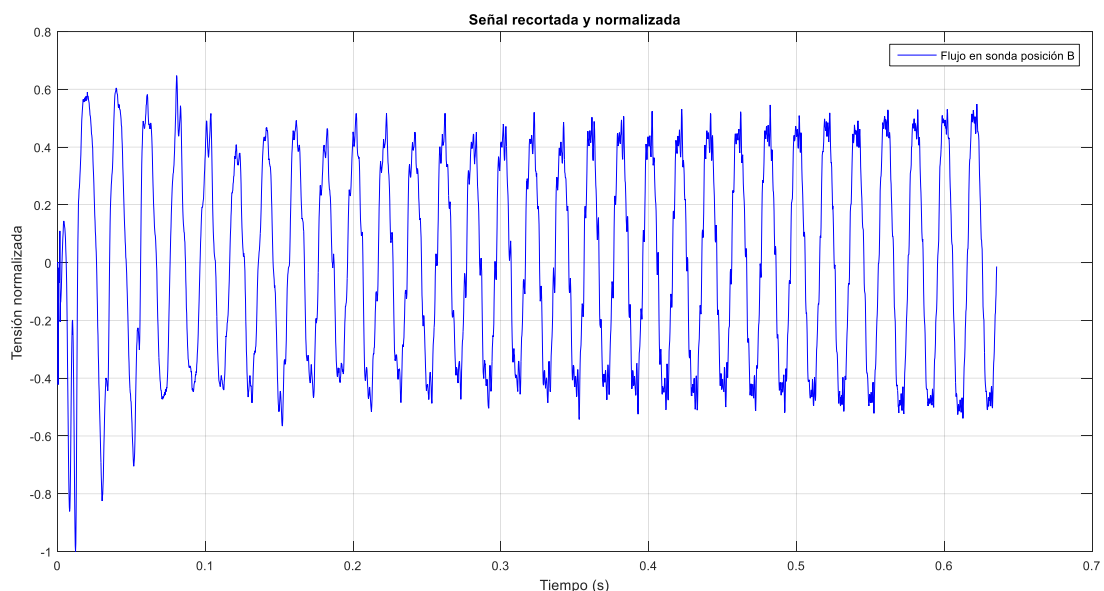


Fig. 41 Evolución del flujo de dispersión mixto durante el arranque. Motor sano. Sonda en posición B.

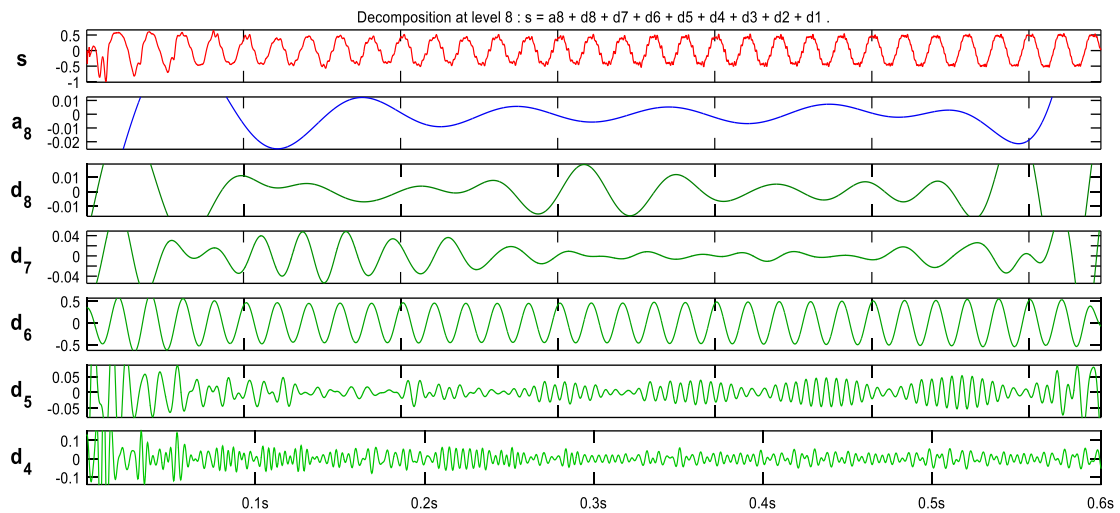


Fig. 42 Señales de descomposición DWT. Arranque en motor sano. Sonda en posición B. Flujo mixto

Se observa una forma de onda casi constante a lo largo de todo el transitorio para la señal de detalle  $d_6$ , banda que contiene a la frecuencia fundamental. Dicha evidencia se considera un indicador de que el rotor se encuentra sano.

$$\gamma_{DWT}(dB) = 10 \cdot \log \left[ \frac{\sum_{j=N_b}^{N_s} EMF_j^2}{\sum_{j=N_b}^{N_s} [d_8(j)]^2} \right] = 31.42 \text{ dB}$$

(ec. 5.3)

### 5.1.2.3 FLUJO RADIAL. RÉGIMEN TRANSITORIO. MOTOR SANO

Tras medir en la posición C, donde la mayor parte del flujo capturado tiene dirección radial (al ser quedar el vector superficie de la sonda perpendicular al eje de la máquina) se obtiene una forma de onda que se representa en la figura 43.

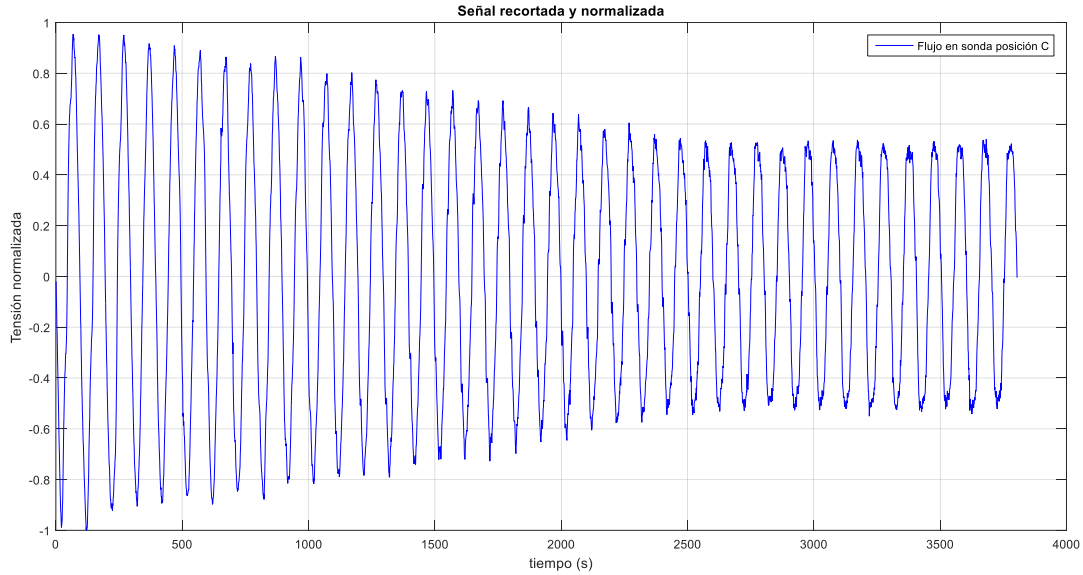


Fig. 43 Evolución del flujo de dispersión mixto durante el arranque. Motor sano. Sonda en posición B.

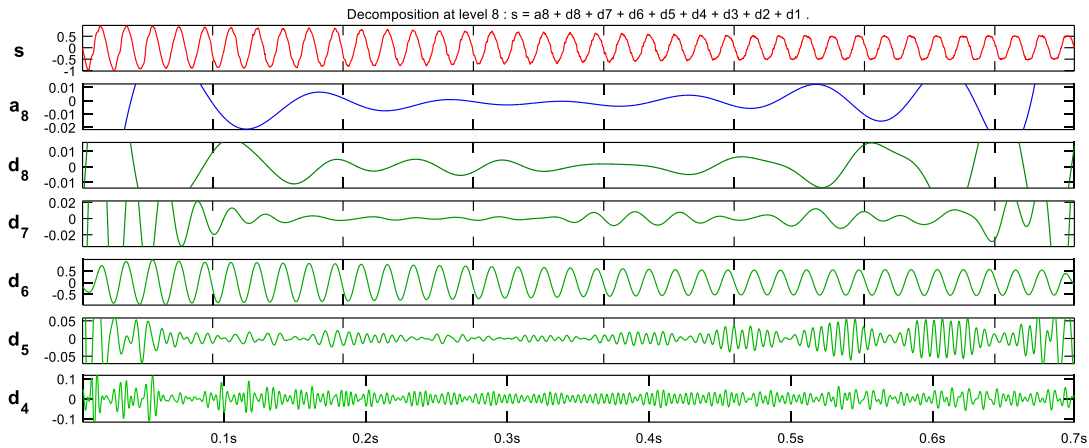


Fig. 44 Señales de descomposición DWT. Arranque en motor sano. Sonda en posición B. Flujo mixto

Tras aplicar la transformada discreta de Wavelet se obtiene la anterior descomposición, obteniendo el siguiente coeficiente energético:

$$\gamma_{DWT}(dB) = 10 \cdot \log \left[ \frac{\sum_{j=Nb}^{Ns} EMF_j^2}{\sum_{j=Nb}^{Ns} [d_8(j)]^2} \right] = 30.90 \text{ dB}$$

(ec. 5.4)

## 5.2 MOTOR CON 1 BARRA ROTA

A continuación se analiza el flujo de dispersión en diferentes regímenes y direcciones.

Con ello se pretende establecer una valoración de la magnitud de las diferentes componentes armónicas y de su evolución, con el objetivo de poder comparar más adelante con los diferentes grados de avería forzados.

### 5.2.1 ANÁLISIS EN RÉGIMEN PERMANENTE. 1 BARRA ROTA

#### 5.2.1.1 FLUJO AXIAL. RÉGIMEN PERMANENTE. 1 BARRA ROTA

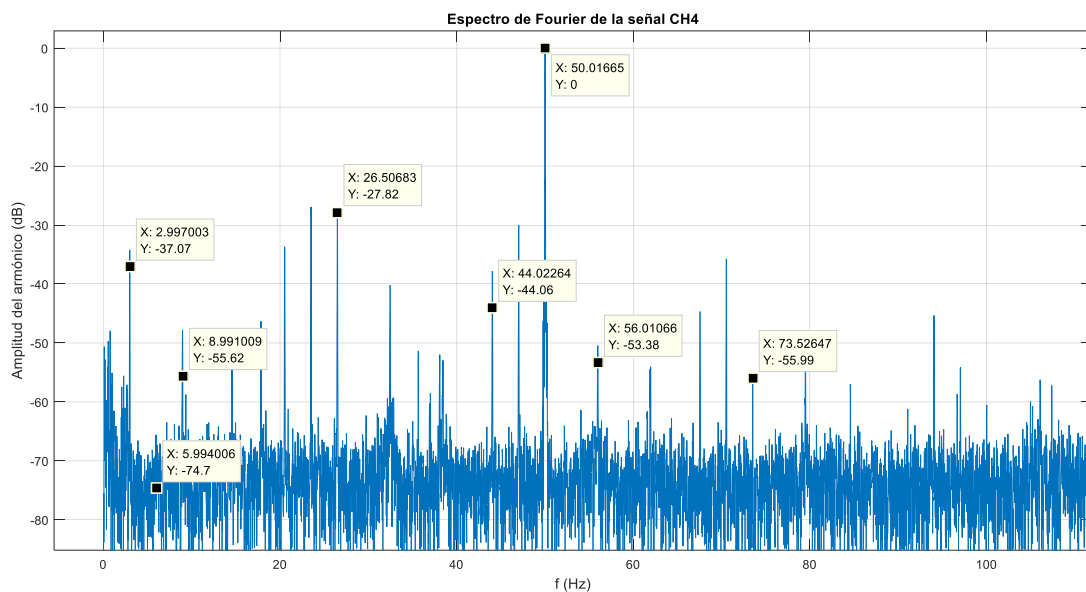


Fig. 45 Detalle de los componentes de fallo en el rotor. Sonda en posición A. Flujo axial

Tras aplicar la transformada de Fourier, se empiezan a detectar valores superiores en las componentes frecuenciales asociadas a la rotura de barras (ver Figura 45), sobretodo en las componentes asociadas a rotura de barra  $s \cdot f$  y  $3 \cdot s \cdot f$  además de en los armónicos laterales ( $f - 2 \cdot s \cdot f$ ,  $f + 2 \cdot s \cdot f$ ). Claramente se percibe un aumento del valor de la componente de desalineación  $f_r$ , lo cual hace patente la interferencia entre la casuística de rotura de barra y excentricidad/desalineación.

### 5.2.1.2 FLUJO MIXTO. RÉGIMEN PERMANENTE. 1 BARRA ROTA

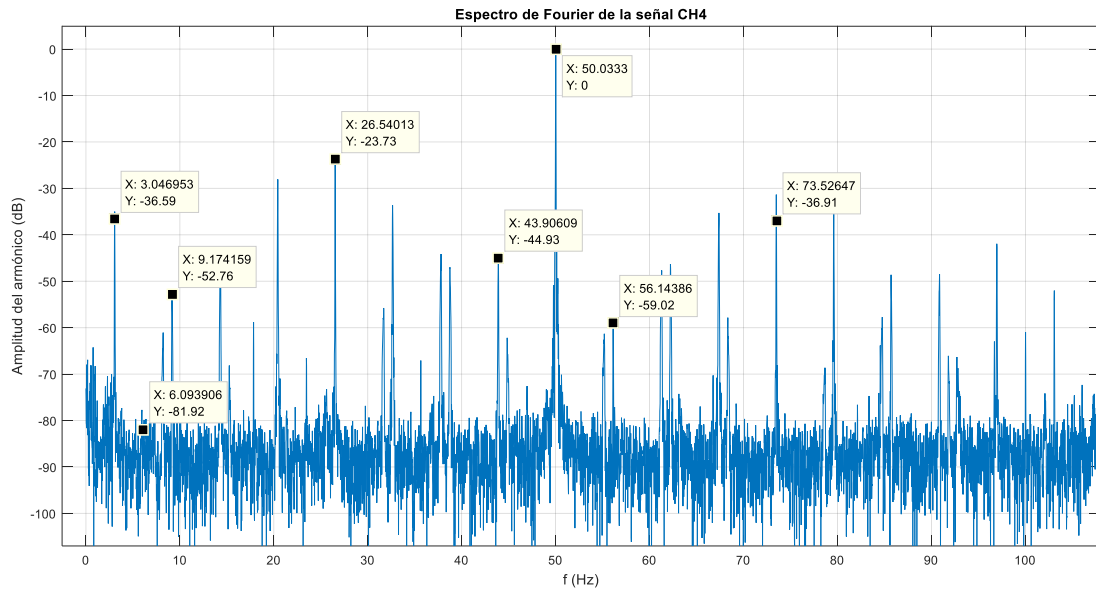


Fig. 46 Detalle de los componentes de fallo en el rotor. Sonda en posición B. Flujo mixto

Como estaba previsto, las componentes laterales cuya naturaleza es mayoritariamente radial muestran un aumento importante en su magnitud (Figura 46), alcanzando valores similares a los registrados en el flujo radial, tal y como se verá a continuación.

### 5.2.1.3 FLUJO RADIAL. RÉGIMEN PERMANENTE. 1 BARRA ROTA

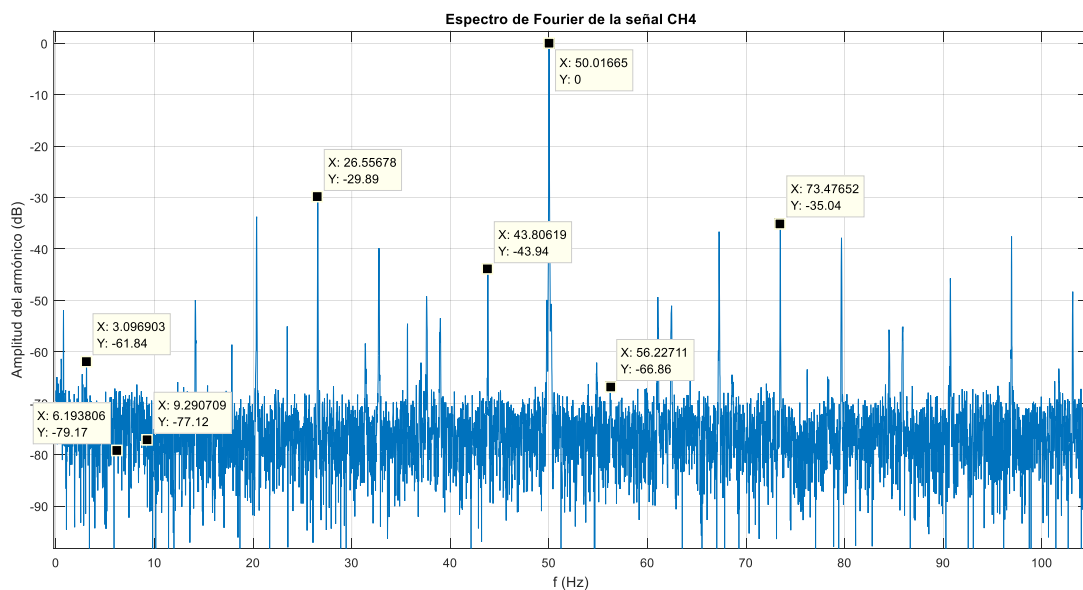


Fig. 47 Detalle de los componentes de fallo en el rotor. Sonda en posición C. Flujo radial

Tal y como se ha comentado con anterioridad, se observa un valor elevado del armónico lateral inferior, lo cual confirma la presencia de rotura de barra (Figura 47). Se debe mencionar la reducción en amplitud para el armónico lateral superior, patrón de evolución que se muestra anómalo en comparación al resto de ensayos realizados con diferente grado de avería.

## 5.2.2 ANÁLISIS EN RÉGIMEN TRANSITORIO. 1 BARRA ROTA

### 5.2.2.1 FLUJO AXIAL. RÉGIMEN TRANSITORIO. 1 BARRA ROTA

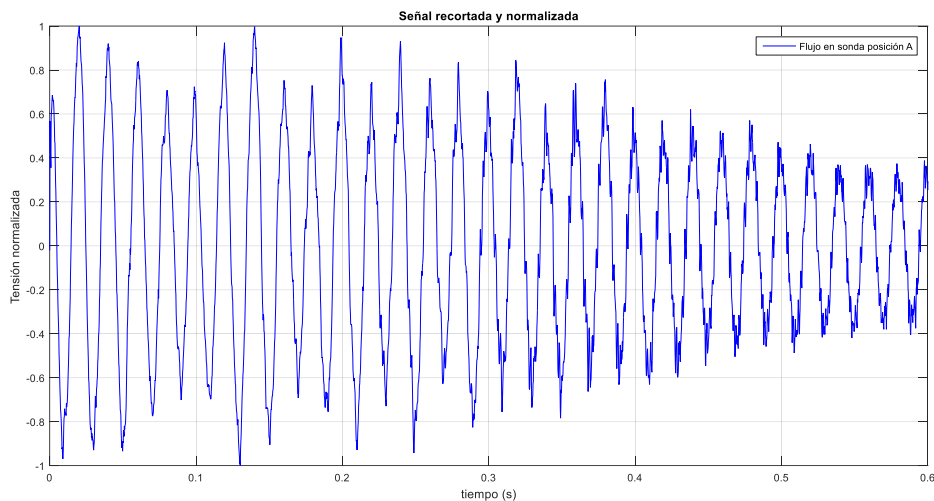


Fig. 48 Evolución del flujo de dispersión axial durante el arranque. 1 Barra rota. Sonda en posición A.

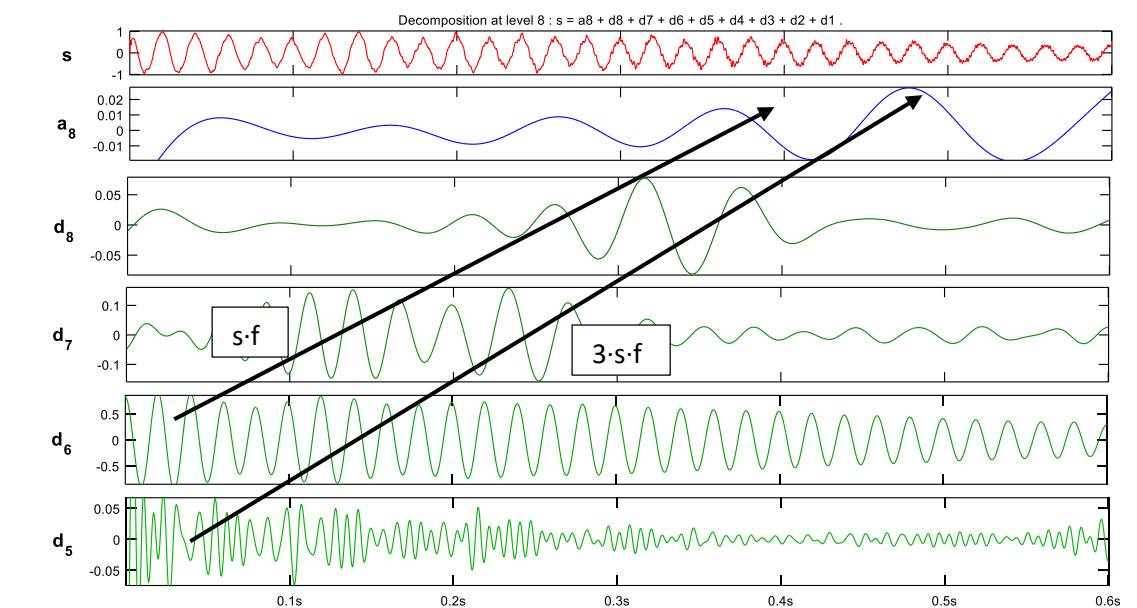


Fig. 49 Señales de descomposición DWT. Motor con 1 barra rota. Sonda en posición A. Flujo axial.





En la descomposición DWT, podemos ver la evolución de las componentes  $s \cdot f$  y  $3 \cdot s \cdot f$  a través de las correspondientes señales wavelet (Figura 49). La componente  $s \cdot f$  adopta el valor de 50Hz en el instante inicial del arranque, por tanto se aprecia una primera perturbación en la señal de detalle d6. Esta componente va evolucionando posteriormente hasta su valor de frecuencia en régimen permanente ( $\approx 0$ ), causando oscilaciones sucesivas en las señales d7, d8 y a8. Por otra parte, y con el mismo razonamiento, se observa cómo se inicia en la señal de detalle d5 (para 150Hz) una evolución hasta converger hasta valores de baja frecuencia ( $s \approx 0$ ).

Se observa una reducción en el coeficiente energético de la banda d8 debido a la perturbación presente por el paso de ambas componentes:

$$\gamma_{DWT}(dB) = 10 \cdot \log \left[ \frac{\sum_{j=Nb}^{Ns} EMF_j^2}{\sum_{j=Nb}^{Ns} [d_8(j)]^2} \right] = 24.31 \text{ dB}$$

(ec. 5.5)

### 5.2.2.2 FLUJO MIXTO. RÉGIMEN TRANSITORIO. 1 BARRA ROTA

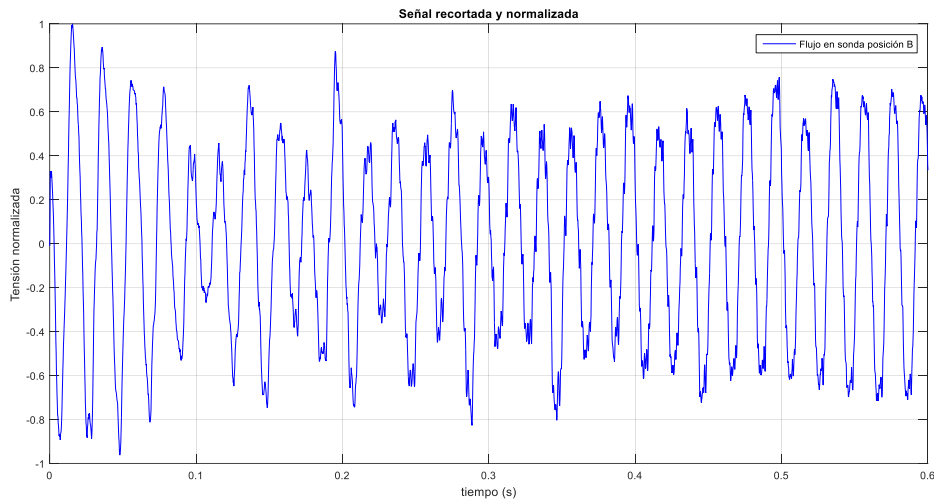


Fig. 50 Evolución del flujo de dispersión mixto durante el arranque. 1 Barra rota. Sonda en posición B.

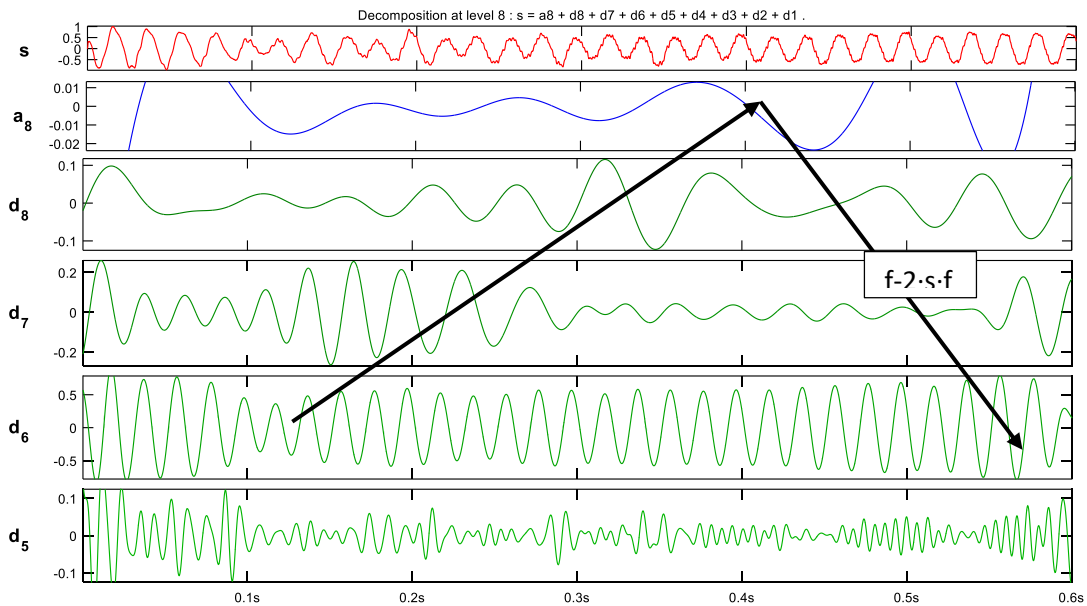


Fig. 51 Señales de descomposición DWT. Motor con 1 barra rota. Sonda en posición B. Flujo mixto.

Tras la evaluación de la señal (Figura 51), se percibe claramente la evolución de la componente  $f-2 \cdot s \cdot f$ , lo cual remarca la presencia de barra rota. Se observa una reducción importante del coeficiente energético:

$$\gamma_{DWT}(dB) = 10 \cdot \log \left[ \frac{\sum_{j=Nb}^{Ns} EMF_j^2}{\sum_{j=Nb}^{Ns} [d_8(j)]^2} \right] = 19.17 \text{ dB}$$

(ec. 5.6)

### 5.2.2.3 FLUJO RADIAL. RÉGIMEN TRANSITORIO. 1 BARRA ROTA

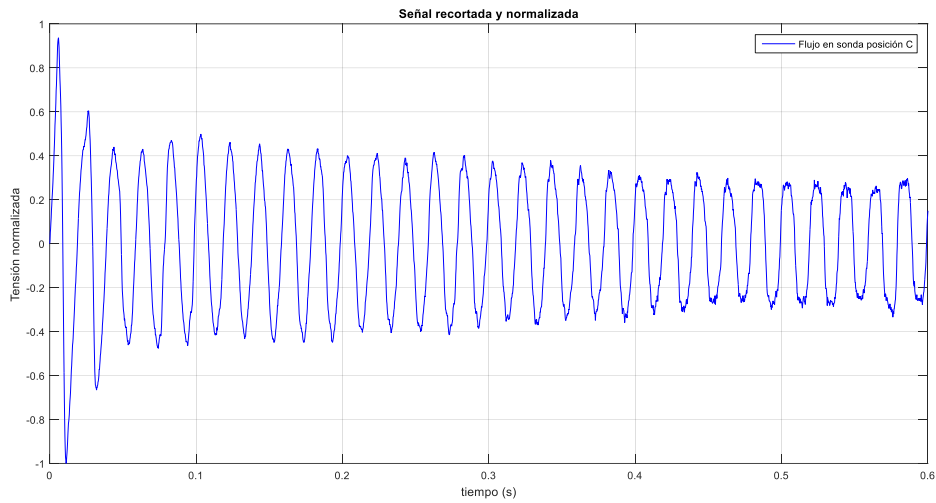


Fig. 52 Evolución del flujo de dispersión radial durante el arranque. 1 Barra rota. Sonda en posición C.

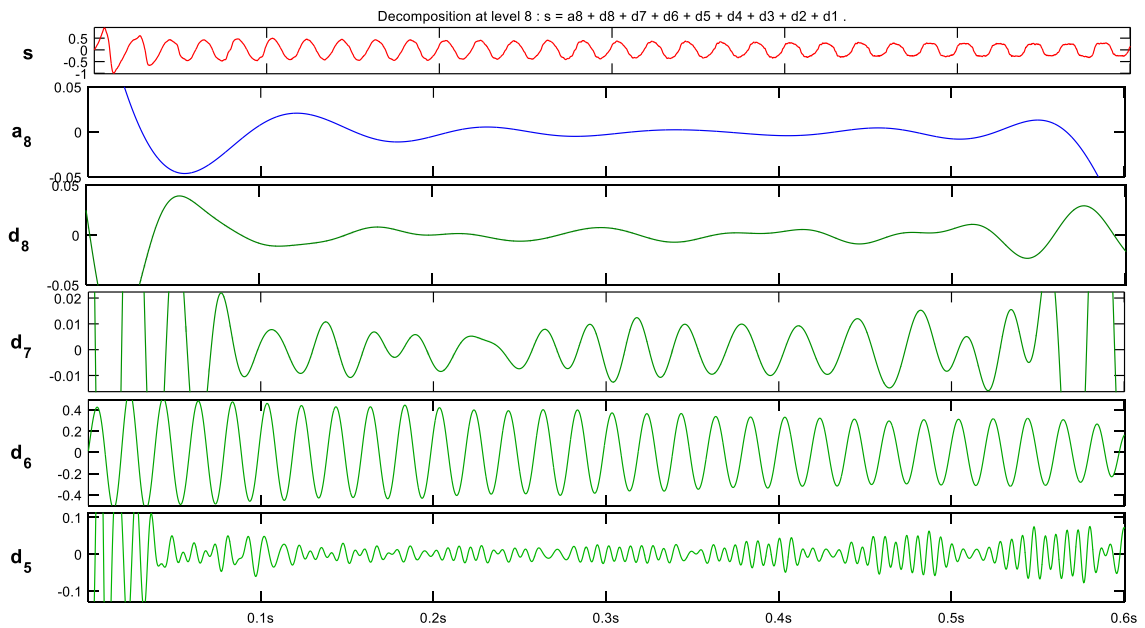


Fig. 53 Señales de descomposición DWT. Motor con 1 barra rota. Sonda en posición C. Flujo radial.

En la evolución para el flujo radial no se presentan patrones característicos. Se obtiene un valor del coeficiente energético similar al de estado sano:

$$\gamma_{DWT}(dB) = 10 \cdot \log \left[ \frac{\sum_{j=Nb}^{Ns} EMF_j^2}{\sum_{j=Nb}^{Ns} [d_8(j)]^2} \right] = 29.66 \text{ dB}$$

(ec. 5.7)

## 5.3 MOTOR CON 2 BARRAS ROTAS ADYACENTES

### 5.3.1 ANÁLISIS EN RÉGIMEN PERMANENTE. 2 BARRAS ROTAS ADYACENTES

#### 5.3.1.1 FLUJO AXIAL. RÉGIMEN PERMANENTE. 2 BARRAS ROTAS ADYACENTES

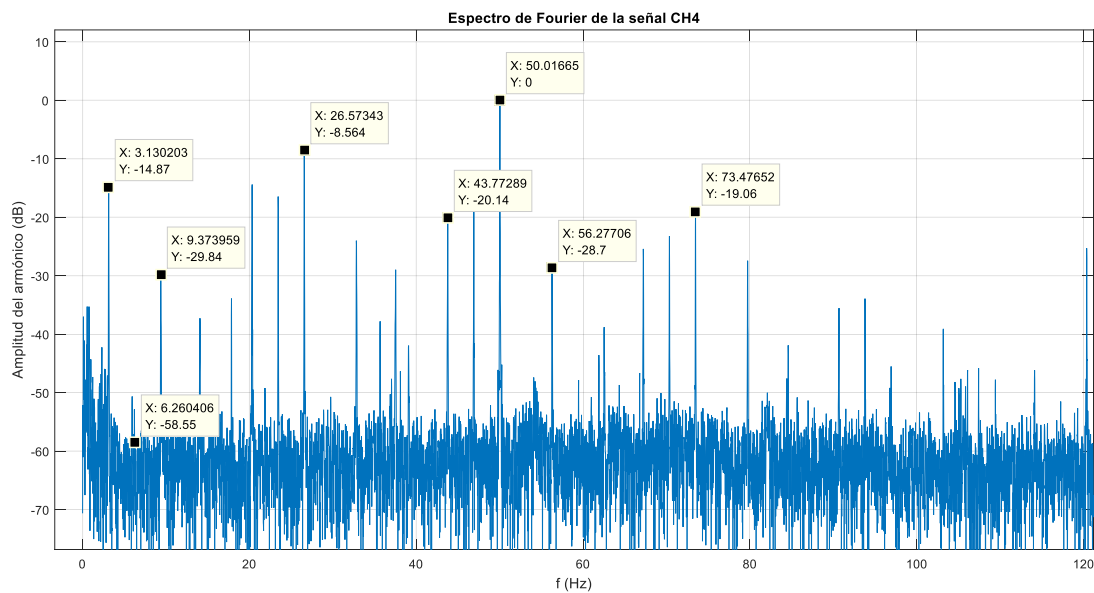


Fig. 54 Detalle de los componentes de fallo en el rotor. Sonda en posición A. Flujo axial

Se observa un aumento importante en todas las componentes relacionadas con rotura de barras ( $s \cdot f$ ,  $3 \cdot s \cdot f$ ,  $f - 2 \cdot s \cdot f$ ,  $f + 2 \cdot s \cdot f$ ), así como las componentes de desalineación (Figura 54). Más adelante se observará la proporcionalidad en el aumento entre cada una de las componentes.

### 5.3.1.2 FLUJO MIXTO. RÉGIMEN PERMANENTE. 2 BARRAS ROTAS ADYACENTES

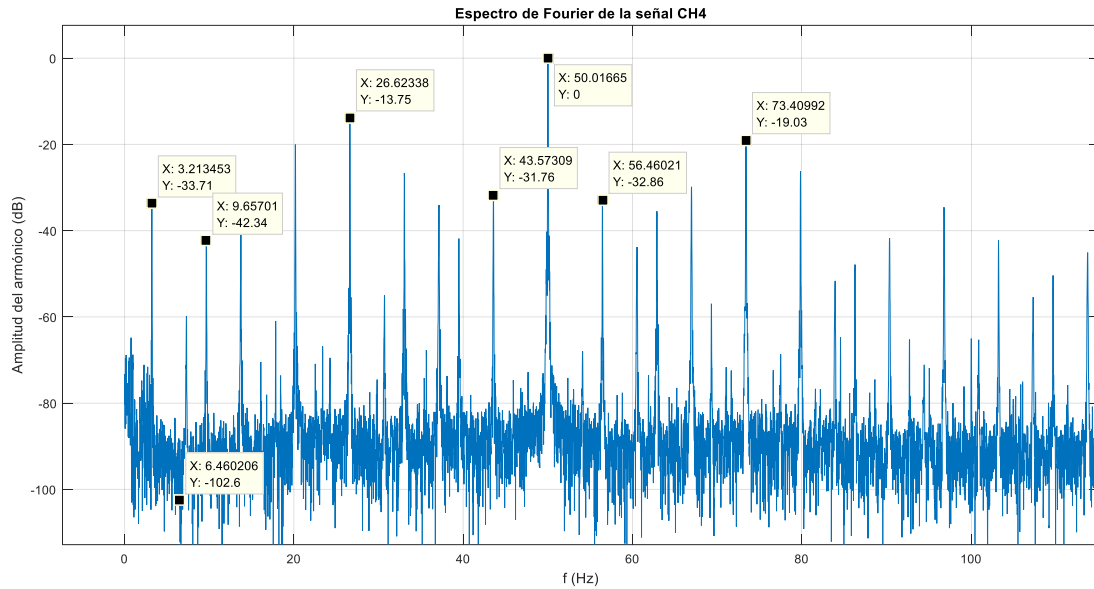


Fig. 55 Detalle de los componentes de fallo en el rotor. Sonda en posición B. Flujo mixto.

En éste caso se observa un aumento más acusado de las componentes laterales de rotura de barra, obteniendo los valores de -31,76dB y -32,86dB para los armónicos laterales inferior y superior respectivamente (Figura 55).

### 5.3.1.3 FLUJO RADIAL. RÉGIMEN PERMANENTE. 2 BARRAS ROTAS ADYACENTES

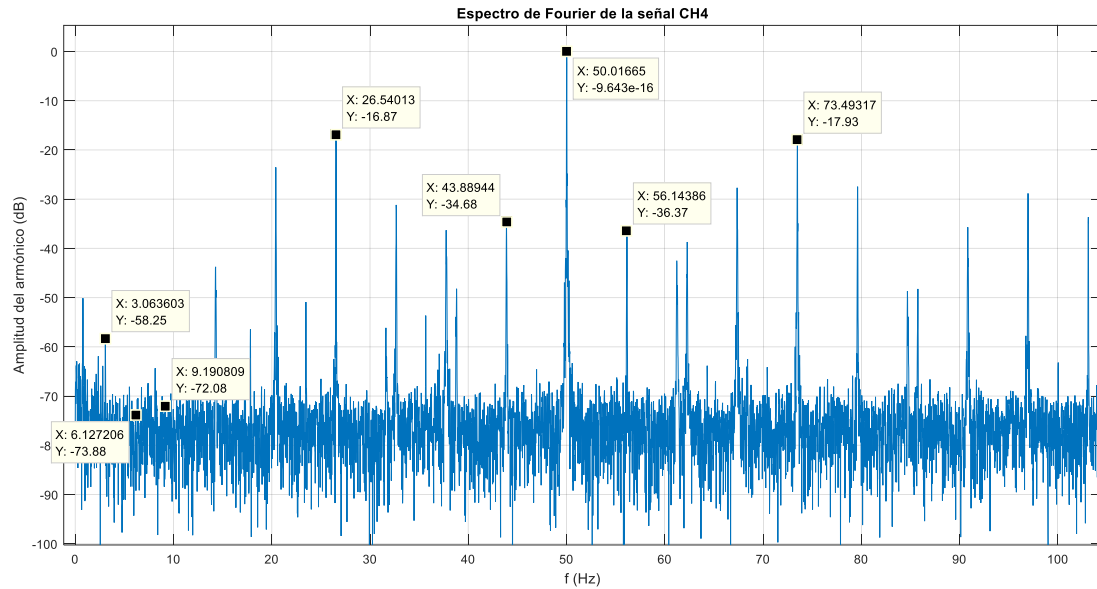


Fig. 56 Detalle de los componentes de fallo en el rotor. Sonda en posición C. Flujo radial

De la misma forma que en el flujo mixto, vuelve a prevalecer el aumento de las componentes laterales, con valores de -34,68dB y -36,37dB respectivamente (Figura 56).

### 5.3.2 ANÁLISIS EN RÉGIMEN TRANSITORIO. 2 BARRAS ROTAS ADYACENTES

#### 5.3.2.1 FLUJO AXIAL. RÉGIMEN TRANSITORIO. 2 BARRAS ROTAS ADYACENTES

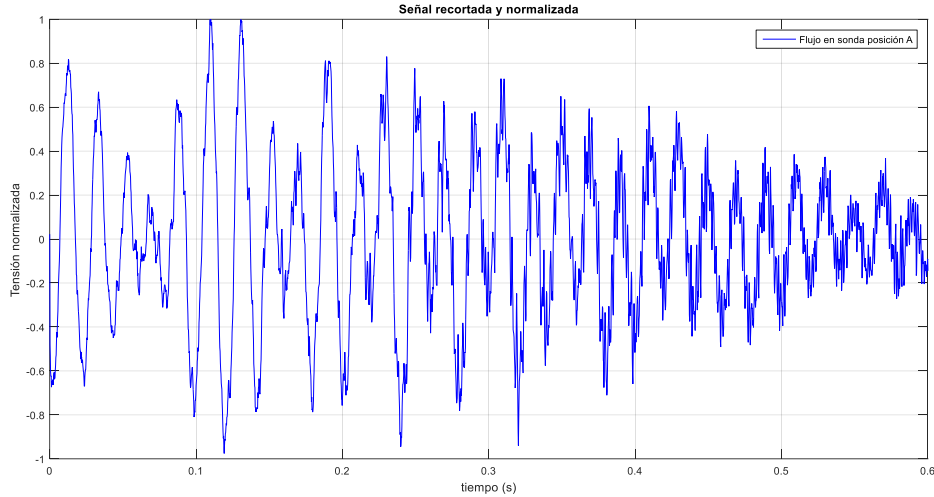


Fig. 57 Evolución del flujo de dispersión axial durante el arranque. 2 Barras rotas. Sonda en posición A.

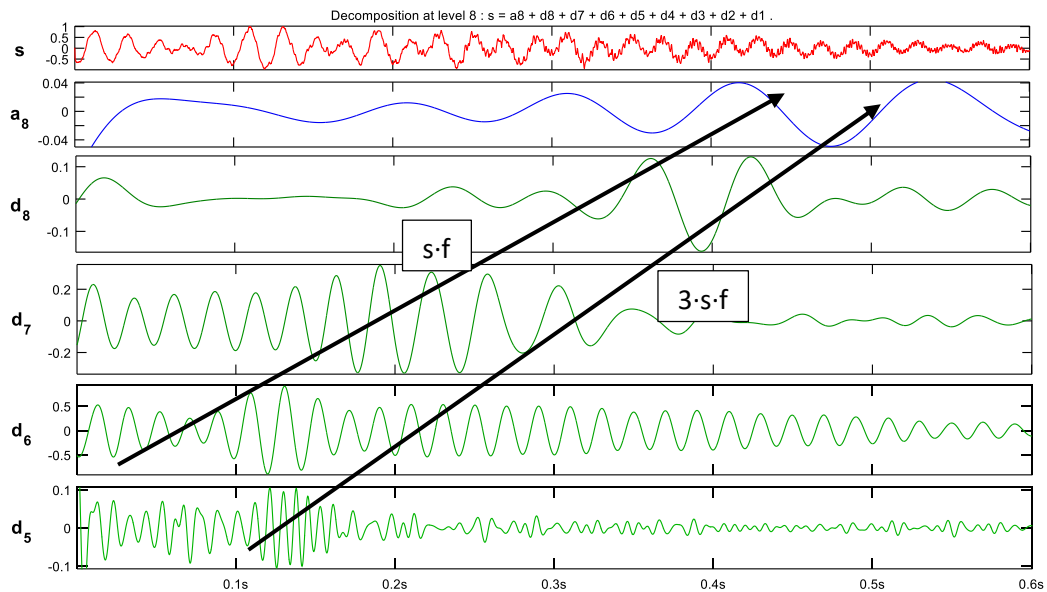


Fig. 58 Señales de descomposición DWT. Motor con 2 barras rotas. Sonda en posición A. Flujo radial.

Se observa el paso por las bandas de frecuencias de las componentes  $s \cdot f$  y  $3 \cdot s \cdot f$  provocando una bajada importante en el coeficiente energético (Figura 58):

$$\gamma_{DWT}(dB) = 10 \cdot \log \left[ \frac{\sum_{j=Nb}^{Ns} EMF_j^2}{\sum_{j=Nb}^{Ns} [d_8(j)]^2} \right] = 17.51 \text{ dB}$$

(ec. 5.8)

### 5.3.2.2 FLUJO MIXTO. RÉGIMEN TRANSITORIO. 2 BARRAS ROTAS ADYACENTES

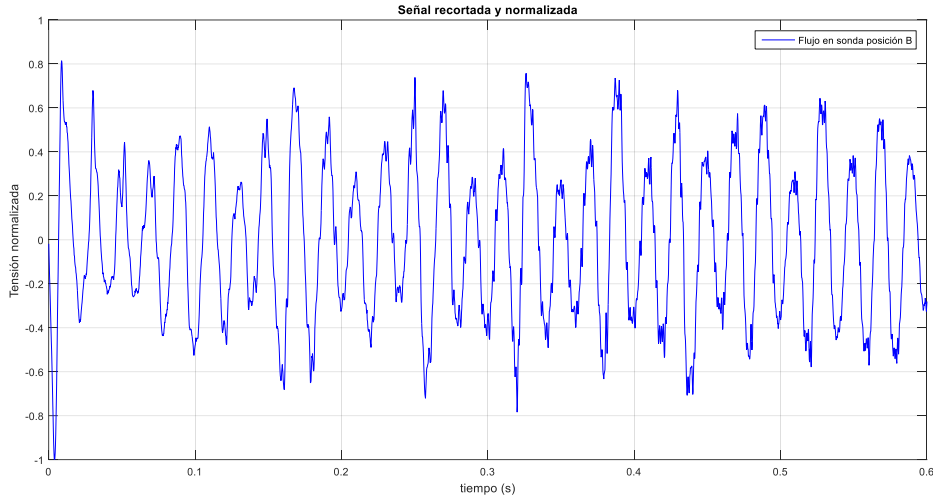


Fig. 59 Evolución del flujo de dispersión mixto durante el arranque. 2 Barras rotas. Sonda en posición B.

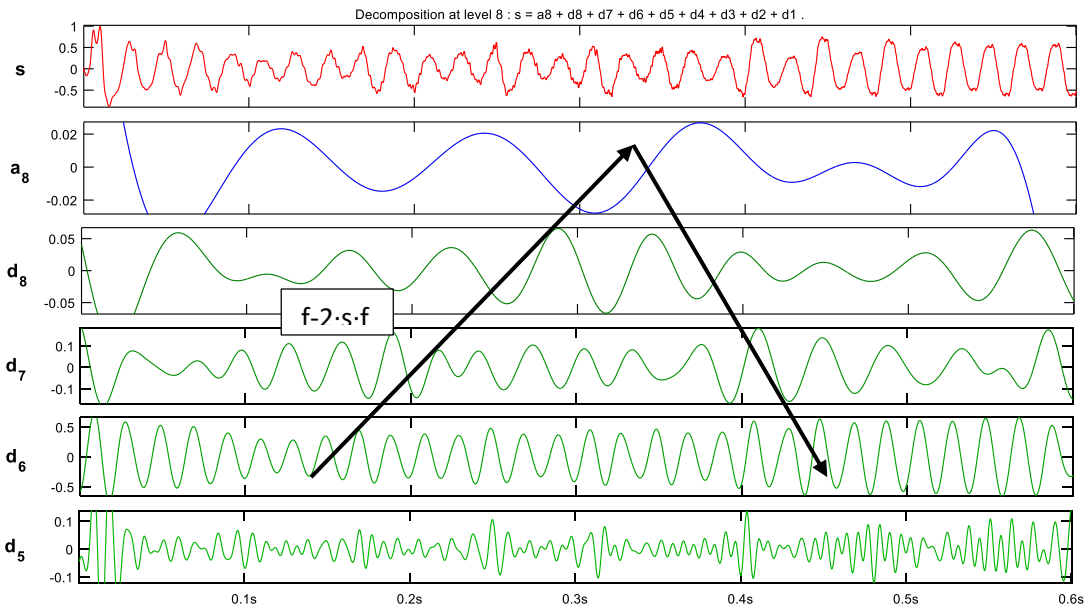


Fig. 60 Señales de descomposición DWT. Motor con 2 barras rota. Sonda en posición B. Flujo mixto.

Se observa la presencia de la componente  $f-2 \cdot s \cdot f$  (ver Figura 60) Se obtiene un coeficiente de valor:

$$\gamma_{DWT}(dB) = 10 \cdot \log \left[ \frac{\sum_{j=Nb}^{Ns} EMF_j^2}{\sum_{j=Nb}^{Ns} [d_8(j)]^2} \right] = 17.81 \text{ dB}$$

(ec. 5.9)



### 5.3.2.3 FLUJO RADIAL. RÉGIMEN TRANSITORIO. 2 BARRAS ROTAS ADYACENTES

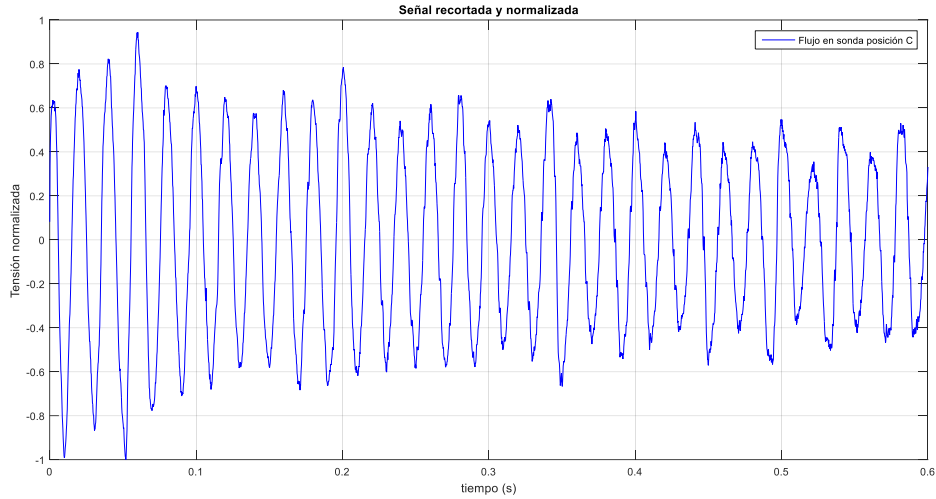


Fig. 61 Evolución del flujo de dispersión radial durante el arranque. 2 Barras rotas. Sonda en posición C.

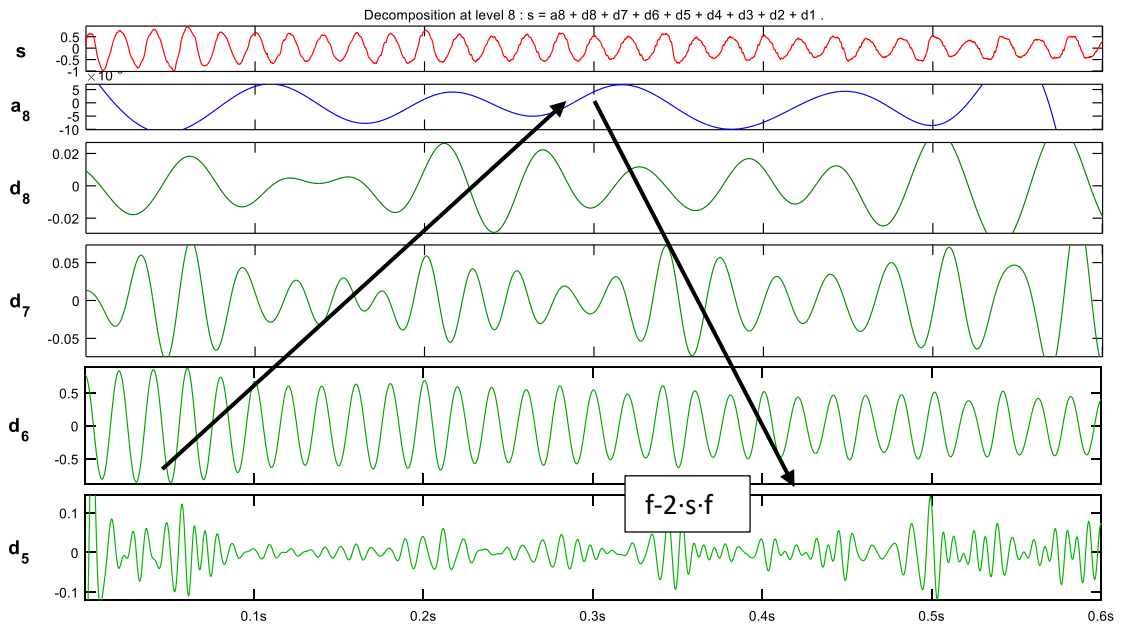


Fig. 62 Señales de descomposición DWT. Motor con 2 barras rotas. Sonda en posición C. Flujo radial.

De nuevo se observa el armónico lateral inferior de avería por rotura de barra (Figura 62).

$$\gamma_{DWT}(dB) = 10 \cdot \log \left[ \frac{\sum_{j=Nb}^{Ns} EMF_j^2}{\sum_{j=Nb}^{Ns} [d_8(j)]^2} \right] = 27.58 \text{ dB}$$

(ec. 5.10)

## 5.5 MOTOR CON 9 BARRAS ROTAS ADYACENTES

### 5.5.1 ANÁLISIS EN RÉGIMEN PERMANENTE. 9 BARRAS ROTAS ADYACENTES

#### 5.5.1.1 FLUJO AXIAL. RÉGIMEN PERMANENTE. 9 BARRAS ROTAS ADYACENTES

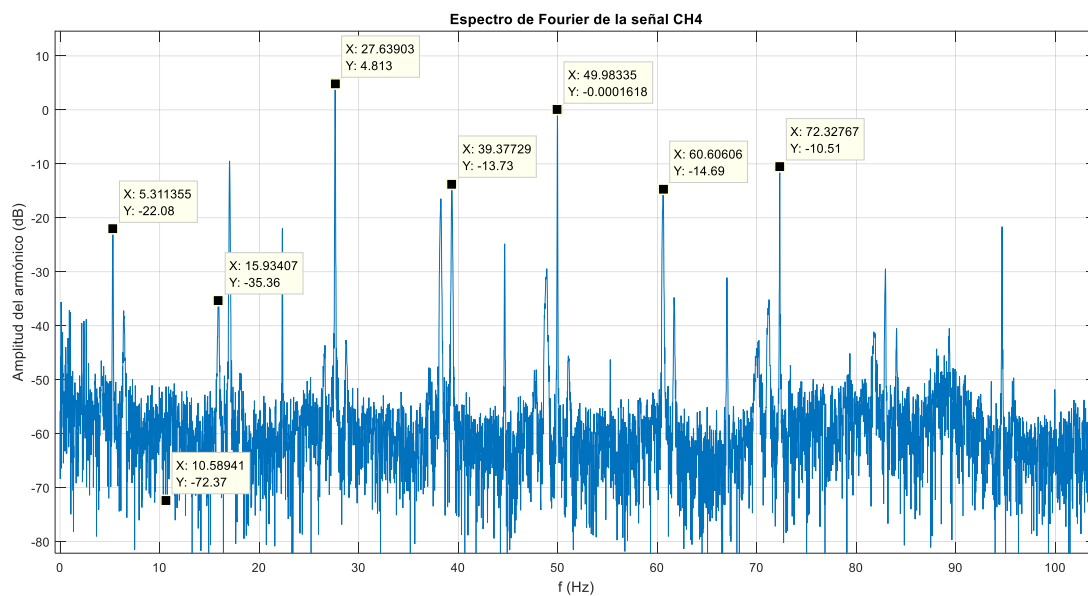


Fig. 63 Detalle de los componentes de fallo en el rotor. Sonda en posición A. Flujo axial.

Tras analizar la señal obtenida se percibe que la frecuencia fundamental pasa a tomar el valor  $f-f_r$  (ver Figura 63). Dicho fenómeno probablemente sea debido al aumento del flujo de dispersión en las zonas entorno a las barras rotas.

Se ajusta el análisis de Fourier indicando manualmente la posición del fundamental de la tensión de suministro (49.98335Hz) y se procede a normalizar frente a éste fundamental artificial.

Una vez normalizado se comprueba un aumento generalizado de todas las componentes detalladas.

### 5.5.1.2 FLUJO MIXTO. RÉGIMEN PERMANENTE. 9 BARRAS ROTAS ADYACENTES

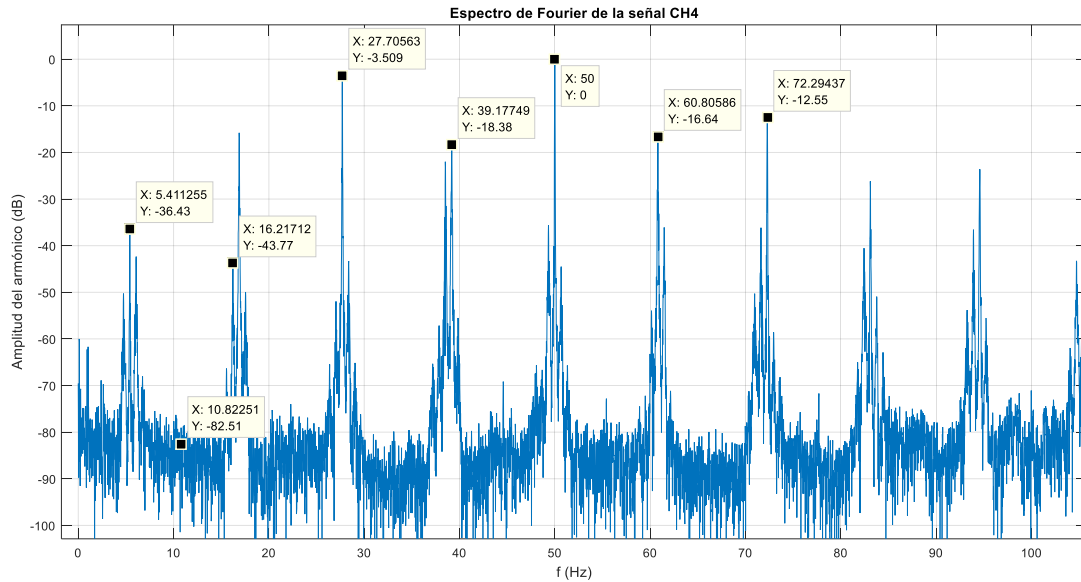


Fig. 64 Detalle de los componentes de fallo en el rotor. Sonda en posición B. Flujo mixto.

Para el espectro del flujo mixto, se obtienen valores de  $s \cdot f$  y  $3 \cdot s \cdot f$  ligeramente superiores a los obtenidos en el caso de una y dos barras rotas respectivamente (Figura 64). Se percibe un aumento proporcional para los componentes  $f \pm f_r$  y  $f \pm 2 \cdot s \cdot f$  con respecto al caso de dos barras rotas, tomando la componente  $f - f_r$  valores muy cercanos a la fundamental pero sin sobrepasarla como en la posición anterior.

### 5.5.1.3 FLUJO RADIAL. RÉGIMEN PERMANENTE. 9 BARRAS ROTAS ADYACENTES

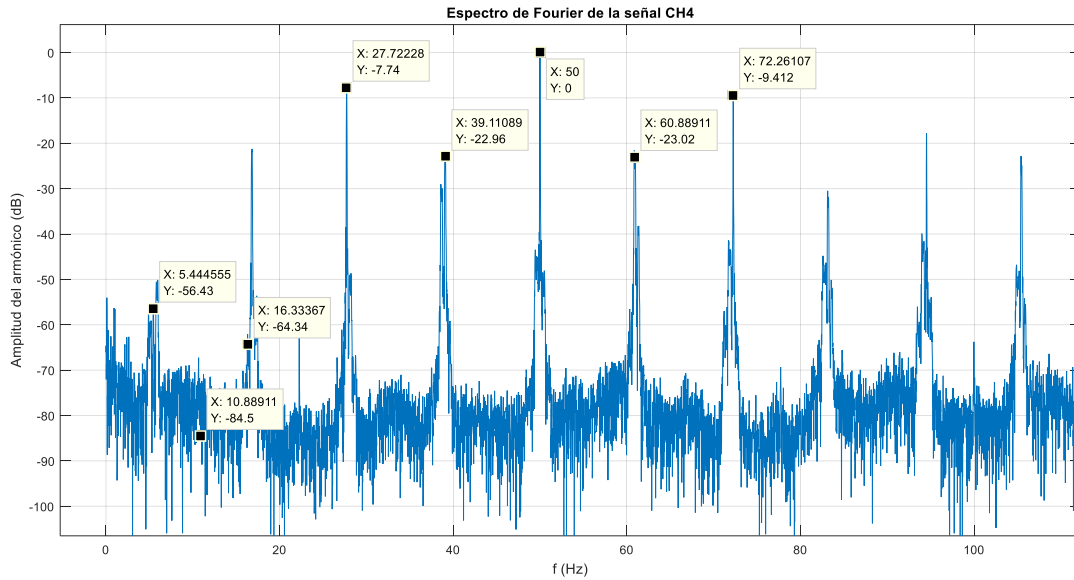


Fig. 65 Detalle de los componentes de fallo en el rotor. Sonda en posición C. Flujo radial.

En el caso de flujo radial se mantiene la proporcionalidad mostrada en el mixto con valores muy elevados en todos los casos (Figura 65).

## 5.5.2 ANÁLISIS EN RÉGIMEN TRANSITORIO. 9 BARRAS ROTAS ADYACENTES

### 5.5.2.1 FLUJO AXIAL. RÉGIMEN TRANSITORIO. 9 BARRAS ROTAS ADYACENTES

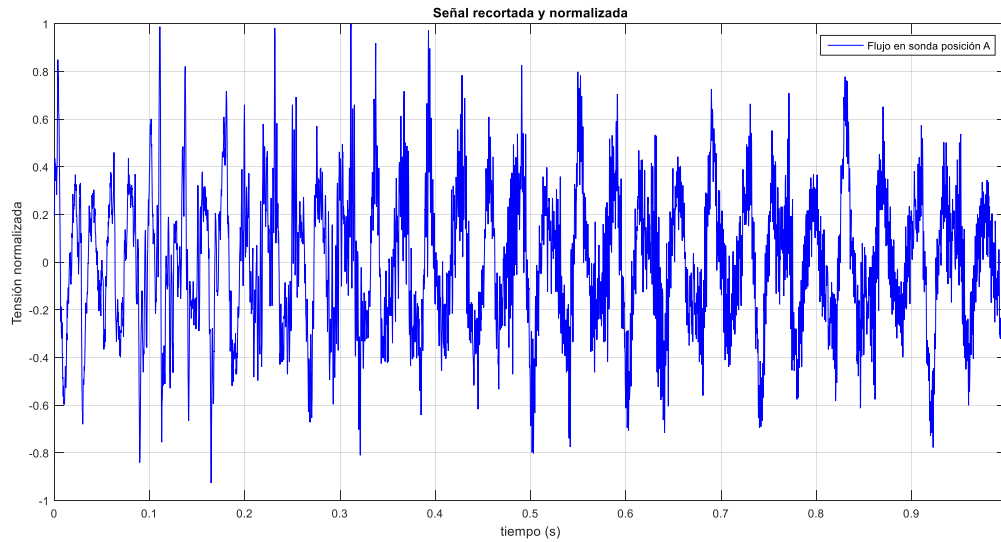


Fig. 66 Evolución del flujo de dispersión radial durante el arranque. 9 Barras rotas. Sonda en posición A.

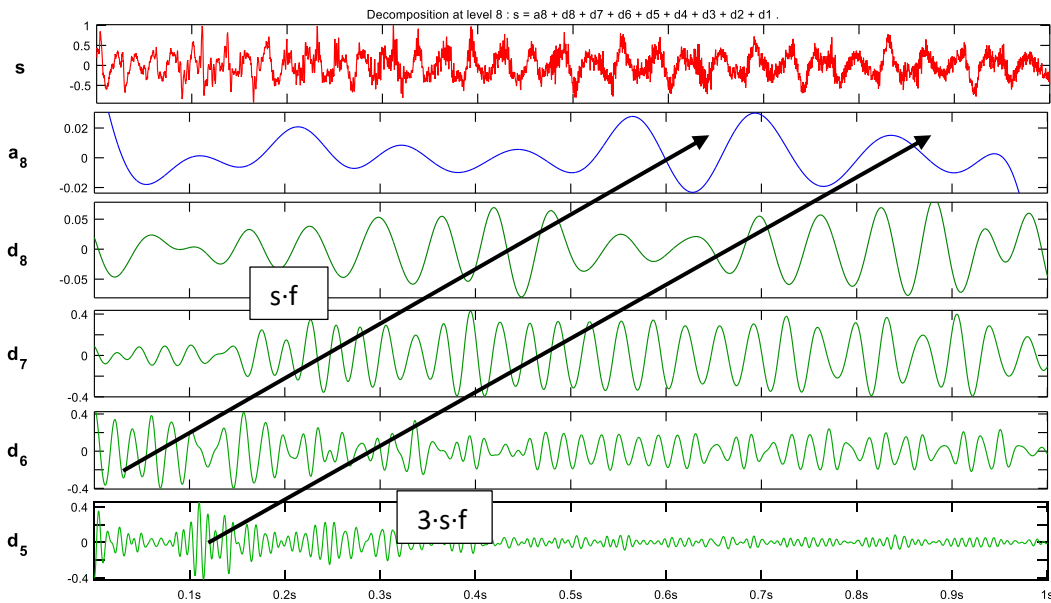


Fig. 67 Señales de descomposición DWT. Motor con 9 barras rotas. Sonda en posición A. Flujo axial.

Se observan las componentes  $s \cdot f$  y  $3 \cdot s \cdot f$  (Figura 67), obteniéndose un coeficiente energético bajo.

$$\gamma_{DWT}(dB) = 10 \cdot \log \left[ \frac{\sum_{j=Nb}^{Ns} EMF_j^2}{\sum_{j=Nb}^{Ns} [d_8(j)]^2} \right] = 17.57 \text{ dB}$$

(ec. 5.11)

### 5.5.2.2 FLUJO MIXTO. RÉGIMEN TRANSITORIO. 9 BARRAS ROTAS ADYACENTES

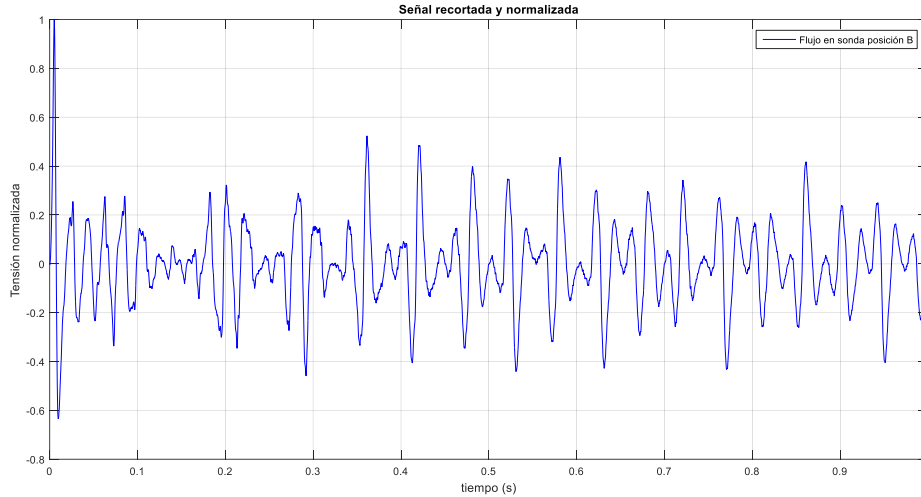


Fig. 68 Evolución del flujo de dispersión mixto durante el arranque. 9 Barras rotas. Sonda en posición B.

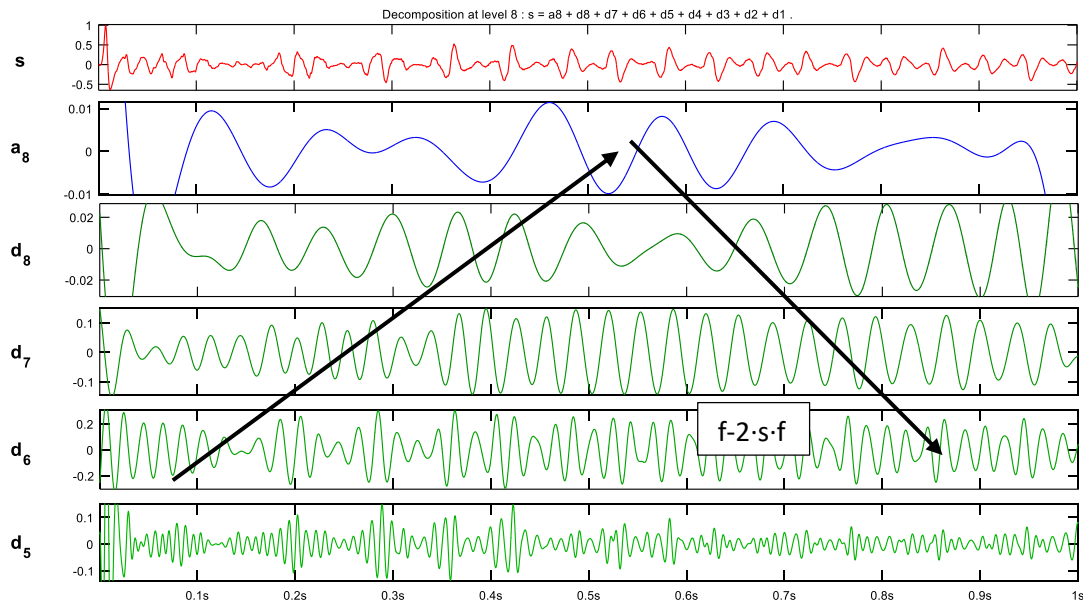


Fig. 69 Señales de descomposición DWT. Motor con 9 barras rotas. Sonda en posición B. Flujo mixto

$$\gamma_{DWT}(dB) = 10 \cdot \log \left[ \frac{\sum_{j=Nb}^{Ns} EMF_j^2}{\sum_{j=Nb}^{Ns} [d_8(j)]^2} \right] = 22.60 \text{ dB}$$

. (ec. 5.14)

### 5.5.2.3 FLUJO RADIAL. RÉGIMEN TRANSITORIO. 9 BARRAS ROTAS ADYACENTES

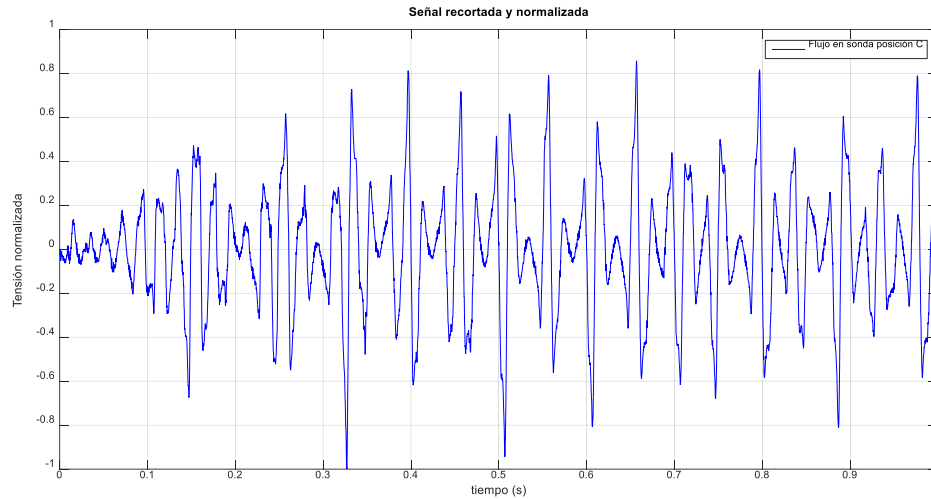


Fig. 70 Evolución del flujo de dispersión radial durante el arranque. 9 Barras rotas. Sonda en posición C.

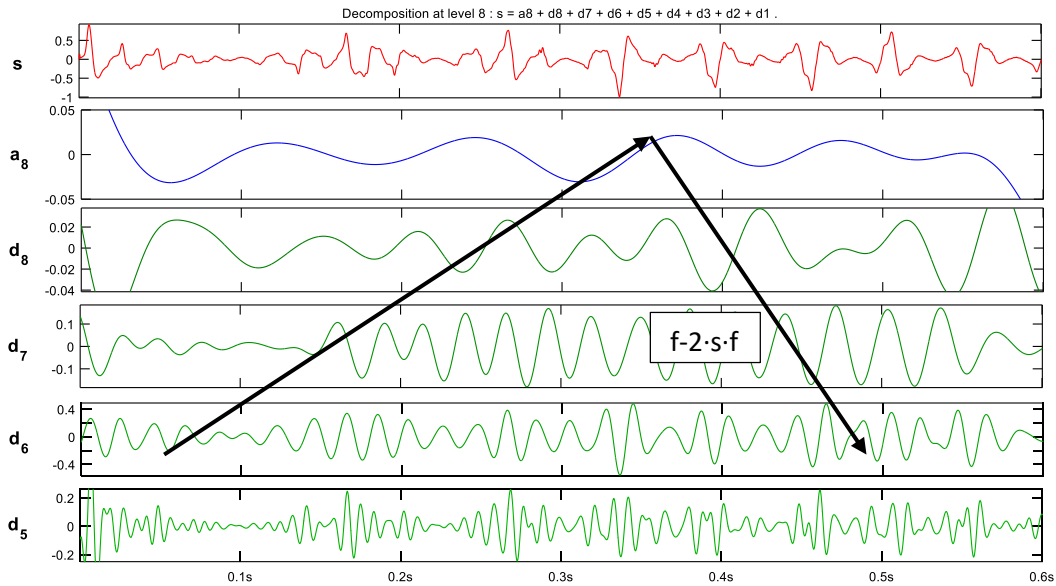


Fig. 71 Señales de descomposición DWT. Motor con 9 barras rotas. Sonda en posición C. Flujo radial

$$\gamma_{DWT}(dB) = 10 \cdot \log \left[ \frac{\sum_{j=Nb}^{Ns} EMF_j^2}{\sum_{j=Nb}^{Ns} [d_8(j)]^2} \right] = 22.58 \text{ dB}$$

(ec. 5.15)

## 5.6 MOTOR EN DESALINEACIÓN CON LA CARGA

### 5.6.1 ANÁLISIS EN RÉGIMEN PERMANENTE. DESALINEACIÓN CARGA

#### 5.6.1.1 FLUJO AXIAL. RÉGIMEN PERMANENTE. DESALINEACIÓN CARGA

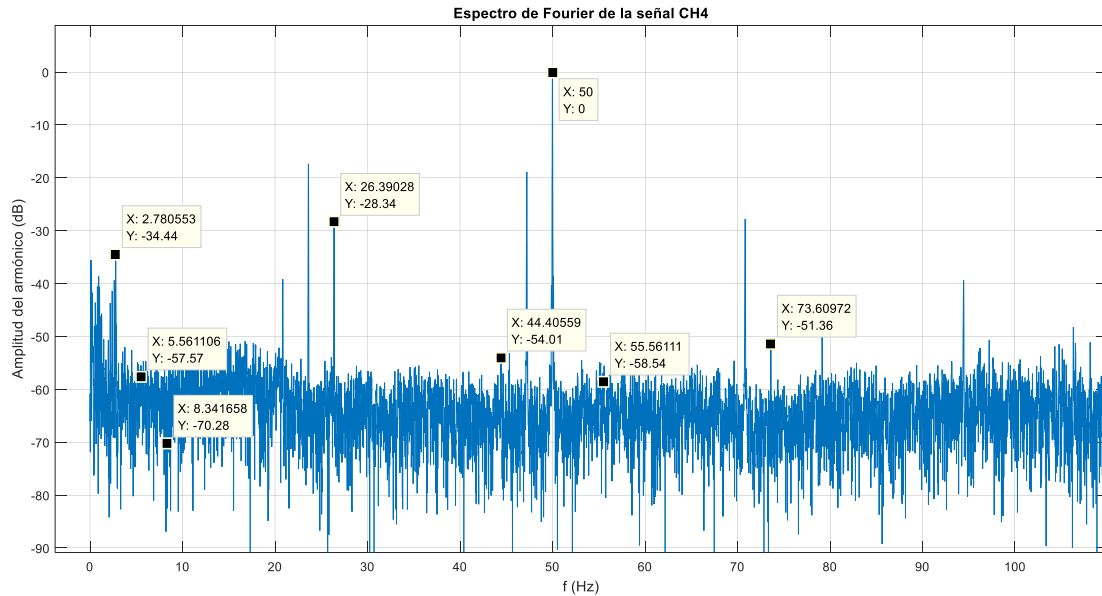


Fig. 72 Detalle de los componentes de fallo en el rotor. Sonda en posición A. Flujo axial.

En el caso de desalineación forzada entre motor y carga (Figura 72), se prevé la presencia de las componentes  $f \pm f_r$ , constatando un valor elevado para la primera, e igualdad de valor para el resto de componentes con respecto a la máquina sana (con excentricidad y desalineación inherentes).



### 5.6.1.2 FLUJO MIXTO. RÉGIMEN PERMANENTE. DESALINEACIÓN CARGA

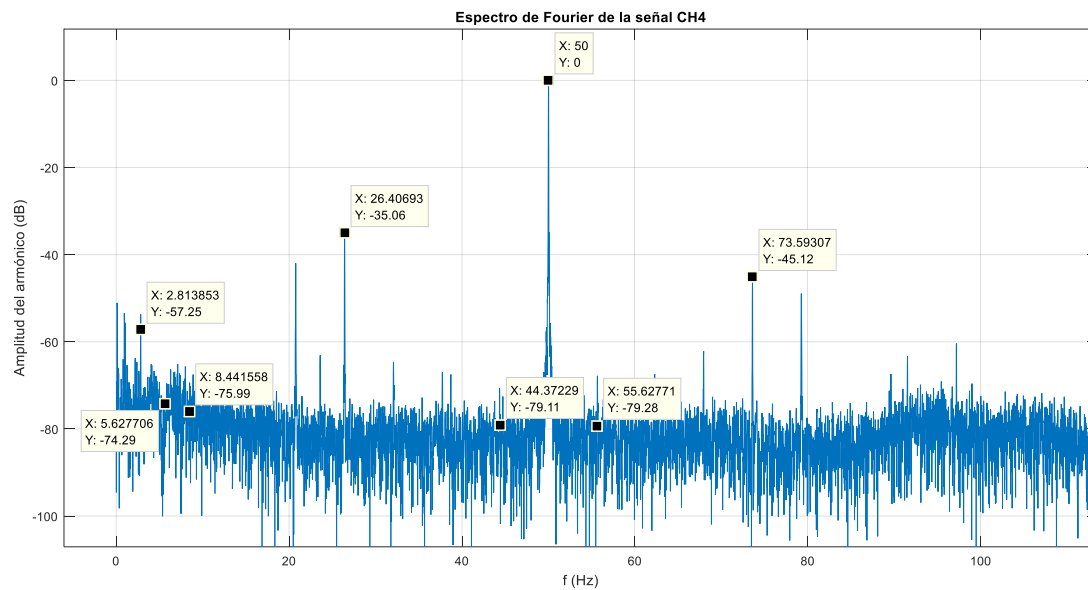


Fig. 73 Detalle de los componentes de fallo en el rotor. Sonda en posición B. Flujo mixto

Para el flujo mixto (también el radial) se observan valores similares para todas las componentes, siendo lo más relevante de éste caso, los valores especialmente bajos para los armónicos laterales ( $f \pm 2 \cdot s \cdot f$ ) (ver Figura 73).

### 5.6.1.3 FLUJO RADIAL. RÉGIMEN PERMANENTE. DESALINEACIÓN CARGA

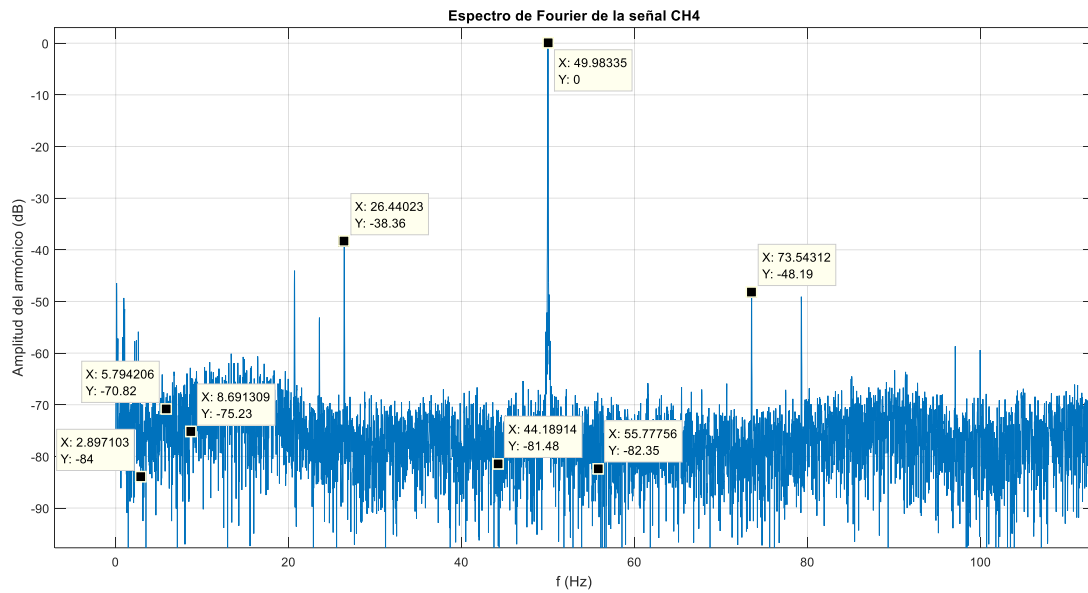


Fig. 74 Detalle de los componentes de fallo en el rotor. Sonda en posición C. Flujo radial.

Se constata el efecto de la posición anterior, remarcando de nuevo valores bajos para los armónicos laterales ( $f \pm 2 \cdot s \cdot f$ ) (Figura 74).

## 5.6.2 ANÁLISIS EN RÉGIMEN TRANSITORIO. DESALINEACIÓN CARGA

### 5.6.2.1 FLUJO AXIAL. RÉGIMEN TRANSITORIO. DESALINEACIÓN CARGA

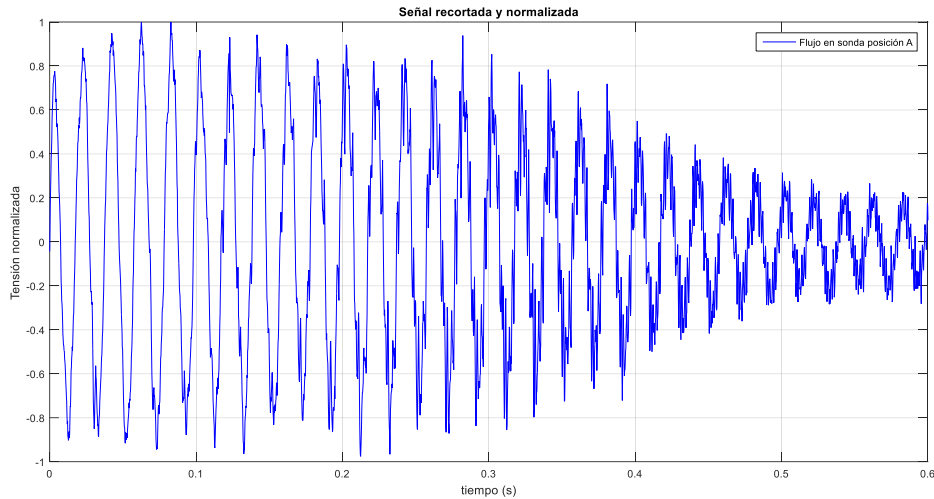


Fig. 75 Evolución del flujo de dispersión axial durante el arranque. Desalineación. Sonda en posición A.

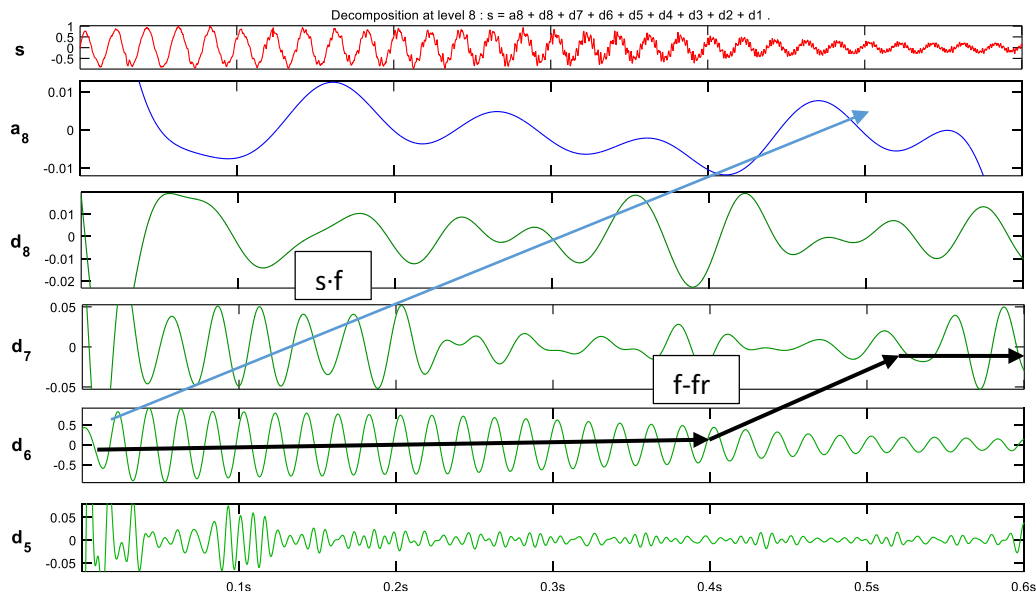


Fig. 76 Señales de descomposición DWT. Desalineación. Sonda en posición A. Flujo axial.

Se percibe claramente la evolución de la componente  $f \cdot f_r$  reflejando la presencia de desalineación existente (Figura 76). También se percibe levemente la componente  $s \cdot f$ .



El coeficiente energético presenta un valor similar al de motor sano, en parte debido a que la comprobación se hace en la señal de detalle d8, siendo que la evolución de la componente  $f_r$  no está presente en ningún momento en dicha banda frecuencial.

$$\gamma_{DWT}(dB) = 10 \cdot \log \left[ \frac{\sum_{j=N_b}^{N_s} EMF_j^2}{\sum_{j=N_b}^{N_s} [d_8(j)]^2} \right] = 33.02 \text{ dB}$$

(ec. 5.16)

### 5.6.2.2 FLUJO MIXTO. RÉGIMEN TRANSITORIO. DESALINEACIÓN CARGA

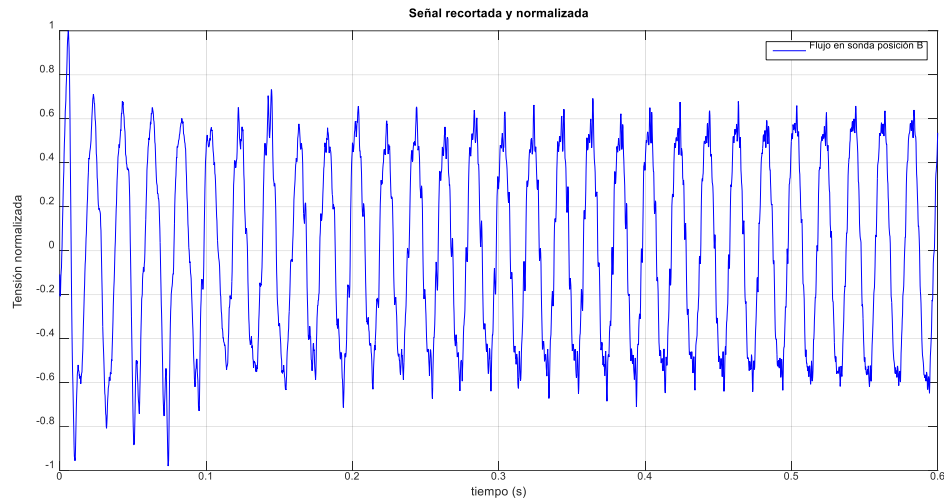


Fig. 77 Evolución del flujo de dispersión mixto durante el arranque. Desalineación. Sonda en posición B.

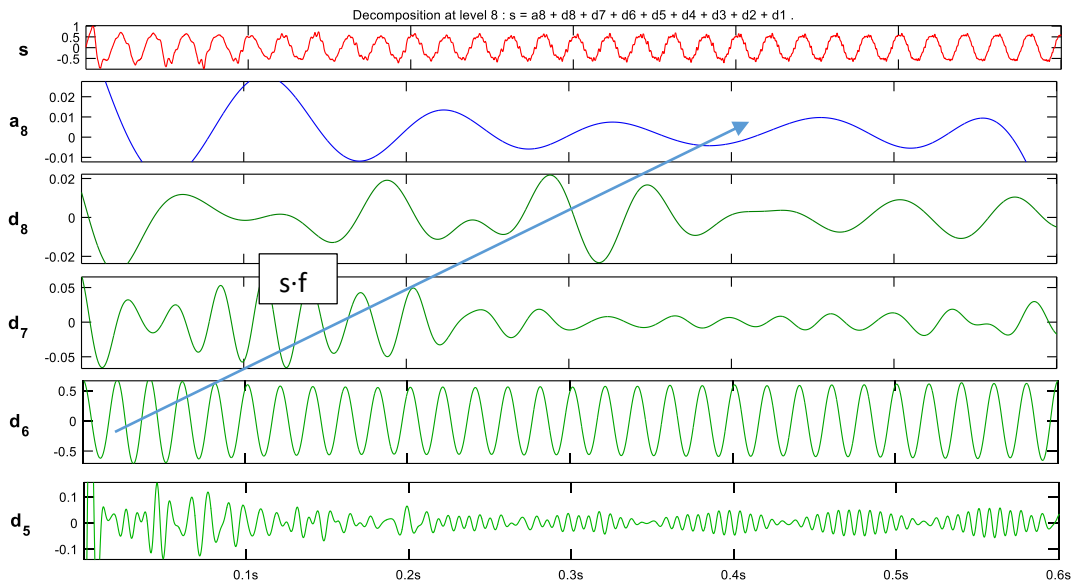


Fig. 78 Señales de descomposición DWT. Desalineación. Sonda en posición B. Flujo mixto.

Se percibe leve presencia de la componente  $s \cdot f$ . Tal y como sucede en el estado sano. La banda  $d_6$  refleja una amplitud y forma de onda prácticamente constante durante todo el arranque, lo cual es indicativo de estado del rotor sano (Figura 78).

$$\gamma_{DWT}(dB) = 10 \cdot \log \left[ \frac{\sum_{j=N_b}^{N_s} EMF_j^2}{\sum_{j=N_b}^{N_s} [d_8(j)]^2} \right] = 33.31 \text{ dB}$$

(ec. 5.17)

### 5.6.2.3 FLUJO RADIAL. RÉGIMEN TRANSITORIO. DESALINEACIÓN CARGA

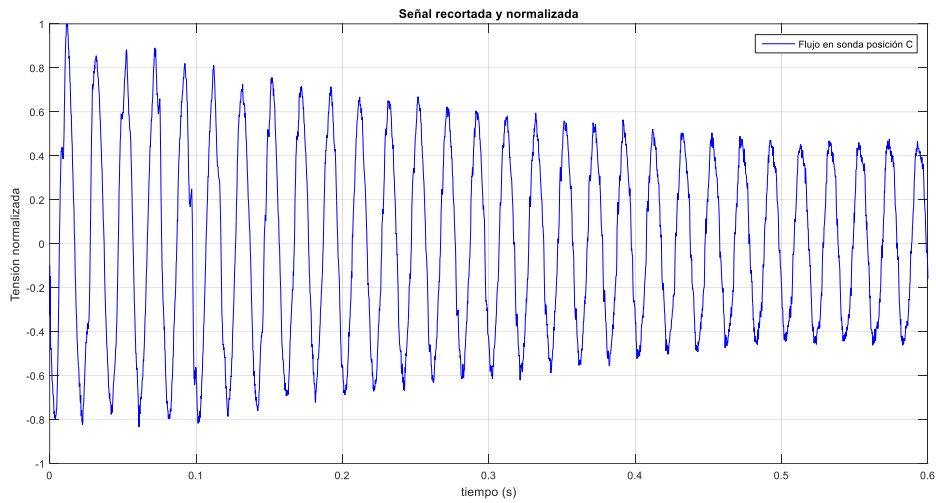


Fig. 79 Evolución del flujo de dispersión radial durante el arranque. Desalineación. Sonda en posición C

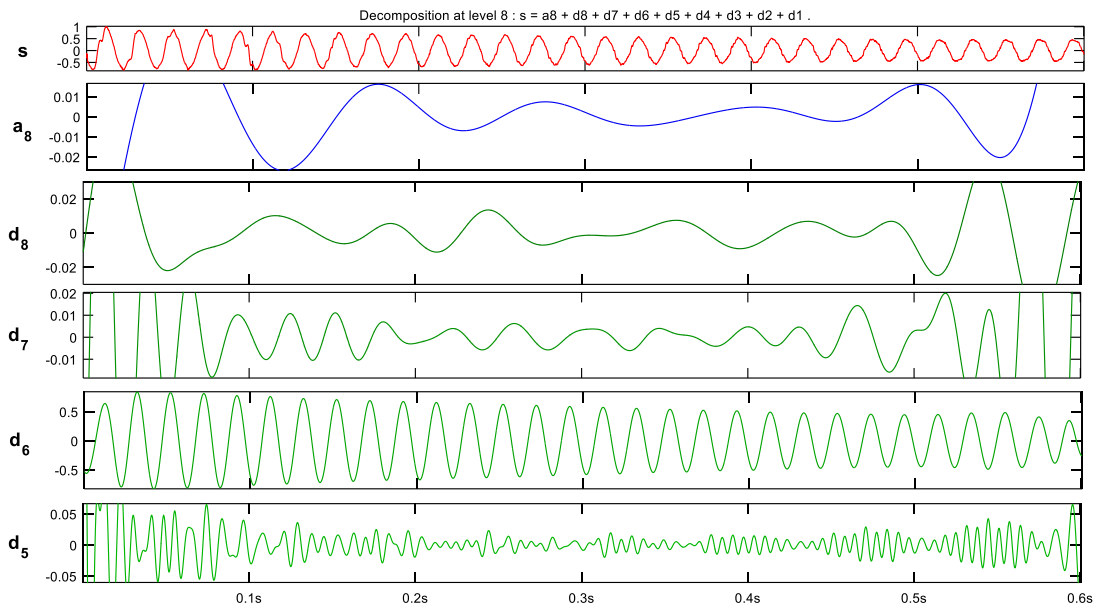


Fig. 80 Señales de descomposición DWT. Desalineación. Sonda en posición C. Flujo radial.

No se detectan patrones de evolución significativos (Figura 80). El coeficiente energético toma valores similares al de estado sano.

$$\gamma_{DWT}(dB) = 10 \cdot \log \left[ \frac{\sum_{j=Nb}^{Ns} EMF_j^2}{\sum_{j=Nb}^{Ns} [d_8(j)]^2} \right] = 29.89 \text{ dB}$$

(ec. 5.18)

## 6 CONCLUSIONES

### 6.1 ANÁLISIS EN RÉGIMEN PERMANENTE

Tras analizar todos los datos obtenidos en los espectros de Fourier para las diferentes averías ensayadas, se obtienen las siguientes tablas de resumen:

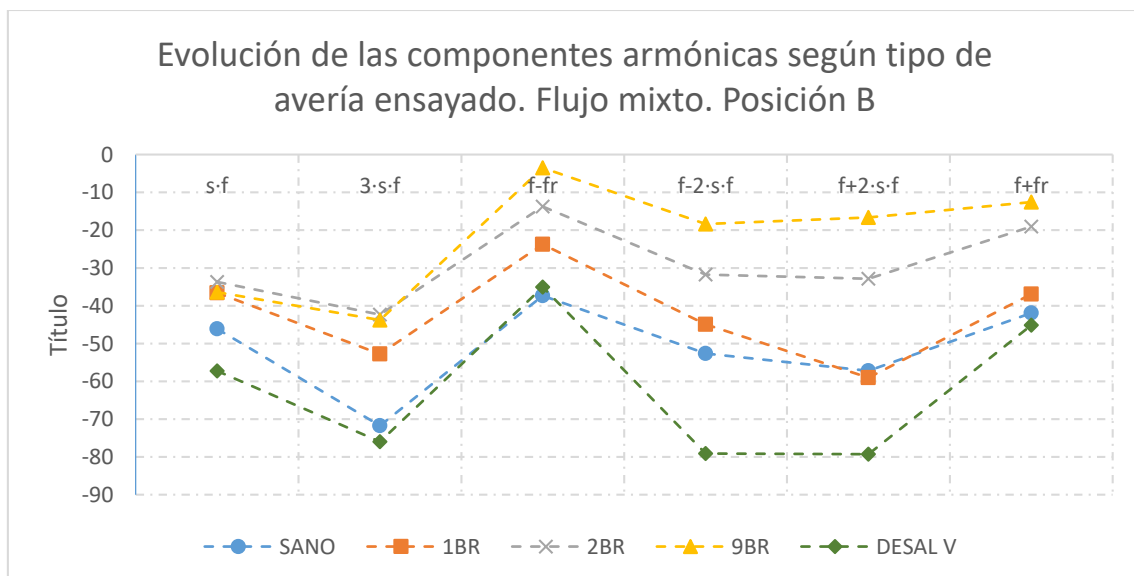
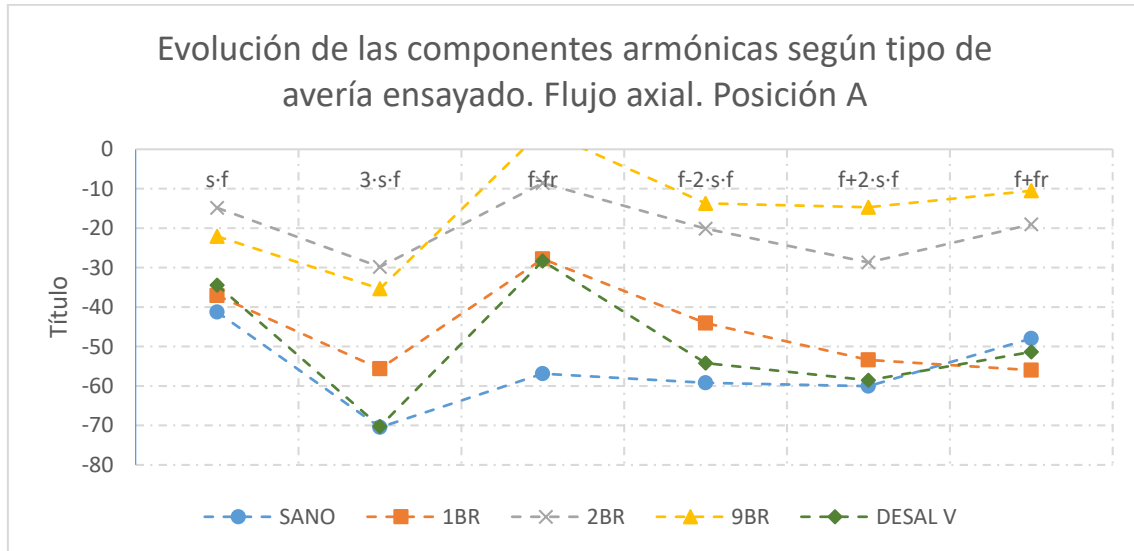
| COMPONENTE | POSICIÓN A                                |        |        |        |         |
|------------|---|--------|--------|--------|---------|
|            | AMPLITUD FRECUENCIAS CARACTERÍSTICAS [dB] |        |        |        |         |
|            | SANO                                      | 1BR    | 2BR    | 9BR    | DESAL V |
| s·f        | -41,25                                    | -37,07 | -14,87 | -22,08 | -34,44  |
| 3·s·f      | -70,47                                    | -55,62 | -29,84 | -35,36 | -70,28  |
| f·fr       | -56,88                                    | -27,82 | -8,564 | 4,813  | -28,34  |
| f·2·s·f    | -59,21                                    | -44,06 | -20,14 | -13,73 | -54,21  |
| f+2·s·f    | -60,05                                    | -53,38 | -28,7  | -14,69 | -58,54  |
| f+fr       | -47,97                                    | -55,99 | -19,06 | -10,51 | -51,36  |

| COMPONENTE | POSICIÓN B                                |        |        |        |         |
|------------|---|--------|--------|--------|---------|
|            | AMPLITUD FRECUENCIAS CARACTERÍSTICAS [dB] |        |        |        |         |
|            | SANO                                      | 1BR    | 2BR    | 9BR    | DESAL V |
| s·f        | -46,13                                    | -36,59 | -33,71 | -36,43 | -57,25  |
| 3·s·f      | -71,75                                    | -52,76 | -42,34 | -43,77 | -75,99  |
| f·fr       | -37,34                                    | -23,73 | -13,75 | -3,509 | -35,06  |
| f·2·s·f    | -52,63                                    | -44,93 | -31,76 | -18,38 | -79,11  |
| f+2·s·f    | -57,22                                    | -59,02 | -32,86 | -16,64 | -79,28  |
| f+fr       | -41,91                                    | -36,91 | -19,03 | -12,55 | -45,12  |

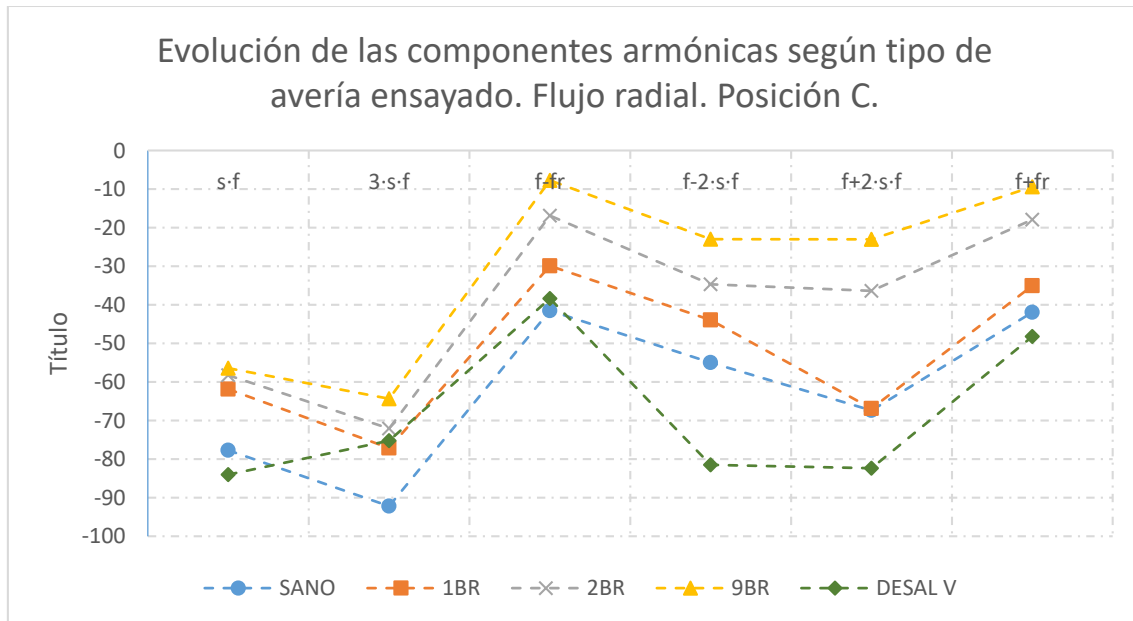
| COMPONENTE | POSICIÓN C                                |        |        |        |         |
|------------|---|--------|--------|--------|---------|
|            | AMPLITUD FRECUENCIAS CARACTERÍSTICAS [dB] |        |        |        |         |
|            | SANO                                      | 1BR    | 2BR    | 9BR    | DESAL V |
| s·f        | -77,72                                    | -61,84 | -58,25 | -56,43 | -84     |
| 3·s·f      | -92,18                                    | -77,12 | -72,08 | -64,34 | -75,23  |
| f·fr       | -41,52                                    | -29,89 | -16,87 | -7,74  | -38,36  |
| f·2·s·f    | -54,95                                    | -43,94 | -34,68 | -22,96 | -81,48  |
| f+2·s·f    | -67,36                                    | -66,86 | -36,37 | -23,02 | -82,35  |
| f+fr       | -41,95                                    | -35,04 | -17,93 | -9,412 | -48,19  |

**Tabla 6: Tablas resumen de amplitud de componentes de avería en régimen permanente**

A partir de las tablas, se elaboran gráficos que muestran la evolución de la magnitud de las diferentes componentes para cada estado y dirección de flujo registrado.







En los gráficos se representa en abscisas cada componente frecuencial estudiada, mostrada en orden creciente de aparición en el espectro de Fourier. En ordenadas el valor en dB de la magnitud de cada componente. Cada serie corresponde únicamente a un tipo de avería.

Partiendo de las magnitudes obtenidas en el caso de motor sano, se observa una progresión en el valor obtenido para las diferentes componentes:

- Componentes axiales  $s·f$  y  $3·s·f$ : Componentes de rotura de barra. Se observa una clara proporcionalidad entre los diferentes grados de avería en el caso de rotura de barras para las tres direcciones de flujo. Se observa una mayor resolución frente a la severidad para el caso del flujo axial, por tanto resulta conveniente el uso de la sonda en posición A para la determinación de rotura de barras mediante estas componentes.
- Componentes  $f±f_r$ : Componentes de excentricidad/desalineación. Estando presentes en las tres direcciones, se ve mejorada su representatividad en las posiciones A y B. Se observa un efecto de potenciación de su magnitud en caso de presencia de rotura de barras. Si en un caso el componente  $f·f_r$  presenta valores elevados junto a valores bajos para las componentes  $s·f$  y  $3·s·f$ , se puede concluir que existe cierto nivel de excentricidad o desalineación con la carga sin riesgo de presencia de rotura de barras.
- Componentes  $f±2·s·f$ : Componentes de rotura de barras con presencia mayoritariamente radial. Ambas componentes tienen buena resolución en las tres direcciones de flujo, por tanto es conveniente evaluar su magnitud en las tres posiciones. Para grados altos de avería se muestran magnitudes elevadas. En el caso de indeterminación, la componente  $f-2·s·f$  (armónico lateral inferior) muestra mejores resultados.

A continuación se propone una tabla de severidad para la aplicación del método:

| AMPLITUD (dB) | COMPONENTES FRECUENCIALES |             |                    |             |                    |             |
|---------------|---------------------------|-------------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|
|               | s·f                       | 3·s·f       | f·fr               | f·2·s·f     | f+2·s·f            | f+fr        |
|               | ROTURA DE BARRAS          | DESAL./EXC. | ROTURA DE BARRAS   | DESAL./EXC. | ROTURA DE BARRAS   | DESAL./EXC. |
| -5            | 5                         | 5           | 5                  | 5           | 5                  | 5           |
| -10           | 5                         | 5           | 4                  | 5           | 5                  | 5           |
| -15           | 4                         | 5           | 4                  | 4           | 5                  | 4           |
| -20           | 4                         | 5           | 3                  | 4           | 4                  | 4           |
| -25           | 4                         | 5           | 3                  | 3           | 4                  | 3           |
| -30           | 3                         | 5           | 2                  | 3           | 4                  | 3           |
| -35           | 3                         | 4           | 2                  | 3           | 3                  | 3           |
| -40           | 2                         | 3           | 2                  | 3           | 3                  | 3           |
| -45           | 1                         | 3           | 2                  | 3           | 3                  | 2           |
| -50           | 1                         | 3           | 2                  | 2           | 3                  | 2           |
| -55           | 1                         | 3           | 2                  | 1           | 3                  | 1           |
| -60           | 1                         | 2           | 2                  | 1           | 2                  | 1           |
| -65           | 1                         | 2           | 1                  | 1           | 1                  | 1           |
| -70           | 1                         | 2           | 1                  | 1           | 1                  | 1           |
| -75           | 1                         | 1           | 1                  | 1           | 1                  | 1           |
| -80           | 1                         | 1           | 1                  | 1           | 1                  | 1           |
| -85           | 1                         | 1           | 1                  | 1           | 1                  | 1           |
| SONDA EN→     | POSICIÓN A                | POS. B/C    | CUALQUIER POSICIÓN | POS. B/C    | CUALQUIER POSICIÓN | POS. B/C    |

**Tabla 7: Tabla de severidad propuesta para análisis de flujo de dispersión**

Nivel 1: Indica un estado general sano, en el que el motor se encuentra correctamente alineado con la carga y no presenta niveles de excentricidad destacables.

Nivel 2: Representa la zona umbral entre el estado sano y la presencia de avería o excentricidad/desalineación severos, en este punto es conveniente ver la tendencia del componente con revisiones periódicas.

Nivel 3: Estado averiado. Presencia de una o más barras rotas para las componentes de rotura de barras o severa excentricidad/desalineación en el caso de componentes  $f \pm f_r$ .

Nivel 4: Estado averiado. Presencia de dos o más barras rotas.

Nivel 5: Estado averiado severo. Presencia de múltiples barras rotas; posible fallo inminente del motor.

## 6.2 ANÁLISIS EN RÉGIMEN TRANSITORIO

Tras analizar los diferentes grados de avería durante el transitorio de arranque, se extraen las siguientes conclusiones:

- Se aprecia la presencia de evoluciones de las componentes  $s:f$  en las todas las averías simuladas para el flujo axial. Se extrae, por tanto, que además de ser una componente de rotura de barra, también muestra sensibilidad para el caso de excentricidad/desalineación, siendo más sensible al fenómeno de rotura de barras.
- Cuando se percibe la presencia de la componente de rotura de barras  $f\cdot 2\cdot s:f$  en la posición de flujo mixto, dicha componente enmascara la evolución de la componente  $s:f$ .
- Se observa claramente la evolución de la componente  $3\cdot s:f$  en el flujo axial para los casos de rotura de barras, no estando presente en el caso de motor sano y/o con excentricidad/desalineación. Por tanto la presencia de la evolución de dicha componente es un buen indicador de rotura de barras.
- Existe presencia de la evolución de la componente  $f\cdot 2\cdot s:f$  en el flujo mixto y en el radial únicamente para los casos en los que existe rotura de barras. Por tanto se extrae como componente indicadora de rotura de barras.
- Pese a ser caracterizada en la literatura como componente mayoritariamente radial, se percibe la evolución de la componente  $f\cdot f_i$  únicamente en la posición A para el caso de desalineación con la carga.

|               |       | POSICIÓN A         |       |       |         |  |
|---------------|-------|--------------------|-------|-------|---------|--|
|               |       | $\gamma$ _DWT [dB] |       |       |         |  |
| SEÑAL WAVELET | SANO  | 1BR                | 2BR   | 9BR   | DESAL V |  |
| d_8           | 29,87 | 24,31              | 17,51 | 17,57 | 33,02   |  |

|               |       | POSICIÓN B         |       |      |         |  |
|---------------|-------|--------------------|-------|------|---------|--|
|               |       | $\gamma$ _DWT [dB] |       |      |         |  |
| SEÑAL WAVELET | SANO  | 1BR                | 2BR   | 9BR  | DESAL V |  |
| d_8           | 31,42 | 19,17              | 17,81 | 22,6 | 33,31   |  |

|               |      | POSICIÓN C         |       |       |         |  |
|---------------|------|--------------------|-------|-------|---------|--|
|               |      | $\gamma$ _DWT [dB] |       |       |         |  |
| SEÑAL WAVELET | SANO | 1BR                | 2BR   | 9BR   | DESAL V |  |
| d_8           | 30,9 | 29,66              | 27,58 | 22,58 | 28,89   |  |

**Tabla 8: Tablas de resumen de coeficiente energético basado en la señal Wavelet d8 para análisis en régimen transitorio**

- Para el indicador energético propuesto, se obtienen valores significativos en los casos de rotura de barra para las posiciones A y B de la sonda, siendo las diferencias más contenidas para la posición C.
- Los valores de amplitud para cada una de las posiciones de la sonda en el caso de máquina sana se mantienen bastante constantes entorno a un valor de 30dB.
- En el caso de desalineación no se obtiene gran diferencia con el estado de rotor sano, debido a la baja interacción de las componentes sobre la banda de la señal d8. Por ello, se puede proponer de un indicador alternativo para la detección de este fallo basado en el análisis de la señal d7 desde el tiempo  $t=0,3s$  hasta  $t=0,6s$ , el cual, de forma comparativa para todos los casos quedaría:

| POSICIÓN A                      |      |       |       |      |         |
|---------------------------------|------|-------|-------|------|---------|
| $\gamma$ _DWT Desalineación[dB] |      |       |       |      |         |
| SEÑAL WAVELET                   | SANO | 1BR   | 2BR   | 9BR  | DESAL V |
| d_7                             | 29,9 | 24,92 | 13,68 | 2,48 | 24,51   |

| POSICIÓN B                      |       |       |      |      |         |
|---------------------------------|-------|-------|------|------|---------|
| $\gamma$ _DWT Desalineación[dB] |       |       |      |      |         |
| SEÑAL WAVELET                   | SANO  | 1BR   | 2BR  | 9BR  | DESAL V |
| d_7                             | 34,47 | 18,31 | 13,6 | 5,92 | 32,9    |

| POSICIÓN C                      |       |       |       |      |         |
|---------------------------------|-------|-------|-------|------|---------|
| $\gamma$ _DWT Desalineación[dB] |       |       |       |      |         |
| SEÑAL WAVELET                   | SANO  | 1BR   | 2BR   | 9BR  | DESAL V |
| d_7                             | 22,46 | 18,69 | 18,13 | 7,89 | 20,5    |

**Tabla 9: Tablas de resumen de coeficiente energético propuesto basado en la señal Wavelet d7 para detección de excentricidad/desalineación mediante análisis en régimen transitorio**

De esta forma se centra la evaluación entorno al punto donde la componente de desalineación  $f \cdot f_r$  entra en la banda d7. Los descensos en el valor del indicador energético para los casos de rotura de barra son debidas a la gran influencia de los pasos de las componentes  $3 \cdot s \cdot f$  y  $f \cdot (1-2s)$  por dicha banda.

Se constata la efectividad de este indicador energético para la verificación de la presencia de desalineación/excentricidades para las tres posiciones de la sonda, donde las diferencias con respecto al estado sano son perceptibles.





## 7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Serrano Irirbarneay L., Martínez Román J. "Máquinas Eléctricas". 1ª ed. Valencia: UPV; 2013.
- [2] 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.
- [3] Riera Guasp M., Antonino Daviu J. A., Pineda Sánchez M., Puche Panadero R., Pérez Cruz J. "A general approach for the transient detection of slip dependent fault components based on the discrete wavelet Transform". IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol 55, nº 12, 2008.
- [4] R. Romary, R. Pusca, J. P. Lecointe and J. F. Brudny, "Electrical machines fault diagnosis by stray flux analysis," 2013 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD), Paris, 2013, pp. 247-256.
- [5] J. A. Ramirez-Nunez et al., "Evaluation of the Detectability of Electromechanical Faults in Induction Motors Via Transient Analysis of the Stray Flux," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 54, no. 5, pp. 4324-4332, Sept.-Oct. 2018.
- [6] J. Antonino-Daviu, A. Quijano-López, V. Climente-Alarcon and H. Razik, "Evaluation of the detectability of rotor faults and eccentricities in induction motors via transient analysis of the stray flux," 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Cincinnati, OH, 2017, pp. 3559-3564.
- [7] W. T. Thomson and M. Fenger, "Current signature analysis to detect induction motor faults," in *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 7, no. 4, pp. 26-34, July-Aug. 2001. doi: 10.1109/2943.930988
- [8] I. Chernyavska and O. Vitek, "Analysis of broken rotor bar fault in a squirrel-cage induction motor by means of stator current and stray flux measurement," 2016 *IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*, Varna, 2016, pp.532-537. doi: 10.1109/EPEPEMC.2016.7752052
- [9] I. Ishkova and O. Vitek, "Analysis of induction motor faults by means of monitoring the current and magnetic flux density spectrums," 2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Anacapri, 2016, pp. 611-616. doi: 10.1109/SPEEDAM.2016.7525861
- [10] C. Harlişca, L. Szabó, L. Frosini and A. Albin, "Diagnosis of rolling bearings faults in electric machines through stray magnetic flux monitoring," 2013 8TH INTERNATIONAL



- SYMPOSIUM ON ADVANCED TOPICS IN ELECTRICAL ENGINEERING (ATEE), Bucharest, 2013, pp. 1-6. doi: 10.1109/ATEE.2013.6563406
- [11] W. T. Thomson and M. Fenger, "Current signature analysis to detect induction motor faults," in *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 7, no. 4, pp. 26-34, July-Aug. 2001. doi: 10.1109/2943.930988
- [12] M. Riera-Guasp, J. A. Antonino-Daviu, M. Pineda-Sanchez, R. Puche-Panadero and J. Perez-Cruz, "A General Approach for the Transient Detection of Slip-Dependent Fault Components Based on the Discrete Wavelet Transform," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 12, pp. 4167-4180, Dec. 2008. doi: 10.1109/TIE.2008.2004378
- [13] H. Cherif, A. Menacer, R. Romary and R. Pusca, "Dispersion field analysis using discrete wavelet transform for inter-turn stator fault detection in induction motors," 2017 IEEE 11th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), Tinos, 2017, pp. 104-109. doi: 10.1109/DEMPED.2017.8062341
- [14] L. Ishkova and O. Vitek, "Detection and classification of faults in induction motor by means of motor current signature analysis and stray flux monitoring," *Przeglad Elektrotechniczny*, vol. R.92, no. 4, pp. 166–170, 2016
- [15] A. Ceban, R. Pusca and R. Romary, "Study of Rotor Faults in Induction Motors Using External Magnetic Field Analysis," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 5, pp. 2082-2093, May 2012. doi: 10.1109/TIE.2011.2163285
- [16] C. Verucchi, J. M. Bossio, G. B. Bossio, and G. Acosta, "Misalignment detection in induction motors with flexible coupling by means of estimated torque analysis and MCSA," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 80, pp. 570–581, Dec. 2016.
- [17] S. Karmakar et al., *Induction Motor Fault Diagnosis*, Power Systems, Springer Science+Business Media Singapore 2016 DOI 10.1007/978-981-10-0624-1\_2
- [18] A. Nourmohammadi, M. H. Asteraki, S. M. H. Feiz and M. Habibi, "A Generalized Study of Coil-Core-Aspect Ratio Optimization for Noise Reduction and SNR Enhancement in Search Coil Magnetometers at Low Frequencies," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 11, pp. 6454-6459, Nov. 2015. doi: 10.1109/JSEN.2015.2461432
- [19] A. Grosz and E. Paperno, "Analytical Optimization of Low-Frequency Search Coil Magnetometers," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 12, no. 8, pp. 2719-2723, Aug. 2012. doi: 10.1109/JSEN.2012.2202179
- [20] <https://refrigeraciondesdecasa.blogspot.com/2018/01/motores-con-rotor-bobinado-o-anillos.html>



[21] <http://www.trafomotor.com/wp-content/uploads/2012/08/Imagen-estator-rotor2.jpg>







# ANEXO

## ENSAYOS Y COMPARATIVA DE SONDAS





## A1. INTRODUCCIÓN

Inicialmente se realizan medidas con una sonda artesanal existente en laboratorio. Se constata cierto nivel de degradación en la misma, al presentarse ruido en el espectro de Fourier para cualquier posición de medida.

En la literatura se encuentran publicaciones acerca de la optimización de la sensibilidad de sondas basadas en bobinas, donde además se clasifican los ruidos en la medida según dos orígenes.

Por una parte, ruido electromagnético en general, que puede ser originado por elementos o máquinas cercanas al lugar de medida. Por otra parte, se constata la presencia de ruido con origen térmico, debido al calentamiento de las espiras por efecto Joule.

En [18] y [19] se proporcionan soluciones de optimización de la sensibilidad y reducción del ruido basados en la relación de masas entre el cobre del bobinado y el material ferromagnético del núcleo, proponiendo además el uso de amplificadores de señal basados en electrónica analógica.

Dicho procedimiento no es de aplicación en el método actual de medida del flujo de dispersión debido al nivel relativamente bajo de campo magnético en el exterior de la envolvente de los motores, que se vería alterado en su distribución en el caso del uso de concentradores de flujo (ya sean de núcleo de bobina, como de disco).

Partiendo de la fuerza electromotriz inducida para una bobina cuyo núcleo es aire ( $\mu_r = 1$ ), la idea tomada para solucionar los problemas con la sonda actual se basa en las siguientes características:

- a) Interacción del efecto Joule sobre la medida obtenida mediante la variación de la sección del hilo de cobre esmaltado empleado (0,1 mm, 0,2 mm o 0,3 mm de diámetro) De esta forma se producen variaciones de la resistencia inherente al bobinado.

$$\widehat{fem} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot N \cdot S \cdot \hat{B}$$

- b) Variación de la superficie efectiva de la sonda así como del número de espiras de la misma. De esta forma se obtienen aumentos proporcionales sobre el nivel de tensión inducida.

La sonda de partida del laboratorio dispone de las siguientes características:

-N=1000 espiras

-Diámetro interior= 39mm

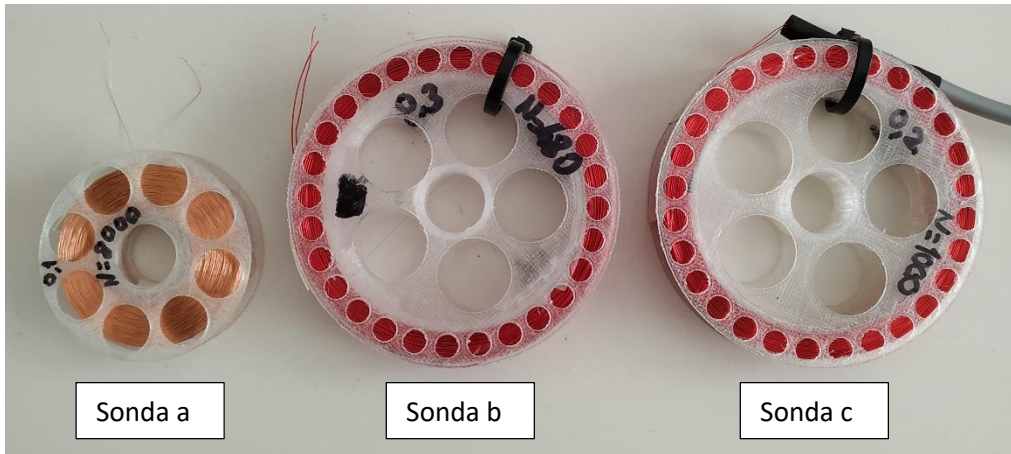
Los niveles de tensión de pico para motor en vacío son:

-Posición A: 59 mVp. ( $\hat{B} \approx 125 T$ )

-Posición B: 180 mVp ( $\hat{B} \approx 380 T$ )

-Posición C: 63 mVp ( $\hat{B} \approx 134 T$ )

Se decide fijar el formato de la sonda en cuanto a dimensiones exteriores, de forma que no sean superiores a las de partida. Por ello se construyen las siguientes sondas:



*Imagen 1 Sondas construidas en laboratorio.*

Sonda a: Diámetro interior 22mm. Hilo de cobre de 0,1mm. N= 8000 espiras.

Sonda b: Diámetro interior 62mm. Hilo de cobre de 0,3mm. N=480 espiras.

Sonda c: Diámetro interior 62mm. Hilo de cobre de 0,2mm. N=1000 espiras.

## A2. ENSAYOS Y COMPARATIVA

En ciertos análisis resulta imprescindible la medida con el motor en vacío. Dicho estado de carga profiere los niveles más bajos de flujo de dispersión.

Por ello se compara el comportamiento de cada sonda en ensayos de régimen permanente con el motor desacoplado de la carga.

Adicionalmente, en vacío se obtienen valores de deslizamiento  $s$  muy bajos, pudiendo evaluar la reproductividad de cada sonda de las componentes dependientes del deslizamiento.

Se obtienen los siguientes resultados para análisis en régimen permanente y máquina en vacío:

### POSICIÓN A

En la posición A se induce un nivel de tensión similar en las sondas a y c, con valores de pico cercanos a 150mV para máquina descargada, quedando la sonda b con un valor de pico en torno a la mitad que las anteriores (75mV).

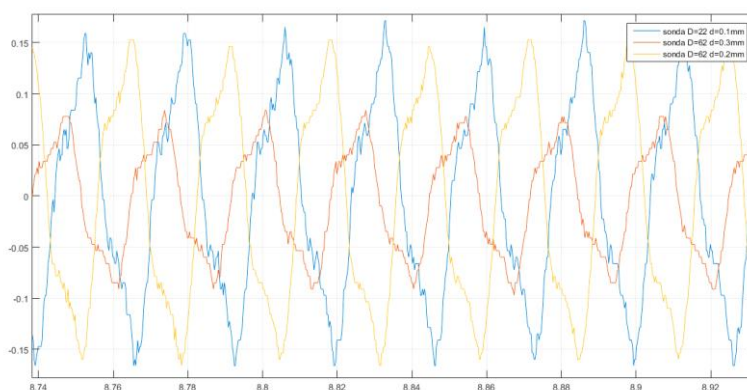


Imagen 2 Señal en régimen permanente. Posición A. Flujo axial.

Se observa buen contraste en componentes para toda la banda 0-1000Hz para las sondas a y c, perdiendo dicha situación a partir de los 700 Hz en la sonda b.

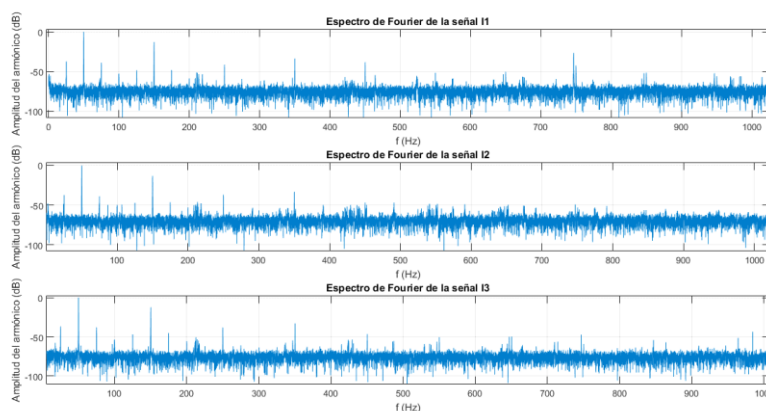


Imagen 3 Espectro de Fourier. Posición A. Flujo axial.

Se constata un aumento en la amplificación para las componentes de muy baja frecuencia en la sonda c.

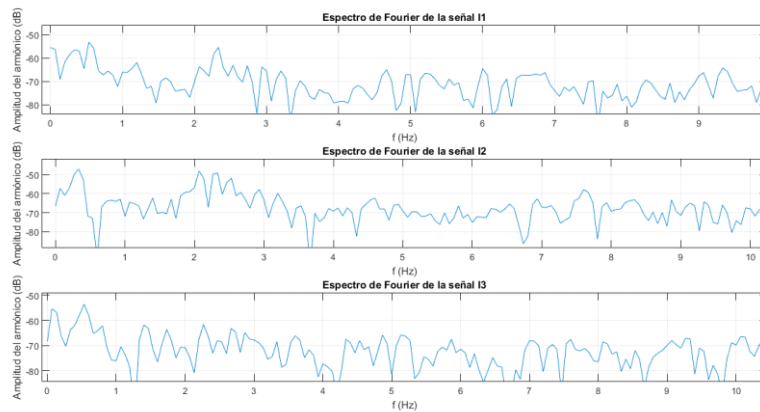


Imagen 4 Detalle de muy baja frecuencia del espectro. Posición A. Flujo axial.

## POSICIÓN B

En la posición B, donde el la inducción magnética es mayor, debido a la captación de flujo mixto y por la proximidad de la sonda a la envolvente del motor, la sonda c muestra un nivel muy superior de tensión de pico (450mV), frente a los 150mV y 80mV para las sondas a y b respectivamente.

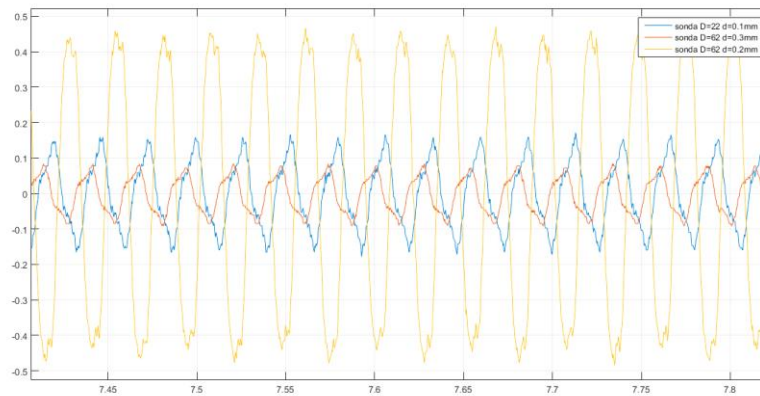


Imagen 5 Señal en régimen permanente. Posición B. Flujo mixto.

De nuevo se observa una correspondencia espectral entre las sondas a y c para toda la banda, y una pérdida de resolución a partir de los 700Hz para la sonda b.

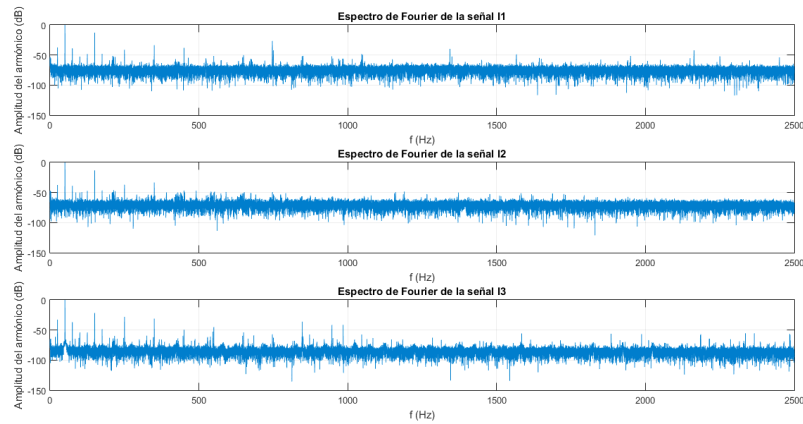


Imagen 6 Espectro de Fourier. Posición B. Flujo mixto.

Se observa mayor nivel de amplificación para los armónicos de muy baja frecuencia para la sonda b.

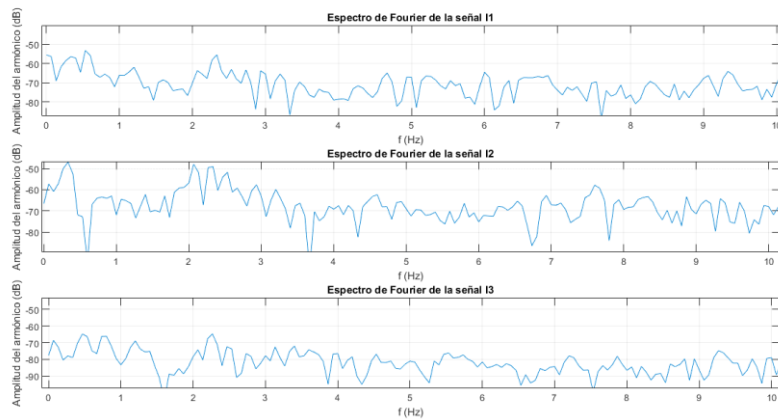


Imagen 7 Detalle de muy baja frecuencia del espectro. Posición B. Flujo mixto.



## POSICIÓN C

Para la Posición C de la sonda, se observan niveles de tensión similares a los observados en la posición A. (150mV a y c, 75mV b).

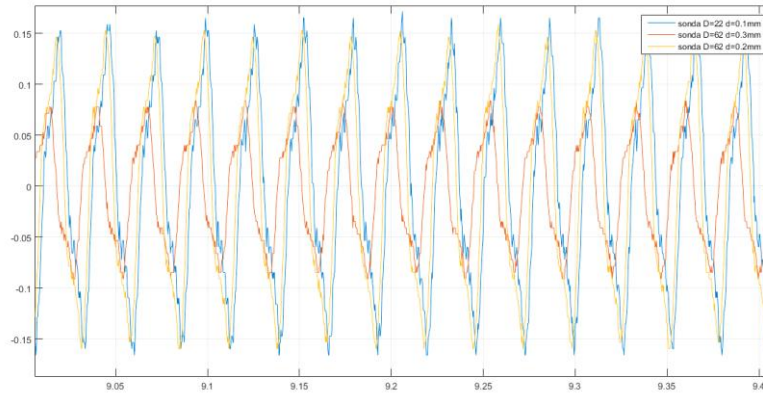


Imagen 8 Señal en régimen permanente. Posición C. Flujo radial.

Existe correspondencia entre los espectros de las sondas a y c.

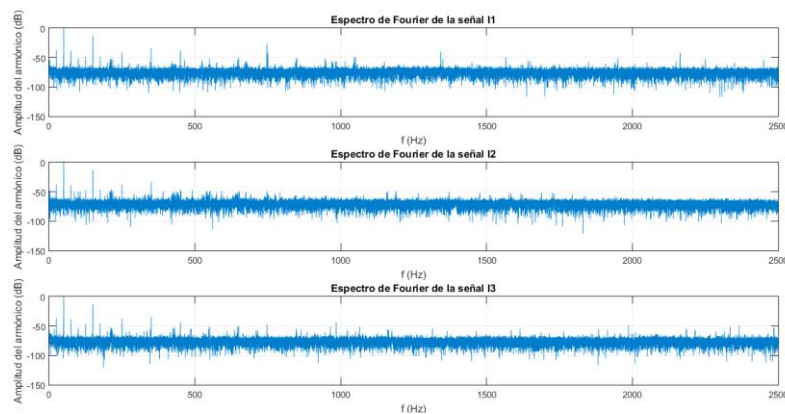


Imagen 9 Espectro de Fourier. Posición C. Flujo radial.

Nuevamente la sonda b registra mejores niveles de amplificación para la banda de muy baja frecuencia.

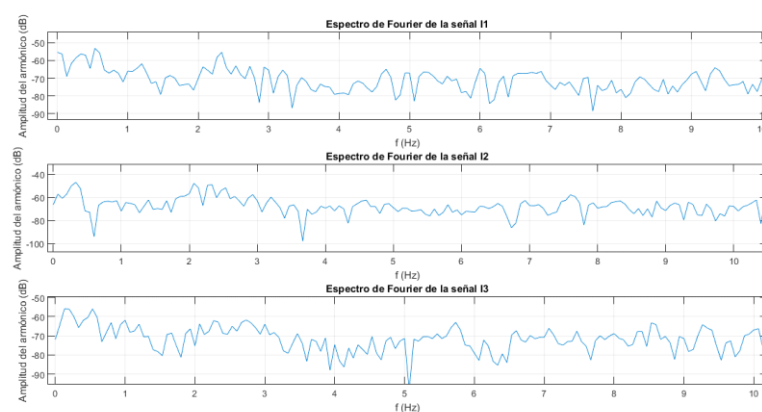


Imagen 10 Detalle de muy baja frecuencia del espectro. Posición C. Flujo radial.



### **A3. SELECCIÓN DE LA SONDA**

Tras evaluar la respuesta en cada posición para las tres sondas construidas, se decide utilizar la **sonda c** por las siguientes razones:

- Mayor nivel de tensión en todas las posiciones. Para su uso sin etapa de amplificación resulta fundamental disponer de niveles de tensión razonables. En el caso de quipos de medida con baja resolución (en torno a 10mV) se puede perder información de la señal.
- Reproductividad de los componentes para toda la banda de frecuencias. Para una frecuencia de muestreo de 5ks/s, según el teorema de Nyquist se puede medir hasta los 2500Hz, banda donde la sonda reproduce componentes para las tres posiciones de medida.
- Frente a la sonda a, cuyo hilo es de 0,1mm de diámetro, el hilo de 0,2mm de diámetro presenta la rigidez suficiente como para conformar la bobina con facilidad, así como soldar los extremos para llevarlos a conector BNC. Dicha característica confiere además mayor durabilidad a la sonda.
- Se comprueba que su mayor superficie de captación no afecta negativamente al espectro de la señal (en forma de ruido). Con ello se evita la posibilidad de que exista variación en la medida debido a la posición exacta de la sonda en el exterior del motor para cada ensayo.

Para los parámetros de medida de los ensayos, no se ha constatado influencia del efecto Joule sobre las diferentes secciones de hilo, quedando dicho efecto relegado a niveles de inducción y temperatura exterior de la sonda mucho más elevados.

Se achaca el fallo presentado en la sonda original de laboratorio a la deficiencia en la conexión interna entre los terminales de la bobina y el cable coaxial de salida.





# PRESUPUESTO





Para elaborar el presupuesto se ha optado por el enfoque de un proyecto pionero desarrollado en el marco de una empresa dedicada al mantenimiento de motores eléctricos en general que tiene intención de incorporar el mantenimiento predictivo por análisis del flujo de dispersión a su abanico de servicios ofertados.

Se consideran unos gastos generales del 12% y un beneficio industrial del 6%.

Para la elaboración de la lista de precios unitarios se han considerado unos precios por hora y por desplazamiento que se corresponden con un valor orientativo que se podría encontrar actualmente en la industria (2018):

- Precio por hora de diseño mediante software 3D: 25 €
- Precio por hora de impresión aditiva en PLA: 20€
- Precio por hora de ensayos en laboratorio: 32€
- Precio por informe de estado de motor (<30kW): 10€
- Precio por informe de estado de motor (30kW<P<150kW): 50€
- Precio por km de desplazamiento: 0,4€

Se hace diferenciación con respecto al rango de potencias de cada motor, por la relación creciente entre el tamaño del motor inspeccionado y el eventual coste de la avería y su repercusión sobre el proceso de producción al que afectaría una parada no prevista del motor.



## PRESUPUESTO

| Código      | Descripción   | Uds. | Medición     | Precio       | Importe         |
|-------------|---|------|--------------|--------------|-----------------|
| <b>DIS</b>  | <b>DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE SONDAS</b>  |      |              |              |                 |
| DIS.01      | h Diseño con SolidWorks<br><br>Diseño de envolvente de sondas, así como soporte modular específico. Incluido conversión a sólido en formato .stl para su posterior impresión. Se entregan los archivos únicamente en formato .stl no editable.  | h    |              |              |                 |
|             | <b>Total partida DIS.01</b>   |      | <b>7,00</b>  | <b>25,00</b> | <b>175,00</b>   |
| DIS.02      | h Impresión aditiva en PLA<br><br>incluida la programación en código G mediante software específico de slicing. Incluido material de impresión. Poliacido Láctico. Incluido el desbarbado final.  | h    |              |              |                 |
|             | <b>Total partida DIS.02</b>   |      | <b>15,00</b> | <b>20,00</b> | <b>300,00</b>   |
|             | <b>Total capítulo 1</b>   |      |              |              | <b>475,00</b>   |
| <b>INV</b>  | <b>MEDICIÓN EN LABORATORIO</b>  |      |              |              |                 |
| INV.01      | h De medición de ensayos<br><br>Incluido el registro y análisis de los datos obtenidos. Incluido el alquiler de osciloscopio marca Yokogawa modelo DL850 y una unidad de pinza amperimétrica marca Fluke modelo i3000s FLEX.  | h    |              |              |                 |
|             | <b>Total partida INV.01</b>   |      | <b>46,00</b> | <b>32,00</b> | <b>1.472,00</b> |
|             | <b>Total capítulo 2</b>   |      |              |              | <b>1.472,00</b> |
| <b>PRED</b> | <b>INFORME DE EVALUACIÓN</b>  |      |              |              |                 |
| PRED.01     | ud Informe del estado del motor (hasta 30kW)<br><br>Incluye la redacción y presentación de informe completo de una unidad de motor evaluado en industria. Incluye la adhesión a una base de datos interna para fines de seguimiento del estado del motor. No se incluye desplazamiento.   | ud   |              |              |                 |
|             | <b>Total partida PRED.01</b>  |      | <b>0,00</b>  | <b>10,00</b> | <b>0,00</b>     |
| PRED.02     | ud Informe del estado del motor (30kW<P<150kW)<br><br>Incluye la redacción y presentación de informe completo de una unidad de motor evaluado en industria. Incluye la adhesión a una base de datos interna para fines de seguimiento del estado del motor. No se incluye desplazamiento. | ud   |              |              |                 |
|             | <b>Total partida PRED.02</b>  |      | <b>0,00</b>  | <b>50,00</b> | <b>0,00</b>     |
| PRED.99     | km Desplazamiento a industria<br><br>Incluye desplazamiento y dietas para mantenimientos predictivos en empresas ubicadas dentro de los 400km de distancia a la ciudad de Valencia.   | km   |              |              |                 |
|             | <b>Total partida PRED.03</b>  |      | <b>0,00</b>  | <b>0,40</b>  | <b>0,00</b>     |
|             | <b>Total capítulo 3</b>   |      |              |              | <b>0,00</b>     |



|                          |                 |
|--------------------------|-----------------|
| <b>Total presupuesto</b> | <b>1.947,00</b> |
| 12% Gastos Generales     | 233,64          |
| 6% Beneficio industrial  | 116,82          |
| <b>Presupuesto Bruto</b> | <b>2.297,46</b> |
| 21% I.V.A.               | 482,47          |
| <b>Presupuesto Total</b> | <b>2779,93</b>  |

Asciende el presente Presupuesto Total a la cantidad de dos mil setecientos setenta y nueve euros con noventa y tres céntimos (2779,93€)

En Valencia a 9 de Enero de 2019

\_\_\_\_\_  
Firma del cliente