



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Eléctrica

**ESTUDIO SOBRE LA VIABILIDAD DE LOS
ESTADÍSTICOS DE ORDEN SUPERIOR DE
LA CORRIENTE DE ALIMENTACIÓN COMO
INDICADORES PARA DETERMINAR EL
ESTADO DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN**

Autor:

de la Rosa López, Rubén

Tutores:

Moriñigo Sotelo, Daniel

Martín Díaz, Ignacio

Dto. Ingeniería Eléctrica

Valladolid, Julio y 2015.

AGRADECIMIENTOS

Desde estas líneas quiero manifestar mi más sincero agradecimiento a las siguientes personas:

A mis padres Antonio y Mercedes y mi hermana Raquel, me habéis enseñado a ser fuerte y ver con optimismo la vida. Gracias por vuestro sacrificio, paciencia y cariño a lo largo de toda mi vida.

A todas esas personas, quien no pueden acompañarme en estos momentos, pero que allí donde estén espero que se sientan orgullosos de mis logros.

A mis tíos y primos, que siempre me han apoyado en todos los momentos, sean bueno o malos.

A mis amigos, por ser a veces mis consejeros y hacerme ver siempre las cosas desde otro punto de vista.

Al Dpto. Ingeniería Eléctrica por su cercanía y forma de transmisión de conocimientos, porque gracias a ellos, han conseguido despertar en mí el interés en esta rama de la ingeniería consiguiendo tener una formación continua en las nuevas tecnologías y especialmente en el sector renovable.

A mi director y co-director, Daniel e Ignacio, cuya importancia ha sido vital para el desarrollo des mismo, así como consejos, esfuerzos y dedicación.

Gracias a todos por haberme ayudado a conseguir cumplir esta meta,
porque los sueños en esta vida a veces se cumplen,
tan solo tienes que luchar por ellos.

RESUMEN

El motor inducción es el más empleado en la industria. Aunque es una máquina robusta, los gastos asociados a su mantenimiento son elevados. La técnica más extendida para la detección de fallos y su diagnóstico suele ser el análisis de vibraciones, pero la monitorización de la corriente del estator está empezando a extenderse por las ventajas que presenta el uso no invasivo de un sensor de corriente. Para realizar una correcta detección, normalmente no basta con un único indicador. En ambas técnicas se pueden emplear estadísticos de orden superior calculados sobre la onda temporal, pero no hay un estudio que indique como cambian en función del estado del motor. En este TFG se plantea un estudio con señales sintéticas, cuya generación se basa en valores experimentales, que permitan determinar si estos estadísticos tienen capacidad para detectar el fallo de barras en motores de inducción.

Palabras clave: motor de inducción, técnicas, análisis corriente, fallos , estadísticos de orden superior.

Índice

AGRADECIMIENTOS	3
RESUMEN	5
Índice	7
Capítulo 1: Introducción	11
1.1. JUSTIFICACIÓN	13
1.2. OBJETIVOS	15
1.2.1. OBJETIVOS PRINCIPALES	15
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
1.3. DESARROLLO DE LA MEMORIA.....	17
Capítulo 2: Motor de Inducción	19
2.1. INTRODUCCIÓN	21
2.2. CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS	21
2.2.1. ESTATOR DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN	22
2.2.2. ROTOR DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN	23
2.3. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO	24
2.3.1. CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMIENTO	27
2.4. LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DEL COMPORTAMIENTO DE LAS MÁQUINAS ASÍNCRONAS.....	29
2.5. VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN 30	
Capítulo 3: Fallos en los motores de inducción	31
3.1. INTRODUCCIÓN	33
3.2. FIABILIDAD DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN.....	33
3.2.1. INTRODUCCIÓN	33
3.3. CAUSAS Y ANÁLISIS DE FALLOS EN EL ESTATOR.	34
3.3.1. FACTORES TÉRMICOS.....	34

3.3.2.	FACTORES ELÉCTRICOS.	36
3.3.3.	FACTORES MECÁNICOS.	37
3.3.4.	FACTORES AMBIENTALES.	38
3.4.	ANÁLISIS DE FALLOS EN EL BOBINADO.	38
3.5.	CAUSAS Y ANÁLISIS DE FALLOS EN EL ROTOR.	40
3.5.1.	FACTORES TÉRMICOS.	41
3.5.1.1.	ROTURA DE BARRA(S) EN MOTORES DE INDUCCIÓN.	43
3.5.2.	FACTORES MAGNÉTICOS.	46
3.5.3.	FACTORES RESIDUALES.	46
3.5.4.	FACTORES DINÁMICOS.	46
3.5.5.	FACTORES AMBIENTALES.	47
3.5.6.	FACTORES MECÁNICOS.	47
3.6.	AVERÍAS EN LOS RODAMIENTOS Y EJE.	48
3.6.1.	RODAMIENTOS EN MOTORES DE INDUCCIÓN.	49
3.6.1.1.	FALLO EN RODAMIENTOS	51
3.6.2.	EXCENRICIDAD EN MOTORES DE INDUCCIÓN.	52
3.6.2.1.	EXCENRICIDAD ESTÁTICA	52
3.6.2.2.	EXCENRICIDAD DINÁMICA.	53
3.6.2.3.	EXCENRICIDAD MIXTA.	54
3.6.2.4.	FALLO DEBIDO A EXCENRICIDAD ROTÓRICA.	54
Capítulo 4: Técnicas de mantenimiento en la Industria		57
4.1.	INTRODUCCIÓN	59
4.2.	MANTENIMIENTO DE MOTORES DE INDUCCIÓN	59
4.2.1.	OBJETIVOS DEL MANTENIMIENTO DE MOTORES DE INDUCCIÓN.	59
4.2.2.	FUNCIONES DEL MANTENIMIENTO DE MOTORES DE INDUCCIÓN	60
4.3.	ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO EN MOTORES DE INDUCCIÓN 61	
4.3.1.	MANTENIMIENTO REGRESIVO	62
4.3.2.	MANTENIMIENTO REACTIVO Ó CORRECTIVO	63
4.3.3.	MANTENIMIENTO PREVENTIVO.	64
4.3.4.	MANTENIMIENTO PREDICTIVO.	65
4.3.5.	MANTENIMIENTO PROACTIVO	69
4.3.6.	NUEVAS ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO	69

4.3.6.1. MANTENIMIENTO BASADO EN LA FIABILIDAD (RCM).....	69
4.3.6.2. ANÁLISIS DE MODOS DE FALLO Y EFECTOS (AMFE)	71
4.3.6.3. MANTENIMIENTO PRODUCTIVO TOTAL (TPM).....	74
Capítulo 5: Análisis de señales en el dominio de la frecuencia.....	77
5.1. INTRODUCCIÓN	79
5.2. CLASIFICACIÓN DE SEÑALES	79
5.3. ANÁLISIS DE SEÑALES.....	82
5.3.1. TRANSFORMADA DE FOURIER	82
5.3.2. TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER (DFT)	83
5.3.3. TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER	86
5.4. MUESTREO DE SEÑALES.....	88
5.4.1. LIMITACIONES DEL MUESTREO DE SEÑALES.....	89
Capítulo 6: Desarrollo de un modelo sintético de señales	99
6.1. INTRODUCCIÓN AL MODELO	101
6.1.1. ¿QUÉ ES UN MODELO SINTÉTICO?	101
6.1.2. PARA QUÉ SIRVE UN MODELO SINTÉTICO	101
6.1.3. CÓMO SE HA DESARROLLADO EL MODELO SINTÉTICO.....	101
6.2. DESARROLLO DEL MODELO SINTÉTICO.....	102
6.2.1. INTRODUCCIÓN DE ARMÓNICOS EN LA SEÑAL DE CORRIENTE DE 102	
6.2.2. APARICIÓN DE ARMÓNICOS DE LA CORRIENTE DEL ESTATOR DEBIDO A LA PREENCIA DE FALLO EN: ROTOR, COJINETES, ETC.....	104
6.3. GENERACIÓN DE RUIDO EN LA SEÑAL.....	105
6.3.1. RUIDO BLANCO.	105
6.3.2. RESULTADO DE LA APARICIÓN DE RUIDO BLANCO EN LA SEÑAL	105
6.4. APLICACIÓN EN SOFTWARE PARA LA GENERACIÓN DE LAS SEÑALES.....	108
Capítulo 7: Resultados de la aplicación del modelo sintético	109
7.1. INTRODUCCIÓN	111
7.2. BANCO DE ENSAYOS.....	111
7.2.1. ALIMENTACIÓN.....	112
7.2.2. MOTOR.....	113
7.2.3. FRENO MOTOR.....	114

7.2.4.	SENSORES.....	114
7.3.	RECOGIDA DE DATOS.	114
7.4.	CARACTERÍSTICAS ESTADÍSTICAS EN EL DOMINIO TEMPORAL. .	115
7.5.	RESULTADOS GRÁFICOS Y CONCLUSIONES.	119
7.5.1.	GRÁFICOS DE LAS SEVERIDADES SIN RUIDO	120
7.5.2.	GRÁFICOS DE LOS ESTADÍSTICOS SIN RUIDO	123
7.5.3.	RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....	139
7.5.4.	GRÁFICOS DE LAS SEVERIDADES CON RUIDO BAJO.....	140
7.5.5.	GRÁFICOS DE LOS ESTADÍSTICOS CON RUIDO BAJO	144
7.5.6.	RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....	160
7.5.7.	GRÁFICOS DE LAS SEVERIDADES CON RUIDO ALTO.....	162
7.5.8.	GRÁFICOS DE LOS ESTADÍSTICOS CON RUIDO ALTO	166
7.5.9.	RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....	181
Capítulo 8: Resultados y conclusiones.....		185
8.1.	INTRODUCCIÓN	187
8.2.	RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....	187
8.3.	LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN	189
Capítulo 9: Bibliografía		191
9.1.	Bibliografía	193
Capítulo 10: Anexos.....		195
10.1.	Anexos	197
10.1.1.	Código motor totalmente SANO.....	197
10.1.2.	Código motor con fallo INCIPIENTE	201
10.1.3.	Código motor con fallo DESARROLLADO.....	206
10.1.4.	Código motor con fallo TOTAL	211
10.1.5.	Representación de los estadísticos de ORDEN SUPERIOR	216

Capítulo 1

Introducción

1.1. JUSTIFICACIÓN

Los motores eléctricos son fundamentales en el sector industrial y de servicios. Son el principal medio para obtener energía mecánica a partir, en este caso, de energía eléctrica. Son los mayores consumidores de energía eléctrica en el sector industrial y en el comercial. Cerca de la mitad de la energía eléctrica usada y en torno a las dos terceras partes de la utilizada en la industria es consumida por dichos motores.

Los más utilizados en diversas aplicaciones industriales son los de inducción de jaula de ardilla. Se les han considerado tradicionalmente como máquinas muy robustas, con un índice de averías y con unas necesidades de mantenimiento precisas bajas. Sin embargo, debido a la tendencia actual de reducir los costes y con vistas hacia una producción de mayor calidad que evite las interrupciones en los procesos de producción, se ha hecho cada vez sea más necesario controlar el funcionamiento interno de las máquinas, y así poder detectar cualquier posible indicio de fallo antes incluso de que éste se desarrolle completamente.

Todo esto ha llevado a tratar de sustituir el mantenimiento preventivo por tratarse de una técnica basada en la sustitución programada de piezas susceptibles de sufrir una avería, que tiende a desaprovechar el uso de estos elementos. Así, el mantenimiento preventivo ha evolucionado hacia la monitorización y control de determinados parámetros o variables de funcionamiento, capaces de determinar el momento adecuado para intervenir y así corregir lo que en un futuro sería una probable avería. Esto es lo que se conoce como mantenimiento predictivo. Además, también hace posible conocer con antelación las piezas de recambio que se necesitarán, evitar paradas innecesarias y disminuir los stocks para realizar correctamente el mantenimiento.

Existen diversas técnicas para diagnosticar fallos en estos motores aplicando un mantenimiento predictivo tales como, el análisis de vibraciones, análisis de temperatura y la técnica de MCSA (Motor CurrentSignatureAnalysis). El MCSA trata de monitorizar la corriente consumida por el motor. Esta técnica presenta varias ventajas frente a los otros métodos: es no invasiva, puesto que la corriente se puede medir con una pinza amperimétrica, y es capaz de diagnosticar fallos en línea (incluso en tiempo real dependiendo de la técnica de tratamiento de la señal empleada), por lo que no requiere realizar paradas de mantenimiento innecesarias.

Estudios recientes indican que el 90% de los fallos en las máquinas de inducción ocurren a raíz del funcionamiento anormal de los componentes internos. Los principales fallos mecánicos son: problemas de rodamientos,

barras rotas, excentricidades, obstrucción de la ventilación, etc. Aproximadamente el 50% de las averías en las máquinas eléctricas se deben a problemas en los rodamientos. Aunque solamente el 10% son achacables a problemas en las barras o en los anillos, es importante señalar que aunque tengan un escaso porcentaje de incidencia, se trata de un tipo de fallo muy grave, debido a que sus consecuencias sobre la integridad de la máquina son catastróficas.

La presencia de barras rotas, excentricidad mixta y los fallos en los rodamientos de los motores producen variaciones en el campo magnético del motor, que se traduce en la aparición de armónicos, capaces de inducir fuerzas magnetomotrices, que finalmente dan lugar a la aparición de armónicos en la corriente de alimentación del motor. En el caso de asimetrías en el rotor (rotura de barras y excentricidad mixta), el fallo se manifiesta en forma de bandas alrededor del armónico fundamental, e incluso alrededor de algunos armónicos enteros superiores.

En la técnica del MCSA para detectar asimetrías en el rotor normalmente se emplea la transformada de Fourier para analizar el espectro de la corriente. Esta técnica está probada en motores alimentados de red y también puede emplearse en motores alimentados por convertidor. Aunque esta situación presenta algunos inconvenientes que impide realizar un buen diagnóstico.

Lo normal suele ser monitorizar sólo una de las tres fases del motor debido a que se ha comprobado que la elección arbitraria de una de éstas para realizar la monitorización no influye en la tarea del diagnóstico.

En este caso se está empleando la transformada de Fourier para extraer los patrones (amplitudes a las frecuencias de fallo) que luego permiten realizar el diagnóstico del estado de la máquina. Esta transformada, muy conocida y empleada en la industria, presenta algunas desventajas: para obtener una buena resolución en frecuencia es necesario medir en estado estacionario durante un tiempo largo, si se producen oscilaciones en la carga del motor se pueden falsear las medidas, por estas razones se están aplicando otras técnicas que tienen un coste computacional muy elevado: Wavelet, Wigner-Ville, MUSIC, EmpiricalModeDecomposition, Hilbert, Hilbert-Huang, Correlación con Átomos Tiempo-Frecuencia.

En algunas referencias bibliográficas sobre sistemas expertos para el diagnóstico de motores de inducción, además de indicadores de fallo calculados a partir de la corriente en el dominio de la frecuencia, se emplean estadísticos de orden superior (primer y segundo orden), calculados en el dominio del tiempo. En ningún caso se justifica porque estos indicadores son útiles para el diagnóstico del motor. En este proyecto se pretende realizar un estudio sobre el comportamiento de estos estadísticos según el contenido

armónico de una señal sintética generada en Matlab. Se desarrollará una herramienta para generar señales artificiales con contenido armónico controlado y similar al de la corriente cuando se produce un fallo. Estas señales se usarán para comprobar cómo cambia el valor de los diferentes estadísticos y evaluar su posible uso para discriminar si un motor tiene fallo o no.

1.2. OBJETIVOS

En este apartado distinguiremos entre el objetivo principal y una serie de objetivos específicos o etapas necesarios para la consecución de éste:

1.2.1. OBJETIVOS PRINCIPALES

El objetivo principal de este proyecto, con la asistencia y experiencia de los investigadores de este grupo, es determinar la relación entre un estado de fallo del motor con los estadísticos de orden superior calculados a partir de la corriente de un motor en el dominio del tiempo. Como herramienta necesaria para la obtención de esta meta se va a emplear Matlab.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para lograr el objetivo primario se seguirán los siguientes pasos:

- Una etapa de aprendizaje y estudio inicial, consistente en la lectura de memorias de otros proyectos y artículos relacionados, con el objetivo de introducirse en la materia y obtener una idea global del problema.
- Generación mediante Matlab de señales en el dominio de la frecuencia con diferente contenido armónico, con el fin de establecer las bases de los objetivos posteriores.
- Generación en Matlab de señales en el dominio de la frecuencia con contenido armónico similar al de motores de inducción con fallo rotórico y diferentes severidades, con la ayuda de la aplicación desarrollada previamente y el análisis de diferentes ensayos pertenecientes al Departamento de Ingeniería Eléctrica.
- Cálculo mediante Matlab de un conjunto de estadísticos de orden superior sobre la señal temporal, para cada una de las señales anteriores y lograr un conjunto de datos.
- Realizar un estudio de posibles relaciones o correlaciones de los estadísticos de orden superior con cada tipo de fallo.

La organización del trabajo para la consecución de estos objetivos se presenta en el diagrama de Gantt de la Tabla 1.1:

Capítulo 1: Introducción

TAREA	RECURSOS	22-Sep-06	02-Oct-06	12-Oct-06	22-Oct-06	01-Nov-06	11-Nov-06	21-Nov-06	01-Dic-06	11-Dic-06	21-Dic-06	31-Dic-06	10-Jan-07	20-Jan-07	30-Jan-07	09-Feb-07	19-Feb-07	30-Feb-07	10-Mar-07	20-Mar-07	30-Mar-07	09-Abr-07	19-Abr-07	30-Abr-07	10-May-07	20-May-07	30-May-07	09-Jun-07	19-Jun-07	30-Jun-07	10-Jul-07		
Documentación	Administrativo	Red	Red																														
Documentación Técnica	Administrativo o Ingeniero			Am	Am																												
Recogida de información y análisis inicial	Ingeniero			Am	Am	Am	Am	Am	Am																								
Programación	Ingeniero																																
Comprobación de especificaciones	Ingeniero o director																																
Redacción del Proyecto	Administrativo o Ingeniero																																

Tabla 1.1: Diagrama de Gantt del proyecto.

1.3. DESARROLLO DE LA MEMORIA

La estructura que compone el presente proyecto está elaborada en ocho capítulos que se pueden resumir en:

- Capítulo 1: En este primer capítulo se introduce y justifica este Trabajo de Fin de Grado
- Capítulo 2: Realizamos una breve introducción a los motores de inducción, describiendo de forma detallada sus características constructivas y los principios de funcionamiento en los que se basan.
- Capítulo 3: En el tercer capítulo se analizan los tipos de fallos que pueden aparecer en un motor, causas y consecuencias, haciendo hincapié en los fallos por rotura de barra.
- Capítulo 4: En este capítulo se introducirán las principales estrategias empleadas para el mantenimiento de los equipos en el sector industrial, relacionando el coste-beneficio frente a su facilidad de implantación.
- Capítulo 5: En este capítulo trataremos la metodología empleada en el análisis de las señales en el dominio de la frecuencia, junto con los principales problemas que surgen al realizar el muestreo de las señales continuas.
- Capítulo 6: En este capítulo desarrollaremos un modelo sintético para la generación de señales con diferentes armónicos y diferentes amplitudes de ruido.
- Capítulo 7: En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la aplicación del modelo sintético, para 3 casos concretos observando la correlación con los diferentes estadísticos.
- Capítulo 8: En este capítulo se estudian los resultados, las conclusiones y líneas futuras de investigación.

Capítulo 2

Motor de Inducción

2.1. INTRODUCCIÓN

El motor de inducción trifásico, también conocido como motor asíncrono, es el motor eléctrico con mayor campo de aplicación en el sector industrial, de hecho constituye el 80% de los motores eléctricos industriales que se emplean en la actualidad, especialmente el motor con rotor de “*jaula de ardilla*”.

Se denominan **máquinas de inducción** porque la corriente que circula por uno de los devanados (generalmente el situado en el rotor), se debe a la f.e.m inducida por la acción del flujo creado a su vez por el otro devanado. También, reciben el nombre de **máquinas asíncronas** debido a que la velocidad de giro del rotor no es la de sincronismo impuesta por la frecuencia de la red, es decir, se aproxima pero no llega a alcanzar la velocidad de la frecuencia de alimentación del motor.

La importancia de los motores asíncronos o de inducción, se debe a su construcción simple y robusta (sobre todo en el caso del rotor en forma de jaula), sencillez de mantenimiento, facilidad de instalación y bajo coste. Sin embargo, históricamente su inconveniente más grave ha sido la limitación para regular su velocidad, y de ahí que cuando esto era necesario, en diversas aplicaciones como la tracción eléctrica, trenes de laminación, etc., eran sustituidos por motores de c.c.. Desde finales del siglo XX y con un desarrollo espectacular de la electrónica industrial, con accionamientos electrónicos como inversores u onduladores y cicloconvertidores, que permiten obtener frecuencia variable a partir de la frecuencia constante de la red, y con la introducción del microprocesador en la electrónica de potencia, se han realizado grandes cambios, y los motores asíncronos o de inducción se están imponiendo poco a poco en los accionamientos eléctricos de velocidad variable.

2.2. CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS

La máquina asíncrona o de inducción al igual que cualquier otro dispositivo de conversión electromecánica de la energía de tipo rotativo, está formado por una parte fija o estator, y por otra parte móvil o rotor.

El devanado del rotor, el cual conduce la corriente alterna que se produce por inducción desde el devanado del estator conectado directamente, consiste en una serie de conductores de cobre o aluminio moldeado para el caso de Baja Potencia, y la jaula suele ser de cobre para los de Alta Potencia en un rotor de laminaciones de acero. Se instalan anillos terminales de cortocircuito en ambos extremos de la “*jaula de ardilla*” o bien, en uno de los extremos en el caso del rotor devanado.

Los motores de inducción de rotor devanado son menos empleados debido a su mayor coste y mantenimiento que se debe realizar, en comparación con los de "jaula de ardilla".

2.2.1. ESTATOR DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN

El estator de un motor de inducción (ó parte fija) como el mostrado en la Fig. 2.1 es donde se coloca normalmente el inductor, el cual es el encargado de crear el campo magnético. Está formado por:

- Circuito magnético: un apilamiento de chapas de hierro aleado con silicio aisladas entre sí con Carlite (consiste en una capa especial aislante aplicada en el proceso final de planchado y recocido), para reducir las pérdidas debido a las corrientes parásitas, que disponen de unas ranuras en su periferia interior en las que se desea alojar los conductores de los devanados trifásicos.
- Circuito eléctrico: está formado por tres devanados monofásicos que al conectarlos en estrella o triángulo forman un devanado trifásico.

En su concepción más elemental, estos devanados son tres bobinas desfasadas 120° . Cada bobina está formada por 2 conductores diametralmente opuestos (bobina de paso diametral) y el estator precisa por lo tanto de 6 ranuras para alojarlos.

Por esto se desaprovecha la capacidad del estator, puesto que sólo son necesarias 6 ranuras para 3 bobinas. En los devanados reales la disposición es muy distinta:

- el número de ranuras es normalmente 24, 36, 48, etc.
- las bobinas no son de paso diametral.
- cada devanado monofásico está formado de varias de estas bobinas conectadas en serie.

En el interior del estator, va colocado el rotor ó parte giratoria de la máquina. El espacio comprendido entre ambas partes se denomina entrehierro, está formado por aire, que es necesario para que la máquina pueda realizar el giro. El campo magnético existente en el mismo, es el encargado de realizar el acoplamiento entre los sistemas eléctrico y mecánico.

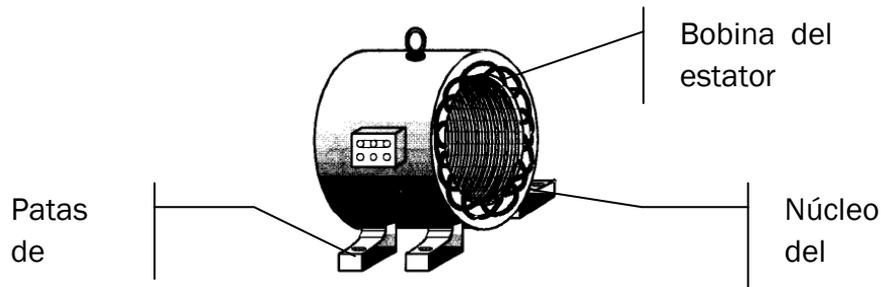


Figura 2.1: Estator de un motor de inducción.

El estator está rodeado por la carcasa disponiéndose en ésta las correspondientes patas de fijación y los anillos o cáncamos de elevación y transporte.

2.2.2. ROTOR DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN

El rotor (parte giratoria) es el inducido en los motores de inducción, es decir, donde se induce el campo magnético creado en el estator.

Está compuesto por:

- Circuito magnético: constituido por un conjunto de chapas apiladas de hierro aleadas con silicio formando un cilindro, que tiene unas ranuras en la circunferencia exterior, en donde va a ir colocado el devanado. Las chapas se encuentran aisladas entre sí, y están formadas por acero eléctrico de grano orientado para reducir las pérdidas por corrientes parásitas.
- Circuito eléctrico: formado por un devanado trifásico. En función de la forma constructiva de este devanado, distinguimos entre: rotor de "jaula de ardilla" ó rotor bobinado.

También existen otros dos tipos básicos de rotores en los motores de inducción:

- Rotor bobinado o de anillos rozantes(Dolivo-Dobrovolsky, 1890):

En la Fig. 2.2 podemos apreciar el rotor bobinado. En este tipo de rotor se tiene un arrollamiento trifásico similar al que hay situado en el estator, en el que las tres fases se conectan por un lado en estrella y por el otro se lleva a unos anillos aislados entre sí. Esta disposición se realiza para poder introducir resistencias externas por los anillos que nos ayudan a limitar las corrientes de arranque, mejorar las características del par y controlar la velocidad.

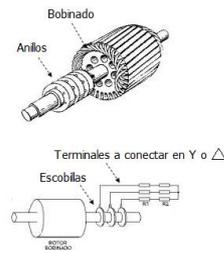


Figura 2.2: Rotor bobinado

➤ Rotor de jaula de ardilla (Dolivo-Dobrovolsky, 1889) :

El devanado del rotor mostrado en la Fig. 2.3 está compuesto por un número determinado de barras soldadas por sus extremos a sendos anillos (anillos de cortocircuito). A día de hoy, en las maquinas pequeñas se utiliza un método de fundición de aluminio, para realizar al mismo tiempo las barras del rotor y los anillos laterales. Los recientes avances en las técnicas de moldeo, permiten fabricar el rotor de cobre, con las consiguientes rebajas en las pérdidas y mejora en la conductividad. Estos motores (de rotor de cobre) tienen un rendimiento mayor que los de aluminio.

Mediante esta configuración, la máquina no requiere ni anillos rozantes ni escobillas para conectar la corriente al rotor ya que ésta se consigue por efecto de inducción magnética del estator sobre el rotor.

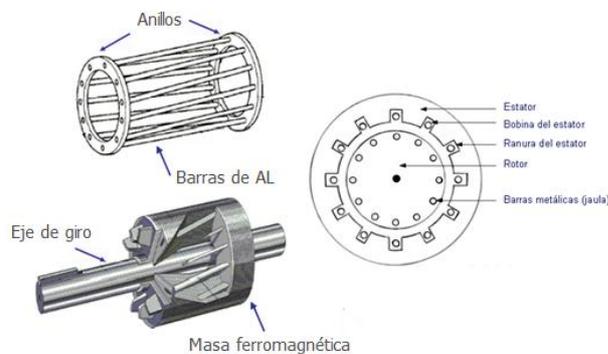


Figura 2.3: Rotor de jaula de ardilla.

2.3. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Para explicar el funcionamiento del motor de inducción, necesitamos conocer cómo se produce el campo magnético en el estator y cómo se desarrolla el par inducido en el rotor.

Debido a que el sistema eléctrico industrial utiliza fuentes trifásicas de energía, el devanado del estator está constituido por tres devanados, distribuidos y desfasados espacialmente 120° y de $2p$ polos. En cada una de

las tres bobinas desfasadas espacialmente se inyecta c.a. senoidal desfasada en el tiempo 120° unas de otras, como se muestra a continuación en la Fig. 2.4.

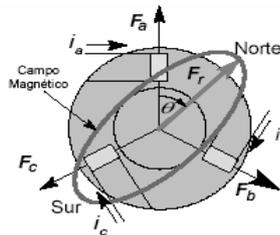


Figura: 2.4.: Distribución senoidal del campo magnético rotatorio.

Cada bobina produce un campo magnético estático en el espacio. La amplitud de este campo se encuentra en la dirección del eje magnético de la bobina y varía senoidalmente en el tiempo. La combinación de los campos pulsantes producidos por las tres corrientes desfasadas temporalmente, circulando por las tres bobinas desfasadas espacialmente, se traduce en un campo magnético distribuido senoidalmente en el espacio, que rota a la velocidad de variación de las corrientes en el tiempo, y si está su circuito eléctrico cerrado, aparecerán corrientes que reaccionarán con el flujo del estator.

Puesto que el periodo o intervalo de tiempo de la variación senoidal de la corriente es el mismo en los conductores, la velocidad del campo magnético rotatorio (S) varía directamente con la frecuencia (f), pero inversamente con el número de pares de polos (p), esto queda reflejado a continuación en la Ecuación 2.1, que recibe el nombre de velocidad de sincronismo:

$$n_1 = \frac{60 * f}{p} \quad (2.1)$$

Este flujo giratorio inducirá f.e.m.s. en los conductores del rotor, y si está su circuito eléctrico cerrado, aparecerán corrientes que reaccionarán con el flujo del estator.

De acuerdo con la ley de Faraday expresada mediante la Ecuación 2.2, la f.e.m. inducida en un conductor de longitud l que se mueve a la velocidad v dentro de un campo magnético rotatorio B tiene un valor:

$$e_{ind} = (v \times B) * L \quad (2.2)$$

Para determinar su sentido, debe considerarse que el rotor gira en sentido opuesto al campo, para tener en cuenta el movimiento relativo mutuo entre ambos sistemas.

Al circular corriente por los conductores del rotor, aparecerá en los mismos una fuerza cuyo sentido se obtiene aplicando la conocida ley vectorial (ley de Laplace, Ecuación 2.3 y Fig. 2.5).

$$F = i(L \times B) \quad (2.3)$$

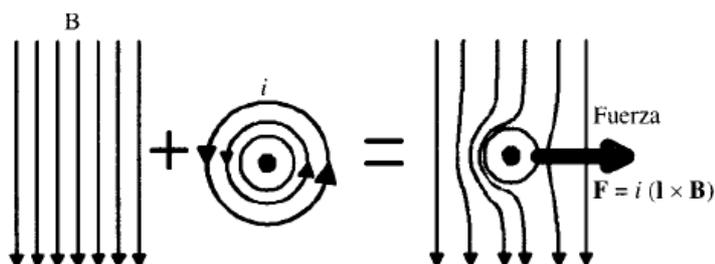


Figura 2.5: Aparición de la fuerza tras la suma de un campo magnético y una corriente

Donde

- i : corriente por los conductores del rotor.
- v : es la velocidad de la barra, relativa al campo magnético.
- B : es el vector de densidad de flujo magnético.
- L : es la longitud del conductor en el campo magnético.

El movimiento relativo del rotor con respecto al campo magnético del estator (B_s) induce voltaje en una barra del rotor. El flujo magnético del rotor produce un campo magnético del rotor B_R .

El par en la máquina, T_{ind} , está dado por la Ecuación 2.4:

$$\tau_{ind} = k * B_R * B_S \quad (2.4)$$

La dirección tiene el mismo sentido de giro que el campo magnético giratorio B_s , por lo tanto el rotor se acelera en esa dirección. En operación normal, la velocidad de sincronismo n_1 , constituye el límite teórico al que puede girar el rotor. Pero el motor debe girar a una velocidad inferior a la de sincronismo ($n < n_1$), es decir, su velocidad de régimen es asíncrona.

Debido a esta diferencia de velocidades, se define un parámetro muy importante en este tipo de máquinas, conocido con el nombre de

deslizamiento, cuya expresión viene dada por la diferencia entre la velocidad de sincronismo y la adquirida por el rotor, dividido por la de sincronismo, tal como refleja la Ecuación 2.5. Al aumentar la carga mecánica del motor, el par resistente se hace mayor que el par interno y el deslizamiento aumenta, esto provoca un aumento en las corrientes del rotor, gracias a lo cual aumenta el par motor y se establece el equilibrio dinámico de los momentos resistente y motor:

$$s = \frac{(n_1 - n)}{n_1} \quad (2.5)$$

Por último, se ha de señalar que la conexión entre devanados, puede realizarse de dos formas distintas, mediante la denominada conexión en triángulo ó mediante la conexión en estrella. La forma de saber si estamos conectados en estrella o en triángulo, se encuentra en la colocación de unas pletinas de cobre. Suponemos que se dispone de las dos tensiones habituales en la industria, 400 y 230 voltios, se asocia la tensión alta a la conexión en estrella como muestra la Fig. 2.6 y la tensión baja a la conexión en triángulo como podemos ver en la Fig. 2.7. El motor está construido para soportar la tensión necesaria para la conexión que se tenga y tendremos un nivel de aislamiento correspondiente.

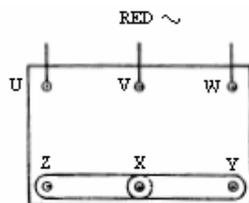


Figura 2.6: Conexión en estrella

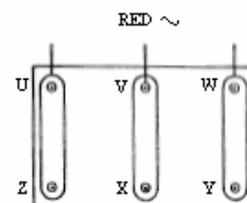


Figura 2.7: Conexión en triángulo

2.3.1. CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMIENTO

Las características de funcionamiento son una presentación gráfica del comportamiento de los siguientes parámetros:

- La velocidad.
- La corriente.
- El factor de potencia.
- La potencia.
- El rendimiento.
- El deslizamiento en función de la carga.

La Fig. 2.8 muestra las características de funcionamiento de un motor de inducción típico.

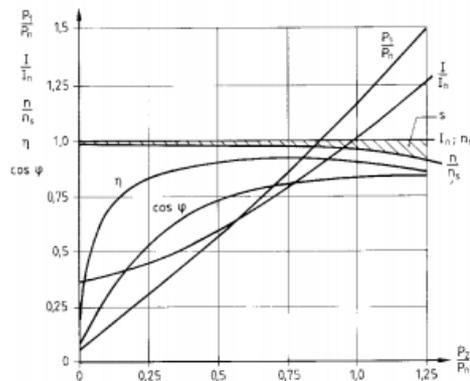


Figura 2.8: Características de funcionamiento de un motor de inducción en función de la carga

Donde:

- | | |
|-------------------------------|---------------------------------------|
| - n = velocidad | - n_s = velocidad sincrónica |
| - P_1 = potencia de entrada | - P_2 = potencia de salida |
| - η = rendimiento | - $\cos \varphi$ = factor de potencia |
| - I = corriente de entrada | - I_n = intensidad nominal |
| - s = deslizamiento | - P_n = potencia nominal |

Explicación de la gráfica:

- n : La velocidad n sólo disminuye ligeramente conforme aumenta la carga. Por consiguiente, los motores de jaula de ardilla estándar tienen unas características de velocidad "rígidas" al soportar variaciones de carga importantes sin disminución significativa de la velocidad.
- s : El deslizamiento s , aumenta más o menos proporcionalmente con el incremento de la carga.
- $\cos \varphi$: El factor de potencia $\cos \varphi$, depende en gran medida de la carga y normalmente alcanza su máximo durante la sobrecarga. En el régimen de carga parcial, es relativamente desfavorable, ya que incluso con cargas parciales, la magnetización es prácticamente constante.
- η : El rendimiento η muestra una característica relativamente plana y es prácticamente constante por encima de media carga. Suele alcanzar su máximo, cuando está por debajo de la potencia de régimen P_n .
- I : La intensidad I aumenta proporcionalmente comenzando más o menos a media carga. Por debajo de la media carga, la corriente

disminuye sólo ligeramente hasta convertirse en la corriente de carga nula I_0 (magnetización constante).

- P : La potencia P_1 aumenta en mayor o menor proporción con el inicio de carga comenzando en la potencia de carga nula. En el régimen de sobrecarga, la potencia aumenta rápidamente, ya que las pérdidas también se incrementan con más rapidez.

Dado que el rendimiento η y el factor de potencia $\cos\phi$ pueden tener un efecto importante en la eficacia económica de un motor, es necesario conocer los valores de la carga parcial. Ambos parámetros nos determinarán el rendimiento económico durante su funcionamiento. En el régimen de carga parcial, los dos valores decrecen. Además, el factor de potencia $\cos\phi$ de los motores de velocidad baja es inferior al de los motores de velocidad elevada. En consecuencia, los motores de velocidad alta y dimensionamiento preciso no sólo resultan más baratos al comprarlos, sino también a lo largo de su utilización.

2.4. LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DEL COMPORTAMIENTO DE LAS MÁQUINAS ASÍNCRONAS.

De todas las formas que representan las variables de un motor eléctrico, es la característica mecánica el dato que más y mejor información aporta sobre su funcionamiento. Consiste en la representación de la curva Par-Velocidad, cuando la máquina está alimentada a su tensión y frecuencia nominales. En la Fig. 2.9 se expone la característica mecánica de un motor de inducción en la que se han señalado los puntos más significativos y las tres posibles zonas de trabajo. En ella se puede ver como los puntos de mayor interés son los siguientes:

- Par de arranque: par que desarrolla el motor con velocidad nula.
- Par máximo: el mayor que podrá desarrollar el motor.
- Par nominal: el desarrollado a la velocidad nominal.

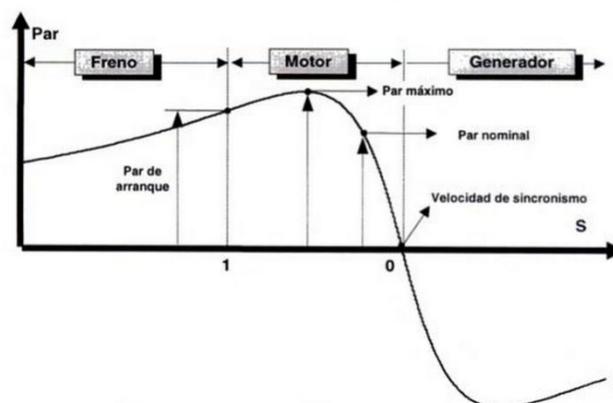


Fig. 2.9: Característica mecánica de un motor de inducción.

2.5. VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN

Ventajas de los motores de inducción:

- Construcción simple y robusta, manteniendo un buen comportamiento ante variaciones bruscas de la carga (el motor recupera la velocidad ante variaciones de carga). Concretamente, el rotor de jaula de ardilla es muy robusto.
- Principio de reversibilidad: Debido a este principio podemos hablar tanto de uso como motor o como generador asíncrono. Bajo nuestro punto de vista lo consideraremos como motor, aunque no por ello se puede descartar su uso como generador.
- No necesita el uso de escobillas o elementos rozantes, debido a que no existe corriente conducida al rotor, es inducida. Excepto en el caso del rotor devanado, suelen tener un par de arranque y sólo una alimentación eléctrica que se recibe a través de una línea trifásica.

Inconvenientes de los motores de inducción:

- Regulación complicada de la velocidad: Esto es debido a la dificultad para que el motor mueva la carga a una velocidad diferente respecto a la que estaba preparado, sin embargo, gracias al abaratamiento de la fabricación de dispositivos electrónicos de potencia, se ha superado completamente este inconveniente mediante el uso de convertidores electrónicos de frecuencia.
- El motor absorbe una elevada intensidad en el arranque: durante el arranque se absorbe una intensidad entre tres y seis veces mayor que la intensidad nominal, cuando el arranque es directo a la tensión nominal.

Capítulo 3

Fallos en los motores de inducción

3.1. INTRODUCCIÓN

Definición de "Fallo" según la RAE:

- Fallo: falta, deficiencia, error.
- Avería: daño o desperfecto ocurrido en algún mecanismo.

Clasificación de Fallos:

Según el grado de influencia en la capacidad de trabajo:

- ✓ Fallo total o catastrófico: implica la incapacidad total del sistema para realizar su función.
- ✓ Fallo incompleto o parcial: implica la incapacidad de algún elemento del sistema pero que le permite seguir funcionando; es una disminución de las prestaciones del sistema.

Los motores de inducción no están exentos de posibles averías, siendo la causa habitual la aplicación de esfuerzos en los devanados del estator, núcleos magnéticos, jaula, rodamientos y eje, más elevados o durante un tiempo más prolongado que para los que fueron diseñados. Si estos esfuerzos se encuentran dentro del rango establecido en el diseño y la aplicación del motor es la correcta, no tiene por qué producirse un fallo prematuro. Pero si uno de estos esfuerzos o la combinación de varios supera el rango de valores de diseño, la vida útil del motor se reducirá de forma drástica y producirá una avería catastrófica.

3.2. FIABILIDAD DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN

3.2.1. INTRODUCCIÓN

La fiabilidad de un equipo industrial puede cuantificarse a tres niveles:

- Componentes, sistema funcional o como unidad global.
- En función del alcance del estudio, del detalle deseado.
- Datos históricos de que se disponga.

Si lo que queremos es realizar un estudio de la fiabilidad de un motor que nos permita mejorar sus prestaciones, y en particular mediante una redefinición de su política de mantenimiento, será necesario considerar la fiabilidad individual de sus componentes considerando al motor de inducción como un sistema a analizar.

Si consideramos el motor de inducción compuesto por una serie de componentes agrupados según su función, desde el punto de vista del análisis de fiabilidad podemos interpretar el motor como la agrupación en serie de los componentes. No obstante, es necesario destacar que las tasas de fallo de los componentes no son independientes entre sí, pues una incidencia en un componente del motor puede significar el deterioro de otro, incrementando su tasa de fallo. Por ejemplo, la rotura de una barra del rotor puede provocar el sobrecalentamiento del devanado del estator, unos rodamientos desalineados pueden afectar al rotor y al estator, los sobrecalentamientos y vibraciones del motor pueden alterar el funcionamiento de los sensores, etc.

3.3. CAUSAS Y ANÁLISIS DE FALLOS EN EL ESTATOR.

La mayor parte de los fallos que se producen en el estator tiene lugar sobre el sistema aislante y generalmente son producidos por la combinación de varios esfuerzos. El envejecimiento del aislamiento es debido a la interacción de los diversos esfuerzos que se producen durante su funcionamiento. La influencia de cada factor no suele ser simplemente aditiva, sino que la acción de algunos de los factores resulta reforzada por la presencia simultánea de otros esfuerzos en un efecto de sinergia (la suma del todo no es igual a la suma de sus partes).

3.3.1. FACTORES TÉRMICOS.

A menos que la temperatura de funcionamiento sea sumamente alta, el efecto normal del envejecimiento térmico es proporcional a la vulnerabilidad del sistema de aislamiento por influencia de otros factores o esfuerzos que llevan al fallo. Una vez que se produce el deterioro del sistema de aislamiento, ya no resistirá los esfuerzos dieléctricos, mecánicos y ambientales normales.

Estudiando el efecto de la temperatura sobre el envejecimiento térmico, hay dos consideraciones para incrementar la vida térmica que son:

- reducir la temperatura de funcionamiento,
- incrementar la clase de material aislante usado.

Por ejemplo, si un motor está funcionando a una temperatura de clase B (130° máx.) y usa un material aislante de clase F, entonces la vida térmica se incrementará en aproximadamente 10000 horas.

La vida del aislamiento se ve limitada siempre que se produzcan sobrecargas térmicas, las cuales pueden ser originadas por diversas causas, entre ellas:

a) Variaciones de tensión: Los últimos años los motores han sido diseñados con una mayor potencia manteniendo la estructura con un tamaño dado. El resultado es que estos motores son más susceptibles a averías por variaciones de tensión, que afectan tanto al rendimiento del motor como a la temperatura del bobinado. Los motores están diseñados para operar satisfactoriamente con una variación de tensión de $\pm 10\%$. Operar fuera de este rango podría reducir mucho la vida del motor.

b) Tensión de fase desequilibrada: Un pequeño desequilibrio en la tensión causará un incremento excesivo en la temperatura del bobinado. Por esta razón, se intentará realizar un suministro de tensión trifásico lo más equilibrado posible.

c) Cíclica: Durante la puesta en marcha en un arranque directo a red, un motor consume de 5 a 8 veces la corriente normal requerida para funcionar bajo condiciones de plena carga. Si un motor está sometido a ciclos de arranque sucesivos en un corto periodo de tiempo, la temperatura del bobinado aumentará rápidamente. Dependiendo de su aplicación específica, cada motor tendrá sus propias limitaciones. Un defecto adicional debido a este esfuerzo cíclico consiste en causar dilataciones y contracciones del sistema de aislamiento. Sobrepasado un periodo de tiempo, los materiales aislantes tienden a volverse frágiles y a agrietarse. El diseño del aislamiento debe asegurar que los materiales son lo bastante flexibles, para resistir estas contracciones y dilataciones sin agrietarse, y sin embargo, no ser tan flexibles como para que se cause un fallo debido a los esfuerzos mecánicos.

d) Sobrecarga: Los fabricantes de motores normalmente usan unos ciertos márgenes de seguridad. En referencia a esto, se usa un sistema de aislamiento de clase-F con una temperatura de operación de clase-B. Por ejemplo, un motor de 100 CV con un aumento de temperatura de 64 °C a plena carga, operará con un aumento de 85 °C con una sobrecarga del 15%. (Se asume una temperatura ambiente de 40 °C para ambas cargas). Así, la vida térmica bajará de 1.000.000 a 160.000 horas.

Clase de aislamiento	Y	A	E	B	F	H	C
T _{MAX} (°C)	90	105	120	130	155	180	>180

Tabla 2.1: Clases de aislamiento

e) Ventilación obstruida: El calor generado en el rotor y el estator es disipado por conducción, convección y radiación. Cualquier elemento que obstruya o dificulte el flujo de aire a través del motor, o que impida la radiación de calor de las piezas del motor, provocará un incremento en la temperatura del bobinado. Por lo tanto, es importante que el motor mantenga tanto el interior como el exterior limpios, para conseguir que el flujo de aire no esté limitado. Una indicación útil es que si por alguna razón es necesario el funcionamiento con el motor sobrecalentado, debemos considerar la opción de colocar un sistema adicional de refrigeración el cual incremente el aire sobre el motor. Si no es posible mantener el motor limpio, estas limitaciones han de ser consideradas durante la etapa de diseño, restringiendo la temperatura del bobinado y adecuando los sistemas de aislamiento.

3.3.2.FACTORES ELÉCTRICOS.

Cuando tratamos fallos en el bobinado causados por esfuerzos eléctricos, es necesario tener en cuenta los materiales aislantes usados y sus propiedades. Vamos a exponer los puntos más importantes e indicar las áreas donde se producen.

a) Dieléctrico: Existe una relación entre la vida del aislante y el esfuerzo de tensión aplicada a los materiales aislantes. Es necesario conocer la aplicación a la que será destinado el motor, seleccionar los materiales y establecer el diseño de las bobinas, los cuales aseguren una adecuada vida para el diseño.

b) Ataque superficial: Se da particularmente en motores que operan con tensiones por encima de los 600 V. Este fenómeno se conoce como 'tracking' (formación de un camino conductor carbonizado sobre la superficie del material). Puede ocurrir en el bobinado si el sistema de aislamiento no lo protege perfectamente del entorno ambiental.

c) Corona: Puede representar un problema serio, fundamentalmente en bobinados funcionando por encima de 5 kV. En la corona se localizan descargas resultado de la ionización gaseosa transitoria en un sistema de aislamiento, donde el factor de la tensión supera el valor crítico. Algunos de los factores que influyen en la descarga en la corona incluyen la frecuencia, el espesor dieléctrico, los materiales, el vacío, el esfuerzo de la tensión, la

geometría, la humedad, los esfuerzos mecánicos y la temperatura. Los fallos mecánicos pueden ser debidos al calentamiento, erosión o causados por una reacción química, provocando el deterioro del aislamiento del bobinado. La responsabilidad del fabricante es impedir descargas en la corona fuera de los límites, que aseguren una vida adecuada al motor. El usuario también puede ayudar manteniendo el motor limpio y refrigerado.

d) Condiciones de transitorios en la tensión: En los últimos años se han tenido evidencias, que indican que un número importantes de motores expuestos a condiciones de transitorios de tensión, sufren una reducción en la vida del bobinado o dan lugar a fallos prematuros. Normalmente no sabemos cuándo incluir protecciones frente a sobrecargas y descargas eléctricas. No obstante, se puede determinar las sobrecargas límites que el motor puede resistir y con las que todavía tendrá una vida satisfactoria. Para aplicaciones donde los valores recomendados se excedan, se debe usar un sistema de aislamiento especial donde se incrementa la resistencia dieléctrica por vuelta y/o tierra, o el condensador característico usado y/o el protector.

3.3.3. FACTORES MECÁNICOS.

El motor también está sometido a esfuerzos mecánicos, entre los que se pueden citar los siguientes:

- Movimiento de la bobina: La corriente en el bobinado del estator produce una fuerza en las bobinas proporcional al cuadrado de la corriente. Esta fuerza es máxima durante el ciclo inicial, provocando en las bobinas una oscilación de la frecuencia, con movimientos en la dirección radial y tangencial. Este movimiento, puede causar daños graves en el aislamiento de las bobinas y causar daños en los conductores de cobre. En las máquinas grandes de alta velocidad, suelen sufrir generalmente más el movimiento de las bobinas que las máquinas pequeñas de baja velocidad. La mayor extensión de la bobina, hace que el problema sea mayor y también será mayor la frecuencia de arranque, así como más largo el tiempo de aceleración, con lo cual aumentan las posibilidades de debilitar el sistema de aislamiento.
- Golpes del rotor: Existen diversas causas (fallos de cojinetes, desviación del eje o excentricidad, defecto en la alineación rotor-estator) por las que el rotor puede golpear al estator. Cuando ocurre este contacto pueden suceder varias cosas:
 - Si el golpe sólo se produce en el arranque, la fuerza del rotor puede causar la laminación del estator perforando el aislamiento de la bobina, con lo cual la bobina resulta puesta a tierra. Los motores pueden incluso funcionar durante varios

años bajo esta condición, dependiendo de la frecuencia en los arranques y la superficie de contacto entre el rotor-estator.

- Si el contacto se produce cuando el motor se encuentra en funcionamiento a plena velocidad, como resultado se producirá una prematura conexión a tierra de la bobina por la ranura del estator, que es producida por una excesiva generación de calor en el punto de contacto.

3.3.4. FACTORES AMBIENTALES.

Uno de los factores más importantes a la hora de mantener el motor durante mucho tiempo libre de anomalías es mantenerlo limpio y seco, tanto internamente como externamente; es decir, protegerlo de las condiciones ambientales que interfieran en el buen funcionamiento del mismo.

La presencia de partículas extrañas puede tener efectos negativos como la reducción en la disipación de calor (por lo que se incrementará la temperatura de funcionamiento reduciéndose la vida del aislamiento), fallos prematuros en los cojinetes debido a la localización de grandes esfuerzos o interrupción del sistema de aislamiento, causando cortes y puestas a tierra.

Un problema muy común, es la condensación que se produce en el bobinado del estator. Cuando dicha situación es muy acusada, lo más normal es que cause en el bobinado una puesta a tierra por la ranura. Para prevenir esta situación consiste en secar el bobinado, usando para ello un espacio con aire caliente o un chorro de aire caliente. Los problemas relacionados con la condensación se ven incrementados, en funcionamientos prolongados en vacío de la máquina.

3.4. ANÁLISIS DE FALLOS EN EL BOBINADO.

En este apartado se describen las distintas causas de fallos en el bobinado de acuerdo con los patrones destructivos:

a) Patrón de destrucción simétrica con todas las fases sobrecalentadas: en este caso, se produce un reparto del calor excesivo generado simétricamente por todo el bobinado. El calor es producido bien por las altas corrientes o por la incapacidad del motor a la hora de disipar el calor que se genera normalmente. Entre las posibles causas se pueden enumerar:

- Baja o alta tensión.
- Excesiva sobrecarga.
- Gran número de ciclos de arranques en cortos periodos de tiempo.

- Déficit en la ventilación.
- Condiciones ambientales extremas.
- Rotor defectuoso.
- Fallo en el acabado de los cojinetes, que provoca paradas.

Por lo general, cada grupo de bobinas mostrará signos de sobrecalentamiento, que muestran la evidencia en la descolocación y la avería del aislamiento dependiendo de la cantidad de calor. Los fallos ocurren debido a una combinación de aberturas y roturas. El bobinado puede también ser puesto a tierra debido a un calentamiento demasiado alto de la ranura del estator o del cableado del motor.

b) Esquema de la destrucción de una única fase: este es el caso más fácil de hallar, dado que su esquema es único. Entre las posibles causas podemos enumerar:

- el controlar una única fase o la potencia suministrada,
- la existencia de un conductor del bobinado abierto,
- una conexión no adecuada o una fuente de tensión desequilibrada.

Dependiendo de si la conexión es en estrella o en triángulo, una o dos fases pueden sobrecalentarse, provocando el fallo debido a un cortocircuito vuelta a vuelta entre las fases sobrecalentadas. Si la causa es interna al bobinado, la fase o fases sin calentarse se encuentran en circuito abierto.

c) Patrón de destrucción no simétrica donde el bobinado es puesto a tierra: Según el tipo de protección que usemos en el motor, un fallo a tierra puede ser el tipo de fallo más destructivo. No sólo será destruido el bobinado, sino que en algunos casos también, la laminación sufre una avería grave debido a la corriente. La suma de este tipo de fallos tiene una gran importancia para el usuario, ya que las posibles descargas que puede sufrir, supone un peligro eléctrico. Posibles causas que lo provocan son:

- Roce del rotor contra la laminación del estator.
- Deterioro del aislamiento, de ranuras o cables.
- Transitorios de tensión, sobretensión en el interruptor o golpe de un rayo.
- Contaminación, humedad, sustancias químicas o materiales extraños.
- Ataque superficial por baja tensión o deterioro en el aislamiento de la corona.
- Sobrecalentamiento en las ranuras del estator debido a una excesiva corriente o a la deficiente disipación de calor.
- Movimiento de las bobinas en la ranura o en la última vuelta.

d) Diversos patrones de destrucción no simétricos (excluyendo las puestas a tierra): Muchos de estos aspectos son responsables de fallos del tipo puesta a tierra, los cuales también pueden causar un fallo de cortocircuito entre espiras. Este factor está directamente relacionado con la fuerza o la debilidad del sistema de aislamiento. Así, si un estator está expuesto a condiciones de humedad extrema, provocará un fallo en el punto más débil del sistema de aislamiento de esa máquina.

Si el movimiento de la bobina ha ocurrido antes de la última vuelta, y ha provocado algún daño, el fallo será del tipo vuelta a vuelta. Si el aislante en la ranura del estator estaba debilitado por el movimiento de la bobina, el fallo puede ser también del tipo fase a fase o bobina a bobina. La mayoría de estos fallos, ocurren de manera aislada en un área concreta del bobinado y no siguen un patrón en concreto. Normalmente se manifiestan por cortes aislados vuelta a vuelta y por aberturas, y no se manifestarán como un calentamiento global. De cualquier manera serán indicio de un excesivo calentamiento en áreas adyacentes al fallo, y con frecuencia ocurrirán fallos del tipo fase a fase.

3.5. CAUSAS Y ANÁLISIS DE FALLOS EN EL ROTOR.

En comparación con los devanados convencionales, la jaula es muy rígida, y los problemas que en la misma ocurren suelen estar relacionados con las grandes temperaturas alcanzadas en el rotor y las grandes cargas centrífugas que se producen en el final de las barras, en su conexión con el anillo de cortocircuito, en particular durante los arranques y variación en el régimen de funcionamiento del motor. El origen de estos defectos puede provenir de una incorrecta elección de los materiales que forman la jaula, su deficiente conformación durante los procesos de fundición de la matriz de los rotores o por una mala unión entre las barras de la jaula y el anillo de cortocircuito.

Si la velocidad del rotor cambia debido a variaciones de la carga o al propio ciclo de trabajo, este tipo de fallos produce alteraciones de la distribución del flujo en el entrehierro que se reflejan en una mayor vibración, en alteraciones de la corriente de alimentación y en el flujo axial de dispersión. En los motores de inducción de rotor bobinado, el diseño de las bobinas es similar al de las bobinas del estator y sus problemas semejantes, añadiendo además, los inconvenientes de las fuerzas centrífugas que provocan sobre los finales de las bobinas.

Como también ocurre con el estator, la mayor parte de los fallos que se producen en los motores de inducción son originados por la acción combinada de distintos efectos. De manera general, podemos clasificar estos

esfuerzos como: térmicos, electromagnéticos, residuales, dinámicos, mecánicos y ambientales.

3.5.1. FACTORES TÉRMICOS.

En el motor pueden producirse sobrecargas térmicas durante los arranques, en la aceleración, en funcionamiento estable o en condiciones de reducción de la velocidad. Estas sobrecargas pueden originar fallos en el rotor y sobre el conjunto del motor. Las causas más comunes de fallos por sobrecarga térmica son las siguientes:

- Un elevado número de paradas consecutivas, causa un incremento en la temperatura de las barras o en los anillos de cortocircuito.
- Paradas del rotor debido a una mala selección en la clase de servicio(arranque-parada).
- Fallos al acelerar a plena carga.
- El rotor roza con el estator debido a un fallo en los cojinetes(rotor sobretraccionado), provocando una alta vibración.
- Barras del rotor rotas por fatiga, causado por las contracciones y dilataciones térmicas de los anillos de cortocircuito.
- Déficit de ventilación, debida a los filtros y/o a los conductos de tránsito colocados.
- Un desequilibrio en las tensiones de fase provocando un calentamiento superficial del rotor.

A continuación se expone algunos ejemplos de motores que funcionan con diferentes clases de servicio:

- **S1:** Son motores que funcionan de forma continua y siempre con carga. Por ejemplo, un motor de una cinta transportadora.
- **S2:** Motores que funcionan intermitentemente con tiempo suficiente como para enfriarse. Ejemplo, un motor de una puerta de un garaje.
- **S3:** Funcionan de manera intermitente pero no tienen tiempo suficiente para alcanzar la temperatura ambiente.

Los fallos en el rotor debidos a sobrecarga térmica pueden ser detectados mediante una inspección visual de la jaula del rotor, con síntomas como el ablandamiento del material de la jaula. Normalmente el estator también resulta dañado.

El desequilibrio térmico puede estar causado por cualquiera de las dos condiciones: arranque o funcionamiento. Puede también ser debido al diseño o a la fabricación del motor, o debido a que funcione fuera de los límites de

diseño. Las causas más comunes de fallos por desequilibrio térmico son las siguientes:

- Paradas frecuentes que causan una diferencia en la temperatura de las barras del rotor.
- Diferente transferencia de calor entre las barras y el núcleo del rotor.
- Arqueo del rotor debido a una diferente distribución de presiones asociadas al ciclo térmico.
- Existe una pérdida en la forma entre el centro del rotor y el eje, debido a la expansión térmica que se produce durante el arranque y que causa unas vibraciones produciendo inestabilidad.
- Puntos calientes en la superficie del rotor debido a suciedad en la laminación o a roces del rotor.
- Gradientes de temperatura debidos a una desigual circulación de la corriente.

Estas situaciones son más comunes en máquinas de alta velocidad que tienen un rotor de gran longitud en comparación con su diámetro. El problema se incrementa por el hecho de que la vibración puede ser aceptable al realizar el ensayo sin carga, sin llegar a mostrarse hasta que no se inicie el ciclo de arranque bajo condiciones de carga. Por esto se suele realizar ensayos de carga en máquinas de alta velocidad como un procedimiento de calidad. La resolución de este problema es complejo, debido a que el desequilibrio térmico no es siempre reproducible.

También se destaca la posible existencia de puntos calientes, que se suele intentar corregir durante su proceso de diseño y fabricación. Detectar estos puntos una vez puesto en funcionamiento resulta más difícil.

Durante el funcionamiento normal del motor, también pueden producirse la aparición de no destructivas en el rotor, que no suelen ser observados debido a su baja intensidad y a la falta de accesibilidad del rotor. La fuerza centrífuga, funcionando a plena carga y velocidad, es normalmente mayor que las fuerzas electromagnéticas que actúan en la barra debido a la proporción corriente-carga que soporta el desplazamiento radial de la barra en la ranura. Además, la frecuencia en el circuito del rotor es muy baja. Esta baja frecuencia corresponde a una baja impedancia del circuito de la jaula del rotor, confinando todas las corrientes del rotor en la jaula. Por lo que, aunque si bien es posible, normalmente no se observa ninguna aparición de chispas durante el funcionamiento a plena carga y velocidad.

Los procesos de diseño y fabricación del rotor incluyen medidas destinadas a reducir los chispazos. Según la elección del material y las tolerancias de

fabricación, sumado a los efectos de la expansión por la diferencia térmica y el ciclo térmico, excluyen que algunos motores funcionen sin la aparición de dichas chispas. Incluso motores idénticos o duplicados, mostrarán diferentes niveles de intensidad de chispas dado que todas las piezas poseen tolerancias y sufren ciclos térmicos durante su funcionamiento.

El punto de rotura de las barras se produce normalmente en la zona de unión entre las barras y la conexión con el anillo de cortocircuito. La rotura viene precedida por grietas radiales en la superficie o en el fondo de la barra.

Para prevenir que este efecto incremente el nivel de los chispas en el rotor, debe haberse realizado unos procesos de diseño y fabricación adecuados y el funcionamiento del motor también debe ser el correcto.

3.5.1.1. ROTURA DE BARRA(S) EN MOTORES DE INDUCCIÓN.

Uno de los principales fallos de los motores de inducción, es el agrietamiento, y la rotura de barras de rotor, especialmente en motores que arrancan con frecuencia bajo carga.

El arranque produce una corriente elevada que pasa por las barras debido a que la velocidad del rotor es mucho más baja que la velocidad síncrona. Las altas corrientes causan un calentamiento y una expansión de las barras con relación al rotor y debido a las diferencias en la resistencia eléctrica de las barras individuales. Este calentamiento junto con la expansión que tiene lugar en las barras, serán desiguales y por lo tanto esto producirá un agrietamiento de las juntas, en las cuales las barras se unen al anillo de cortocircuito. Cuando aparece una grieta, la resistencia de la barra se incrementa, lo que incrementa aún más el calentamiento, empeorando el estado de la grieta.

Al mismo tiempo, las barras del rotor vecinas recibirán corrientes incrementadas debido a la corriente reducida en la barra con grietas, con lo que se producirá una rotura en cadena de las barras. A continuación daremos una explicación más detallada de este tipo de fallo.

Los rotores de los motores de inducción, están constituidos por un conjunto de barras unidas en sus extremos unos anillos, denominados anillos de cortocircuito. El conjunto formado por las barras y los anillos de cortocircuito, recibe el nombre de jaula. El núcleo magnético del rotor está constituido por una serie de chapas magnéticas, aisladas y apiladas, que ocupan el espacio comprendido entre las barras. Las jaulas de este tipo de motor pueden estar formadas por diferentes tecnologías como se aprecian en la Fig. 3.1; las barras pueden estar encastradas fuertemente en las ranuras del núcleo

magnético y soldadas en los extremos a los anillos de cortocircuito. En este caso, barras y anillos suelen estar fabricados en cobre.

Otra opción diferente de la anterior consiste en construir la jaula en aluminio, de tal manera que tanto barras como anillos se funden dentro del paquete magnético rotórico. La primera forma constructiva es característica de motores de gran tamaño, mientras que la segunda corresponde a motores de menores dimensiones.

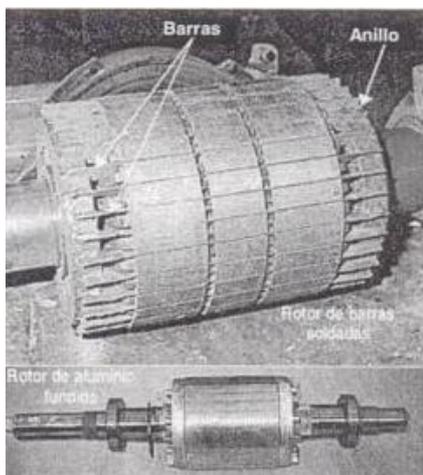


Figura 3.1: Rotores de motores de inducción. En la parte superior rotor de Cobre. En la parte inferior rotor de Aluminio fundido.

Las asimetrías en la jaula rotórica de un motor de inducción suelen estar relacionadas con las altas temperaturas alcanzadas en el rotor y con las elevadas fuerzas centrífugas que son soportadas tanto en las barras como en los anillos, en especial durante los regímenes de funcionamiento transitorio. Los problemas pueden comenzar durante la construcción de la máquina debido a una fundición defectuosa en los rotores de aluminio, o a uniones defectuosas en el caso de anillos de cortocircuito soldados o ensamblados. Por ello aparecen juntas de alta resistencia eléctrica o porosidades en la fundición que producen puntos de altas temperaturas dentro de la jaula.

La fractura suele iniciarse en los puntos de la barra que no están soportados por el cuerpo del rotor, es decir, en las proximidades de la unión con el anillo de cortocircuito o en éste mismo. Además, en esta zona es donde suelen acumular las mayores tensiones mecánicas de la estructura. En el proceso de desarrollo de la avería hay que tener en cuenta que las barras rotóricas soportan las fuerzas de frenado y aceleración del motor; por tanto, si la máquina sufre variaciones bruscas en su velocidad de giro, originadas durante su ciclo de trabajo, o por el tipo de máquina accionada, el fallo puede desarrollarse rápidamente como consecuencia de la fatiga de los materiales.

También debido a los regímenes transitorios térmicos del motor la jaula puede sufrir movimientos diferenciales dentro del paquete magnético rotórico, lo que conduce habitualmente a la torsión y agrietamiento de los anillos. Una vez que una barra o anillo se ha agrietado, el proceso es degenerativo: la barra defectuosa se calienta en torno a la fisura hasta llegar a romperse. La rotura origina la aparición de arcos eléctricos entre las dos partes separadas, que habitualmente dañan al circuito magnético. Las barras adyacentes soportan entonces corrientes mayores y, por tanto, mayores sollicitaciones térmicas y mecánicas, con lo cual se inicia el proceso de aparición de nuevas grietas, como vemos en la Fig. 3.2.

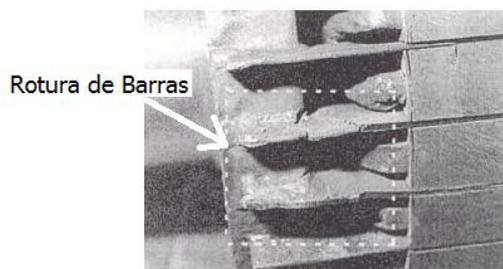


Figura 3.2: Barras rotas en la proximidad del anillo de cortocircuito en un motor de inducción.

El reducido tamaño de las holguras residuales produce una unión muy eficiente entre barras y chapas dando lugar a resistencias de contacto muy bajas. Por esto, es posible la circulación de corrientes entre las barras rotóricas y las chapas del núcleo en dirección perpendicular a las primeras. Este nuevo flujo de corriente estará distribuido a lo largo del rotor, circulando transversalmente a través de las chapas de material magnético entre las diferentes barras de la jaula.

Estas corrientes (denominadas “inter-bar currents” o también denominadas corrientes interlaminares), serán de especial importancia para poder analizar el mecanismo de fallo y sus consecuencias. Por lo tanto, si por una máquina sana pueden circular corrientes interlaminares, la distribución, de corriente resultado de una asimetría rotórica no será la misma ya que existe un nuevo camino para su recirculación: el propio núcleo magnético. De este modo, los efectos que se puedan detectar desde el exterior cuando se inicie la avería no serán los mismos que si la jaula estuviera perfectamente aislada, y, por lo tanto, el protocolo de diagnóstico empleado deberá tenerlo en cuenta.

3.5.2. FACTORES MAGNÉTICOS.

El desequilibrio magnético es un problema importante, ya que puede producir curvatura y atacar el bobinado del estator. En el motor “ideal”, el rotor está centrado en el entrehierro, y las fuerzas magnéticas están equilibradas en las direcciones opuestas, sin causar desviación en el rotor. En los motores reales, el rotor no se encuentra perfectamente centrado con respecto al entrehierro. Esto conlleva a una reducción del entrehierro, que implica una mayor fuerza de atracción debido al incremento de aire en esa zona. Así, la reluctancia de la trayectoria del flujo magnético, opuesta a la trayectoria del flujo, se reduce. La misma corriente magnetizante del bobinado puede crear un flujo mayor que cruce el aire, destacando por su mayor arrastre. A la vez, el entrehierro se incrementa en el lado opuesto de la máquina. La reluctancia se vuelve mayor aquí, provocando sobre el rotor unas fuerzas desequilibradas. El mayor arrastre en el lado que tiene el menor entrehierro tenderá a mover el rotor en esa dirección, haciendo el entrehierro todavía más pequeño. Este proceso continuaría hasta que en este punto tendríamos un entrehierro cero y el rotor se encuentre en contacto directo con el estator.

En la fase de diseño de los motores se trata de atajar este problema limitando al mínimo el entrehierro y limitando el montaje a la cantidad aceptable de excentricidad en el entrehierro. Esto está normalmente dentro de un rango entre 10-20% del entrehierro, según el tamaño de la máquina. También el tamaño del eje es seleccionado según su capacidad para resistir estas fuerzas de torsión (rigidez del eje).

El método de corrección que se suele utilizar, implica mejorar la geometría del entrehierro al hacer el taladrado del estator y/o en la curvatura o centrado del rotor.

3.5.3. FACTORES RESIDUALES.

Estos esfuerzos se pueden representar en un plano (es decir, radial o axial), y no son normalmente perjudiciales para el rotor mientras no causen algún cambio significativo en la geometría del mismo. Algunos de los más comunes son el resultado de las operaciones de fundición, soldadura con aleación, apilado, y del fresado.

3.5.4. FACTORES DINÁMICOS.

Algunos de los más comunes esfuerzos dinámicos asociados con el diseño del rotor son enumerados a continuación. Muchos de estos esfuerzos son

función de los procedimientos de funcionamiento y pueden ser externos a los límites de diseño normales.

a)Par del eje: El motor está diseñado para manejar pares que excedan los pares normales asociados al motor funcionando a plena carga o en caso de avería. Estos pares transitorios se producen durante el arranque o en la barras de distribución. Por ejemplo, es posible generar pares en el eje que sean de unas 20 veces el par del motor a plena carga a través de una barra de distribución fuera de fase. Altos pares en el eje se pueden también producir en condiciones normales de funcionamiento si ocurre una resonancia torsional, especialmente en motores de alta velocidad.

b)Esfuerzos cíclicos: El eje del motor puede estar sometido a esfuerzos cíclicos que pueden provocar un eventual fallo por fatiga. Los esfuerzos cíclicos pueden ser causados por la aplicación, así como por los defectos de alineación entre los equipos de arrastre, las correas de transmisión sobretensionadas o el incorrecto tamaño de la polea. Cargas cíclicas de esta naturaleza deben ser analizadas para tener certeza de que se mantienen los límites de funcionamiento seguro.

3.5.5. FACTORES AMBIENTALES.

Las partículas extrañas que pueden atascar los conductos de ventilación constituirían uno de estos factores, así como también pueden ser las sustancias químicas o la humedad, los cuales atascarían y acabarían causando daños en el rotor. Un buen ejemplo sería una alta concentración de una solución cáustica que podría corroer fuera de la jaula de aluminio del rotor o azufre que echaría humo, los cuales pueden causar deterioros.

3.5.6. FACTORES MECÁNICOS.

Algunos de los más comunes incluyen los siguientes:

- porosidad de la fundición, laminación suelta
- piezas fatigadas o rotas
- montaje incorrecto entre el eje y el centro
- mala calidad de la geometría rotor / estator
- pérdida del entrehierro, eje del rotor torcido
- fallos de los cojinetes, defecto de alineación
- materiales incorrectos
- resonancia de los dientes

3.6. AVERÍAS EN LOS RODAMIENTOS Y EJE.

Históricamente, y de acuerdo con las estadísticas de fallos, los rodamientos son la primera causa de avería en los motores eléctricos. Estos resultados, no son generalizables para motores industriales, ya que se realiza una determinada estrategia de mantenimiento, de modo que se realiza periódicamente su reengrase o su sustitución antes de que se produzca el fallo, bien por realizar mantenimiento preventivo o un mantenimiento predictivo. Así, por ejemplo, en aplicaciones de tracción, el porcentaje de fallos en rodamientos no supera el 10% de las averías de los motores. En todo caso, los rodamientos tienen un tiempo de vida finita debido a la fatiga del material cuando trabajan en condiciones ideales y que es especificado por los fabricantes y definida por diversos términos como: duración nominal, promedio, etc.

Son causas comunes de averías las siguientes:

- Deficiente montaje.
- Carga excesiva. En estado estacionario o dinámico.
- Lubricación inadecuada, insuficiente o excesiva.
- Contaminación externa.
- Diseño erróneo (tamaño incorrecto).
- Exposición a vibración cuando el motor está parado.
- Paso de corriente eléctrica.

El paso de corriente a través de los rodamientos es un fenómeno difícil de prever y sus efectos complicados de cuantificar. Puede aparecer en todo tipo de máquinas rotativas como consecuencia de la aparición de tensiones en los ejes y que únicamente está limitado por la impedancia característica del rodamiento. La aparición de tensiones en el eje es un hecho común a todo tipo de máquinas y puede obedecer a inducciones electromagnéticas o a fenómenos electrostáticos.

Las tensiones inducidas en el eje son debidas a la presencia de asimetrías en el circuito magnético, en especial para máquinas de gran longitud axial. Las variaciones en el entrehierro debidas a la presencia de excentricidad del rotor o a deformaciones del estator, así como la utilización durante el proceso de construcción de la máquina de materiales no homogéneos con distinta permeabilidad u otras asimetrías, dan lugar a una distribución del flujo de dispersión a lo largo del circuito formado por el eje, rodamientos y carcasa que origina la aparición de una diferencia de potencial en los extremos del eje. Análogamente, las distribuciones asimétricas de las corrientes, tanto en el estator como en el rotor, resultantes por ejemplo, de cortocircuitos entre

espiras del estator, fracturas en las barras del rotor, sistema de alimentación desequilibrado, etc., favorecen también la distorsión del campo magnético, lo que origina a su vez la aparición de tensiones inducidas en el eje de la máquina.

La presencia de cargas electrostáticas también puede ser motivo de la aparición de tensiones en el eje. Es el caso, por ejemplo, de turbogeneradores, donde el choque de las pequeñas gotas de agua con las palas de la turbina, puede generar cargas electrostáticas que se acumulan sobre el eje del motor.

El paso de corriente por los rodamientos facilita la creación de cráteres en las zonas de contacto de los elementos rodantes, e incluso con corrientes débiles, se pueden formar estrías en forma de marcas paralelas al eje, que toman una tonalidad marrón y ocupan gran parte o todo el camino de rodadura; además, se produce la degradación del lubricante y el desprendimiento de partículas metálicas. Algunas fuentes señalan que el 25% de las averías que aparecen en los rodamientos utilizados en motores, corresponden a aplicaciones con altas frecuencias y grandes gradientes de tensión.

Las más importantes en porcentaje son las debidas a corrosión, fatiga, fracturas y sobrecargas. Para los motores eléctricos, el fallo por fatiga puede llegar a alcanzar el 90% del total de fallos en el eje, particularmente si los mismos no están diseñados, fabricados o usados de acuerdo con la aplicación requerida. Los fallos por fatiga pueden clasificarse como: fatiga flectora, fatiga torsional y fatiga axial.

- En el caso de fatiga axial, los rodamientos que portan la carga pueden ser causa de fallo antes que el eje (los rodamientos actúan como fusibles mecánicos del sistema).
- En el caso de fatiga flectora, casi todos los fallos se producen debido a la alternancia cíclica de los esfuerzos de tracción y compresión sobre el eje.
- Los fallos torsionales están asociados con el valor del par de carga transmitido. Las sollicitaciones sobre el eje son mayores en motores alimentados por convertidor de frecuencia, debido a la presencia de pares oscilatorios.

3.6.1. RODAMIENTOS EN MOTORES DE INDUCCIÓN

Los rodamientos son el elemento mecánico que reducen la fricción entre un eje y las piezas conectadas a éste por medio de rodadura, sirviendo de

apoyo y facilitando su desplazamiento. Los rodamientos son una pieza clave en los motores eléctricos pero como todo elemento sufre esfuerzos que le pueden hacer fallar.

Debido relativamente al bajo costo y alta fiabilidad de los rodamientos, estos elementos son muy utilizados en la industria. Pero, debido a las tolerancias de fabricación tan cerradas medidas en micras y al acabado superficial pulido espejo de los elementos rodantes del rodamiento donde ocurre la falla, la reparación de estas fallas convencionalmente se realiza mediante la sustitución del rodamiento.

Descripción de los componentes principales de los rodamientos que se pueden observar en la Fig. 3.3:

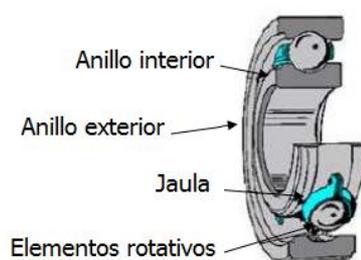


Figura 3.3: Componentes principales de los rodamientos.

- El anillo interior, tiene un ajuste muy justo en la flecha o eje. También es difícil prevenir un desgaste prematuro. El anillo interior normalmente gira con la flecha.
- El anillo exterior, normalmente se encuentra dentro del alojamiento de la máquina y es fijo, las tolerancias de montaje son muy cerradas, normalmente en micras μm .
- La jaula mantiene los elementos rotativos en su lugar.
- Los elementos de rotativos son rodillos, bolas o algún otro dispositivo rodante, que permite la acción rodante entre los anillos interior y exterior. Los elementos rodantes reducen la fricción al deslizarse directamente en las pistas de rodadura y permiten movimiento relativo se los dos anillos.

La lubricación de los rodamientos es muy importante para reducir la fricción y la generación de calor entre los componentes. Los fabricantes de rodamientos cuentan con diferentes tipos de sellos laterales para evitar la contaminación hacia el interior los elementos y del lubricante.

3.6.1.1. FALLO EN RODAMIENTOS

Los principales fabricantes de rodamientos cuentan con estadísticas donde indican que cerca del 16% de las fallas que se dan en los rodamientos son el resultado del mal manejo de estos. Esto es causado por el almacenamiento, transportación e instalación inadecuada del rodamiento.

El 84% restante son instalados libres de defectos. En este momento no hay indicadores de fallas en rodamientos. Si un indicador está presente durante la operación inicial del rodamiento, por lo general se trata de un ajuste en el rodamiento o problema de ensamblado. Este porcentaje se subdividirá como se muestra a continuación en la Fig. 3.4 de la siguiente manera:

- El 36% de las fallas en rodamientos son el resultado de una lubricación deficiente o lubricación inadecuada, mezcla de lubricantes o generación de una película límite de lubricante delgada, a menudo generada por una excesiva vibración en el eje.
- El 34% son el resultado de la operación inadecuada de los rodamientos como pudiera ser el desbalance, excentricidad entre eje, desalineamiento de poleas o remplazo indicado por los programas de mantenimiento preventivo.
- El 14% falla debido a la contaminación.

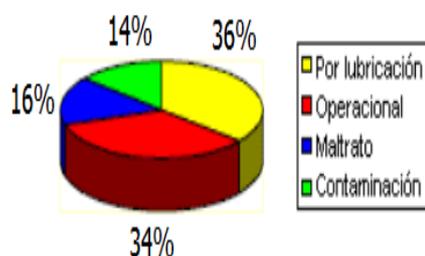


Figura 3.4: Datos estadísticos de las causas que producen fallos en los rodamientos.

Los fallos producidos en los rodamientos, se pueden clasificar como distribuidos y localizados.

- Defectos distribuidos: Estos fallos son las rugosidades superficiales, ondulaciones sobre las pistas, desalineamiento de las pistas, lubricación inadecuada y elementos rodantes desiguales. Pueden ser causados por errores en la manufactura, inadecuada instalación o debidos al desgaste. Las vibraciones debidas a defectos de manufactura han resultado ser más bajas en la mayoría de los casos, que las debidas a defectos producidos por desgaste o fatiga.

- Defectos localizados: Son debidos a grietas, hendiduras, rebordes, resaltes, picaduras. El más común de todos es la picadura de las pistas o de los elementos rodantes, produciendo una grieta por fatiga originada subsuperficialmente, que se propaga hacia la superficie, hasta que una pieza de metal se desprende localmente produciendo un pequeño defecto. La falla por fatiga superficial es acelerada cuando el rodamiento está sobrecargado o sometido a cargas de choque o impacto durante su funcionamiento o instalación y también con el incremento de velocidad.

Puesto que resulta difícil diferenciar cuando la vibración es causada por defectos localizados o distribuidos, es recomendable analizar tanto la frecuencia como la amplitud de las componentes espectrales relacionadas con la vibración

3.6.2. EXCENRICIDAD EN MOTORES DE INDUCCIÓN

La excentricidad en el entrehierro es una condición de operación en la cual la distancia entre el estator y el rotor es distinta. Es producido por una atracción magnética o fuerzas radiales desequilibradas, que pueden llegar a causar daños en el motor debido a la fricción entre el estator y el rotor. Además, la fuerza magnética radial puede ejercer vibraciones potencialmente dañinas sobre el núcleo y devanados del estator. Por este motivo es necesario detectar la excentricidad antes de que la máquina se deteriore.

Existen tres tipos de excentricidades:

- Excentricidad Estática
- Excentricidad Dinámica
- Excentricidad mixta o también llamada combinada estática-dinámica

3.6.2.1. EXCENRICIDAD ESTÁTICA

La excentricidad estática se produce cuando un espacio mínimo queda fijo en el espacio del entrehierro, produciendo una atracción magnética desequilibrada estable en una dirección. Esto puede provocar el arqueado del eje del rotor, desgaste de los rodamientos y finalmente conducir a la excentricidad dinámica.

Como se muestra en la Fig. 3.5, el centro de rotación coincide con el centro geométrico del rotor, pero se encuentra desplazado respecto del centro geométrico del perímetro interno del estator. El espesor del entrehierro (Q) es

función únicamente del ángulo y por lo tanto, la posición de mínimo entrehierro se encuentra fija en el espacio.

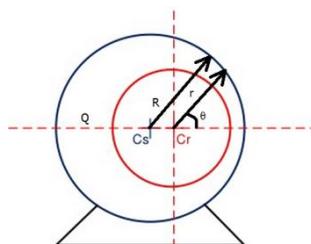


Figura 3.5: Excentricidad Estática $Q=f(\theta)$

Causas de la excentricidad estática:

- Un núcleo del estator con forma ovalada, debido a defectos en la fabricación.
- Desalineamiento de los rodamientos durante el montaje.
- Desgaste de los rodamientos.
- Acoples mecánicos desalineados.

3.6.2.2. EXCENTRICIDAD DINÁMICA

La excentricidad dinámica ocurre cuando el rotor gira alrededor del centro del estator pero sobre su propio centro, lo que causa que un entrehierro mínimo el cual siempre se mueve a través del entrehierro.

Como se observa en la Fig. 3.6, el centro geométrico del rotor se encuentra desplazado respecto del centro de rotación. En este caso el espesor del entrehierro va a ser función tanto del ángulo como del tiempo. Es decir, las posiciones de mínimo entrehierro giran con el rotor.

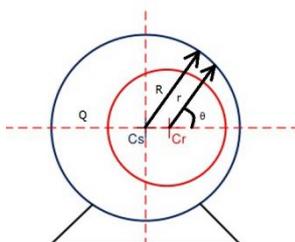


Figura 3.6: Excentricidad Dinámica $Q=f(\theta,t)$

Causas de la excentricidad dinámica:

- La velocidad de giro del centro del rotor no es igual a la velocidad de giro de la máquina.
- Como la excentricidad estática puede derivar en una excentricidad dinámica las causas anteriormente mencionadas para la estática son válidas.
- Resonancia mecánica a una velocidad crítica.

3.6.2.3. EXCENTRICIDAD MIXTA

Las excentricidades estática y dinámica tienden a co-existir en las máquinas. El rotor no gira alrededor de su centro ni alrededor del centro del estator, pero lo hace alrededor de un punto entre los centros del rotor y estator, como muestra en la Fig. 3.6.

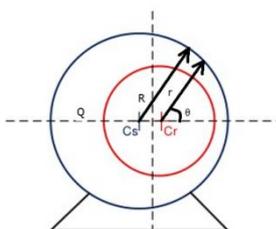


Figura 3.6: Excentricidad Mixta

3.6.2.4. FALLO DEBIDO A EXCENTRICIDAD ROTÓRICA

La excentricidad en el rotor se caracteriza por la existencia de variaciones en la longitud del entrehierro y como resultado se produce una distribución asimétrica del flujo magnético, que origina a su vez un conjunto de efectos adversos en el motor, entre los cuales pueden destacarse:

- Desequilibrio del campo magnético en el entrehierro (También llamado Excentricidad).
- Vibraciones.
- Ruido. Existe una relación entre la excentricidad del entrehierro y el ruido generado por la máquina. Algunas experiencias señalan que excentricidades severas, del orden del 25%, contribuyen entre 2 y 3 dB al nivel de ruido total generado por la máquina.
- Circulación de corriente eléctrica a través de los rodamientos.

La excentricidad rotórica es debida principalmente a causas de diseño, fabricación, montaje del motor y del propio funcionamiento. A continuación se muestran alguna de las causas más comunes:

- Posicionamiento incorrecto del rotor respecto al estator.
- Desalineamiento.
- Deformaciones del eje.
- Desequilibrio de las fuerzas radiales en el entrehierro (campo magnético desequilibrado).
- Tolerancias dimensionales de los distintos componentes.
- Averías en los rodamientos. (Montaje defectuoso, holguras, desgaste excesivo, etc.)
- Desequilibrio dinámico del rotor.
- Deformación del rotor consecuencia de sobrecalentamientos o de la existencia de gradientes térmicos.
- Resonancia mecánica a la velocidad crítica.

Capítulo 4

Técnicas de mantenimiento en la Industria

4.1. INTRODUCCIÓN

Cuando diseñamos o adquirimos un sistema, se espera de este que satisfaga una determinada necesidad, realizando una función especificada, pero no de cualquier forma sino cumpliendo con unos objetivos establecidos. Pero, aunque se cumplan estos objetivos en las fases iniciales de la vida operativa del equipo, siempre se producirán cambios en su comportamiento a lo largo de su vida útil. Estos cambios pueden provocar que las características de operación no cumplan con los criterios pre-especificados. Para que el sistema recupere estas especificaciones, será necesario llevar a cabo una serie de tareas denominadas tareas de mantenimiento. Además, según el diseño y la construcción del equipo, éste tendrá unas características más o menos apropiadas para realizar estas tareas. Estos aspectos dan lugar a los conceptos de “Mantenimiento” y “Mantenibilidad”.

Se puede definir como “Mantenimiento” al conjunto de acciones o técnicas que permiten conservar o restablecer un equipo en un estado específico y asegurar un determinado servicio con un coste mínimo y la mayor seguridad.

Se puede definir como “Mantenibilidad” a la característica inherente de un elemento asociada a su capacidad de ser recuperado para el servicio cuando se realiza la tarea de mantenimiento necesaria.

4.2. MANTENIMIENTO DE MOTORES DE INDUCCIÓN

A continuación se hace una descripción de los objetivos principales de los motores de inducción, y una serie de funciones que se deben de realizar para realizar un buen mantenimiento.

4.2.1.OBJETIVOS DEL MANTENIMIENTO DE MOTORES DE INDUCCIÓN

El objetivo principal del mantenimiento es prolongar la vida útil de los equipos. El mantenimiento es sólo una de las herramientas de las que se dispone para conseguir una satisfactoria fiabilidad. No obstante, las empresas se ven obligadas a obtener el máximo rendimiento posible de los componentes que ya poseen a través de políticas operativas efectivas, incluyendo mejoras en los programas de mantenimiento.

Se pueden establecer como principales objetivos del mantenimiento:

- Reducir al máximo los costes debidos a las paradas por averías del equipo, que comportan pérdidas de producción o servicio.

- Limitar el deterioro de dichos equipos y, en consecuencia, el número de rechazos o la degradación de la calidad del producto.
- Proporcionar conocimientos y asistencia, a partir de la experiencia adquirida, para la construcción, modificación y adquisición de nuevos equipos.
- Efectuar las reparaciones de emergencia lo más pronto posible, empleando los métodos más fáciles de reparación.

El mantenimiento afecta directamente a la fiabilidad de los componentes y del sistema:

- Si se realiza poco mantenimiento, puede resultar en un número elevado de fallos que conlleven costes importantes.
- Si se realiza excesivo mantenimiento, puede mejorar la fiabilidad pero el coste aumentará notablemente.

Por ello, se debe alcanzar un equilibrio entre ambos aspectos.

Por lo tanto, es necesario un mantenimiento organizado, eficiente y desarrollado que garantice a un coste competitivo la disponibilidad y funcionalidad de nuestro motor.

4.2.2.FUNCIONES DEL MANTENIMIENTO DE MOTORES DE INDUCCIÓN

Entre las principales funciones que se deben realizar para un buen mantenimiento del motor, llegando a la solución de compromiso están:

- Planificar el mantenimiento del motor, de los equipos eléctricos e instalaciones del entorno donde opera el motor.
- Ejecutar el mantenimiento del motor, de los equipos eléctricos e instalaciones según los planes establecidos.
- Controlar, documentar y efectuar el seguimiento del proceso de mantenimiento del motor, de los equipos eléctricos e instalaciones.
- Evaluar el mantenimiento del motor, de los equipos eléctricos e instalaciones.
- Mantener al equipo en su máxima eficiencia de operación.
- Reducir lo máximo posible los costos de mantenimiento.
- Investigar las causas y remedios de las paradas de emergencia para desarrollar acciones que eviten paradas drásticas del sistema.

Hay que tener en cuenta, los nuevos desarrollos en las técnicas de gestión y mantenimiento de los equipos que incluyen:

- Herramientas que soportan las decisiones, tal como estudios de rangos, análisis de modos de fallo y sus efectos y sistemas expertos.
- Nuevas técnicas de mantenimiento, particularmente el monitorizado del estado.
- Diseño de los equipos, prestando especial atención a la fiabilidad y al mantenimiento de los mismos.
- Cambios importantes en la organización, dirigidos hacia la participación, trabajo en equipo y flexibilidad.

4.3. ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO EN MOTORES DE INDUCCIÓN

Los motores de inducción son considerados Grupos Mínimos de Corte(GMC) de Orden 1 puesto que una avería inesperada puede provocar el paro general de la planta, con el coste económico que esto conlleva.

Una estrategia ideal de mantenimiento sería aquella que se realizara por el equipo de mantenimiento oportuno, justo en el instante en el que se fuera a producir el fallo o avería, o que coincidiera con su periodo de reparación. En este caso, el coste de reparación sería el mínimo. Pero esta situación lógicamente está lejos de la realidad. Nunca conoceremos exactamente el instante previo al fallo y, además, los periodos de paro y mantenimiento programado no van a coincidir. Por ello, se debe elegir una estrategia de mantenimiento adecuada, dependiendo de la naturaleza y de lo criticidad del equipo o sistema que se va a emplear, atendiendo a razones de fiabilidad, disponibilidad y coste.

Debido al aumento de la competitividad industrial, y las exigencias de calidad, han motivado que las empresas destinen mayor cantidad de recursos, tanto humanos como materiales a sus planes de mantenimiento de equipos e instalaciones, donde los motores de inducción son pieza clave.

A continuación en la Fig. 4.1 se representa gráficamente los diferentes tipos de mantenimiento que vamos a analizar:



Figura 4.1: Clasificación de las estrategias de mantenimiento en función de su relación costo-beneficio y de la dificultad para su implantación.

Las intervenciones de mantenimiento pueden ser programadas o no programadas. Como podemos apreciar en la Fig. 4.2, dentro de las intervenciones programadas podemos distinguir tres tipos según su origen, el cual es debido a una acción reactiva, preventiva o predictiva.



Figura 4.2: Intervenciones de mantenimiento.

4.3.1.MANTENIMIENTO REGRESIVO

Este tipo de mantenimiento no se puede considerar en sí mismo una estrategia, debido a que no existe ninguna previsión de que aparezcan averías o fallos, y por lo tanto, consiste en no plantear ningún tipo de programa de mantenimiento. Por ello, es un tipo de mantenimiento que promueve la filosofía de “usar y tirar”, donde se propone utilizar el componente hasta su avería considerando una reparación como antieconómica. Pero es importante desde el punto de vista económico y a su fácil de implantación. A día de hoy sigue siendo un método muy utilizado.

4.3.2.MANTENIMIENTO REACTIVO Ó CORRECTIVO

Es el tipo de mantenimiento más sencillo de implantar. El mantenimiento correctivo se basa en mantener en funcionamiento el motor hasta que se produzca la avería, momento en el cual se lleva a cabo las reparaciones oportunas o la sustitución del mismo. El mantenimiento reactivo puede realizarse inmediatamente tras producirse la avería, o programarse en el momento en el cual sea posible la intervención, con el fin de afectar lo menos posible la disponibilidad de la producción. Para su aplicación, es necesario disponer de un gran número de empleados suficientemente cualificados, que pueda responder ante cualquier imprevisto, estando normalmente, exentos de cualquier otra función salvo la de atender las emergencias.

Este método que ofrece las siguientes ventajas:

- Es fácil de implementar.
- Bajo coste de implantación.
- Es muy eficiente sobre ciertos activos, ya que sólo actúa sobre ellos tras producirse una avería.
- Produce ahorros en la planificación, ya que las órdenes de trabajo se ejecutan inmediatamente según se producen las averías
- Es un método adecuado para activos no críticos; es decir donde una avería no afecta a la interrupción o reducción de la línea de producción, no provoca daños irreversibles en la máquina o costosas reparaciones y no afecta a la calidad del producto fabricado.

Este método también tiene inconvenientes como veremos a continuación:

- Puede provocar la interrupción de la producción con el consiguiente aumento de costes. Por lo que no conviene su aplicación en motores que sean críticos o esenciales donde una avería inesperada genere algún problema para la seguridad de la planta.
- Un fallo localizado puede propagarse originando una avería mucho más grave sobre el conjunto.
- El momento que ocurre la avería es imprevisible, pudiendo originarse en un momento de baja disposición de recursos humanos o técnicos.
- Exige un gran almacén de repuestos que pueda prolongar los tiempos de inactividad.
- No se busca la causa u origen de la avería.

4.3.3.MANTENIMIENTO PREVENTIVO

El mantenimiento preventivo consiste en realizar un determinado número de revisiones, según un calendario prefijado, realizando las operaciones oportunas.(cambio de aceite o filtros, sustitución de gomas, limpieza y puesta a punto de determinados elementos, etc.).

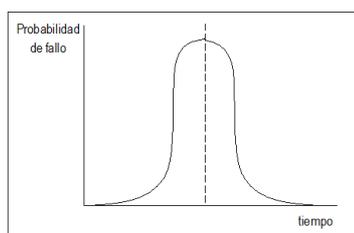


Fig. 4.3: Probabilidad de fallo por unidad de tiempo

El principio de la sustitución a intervalo fijo se ilustra en la figura 4.3, que representa la distribución de la probabilidad de fallo de un determinado componente y que depende claramente del tiempo. Este tipo de gráficas se utilizan para el cálculo de la tasa de fallo en función del periodo de sustitución. Esto se combina entonces con los datos de costes para obtener el coste total esperado en función del tiempo(figura 4.4). El punto de frecuencia optima de sustitución será la mejor política de mantenimiento, siempre y cuando su coste sea menor que el de las otras estrategias alternativas. La dificultad para obtener los datos estadísticos necesarios es un factor que debe de tenerse en cuenta para su aplicación. Fijar el calendario de revisiones es producto de la experiencia práctica acumulada durante años de observación y manejo de los equipos.

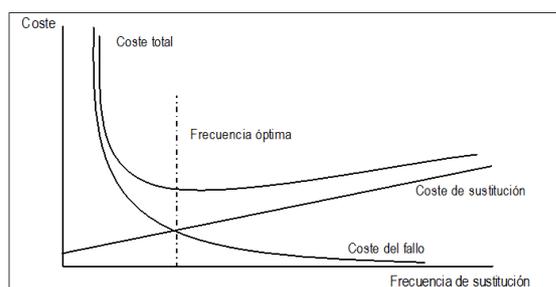


Fig. 4.4: Coste esperado en función del periodo de sustitución.

Con el mantenimiento preventivo no se puede evitar que se produzca un determinado deterioro con respecto a la situación inicial, es decir, que se cambien piezas antes de que éstas hayan llegado realmente al final de su vida útil (problema de sobredimensionamiento). Este es el caso de muchos motores industriales sometidos a sollicitaciones muy variables (térmicas,

eléctricas, mecánicas y ambientales). Algunos estudios indican que sólo el 10% de los componentes que se cambian durante las operaciones de mantenimiento preventivo necesitan realmente ser cambiados, es decir, el restante 90% podría seguir prestando servicio de forma satisfactoria.

El objetivo de este tipo de mantenimiento es reducir la probabilidad de avería o pérdida de rendimiento de una máquina o instalación tratando de planificar unas intervenciones que se ajusten al máximo a la vida útil del elemento intervenido.

Esta estrategia de mantenimiento reduce las paradas no planificadas por avería, pero se recomienda si no existe una manera de conocer el estado de las piezas o componentes a sustituir.

4.3.4.MANTENIMIENTO PREDICTIVO

Para poder diferenciar este tipo de mantenimiento con respecto a los anteriormente citados y respondiendo a las necesidades de establecer un aumento de la seguridad sobre el funcionamiento de los equipos junto con una reducción de costes en mantenimiento, se configura una metodología que nos permita la vigilancia continua del estado de las máquinas o motores, especialmente de aquellas con mayor criticidad dentro de la línea de producción o empresa.

El mantenimiento predictivo tiene una diferencia concreta con respecto a los anteriores, y es que consiste en el seguimiento continuo de algunas variables que determinan el estado del sistema, y se comparan con patrones preestablecidos a fin de establecer el instante óptimo en el que se ha de realizar la reparación o sustitución. Esto contrasta con el mantenimiento correctivo, el cual implica que no se realiza con éxito un control de estado y con el preventivo que está basado en datos estadísticos de fallo de la unidad. En general, el mantenimiento predictivo será más eficiente y flexible que cualquiera de los otros tipos de mantenimiento. Cuando haya indicación de deterioro se puede proponer la parada con anterioridad al fallo. Además, permite reducir la cantidad de piezas sustituidas innecesariamente con carácter preventivo y, con una buena elección del parámetro de estudio, se puede conocer la presencia inminente de fallo antes de que adquiera magnitudes que le hagan irreversible, minimizando los costes directos de las reparaciones.

La elección de una determinada estrategia de mantenimiento predictivo, que se apoye en técnicas de monitorización, dependerá de las características de deterioro del equipo estudiado y de los costes que su reparación implica. En

el extremo más simple, en equipos de fácil sustitución, tal como las bombillas, no tiene sentido utilizar técnicas de mantenimiento más sofisticadas que el mantenimiento correctivo. En el extremo contrario están los equipos de difícil sustitución que pueden requerir su desmontaje completo para una inspección visual (lo que a su vez puede provocar nuevos fallos), como por ejemplo la detección de averías en la jaula de los motores de inducción. Es con equipos de este tipo en donde las técnicas de monitorización complejas, pueden resultar de gran ayuda.

El control exhaustivo de estas variables, es muy difícil de implementar, ya que es necesaria una fuerte inversión inicial en equipos de medida (sensores, equipos de recogida de datos y análisis), y la cualificación necesaria del personal que vaya a desempeñar esta función. No obstante, para el estudio que nosotros vamos a realizar, es la que proporciona mejores resultados a nivel industrial, puesto que se maximiza el tiempo de vida de los equipos, garantizando la máxima calidad, continuidad y seguridad del proceso productivo.

Como ventaja adicional, del análisis de las medidas realizadas se puede conocer cuál fue la causa de la avería. Esto permite no solo sustituir la pieza defectuosa, sino, que dentro de lo posible, se pueden modificar las condiciones de trabajo de la máquina para evitar la aparición de nuevas averías.

Dentro del mantenimiento predictivo de motores de inducción, una de las decisiones más importantes que se ha de tomar en el momento de implementar un sistema de mantenimiento predictivo, es cuál o cuáles serán las variables que se monitorizarán y que permitirán realizar el diagnóstico de la máquina. En un principio, serían muchas las variables que se podrían tomar en consideración a la hora de poder emitir un diagnóstico, pero han de cumplir el requisito de poder monitorizarlas, mientras la máquina se encuentre en funcionamiento, pudiendo realizar medidas no invasivas. Estas restricciones reducen el conjunto de posibilidades al análisis de las vibraciones mecánicas o al análisis de las corrientes de alimentación.

Con respecto al método de monitorización, hay que tener en cuenta una serie de cuestiones de cara a la eficiencia en la aplicación de esta forma de mantenimiento. En concreto:

- El mantenimiento predictivo tiene una gran dependencia de la técnica de monitorización empleada. El alcance de su aplicación y la fiabilidad, dependerá directamente del tipo de sensores empleados para dicha

medición. Así, serán requisitos valorables en la elección de los sensores:

- ✓ Rapidez, precisión y que sean autocorrectivos.
 - ✓ Diseño simple y construcción compacta.
 - ✓ No intrusivos y preferentemente de no contacto.
 - ✓ Alta fiabilidad (superior a la del sistema monitorizado).
 - ✓ Que no incremente la complejidad del sistema.
 - ✓ Fácil calibración.
 - ✓ Capacidad de trabajar en ambientes agresivos.
-
- La técnica de monitorización empleada debe poder excluir entre los distintos tipos de averías. En ocasiones, dos o más averías distintas se presentan de una misma forma.
 - Se debe establecer unos márgenes admisibles de los parámetros observados, así como valores de atención y alarmas previas para conocer, con mayor precisión, el grado de deterioro. Existen unas advertencias sobre los parámetros límites que se desean emplear, por ejemplo, de niveles de vibración para máquinas rotativas; no obstante, no deben aplicarse de manera estricta si previamente no ha sido comparados por la experiencia, siendo función del empleado o departamento de mantenimiento oportuno el establecer estos márgenes y su significado a partir de las variables medidas y de la experiencia de reparación.
 - Las magnitudes observadas deben ser accesibles. Así en ocasiones será difícil colocar los sensores de una manera adecuada.
 - La monitorización de los equipos puede realizarse de forma continua(en tiempo real) o bien tomando registros de los parámetros observables de forma discreta(por impulsos cada cierto tiempo). En este último caso, la sucesión de medidas debe ser la adecuada para que no se produzca y desarrolle una determinada avería en el intervalo entre dos muestras. Por ello, debe utilizarse un análisis de las tendencias con la evolución de las variables monitorizadas, permitiéndose una adaptación de la frecuencia de las medidas según se desarrolla la avería.
 - La avería o fallo de un sensor de monitorización o del equipo asociado debe detectarse inmediatamente y no debe darse la posibilidad de confusión entre la avería del motor y avería del equipo de medida.
 - Siempre que sea posible se utilizará más de un sensor para observar cada máquina, tratando de que sea compatible el que un mismo sensor tome datos de varias máquinas.

Actualmente las técnicas predictivas de mayor implantación (transformadores, máquinas rotativas, etc.) son:

- Análisis de vibraciones.
- Inspecciones infrarrojas.
- Análisis de aceites.
- Detección de ultrasonidos.

Cada una de estas técnicas tiene su aplicación en la detección y diagnóstico de un conjunto determinado de fallos. Estas técnicas no son limitantes entre sí, sino que pueden realizarse en conjunto para aumentar la seguridad del diagnóstico, es decir, cuando dos o más técnicas permiten el diagnóstico de un mismo fallo, serán complementarias y aumentarán la fiabilidad del diagnóstico.

El mantenimiento predictivo puede reportar las siguientes ventajas:

- Observación del estado de la máquina en funcionamiento (monitorización "on-line"), lo que elimina paradas, desmontes innecesarios, permite eliminar la sustitución de materiales que están en buen estado y minimiza el número de intervenciones humanas.
- Los componentes pueden aislarse de su normal funcionamiento y repararse en el momento oportuno para evitar graves consecuencias sobre el sistema de producción.
- Las acciones del mantenimiento pueden ser planificadas y programadas de acuerdo con la disponibilidad de los recursos humanos y materiales, reduciendo de este modo el tiempo de intervención y disminuyendo los costes de stocks.
- Los defectos, al ser detectados en la fase inicial de su desarrollo, pueden ser reparados antes de que se extiendan o propaguen sobre la máquina y produzcan efectos secundarios desastrosos, cuya reparación exigiría un mayor coste.
- La fiabilidad de las instalaciones aumenta considerablemente debido a la observación individual del funcionamiento de los componentes que lo conforman.
- Mejora el conocimiento sobre el funcionamiento de las máquinas y el sistema en general.
- Las técnicas de monitorización pueden aplicarse de manera automática, pudiendo realizarse el control desde centros distantes de la maquinaria, controlados de forma remota, con el equipo de telemando oportuno.

4.3.5.MANTENIMIENTO PROACTIVO

El mantenimiento proactivo o ingeniería del mantenimiento es una estrategia que consiste en la investigación de las causas de las averías (RCA: Root Cause Analysis) y busca remedios para evitar que se repitan y así aumentar la fiabilidad de los equipos.

Las prácticas proactivas más frecuentes en el mantenimiento proactivo de motores de inducción son el equilibrado dinámico de rotores y la alineación de precisión de acoplamientos. Otras prácticas menos habituales pero importantes en la industria son los análisis estructurales de tipo ODS (Operating Deflection Shape) o Análisis Modal Experimental, aplicados a la modificación de bancadas y elementos estructurales y al rediseño operativo del equipo.

El análisis del mantenimiento proactivo se ve potenciado gracias al uso de las nuevas tecnologías desarrolladas para el diagnóstico predictivo, ya que así, se realizan de manera más fácil y sencilla, las modificaciones tanto constructivas como operativas necesarias en los motores o equipos de proceso.

4.3.6. NUEVAS ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO

En esta sección se analizarán las nuevas líneas de mantenimiento, en la que se están realizando estudios para mejorar la fiabilidad de los sistemas.

4.3.6.1. MANTENIMIENTO BASADO EN LA FIABILIDAD (RCM)

Esta estrategia se basa en la planificación del mantenimiento y la eliminación de las causas de la avería en base al conocimiento del estado de operación de los equipos. El objetivo principal es conseguir la máxima fiabilidad para garantizar la máxima disponibilidad. Se denomina RCM (Reliability Centered Maintenance) porque reconoce que el mantenimiento no puede hacer más que asegurar que los elementos continúan consiguiendo su fiabilidad inicial, especificando el lugar donde van a funcionar.

La filosofía RCM plantea como criterio general el mantenimiento solo de los componentes considerados como críticos para el correcto funcionamiento de la línea, dejando operar hasta que se produzca el fallo de los componentes no críticos, teniendo como cuestiones prioritarias la seguridad y la conservación del medio ambiente. Las preguntas básicas a responder al aplicar la metodología RCM son:

1. **¿Cuáles son los fallos?** Es importante determinar qué es lo que la empresa, la planta o el cliente quiere conseguir o realizar dentro del contexto operacional. Se pueden distinguir cuatro funciones principales: primarias, secundarias, de protección y superfluas.
2. **¿Cuáles son los fallos?** Hay que reconocer una a una las probabilidades de fallo de cada componente o equipo(los que impliquen la incapacidad para cumplir un estándar medible de funcionamiento). Por ello existen una serie de calificativos que nos ayudan a olvidar algún posible fallo funcional: NADA, MENOS QUE, MÁS QUE, MENOS DE, MÁS DE, INVERSIÓN, OTROS QUE.
3. **¿De qué forma puede fallar?** Hay que conseguir reconocer la causa más posible de cada fallo funcional o de cada pérdida de servicio que hacen que la máquina o equipo deje de funcionar adecuadamente("modos de fallo"). Se debe incluir todas las causas de fallos que hayan producido, las que se están evitando debido al mantenimiento preventivo que estamos llevando a cabo y las que aún no han ocurrido pero tienen posibilidades de ocurrir.
4. **¿Qué causa que falle?** Es muy importante identificar las causas de fallo con suficiente detalle para asegurar que no se ha derrochado tiempo y esfuerzo tratando síntomas en vez de causas, pero tampoco hay que dilapidar excesivo tiempo realizando el estudio con demasiado detalle. Entre las causas que se deben tener en cuenta están aquéllas responsables de fallos en equipos similares; las que son prevenidas con el plan de mantenimiento actual; las que todavía no han aparecido pero podrían hacerlo; las debidas a deterioro o envejecimiento y las posibles por errores humanos.
5. **¿Qué ocurre si falla?** Cada fallo se registra de manera estricta, qué pasa si se produce una determinada avería y que sucedería si se produjera un modo de fallo o avería asociada. Por lo tanto no nos limitamos únicamente a cada fallo individualizado, sino que atajamos la causa asociada a fallos múltiples. Los efectos se pueden dividir en:
 - Evidencias (si las hay) de que el fallo ha ocurrido.
 - Efectos (si los hay) sobre seguridad y medio ambiente.
 - Efectos (si los hay) sobre operaciones o producción.
 - Posibles daños físicos.
 - Medidas para reparar el fallo.
6. **¿Qué se puede hacer para prevenir los fallos?** Tenemos que registrar todas las propuestas para poder hacer el consiguiente análisis coste-beneficio, que a menudo no existe en los planes de mantenimiento o en las estrategias de mantenimiento empresarial. Lo que realicemos necesitamos saber cuánto cuesta y el beneficio en coste que nos proporciona.

7. **¿Qué sucede si no se puede prevenir el fallo?** Si no podemos evitar el fallo, debemos limitar en lo posible los efectos de este.

Un proceso general de análisis RCM supone la realización de las siguientes tareas principales:

- Definición del alcance y objetivos del estudio.
- Selección y priorización de los sistemas objeto del análisis.
- Análisis de criticidad.
- Selección de tareas de mantenimiento.
- Implantación de recomendaciones, seguimiento de resultados y actualización del estudio.

Para realizar el análisis de la criticidad, puede aplicarse la técnica denominada análisis de modos de fallo y efectos (AMFE), cuyos principales objetivos serán expuestos a continuación. Esta técnica puede ser usada para determinar los componentes del sistema que deben ser considerados como críticos, en los cuales habrá que centrar los esfuerzos y recursos destinados al mantenimiento. Evidentemente, esta es una parte principal del proceso que debe ser realizada por personal con una alta experiencia y conocimiento del sistema.

4.3.6.2. ANÁLISIS DE MODOS DE FALLO Y EFECTOS (AMFE)

La técnica AMFE (Análisis de Modos de Fallos y Efectos), es utilizada para definir, identificar y eliminar fallos conocidos o potenciales, problemas, errores, desde el diseño, proceso y operación de un sistema, antes de que el usuario pueda verse afectado. La principal diferencia del proceso AMFE es que se parte del supuesto que se va a realizar un trabajo preventivo para evitar la avería, mientras que el resto de técnicas se orientan a evaluar la situación anormal ya ocurrida.

El fundamento de la metodología es la identificación y prevención de las averías que conocemos (se han producido en el pasado) o potenciales (no se han producido hasta la fecha) que pueden aparecer en un equipo. Para cada fallo, se estima el efecto sobre todo el sistema y su gravedad. Además, se hace una revisión de las medidas planificadas con el fin de minimizar la probabilidad de fallo, o minimizar su repercusión.

Existen diferentes formas de evaluación, siendo la más habitual el empleo de escalas numéricas llamadas criterios de riesgo, valorados de 1 a 10. Siendo 1 la menor probabilidad de ocurrencia, menos grave o severo y más fácil de identificar la avería cuando ésta se presente. De igual forma 10, se asignará

a las averías de mayor frecuencia de aparición, donde se ponga en riesgo la vida de una persona y exista una gran dificultad para su identificación. A continuación, se indican los pasos necesarios para la aplicación del método AMFE de forma genérica.

Modo de fallo. Un modo de fallo significa que un elemento no satisface o no funciona de acuerdo con las especificaciones o con lo que se espera de él. Un fallo puede no ser detectado de inmediato por el cliente y, sin embargo, debe considerarse como tal. Se debe resaltar los potenciales fallos que ocurrirían con ciertas condiciones de funcionamiento extremas.

Gravedad del fallo. El índice de gravedad (G) evalúa el nivel de las consecuencias observadas por el cliente debidas a los efectos de cada modo de fallo. Este índice aumenta en función de la insatisfacción producida en el cliente, el deterioro de las prestaciones, la rapidez de aparición de la avería o el coste de reparación. Para conocer la asignación de valores a “G” se apoya en la clasificación de la tabla 4.1.

Criterio		Valores de G
Ínfima	El efecto sería imperceptible para el usuario	1
Escasa	El cliente puede notar el fallo, pero sólo provoca una ligera molestia	2-3
Baja	El cliente nota el fallo y le produce cierto enojo	4-5
Moderada	El fallo produce disgusto e insatisfacción en el cliente	6-7
Elevada	El fallo es crítico, provocando alto grado de insatisfacción en cliente	8-9
Muy elevada	El fallo implica problemas de seguridad o de no conformidad con los reglamentos en vigor	10

Tabla 4.1 Categorías de Gravedad en la realización de un AMFE

Probabilidad de ocurrencia. Ocurrencia se define como la probabilidad de que una causa específica se produzca y dé lugar al modo de fallo. Se utiliza un índice de ocurrencia (O) para cada posible causa de fallo. Para calcular “O” hay tener en cuenta no sólo la probabilidad de que se produzca la causa potencial del fallo, sino la probabilidad de que tras la aparición de la causa se produzca el fallo. La definición de estos índices viene reflejados en la Tabla 4.2.

Criterio		Valores de O
Muy escasa	Defecto inexistente en el pasado	1
Escasa	Muy pocos fallos en circunstancias pasadas similares	2-3
Moderada	Defecto aparecido ocasionalmente	4-5
Frecuente	Fallos de cierta frecuencia en el pasado	6-7
Elevada	Fallo bastante frecuente en el pasado	8-9
Muy elevada	El fallo se produce frecuentemente	10

Tabla 4.2 Categorías de Ocurrencia en la realización de un AMFE

Probabilidad de no detección. Este índice, D, indica la probabilidad de que la causa y/o modo de fallo que se produzca, llegue al cliente. En el AMFE debe estar descrita la forma de detección prevista que (Tabla 4.3), por lo general, será alguno de los sistemas de control utilizados.

Criterio		Valores de D
Muy escasa	El efecto es obvio. Resulta muy improbable que no sea detectado	1
Escasa	El defecto podría pasar algún control primario, pero sería detectado	2-3
Moderada	El defecto es una característica de fácil detección	4-5
Frecuente	Defectos de difícil detección que con relativa frecuencia llegan al cliente	6-7
Elevada	El defecto es de difícil detección mediante los sistemas convencionales de control	8-9
Muy elevada	El defecto con mucha probabilidad llegará al cliente	10

Tabla 4.3 Categorías de detección en la realización de un AMFE

Número de prioridad de riesgo (NPR). Es el producto de la probabilidad de ocurrencia (O), la gravedad del fallo (G), y la probabilidad de no detección (D) (Ecuación 4.1). Debe ser calculado para todas las causas de fallo.

$$NPR = O \times G \times D \quad (4.1)$$

Las acciones de corrección que primero se levan a cabo según la causa de fallo será según el mayor NPR, por encima de un valor frontera establecido, y con mayor gravedad de fallo. Los valores fronteras dependerán según los elegidos para actuar según cada empresa.

4.3.6.3. MANTENIMIENTO PRODUCTIVO TOTAL (TPM)

Esta estrategia atribuye un alto valor al trabajo en equipo, a los proyectos realizados por acuerdo común y a la mejora constante; este procedimiento suele ser más estructurado desde el punto de vista de su estilo cultural: todo el mundo comprende su misión y actúa según un protocolo asumido. Consiste en:

- 1) Tener como objetivo la constitución de una estructura empresarial que diese la máxima eficiencia del sistema de producción (eficiencia global).
- 2) Crear, en el entorno cercano de trabajo, mecanismos para prevenir las diversas pérdidas, alcanzándose el nivel "cero accidentes, cero defectos, y cero averías/fallos", teniendo como objetivo el ciclo total de vida útil del sistema de producción.
- 3) Abarcar todos los departamentos, desde el de producción y hasta los sectores de desarrollo, ventas, administración, etc.
- 4) Contar con la implicación de todos, desde la alta administración hasta los operarios de primera línea.

La consecución de los objetivos presentados en el TPM implica la necesidad de conseguir entornos de trabajo ordenados, limpios y disciplinados. De esta manera se obtiene un marco favorable para que el operario practique el "kaizen" (término japonés que se basa en una mejora continua).

Entre las principales ventajas y mejoras que podemos obtener mediante una adecuada implantación del TPM son:

- **Reducción del número de averías de equipo:** un importante número de las averías que son reparadas por los departamentos de mantenimiento podrían haber sido resueltas por el personal de producción.
- **Reducción del tiempo de espera y preparación de los equipos de trabajo:** Si hay una gran separación organizativa entre producción y mantenimiento, el tiempo de respuesta ante una pequeña anomalía o ante una revisión cotidiana siempre es importante y negativa. Si el propio operario de producción resuelve los pequeños fallos y realiza las pequeñas revisiones o inspecciones, este tiempo no se reduce o se elimina.
- **Aumento del control de herramientas y equipos:** El hecho de asignar de forma evidente a cada operario o responsable de producción un determinado número de herramientas o equipos productivos produce una mayor responsabilización y control sobre los mismos,

eliminándose el traspaso de responsabilidades operación-mantenimiento-operación.

- **Conservación del medio ambiente y ahorro de energía.** La realización de revisiones por parte del propio personal implicará menores tiempos muertos y ausencia de trabajos de la máquina o equipo en vacío, con la mejora que ello implica no solamente para la vida útil de la máquina sino para el ahorro energético asociado.
- **Mayor formación y experiencia de los recursos humanos.** Debido a la implicación de todo el personal, desde la alta administración hasta los empleados de la línea

Capítulo 5

Análisis de señales en el dominio de la frecuencia

5.1. INTRODUCCIÓN

La técnica de análisis de la frecuencia en el dominio del tiempo es una herramienta clásica en el control de sistemas, debido a que en general los sistemas que varían periódicamente y con una periodicidad concreta, no suele ser algo común en el ámbito de la ingeniería de procesos. A día de hoy, se han desarrollado herramientas para computadoras en las que la simulación en el dominio el tiempo es mucho más fácil, por lo que este tipo de análisis ha perdido algo de importancia en la práctica. Aunque actualmente se sigue utilizando, debido a una gran aplicación teórica y su sencillez en su comprensión intuitiva.

El análisis en el dominio de la frecuencia (o su espectro), es una de las técnicas más comunes empleadas para el diagnóstico de fallos por medio del análisis de vibraciones y la corriente del estator. Usando esta herramienta se pueden hallar fallos típicos como desequilibrios de rotor, excentricidades, rotura en barras y fallos en rodamientos.

La técnica del análisis espectral de cualquier magnitud continua, ya sea la de corriente, vibración o flujo axial, está basada en el muestreo de estas señales en el tiempo y su paso o transformación al dominio de la frecuencia.

Actualmente esta técnica se realiza en Analizadores Dinámicos de Señales (ADS); los cuales implementan interiormente el algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier (TRF) junto con otras ecuaciones o algoritmos, que presenta el espectro en frecuencia de la señal continua que se esté analizando.

En este capítulo se hablará acerca de cómo ofrecer una comprensión sobre la forma en que trabajan estos tipos de analizadores y de las características de las transformaciones que en estos se producen; para lo que será importante de cara a una mejor comprensión de los resultados prácticos obtenidos en los ensayos.

5.2. CLASIFICACIÓN DE SEÑALES

En este punto se añaden una serie de conceptos básicos acerca del tipo de señal, para una mejor comprensión de procesamiento de la misma.

En la Fig. 5.1 se añade una clasificación del tipo de señales que se usan para la determinación de los sistemas. Esta clasificación se basa en el estudio del comportamiento predefinido o aleatorio de la señal a lo largo del tiempo.

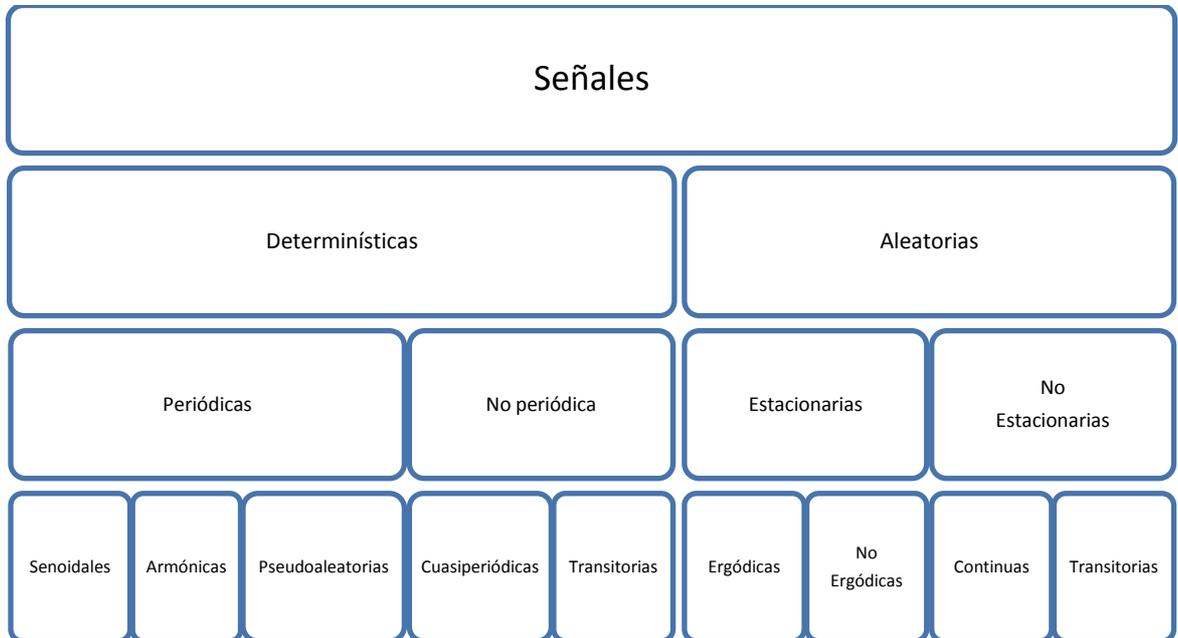


Figura 5.1: Clasificación de señales en función del tiempo.

Las señales se clasifican en dos grandes grupos:

- **Señales Deterministas:** Las señales determinísticas son aquellas que pueden ser modeladas por expresiones matemáticas, como por ejemplo (Ecuación 5.1):

$$X_m(t) = V \text{sen} 2\pi\omega t \quad (5.1)$$

La señal de una expresión determinista puede ser todo lo complicada posible y aún en este caso podrá determinarse, para un instante cualquiera, el valor instantáneo de la señal dada. Cualquier señal que pueda ser descrita por una expresión matemática explícita, por una tabla de datos, o por una regla bien definida es llamada *determinística*. Este término es usado para enfatizar que todos los valores pasados, presentes y futuros de la señal coinciden con precisión, sin incertidumbre.

Estas señales se dividen a su vez en:

- **Señales Periódicas:** Se dice que una señal es periódica si cumple con la siguiente condición: $x(t) = x(t \pm nT)$, donde T es una constante positiva real y n entero ≥ 1 . Los casos más simples y conocidos de señales

periódicas son las funciones armónicas seno/coseno. Así mismo su frecuencia "f" deberá ser un número racional.

Estas se subdividen en:

- Senoidales: Son las señales que vienen definidas por la función $x(t) = E_0 \text{sen}(\omega t + \varphi)$.
 - Armónicas: Son las señales periódicas que no son senoidales, pudiéndose descomponer en una serie de componentes con amplitudes y frecuencias diferentes, y con la particularidad de que sus frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia original, definiéndose la primera frecuencia como primer armónico o fundamental, y a los sucesivos se les denomina 2º, 3er ... etc. armónicos.
 - Pseudoaleatorias: consiste en una señal aleatoria que se repite periódicamente
- *Señales No Periódica*: Cualquier señal determinística que no sea periódica será no periódica.

Estas a su vez se dividen en:

- Cuasiperiódicas: Son señales no periódicas completamente.
- Transitorias: Son señales que empiezan y terminan al nivel cero y duran una cantidad de tiempo finito, pueden ser breves o prolongadas.
- **Señales Aleatorias**: Son aquellas señales en las que existe incertidumbre acerca de los valores que puede tomar en los siguientes instantes y pueden solamente ser descritas desde un punto de vista estadístico. Una realización de un proceso aleatorio difiere de los otros en su descripción temporal, pero sin embargo poseen las mismas propiedades estadísticas. Las señales aleatorias se caracterizan por sus propiedades estadísticas y espectrales.

Estas señales pueden subdividirse en:

- *Señales Estacionarias*: Son aquellas señales que son constantes en sus parámetros estadísticos sobre el tiempo. Las fuentes que presentan una señal variable pero no periódica, corresponden a formas de onda complejas, de las que se pueden distinguir formas simples, como cambios de la señal en un tiempo breve.

Estas a su vez se dividen en:

- Ergódicas: Cuando un proceso aleatorio pertenece a cierta clase especial llamado proceso ergódico, su promedio temporal del ensamble y las propiedades estadísticas del proceso pueden determinarse a partir del promedio temporal de una sola muestra. Para que un proceso aleatorio sea ergódico debe ser estacionario en sentido estricto.
- No Ergódicas: Son las señales para las que no es posible intercambiar sus medias temporales por sus medias estadísticas.
- *Señales No Estacionarias*: Este tipo de señales no son constantes en sus parámetros estadísticos a lo largo del tiempo.

Estas a su vez se pueden dividir en:

- Continuas: Estas señales son aquellas que varían a lo largo de todo su tiempo de observación.
- Transitorias: Las señales transitorias comienzan y terminan con un valor cero, dentro del mismo período de observación

5.3. ANÁLISIS DE SEÑALES

La finalidad del estudio de una señal, no es más que la de extraer la máxima información posible sobre la misma, debido a que resulta valioso y útil su estudio en varios dominios. La señal a la cual se realiza el estudio, es una función definida en el dominio del tiempo, por lo tanto para examinar su contenido en frecuencia, se realiza una transformación al dominio de la frecuencia.

En determinadas condiciones, la transformada de Fourier resulta útil como herramienta de apoyo para el realizar la transformación al dominio de la frecuencia.

5.3.1. TRANSFORMADA DE FOURIER

En la mayoría de los casos la transformada de Fourier es la herramienta en la que se apoya el análisis de frecuencia de señales.

La transformada de Fourier de tiempo continuo, se define mediante las Ecuaciones 5.1 y 5.2:

$$y(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} y(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (5.1)$$

$$y(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t) e^{-j\omega t} dt \quad (5.2)$$

Donde:

- $y(t)$: representa la señal continua en el tiempo de la señal y .
- $y(\omega)$: representa la señal y en el dominio de la frecuencia.
- $j = \text{es la magnitud imaginaria, } \sqrt{-1}$

La Ecuación 5.1 recibe el nombre de Transformada Inversa de Fourier, mientras que la Ecuación 5.2 se la conoce como Transformada de Fourier ó Integral de Fourier.

El uso de instrumentos de cálculo digitales, como es el caso del Analizador Dinámico de Señales (ADS), ha dado lugar a la existencia y uso de la transformada de Fourier para tiempo discreto.

La transformada de Fourier para tiempo discreto, se define por las Ecuaciones 5.3 y 5.4:

$$y(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} y(\Omega) e^{j\Omega n} d\Omega \quad (5.3)$$

$$y(\omega) = \sum_{-\infty}^{\infty} y(n) e^{-j\omega n} \quad (5.4)$$

La Ecuación (5.3) se conoce como Transformada de Fourier de tiempo discreto, y la Ecuación (5.4) como el par de transformada de Fourier.

5.3.2. TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER (DFT)

El desarrollo de herramientas para el estudio o análisis de Fourier de secuencias de tiempo discreto, fue debido al aumento de métodos de tiempo discreto para el análisis y síntesis de señales. Estas herramientas se desarrollaron, dando lugar a la aparición de una técnica adecuada para la utilización en computadoras digitales o para su implantación en hardwares digitales. Esta técnica es la transformada discreta de Fourier (DFT) para señales de duración finita, la cual se desarrolla de la siguiente forma:

- Sea $y(t)$ una señal de duración finita, esto es, hay un entero N_1 , tal que:

$$y(t) = 0 \text{ fuera del intervalo } 0 \leq t \leq N_1 - 1$$

Se puede construir una señal periódica $\tilde{y}(t)$ que sea igual a $y(t)$ en un periodo.

- Sea $N \geq N_1$ un entero dado, y sea $\tilde{y}(t)$ periódica con período N tal que:

$$\tilde{y}(t) = x(t), 0 \leq t \leq N_1-1$$

Los coeficientes de la serie de Fourier para $\tilde{y}(n)$ están dados por la Ecuación 5.5:

$$a_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \tilde{y}(t) e^{-jk \left(\frac{2\pi}{N}\right)t} \quad (5.5)$$

Seleccionado el intervalo de la sumatoria en el que $\tilde{y}(t) = y(t)$, se obtiene la Ecuación 5.6:

$$a_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y(t) e^{-jk \left(\frac{2\pi}{N}\right)t} \quad (5.6)$$

- El conjunto de coeficientes definido por la ecuación anterior comprende la DFT de $y(t)$. La DFT de $y(t)$ usualmente se denota por $\tilde{y}(k)$ y se define mediante la Ecuación 5.7 que se muestra a continuación:

$$\tilde{y}(k) = a_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y(n) e^{-jk \left(\frac{2\pi}{N}\right)t}, \quad k=0,1,\dots,N-1 \quad (5.7)$$

Una característica a tener en cuenta en la Transformada Discreta de Fourier, es que podemos observar que la señal original de duración finita puede reconstruirse a partir de su DFT. En particular, la Ecuación 5.5 para la representación en series de Fourier de $\tilde{y}(t)$ nos permite calcular $\tilde{y}(t)$ a partir de a_k (conjunto de coeficientes). Entonces, usando las Ecuaciones 5.6 y 5.7 se tiene:

$$y(t) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \tilde{y}(k) e^{jk \left(\frac{2\pi}{N}\right)t}, \quad t=0,1,\dots,N-1 \quad (5.8)$$

Por lo que, consideramos que una señal de duración finita está especificada por un conjunto finito de valores distintos de cero, o bien por el conjunto finito de valores a_k (coeficiente) en su DFT.

Otra característica a resaltar sobre la DFT, es que para calcularla existe un algoritmo más rápido que se conoce con el nombre de Transformada Rápida de Fourier (FFT).

Además, hay que tener en cuenta que la selección de N en la Ecuación 5.8 no es fija, siempre que N sea mayor que la duración de $\tilde{y}(t)$. Por ello a_k , en la Ecuación 5.7 se refiere en el dominio de la frecuencia, como la Transformada Discreta de Fourier de N puntos para hacer explícita la longitud del sumatorio en la Ecuación 5.7, obteniendo una mayor eficiencia computacional a partir de la selección como una potencia de 2.

Para ilustrar lo anteriormente citado, se puede apreciar en la Fig. 5.2 que para una señal discreta en el tiempo, el espectro es continuo en la frecuencia. A continuación en la Fig. 5.2 se muestra de forma gráfica las herramientas de Fourier analizadas anteriormente:

- La Fig. 5.2 (a) muestra a la señal en el dominio del tiempo, que consta de una onda cuadrada.
- La Fig. 5.2 (b) muestra los componentes armónicos de la señal por medio de series de Fourier.
- La Fig. 5.2 (c) muestra el espectro de la señal en el dominio de la frecuencia por la transformada de Fourier.
- La Fig. 5.2 (d) muestra a la señal en el dominio de la frecuencia por la DFT.

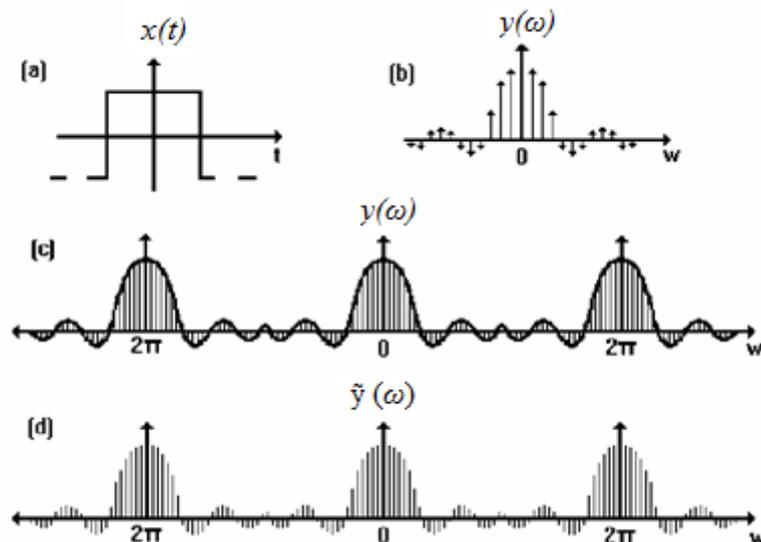


Figura 5.2: Resultados de obtenido al utilizar Fourier a una señal cuadrada.

5.3.3. TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER

La transformada rápida de Fourier (FFT, Fast Fourier Transform) es un algoritmo de computación para el cálculo de la transformada discreta de Fourier (DFT), de hecho se conoce como FFT, cualquier algoritmo que realice menos operaciones de multiplicación y de suma que aplicando la DFT directamente.

- Se toma la expresión de las series discretas de Fourier, para el cálculo de una serie temporal periódica de tiempo finito dada por la Ecuación 5.9:

$$y(k) = \sum_{t=0}^{N-1} y(t) e^{-jk \left(\frac{2\pi}{N}\right)t} \quad (5.9)$$

$k=0,1,\dots,N-1$

- Se simplifica la anterior expresión teniendo en cuenta que si $y(k) = y(N + k)$, para cualquier entero "k" y que para facilitar la notación al término exponencial complejo sustituimos $W_N = e^{-j\left(\frac{2\pi}{N}\right)}$, entonces se obtiene la Ecuación 5.10 que se muestra a continuación:

$$y(k) = \sum_{n=0}^{N-1} y(n) W_N^{kn} \quad (5.10)$$

$k=0,1,\dots,N-1$

- Teniendo en cuenta que la serie en función del tiempo tiene que ser compleja, entonces para calcular los diferentes valores, será necesario realizar operaciones con números complejos. Para ello se descompone en una parte real (real) e imaginaria (img) la expresión anterior, obteniendo la Ecuación 5.11:

$$y(k) = \sum_{n=0}^{N-1} [(real\ y(t),\ img\ y(t)) (real\ W_N^{kt},\ img\ W_N^{kt})], \quad (5.11)$$

k=0,1,...,N-1

- Desarrollando de modo genérico el producto de números complejos, que se puede observar que su cálculo vendría dado por la Ecuación 5.12:

$$\begin{aligned} & [(real\ y(t) * real\ W_N^{kt}) \\ & \quad - (img\ y(t) * img\ W_N^{kt})] + \\ & [(real\ y(t) * img\ W_N^{kt}) - (img\ y(t) \\ & \quad * real\ W_N^{kt})] \end{aligned} \quad (5.12)$$

Para un cálculo inicial aproximado serían necesarias $4N^2$ multiplicaciones de números reales y de $N(4N - 2)$ sumas de números reales. La cantidad de cálculos, y por consiguiente del tiempo de cálculo, es aproximadamente proporcional N^2 , lo cual representa un serio obstáculo.

Por lo que para el cálculo digital de la Transformada de Fourier, consistirá en un proceso largo debido al elevado número de operaciones matemáticas que se debe de realizar para su estudio. No obstante, como se aprecia en la Fig. 5.3 sigue siendo el método más rápido de calcular.

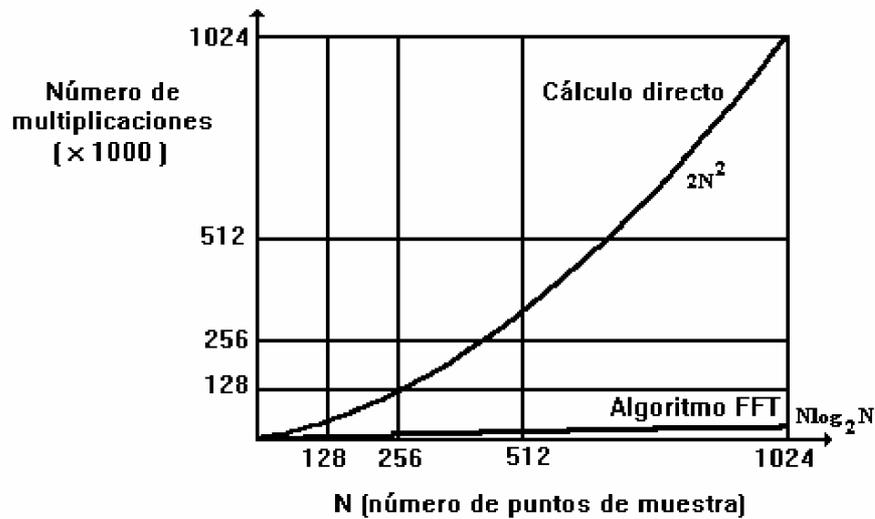


Figura 5.3: Comparación del número de multiplicaciones requeridas entre el cálculo directo y el algoritmo de la FFT.

5.4. MUESTREO DE SEÑALES

El muestreo de señales, también denominado “Discretización de señal”, es el proceso de conversión de una señal analógica (tiempo y amplitud continuas) en una señal digital (tiempo y amplitud discretos).

La conversión de esta señal se realiza en un convertidor A/D y se realiza, entre otros motivos porque las señales digitales presentan grandes ventajas a la hora de ser transmitidas y/o procesadas: mayor seguridad ante el ruido, mayor facilidad de procesamiento, etc.

Para conseguir el muestreo de señales y puesto que la señal que deriva del transductor, es una señal de tensión continua proporcional a la magnitud en cuestión (corriente, aceleración, potencia, fuerza, etc.), es necesario añadir un muestreador y un analizador de espectros como el que se muestra en la Fig. 5.4.



Figura 5.4: Diagrama de bloques de un Analizador de Señales Dinámicas.

El análisis de señales se realiza mediante un analizador dinámico de señales (ADS). Para que el analizador tenga la precisión deseada, es necesario que el muestreador y el Convertidor A/D posean unas características de resolución y linealidad mínimas. Otro factor a tener en cuenta en los Conversores A/D, es la frecuencia de muestreo o periodo de muestreo, cuyo valor máximo del tiempo de muestreo queda establecido y por encima del cual se produce los fenómenos de “aliasing” y otras limitaciones del muestreo de las señales.

5.4.1. LIMITACIONES DEL MUESTREO DE SEÑALES

Durante el estudio de señales pueden aparecer distintos tipos de errores como pueden ser las sobrecargas, ruido digital, errores de cuantificación, limitación del rango dinámico, etc. Este subapartado se plantea para errores más específicos y que pueden obstaculizar el análisis.

a) Aliasing

El aliasing es el fenómeno que causa que señales continuas distintas se transformen en indistinguibles cuando se las muestrea digitalmente. La diferencia entre la frecuencia de la entrada y la de muestreo es lo que se conoce como imagen fantasma o alias, la cual se crea durante el proceso de muestreo de una señal. Esta imagen de baja frecuencia de las componentes muestreadas de la alta frecuencia, cuando la frecuencia utilizada para el muestreo es insuficiente se denomina “aliasing”. Cuando esto sucede, como se aprecia en la Fig. 5.5, la señal original no puede ser reconstruida a su señal inicial a partir de la señal digital porque se produce solapamiento.

En la Fig. 5.5 se observa el efecto en el dominio de la frecuencia del tren de impulsos de una señal discreta: Fig. 5.5 a) es el espectro de la señal original; b) es el espectro de la secuencia muestreada; c) espectro de la señal muestreada con $\omega_s > 2\omega_M$; espectro de la señal con $\omega_s < 2\omega_M$. En este último apartado podemos apreciar que no podemos recuperar la señal original a causa del solapamiento.

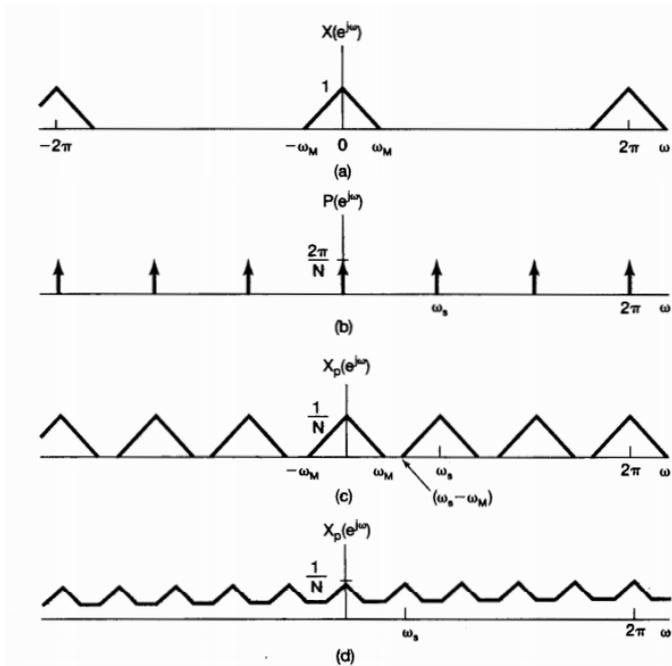


Figura 5.5: Proceso de muestreo con aliasing.

El teorema de Nyquist-Shannon nos dice que si la frecuencia de muestreo (ω_M) es mayor que el doble de la frecuencia de entrada $2\omega_N$, es decir $\omega_{Max} \leq \omega_M/2$, el alias producido no caerá nunca dentro del rango de la frecuencia de entrada, tal y como se muestra en la Fig. 5.6.

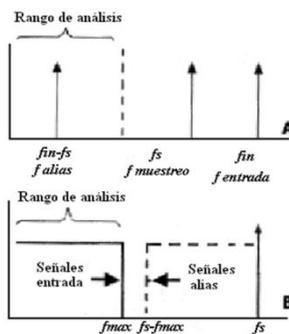


Figura 5.6: Muestreo y formación del alias.

El aliasing es un fenómeno propio de la conversión A/D, en el cual la frecuencia de la señal reconstruida es menor que el de la señal original, lo cual ocurre cuando la frecuencia de muestreo es demasiado baja; estos efectos pueden reducirse utilizando filtros.

Para evitar el aliasing se utiliza un filtro de paso bajo antes del muestreador, denominado filtro antialiasing. Debido a la dificultad de conseguir un filtro ideal, sin una zona que atenúe las amplitudes, el límite de frecuencias se

escoge inferior a la mitad de la frecuencia de muestreo. En los analizadores modernos, suele escogerse de forma que la frecuencia de muestreo sea 2,56 veces la frecuencia límite del filtro. De esta forma el número de líneas del espectro en frecuencia será $N/2,56$. Además el filtro deberá constar de una característica de límite (“roll off”) de muy elevada pendiente(rampa), lo que producirá un desplazamiento en la fase, pudiendo afectar a los datos si se requiere información acerca del rango superior de frecuencias del analizador.

Para limitar esto, como se puede observar en la Fig. 5.7, tendremos que elegir el rango de frecuencias de forma que la frecuencia de interés esté en la mitad inferior del rango de frecuencias, en particular en registros que requieren la fase.

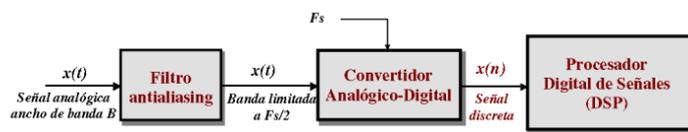


Figura 5.7: Diagrama de bloques del ADS con filtro antialiasing.

b) Leakage y Efecto Ventana

El algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier se basa en que lo que ocurra dentro de un periodo de estudio, ocurrirá lo mismo también fuera de él. Si el periodo de estudio contiene un número entero de ciclos de la señal de entrada($u(t)$), la señal de estudio se considera periódica en registro de tiempos. En caso contrario la señal no cumple la condición anterior y se estará suponiendo una representación que nada tiene que ver con la señal que se desea medir.

En la Fig. 5.8 se ilustra la dificultad que presenta el reconstruir la señal de entrada basándose en el supuesto de que esta sea periódica en el tiempo de registro.



Figura 5.8: Distorsión de la señal de entrada.

En su parte izquierda de la figura, podemos observar una señal senoidal periódica en el tiempo de estudio, puesto que en él se han recogido tres ciclos completos. Su reconstrucción, basada en el criterio de que el periodo de muestreo se repite; por tanto, su espectro estaría muy próximo al ideal formado por una sola línea. Sin embargo, a la derecha se puede apreciar la misma señal pero con un registro de tiempo diferente en el que no se incluyen un número entero de ciclos. En este caso su reconstrucción no será la esperada si se supone que el periodo de muestreo se repite a lo largo del tiempo.

Por lo tanto, al haberse modificado la forma de onda de la señal de entrada, se provocará una discontinuidad en dicha señal. Esta discontinuidad provocará en el proceso de la Transformada Rápida de Fourier un resultado del espectro expandido desde una sola línea hasta las líneas vecinas tal y como se muestra en la Fig. 5.9. Como consecuencia, su espectro se encontrará alejado del ideal formado por una única línea. Este fenómeno se conoce con el nombre de leakage (fuga) o dispersión.

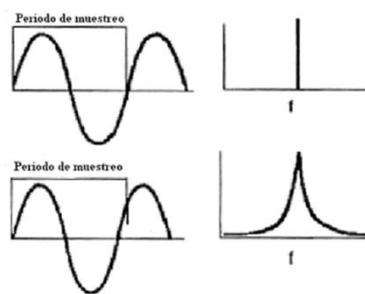


Figura 5.9: Efecto leakage.

El leakage es un problema tan importante que llega a enmascarar picos cercanos más pequeños y que altera el resultado de la Transformada Rápida de Fourier. La solución a este problema es el empleo de las funciones ventana. En la Fig. 5.10 se ilustra el espectro de una señal con efecto leakage (Fig.5.9), y sin el uso de funciones ventana (Fig.5.10).

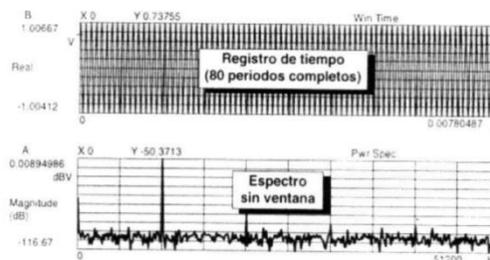


Figura 5.10: Espectro sin ventana.

Hay distintos tipos de ventanas según la aplicación que se vaya a desarrollar. Así, se puede encontrar la ventana Rectangular, la Hanning, la Transitoria, etc. Este tipo de ventanas son funciones que se usa en la señal muestreada para que se pueda estudiar. Cada una de las ventanas acentuará sobre puntos de la señal de cierta manera, obteniendo diferentes espectros.

Las ventanas se usan para que las señales muestreadas cumplan con los requisitos de periodicidad de la Transformada de Fourier, junto con elementos para reducir la distorsión que pueda producir los efectos del leakage.

Las ventanas crean una reducción en la precisión de la amplitud del pico medido de la función, y aparecerá como si hubiera un amortiguamiento mayor del que realmente hay en la estructura. A continuación vamos a describir los distintos tipos de ventanas, en todas ellas se usa un periodo T de duración del estudio y t como variable en el tiempo:

- **Ventana Hanning:** Una de las funciones que más se usa es la ventana Hanning (Fig. 5.11). Su ecuación matemática es la de un coseno elevado al cuadrado, y se usa cuando se pretende estudiar señales periódicas que no se repiten en el tiempo de registro. A la hora de realizar cálculos, se pueden considerar todas las señales con una duración mayor al tiempo de registro. En este caso los resultados obtenidos en la medición de la frecuencia son buenos, aunque introduce un cierto grado de atenuación en la medida de amplitudes.

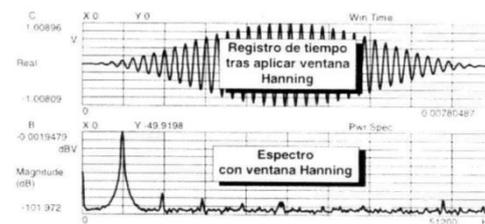


Figura 5.11: Función de la ventana Hanning.

- **Ventana Uniforme o Rectangular:** La entrada en el caso del estudio de transitorios no será periódica y se ha de contar con todos los datos contenidos en el registro de tiempo uniformemente, por lo que se utilizara una ventana que del mismo peso a todos los puntos del registro. Esta ventana es la que se denomina ventana uniforme que puede generalizarse para cualquier señal que tenga valor 0 al principio y al final del registro de tiempo. Es importante recordar que la función ventana se introduce para forzar a que la señal tome valores nulos en ambos extremos del registro, por lo que si la propia función cumple

este requisito, no existe necesidad alguna de introducir la ventana como corrección. Cualquier función que cumpla las condiciones anteriores no generan dispersión, analizándose sin introducir ventana o lo que es lo mismo con la ventana uniforme.

Existen muchas funciones (Fig. 5.12), pertenecientes al tipo de ventana anterior en las que se puede aplicar este tipo de ventanas y entre las que cabe destacar: impulsos, impactos, respuestas a un choque, ruido aleatorio, etc. En cambio, no se debe emplear para el análisis de señales deterministas por dos razones:

- Tiene una selectividad baja.
- Tiene un rizado relativamente elevado.

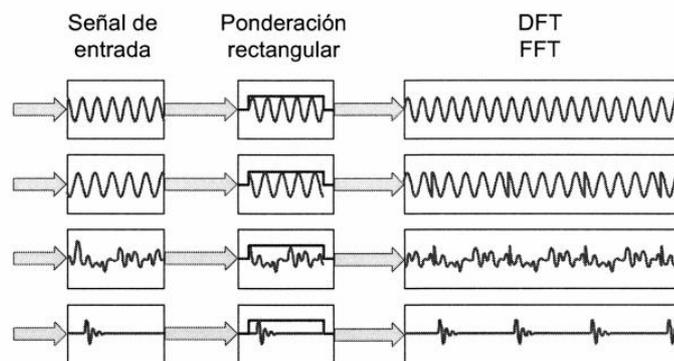


Figura 5.12: Ejemplos del funcionamiento de la ventana Uniforme sobre diferentes señales.

- **Ventana Flat top:** Este tipo de ventana (Fig. 5.13), se ha diseñado para temas de calibración fundamentalmente, aunque en la mayoría de las aplicaciones es preferible usar la ventana Hanning. Es muy útil para determinar amplitudes pero muy mala para obtener cierta resolución en frecuencia con señales periódicas. Sí es efectiva en la medida de amplitudes cuando las componentes en frecuencia de la señal están separadas varias líneas (al menos cinco o seis). No se recomienda su uso para señales que sean aleatorias o transitorias.

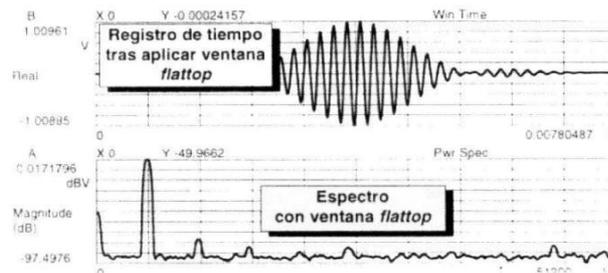


Figura 5.13: Función ventana Flattop.

- **Ventana Kaiser-Bessel:** Su principal uso se basa, en la separación de componentes en frecuencia que se encuentran muy próximas y de niveles diferentes. Se debe emplear para señales periódicas que requieren una selectividad en frecuencia buena. No debe usarse para señales transitorias. Proporciona una buena resolución en frecuencia para señales aleatorias, pero no se debe emplear con carácter general, ya que su velocidad es mucho menor que la de ventana Hanning. Para el análisis de señales periódicas esta ventana probablemente sea la mejor elección. Como inconvenientes con respecto a la ventana Hanning es que es más lenta, es decir, necesita más tiempo para realizar el estudio, y si se emplea con una excitación aleatoria puede producir un leakage mucho mayor en las resonancias y anti-resonancias de la señal.

➤ Comparativa entre los distintos tipos de ventanas:

En la Tabla 5.1 y en la Fig. 5.14, se realiza una comparativa entre los valores de amplitudes máxima y mínima, y la duración efectiva para las ventanas Rectangular, Hanning, Flat Top y Kaiser-Bessel.

Tabla 5.1: Comparación de las ventanas Rectangular, Hanning, Kaiser-Bessel y Flat Top.

Tipo de ventana	Amplitud Máxima	Amplitud Mínima	Duración Efectiva
Rectangular	1	2	1·T
Hanning	2	0	0.375·T
Kaiser-Bessel	2.48	0	0.291·T
Flat top	4.64	-0.33	0.175·T

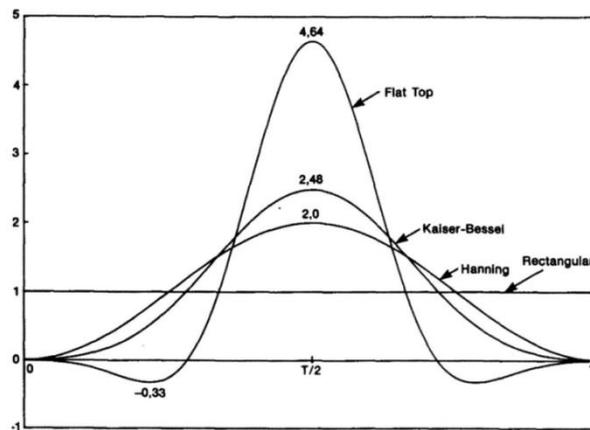


Figura 5.14: Representación conjunta de las ventanas Rectangular, Hanning, Kaiser-Bessel y Flat Top.

c) Efecto Picket Fence

Es producido por el muestreo en frecuencia, y es debido a la repetición periódica (Fig 5.15). Se soluciona mediante el uso de la ventana apropiada y el incremento de la resolución en el dominio de la frecuencia. Siempre que se realiza un análisis con filtros para ciertas frecuencias discretas, el espectro se mide para las frecuencias centrales de los filtros con una resolución dada por el ancho de banda de los filtros. El efecto de medir sólo el espectro para frecuencias discretas se conoce como Efecto Picket Fence. Se obtienen errores tanto en la amplitud como en las frecuencias del espectro a las que se producen.

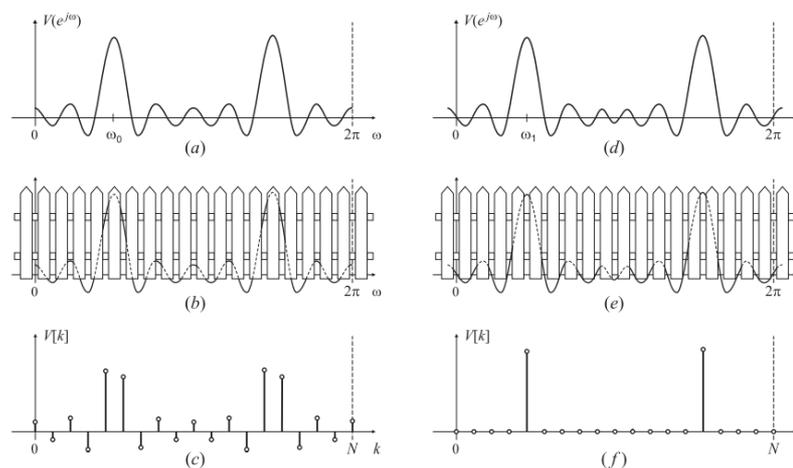


Figura 5.15: Interpretación gráfica de las pérdidas por ondulación (efecto picket fence).

d) Efecto Empalizada

También conocido como error de “bias” en la resolución o efecto empalizada debido a la similitud que tiene la observación del espectro con mirar una cordillera a través de una empalizada. Es consecuencia de la existencia de picos en el espectro real de la señal que se encuentran entre las líneas del análisis de la Transformada Rápida de Fourier, en general, los picos en el espectro FFT se miden con un nivel bajo y los valles se miden con niveles altos. Las frecuencias reales en las que se encuentran los picos y los valles no serán las indicadas en el espectro. Evidentemente, cuanto menor sea el espaciado entre líneas, mayor es la probabilidad de estar registrando los valores de cresta y valle del espectro de la señal analizada.

e) Margen Dinámico

El margen dinámico es una medida de la capacidad para en análisis de pequeñas señales en presencia de otras mayores. La relación entre la mayor y la menor señal, se puede analizar al mismo tiempo (Fig. 5.16).

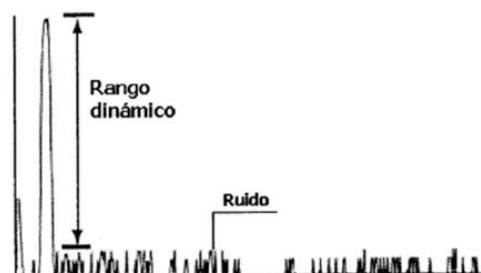


Figura 5.16: Margen dinámico

En presencia de grandes componentes un margen dinámico amplio es importante al igual que cuando la componente que se analiza es pequeña comparada con el nivel de potencia total de la señal. Es decir, es lo mismo tener un gran número de señales pequeñas que dan lugar a una potencia total alta que limita la sensibilidad que una única señal grande. Este es un caso habitual en el análisis de vibraciones en baja frecuencia utilizando acelerómetros como sensores.

f) Promediado digital

La realización de promedios de espectros en el tiempo es una de las funciones importantes del analizador FFT. La señal de vibración o de la corriente en una maquina eléctrica no es completamente determinista, sino que tiene ruidos aleatorios superpuestos. El ruido es un proceso aleatorio, por lo que su transformada de Fourier no existe. Por otro lado, una FFT de los

N puntos de datos dados siempre puede computarse, de forma que la no existencia de la transformada de Fourier significa en la práctica que la FFT de dos muestras diferentes de un mismo sistema con ruido pueden ser significativamente diferentes. Con esta función se realiza un promedio de una serie de espectros, el ruido gradualmente tomará una forma suave (no se reducirá) y los picos espectrales resaltarán, siendo sus niveles representados con mayor precisión.

Capítulo 6

Desarrollo de un modelo sintético de señales

6.1. INTRODUCCIÓN AL MODELO

6.1.1. ¿QUÉ ES UN MODELO SINTÉTICO?

Método sintético: implica la síntesis (del griego *synthesis*, que significa reunión), esto es, unión de elementos para formar un todo.

6.1.2. PARA QUÉ SIRVE UN MODELO SINTÉTICO

Este método es el utilizado en todas las ciencias experimentales ya que mediante ésta se extraen las leyes generadoras, y lo analítico es el proceso derivado del conocimiento a partir de las leyes. La síntesis genera un saber superior al añadir un nuevo conocimiento que no estaba en los conceptos anteriores, pero el juicio sintético es algo difícil de adquirir al estar basado en la intuición reflexiva y en el sentido común, componentes de la personalidad y que no permiten gran cambio temporal

6.1.3. CÓMO SE HA DESARROLLADO EL MODELO SINTÉTICO

Inicialmente generamos 3 señales senoidales que tengan un armónico a 50Hz (fundamental) y otros dos de manera que uno de ellos tenga el armónico por encima del fundamental y el otro por debajo de éste. Después realizamos la suma de estas tres ondas asociándolas en una señal única. Se pretende que esta señal simule a la corriente del estator de un motor de inducción con un fallo de barras en el rotor.

Generamos un vector de tiempo para el muestreo de esta señal. Para la generación de este vector necesitamos una serie de parámetros como son:

- Frecuencia de muestreo
- Tiempo inicial del estudio.
- Tiempo de finalización del estudio.
- Incremento de tiempos, que es el inverso de la frecuencia de muestreo
- Generación de los tiempos de muestreo

Una vez realizado esto, generamos una señal de ruido pseudoaleatoria partiendo del valor de su amplitud media. Esto se genera según la Ecuación 6.1:

$$ruido = (media * randn(1, length(t))) \quad (6.1)$$

Esta señal de ruido será añadida a la señal de suma de las otras ondas senoidales de forma que se asemeje lo más posible a una onda real.

Seguidamente realizamos el estudio en el dominio de la frecuencia mediante el cálculo del PSD (Power Spectral Density) ó cálculo de la densidad de potencia espectral. Primeramente se realiza el cálculo de la señal suma en el dominio de la frecuencia. Esta señal suma, a su vez está formado por 3 señales senoidales. <para mayor similitud con una señal real, añadimos ruido a la señal suma.

Por último, basándonos en el PSD de la señal suma con ruido, realizamos la representación de la Transformada de Fourier.

6.2. DESARROLLO DEL MODELO SINTÉTICO

6.2.1. INTRODUCCIÓN DE ARMÓNICOS EN LA SEÑAL DE CORRIENTE DE ALIMENTACIÓN DEL MOTOR A CAUSA DEL EMPLEO PSD.

Los motores de inducción o asíncronos se alimentan directamente desde la red o mediante variadores de frecuencia. La medición de la corriente empleada en estos motores para su posterior análisis se realiza en la alimentación del motor. Esta corriente sufre una serie de alteraciones que la diferencia respecto de la alimentada por la red pero que guarda una similitud en forma y constitución.

La forma de oscilación de la corriente alterna más comúnmente empleada es la de una oscilación senoidal, puesto que se consigue una transmisión más eficiente de la energía. Sin embargo, en ciertos usos se utilizan otras formas de oscilación periódicas (triangular, cuadrada). Para la realización de este trabajo hemos empleado la señal senoidal.

Junto a la onda perfecta se encuentran una serie de armónicos a diferentes frecuencias y amplitudes que deforman la onda eliminando su integridad. Estos armónicos son debidos a muy diversas fuentes, donde las principales son los propios equipos conectados a la red que en su origen (normalmente u CdT) alteran la forma de la onda.

La corriente demandada por un motor de inducción ideal está compuesto por tres fases, pero sólo analizamos una de ellas. En caso de aparición de cualquier defecto mecánico no considerado en la etapa de diseño, como puede ser a aparición de una grieta en una barra rota y su posterior evolución se producen asimetrías magnéticas originando otros componentes de frecuencias que aparecerán en el espectro de la corriente del estator de la máquina. Este será nuestro objetivo de estudio al procurar buscar una relación de las componentes armónicas con las diferentes severidades de fallo de barra rota.

Como hemos comentado anteriormente la fórmula matemática que usaremos será la de una función senoidal. Además será necesario el uso de una serie de variables (media y desviación estándar) de las ondas que nos permitirán la modificación de la forma.

En primer lugar nos encontramos con la amplitud que determina los extremos tanto positivos como negativos a los que llegará la onda. La frecuencia nos relaciona el tiempo con el número de ciclos por segundo que abarca la onda. Esta variable resulta de gran importancia especialmente en los análisis de frecuencia al ser uno de los principales medios de detección de posibles fallos.

La variable tiempo, permite asignar el tiempo de estudio. Y por último, el desfase nos permite asignar el ángulo de fase inicial.

Por lo tanto, las expresiones empleadas para la generación de ondas tendrán la forma de la Ecuación 6.2:

$$s = A * \text{sen}((2 * \pi * f * t) + \varphi) \quad (6.2)$$

Donde:

- A: amplitud de la onda
- f: frecuencia
- t: tiempo
- φ : es el ángulo de fase inicial

Para este proyecto no se tendrá en cuenta el desfase para el posterior análisis de los resultados. El bajo orden de los armónicos en comparación con la onda base hace posible considerar tal simplificación, al no introducir cambios significativos en los mismos.

Esta señal se logra mediante suma de un conjunto de ondas generadas de forma similar a la fundamental con lo que se consigue una superposición de ondas que da como resultado una onda de similares características a las reales.

En la aplicaciones utilizadas en el proyecto se han denominado s_1, s_2 y s_3 donde:

- s_1 : onda fundamental.
- s_2 : armónico inferior, que equivaldría a la banda inferior de los armónicos de fallo de barras, y que se conoce como LSH.

- s_3 : armónico superior, que equivaldría a la banda superior de los armónicos de fallo de barras, y que se conoce como USH

De esta manera se puede obtener una onda con un máximo de dos armónicos como recoge la Ecuación 6.3.

$$s = s_1 + s_2 + s_3 \quad (6.3)$$

6.2.2. APARICIÓN DE ARMÓNICOS DE LA CORRIENTE DEL ESTATOR DEBIDO A LA PREENCIA DE FALLO EN: ROTOR, COJINETES, ETC.

Cuando realizamos análisis en el dominio de la frecuencia de una señal de corriente de un motor asíncrono, obtenemos información que debemos analizar. Esta información la recibimos a través de los armónicos que aparecen en la señal. De acuerdo a la zona en la que se producen, los fallos característicos que presentan un motor de inducción son:

- Fallos sobre el estator
- Fallos sobre el rotor
- Fallos en rodamientos
- Otros fallos mecánicos

El análisis de estos tipos de fallos se basa en la monitorización de la corriente del estator del motor y su posterior análisis espectral. Este análisis consiste en evaluar la amplitud relativa de los diferentes armónicos que aparecen en la corriente debido al fallo. Estos fallos los podemos clasificar según la Tabla 1:

TIPO DE FALTA	Frecuencia característica de fallo
Rotura de barras, agrietamiento de barras, soldaduras débiles en el anillo de cortocircuito, concentraciones de alta porosidad, etc.	$f=f_1*(1\pm 2*n*s)$ $n=1,2,3,\dots$
Fallos en rodamientos	$f= f_1\pm n \cdot f_v $ $f_v=BPF1,BPFO,BSF,FTF$ $n=1,2,3,\dots$
Excentricidad estática	$f = f_1 \cdot [R \cdot \frac{1-s}{p} \pm 1]$
Excentricidad dinámica	$f = f_1 \cdot [(R \pm n_d) \cdot \frac{1-s}{p} \pm 1]$
Excentricidad mixta	$f = f_1 (1 \pm \frac{1-s}{p})$

Tabla 1: Tipos de faltas y frecuencias a las que se localizan

Nosotros en este proyecto nos centraremos en el análisis y estudio de posibles fallos de barras rotas.

6.3. GENERACIÓN DE RUIDO EN LA SEÑAL.

6.3.1. RUIDO BLANCO.

El ruido blanco es una señal aleatoria que se caracteriza por el hecho de que sus valores de señal en dos tiempos diferentes no guardan correlación estadística. Como consecuencia, su densidad espectral de potencia(PSD) es una constante. Esto significa que la señal contiene todas las frecuencias y todas ellas muestran la misma potencia. Igual fenómeno ocurre con la luz blanca, de donde obtiene la denominación.

Si la PSD no es plana, entonces se dice que el ruido está "coloreado"(correlacionado). Según la forma que tenga la gráfica de la PSD del ruido, se definen los diferentes colores.

6.3.2. RESULTADO DE LA APARICIÓN DE RUIDO BLANCO EN LA SEÑAL

Para la generación del ruido tendremos que usar un método para que genere valores de forma aleatoria. Para ello nos ayudaremos de la generación de ruido, mediante el uso de ruido gaussiano blanco . Debido que Maatlab

genera números pseudoaleatorios, es necesario reiniciar la semilla al inicio del programa mediante el comando "rng('shuffle');". A continuación, generamos un bucle de manera que generemos una matriz de ruido de la misma dimensión que la matriz que genera la señal senoidal.

A la hora de la representación de las funciones, representaremos primero la señal sin ruido, alguno de manera que fuera una señal ideal. Debido a que en la red no se suministra una señal sin ruido añadiremos a la señal sintética ruido, de manera que reproduzca diferentes situaciones en nuestras señales.

$$\text{suma} = s + \text{ruido} \quad (6.4)$$

A la vista de los resultados obtenidos(Fig.6.1) podemos observar dos posibles situaciones, descritas a continuación:

- **Señal sin ruido.**

Como podemos ver en la Figura 6.1, la señal sin ruido tiene bien definido los picos de las frecuencias que nosotros hemos fijado que nos indicarán la severidad del fallo producido en el motor. En el resto de frecuencias no tenemos ninguna alteración de la señal y por ello es lineal. Además podemos ver que la amplitud del PSD(dB) para el resto de frecuencias no se ve afectada por aleatoriedad, observando que el resto de frecuencias tiene forma plana en torno a los -240dB. Todos estos valores han sido normalizados según el fundamental dentro del programa, resultando las amplitudes del resto de frecuencias en valores negativos.

- **Señal con ruido.**

Al añadir ruido a la suma de nuestras señales senoidales, podemos observar la aleatoriedad introducida en el espectro en frecuencias. Además, al añadir ruido lo que hacemos es desplazar la señal hacia arriba fijando los valores ahora que están fuera de las frecuencias fijadas, en valores en torno a los -80dB, esto es lo que en la literatura denominan *césped*.

Capítulo 6: Desarrollo de un modelo sintético de señales

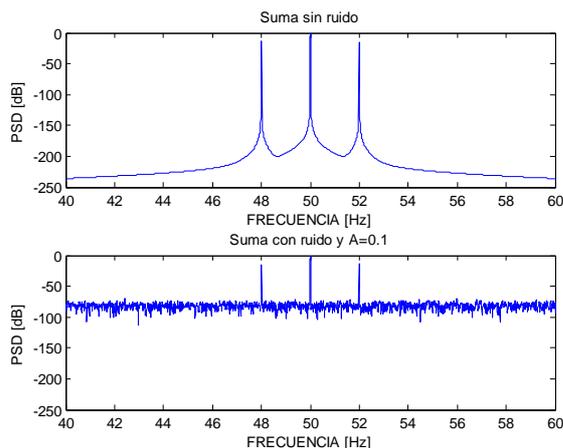


Figura 6.1: Señal sin ruido frente a señal con ruido.

Como era de esperar hemos podido observar en un intervalo de amplitudes de $[0.001,0.1]$, medida en amperios(A), es que cuanto más pequeño sea el valor de la amplitud de ruido menos decibelios tendrá nuestra señal de ruido. (Fig. 6.2)

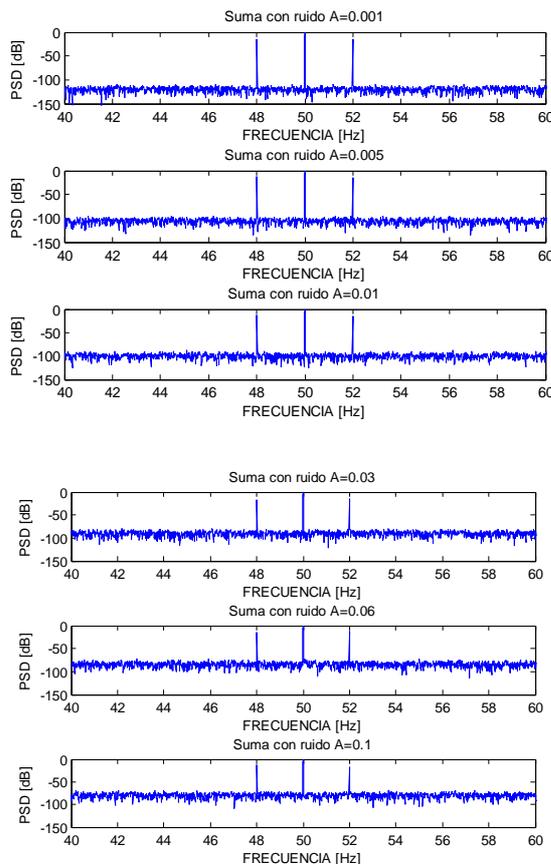


Figura 6.2: Señales con diferentes amplitudes de ruido.

6.4. APLICACIÓN EN SOFTWARE PARA LA GENERACIÓN DE LAS SEÑALES.

Para el desarrollo de este proyecto se han utilizado varios scripts de Matlab con diferentes posibilidades en cuanto a la generación de señales. Esto se ha explicado en un apartado anterior, en el que podríamos modificar la frecuencia de muestreo, las amplitudes de las señales que vamos a utilizar, etc

Primero se realizarán unos script genéricos para realizar cambios en las variables y para su posterior adaptación a los resultados obtenidos en los ensayos. Una vez tengamos este programa pasamos a la parte gráfica en la que analizaremos los resultados obtenidos, comprobando si son unos resultados coherentes.

Una vez tengamos hechos esos programas nos servirán de base para poder analizar luego nuestros ensayos, teniendo sólo que modificar las variables que obtengamos, y realizar su posterior análisis estadístico.

Capítulo 7

Resultados de la aplicación del modelo sintético.

7.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describen y analizan, los resultados obtenidos con las señales sintéticas generadas, cuyos valores se basan en unos ensayos reales sobre un motor alimentado de red.

En el diagnóstico de fallos en motores, tanto por vibración como por MCSA, se emplean estadísticos de orden superior calculados en el dominio del tiempo, puesto que se considera que aportan algún tipo de información extra que ayuda a la discriminación de los diferentes estados de fallo. Se emplean diferentes estadísticos de orden superior, debido a que nos aportan información adicional a través del análisis de la onda de corriente en el dominio del tiempo, los cuales pueden ser variables significativas para la posterior etapa de análisis.

A continuación se procede a realizar una descripción del banco de ensayos utilizado en este proyecto, así como la metodología de ensayo y el análisis que se aplicará.

7.2. BANCO DE ENSAYOS

El esquema de conexiones del banco de ensayos será el siguiente:

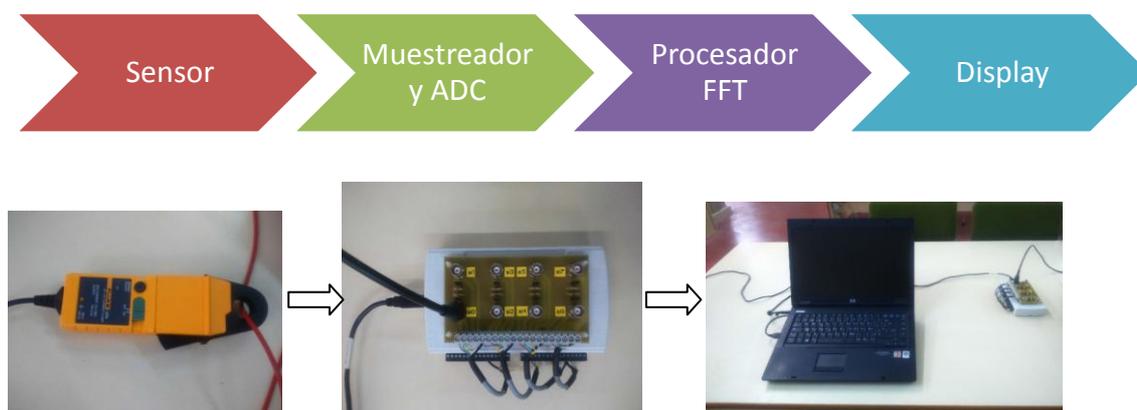


Figura 7.1: Esquema de conexiones

El banco de ensayos está compuesto por una serie de elementos que describiremos. Como podemos ver en la Figura 7.2, la imagen nos muestra los elementos principales del banco:

- Fuente de alimentación: red o inversor.
- Motor de inducción con fallo en barras.
- Freno y su unidad de control
- Aparata de maniobra y protección.

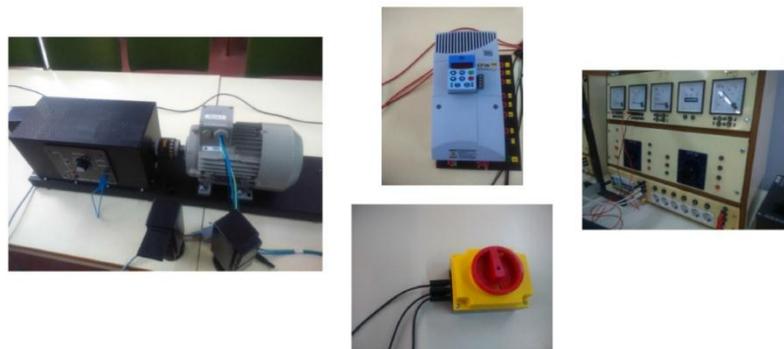


Figura 7.2: Banco de ensayos

7.2.1. ALIMENTACIÓN

Como se aprecia en la Figura 7.3, en el laboratorio se dispone de una fuente de alimentación, la cual va a nuestra caja de conexiones, donde hay disponibles tres tipos de tomas, dos de ellas son tomas monofásicas y la tercera es una toma trifásica.



Figura 7.3: Fuente de alimentación a la izquierda y caja de conexiones a la derecha

El motor de nuestro banco de ensayos puede ser alimentado de dos formas diferentes:

- 1) Alimentado directamente de la red a 50 Hz, cuyo esquema se muestra en la Figura 7.4



Figura 7.4: Banco de ensayos cuyo motor es alimentado directamente de la red.

- 2) Alimentando el motor a través de un convertidor, cuyo esquema se muestra en la Figura 7.5

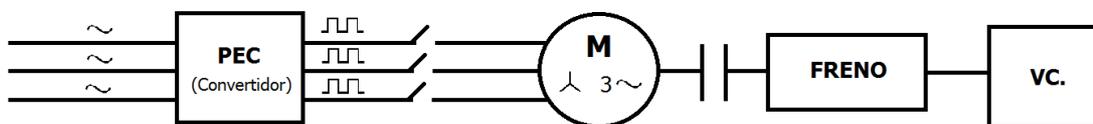


Figura 7.5: Banco de ensayos cuyo motor es alimentado a través de un convertidor.

7.2.2. MOTOR

En el laboratorio se dispone de varios motores asíncronos o de inducción sobre los que se provocan las diferentes severidades de fallo a estudiar, para realizar sobre ellos los ensayos deseados. En este proyecto se realizará el fallo por rotura de barras. El fallo se simula agujereando las barras mediante taladros.

En la Figura 7.6 se muestra el motor empleado para la realización de los ensayos requeridos para la elaboración de este proyecto.



Figura 7.6: Motor de inducción nº11 de nuestro banco de ensayos.

Las características del motor empleado para los ensayos son las siguientes:

Motor Asíncrono Siemens modelo: 1LA7 090 4AA 10

- Motor estándar, Eficiencia aumentada
- Grado de protección IP55
- 4 polos
- Potencia: 1,1 kW , 1,5CV
- Factor de Potencia: 0.81
- Tensión de alimentación: 230/400
- Velocidad Nominal(50Hz): 1500rpm

7.2.3. FRENO MOTOR

En la Figura 7.7 se observa el freno de polvo magnético y su unidad de control. El objetivo del uso de este freno de polvo magnético es generar un par de carga y tener la posibilidad de poder variarlo mediante el controlador.



Figura 7.7: Motor Controlador de freno a la izquierda y freno de polvo magnético a la derecha.

7.2.4. SENSORES

Para capturar la corriente eléctrica se emplea una sonda de corriente de Efecto Hall, que es un sensor que transforma una señal de corriente eléctrica en otra proporcional de tensión. Para realizar la medida, la sonda rodea una de las fases del motor.

Para la realización de los ensayos, tomamos las medidas de corriente con una pinza amperimétrica como la mostrada en la Figura 7.8.



Figura 7.8: Pinza amperimétrica.

7.3. RECOGIDA DE DATOS.

La recogida de datos se realizará mediante un tarjeta de adquisición de datos. Los datos una vez realizado el ensayo son transformados a una tabla de Excel, en donde podremos clasificarlos. La clasificación de estos datos será en dos intervalos en función del deslizamiento del motor:

- Deslizamiento bajo(0.02-0.03 p.u.)
- Deslizamiento alto(0.04-0.05 p.u.)

Una vez, que tengamos los datos agrupados según el deslizamiento, los dividiremos en diferentes hojas según la severidad del fallo. La clasificación de la severidad de fallo es la siguiente:

- R1:Motor completamente SANO
- R2:Fallo INCIPIENTE
- R3:Fallo DESARROLLADO
- R4:Fallo de barra TOTAL

Una vez clasificados los datos según la severidad y ordenados de menor a mayor según el deslizamiento, calculamos una serie de estadísticos(media y desviación estándar) que nos servirán para la generación de los valores aleatorios de Matlab.

Los datos proceden de ensayos donde se registró la corriente. Posteriormente, estas corrientes fueron procesadas calculando su Densidad de Potencia Espectral. En el espectros se identifican los dos armónicos de fallo que empleamos en este proyecto para realizar la detección de fallo. La amplitud de estos armónicos constituye los indicadores de fallo que empleamos para determinar su existencia y su severidad. Todos los ensayos se normalizan para que la amplitud del armónico fundamental sea siempre de 0 dB. De esta forma, la amplitud de los armónicos de fallo se mide respecto a este valor. Los patrones de fallo, por tanto, los tenemos almacenados expresados en dB.

Para generar las señales sintéticas, se necesita convertir los datos que están en dB a amperios, puesto que en la programación trabajamos con las variables en amperios. La ecuación 7.1, es la fórmula que utilizamos para realizar nuestra conversión.

$$A = \sqrt{A_1^2 * (10^{\frac{PSD}{10}})} \quad (7.1)$$

Por último, calculamos la media y desviación estándar del deslizamiento, banda superior (USH) y banda inferior (LSH), que serán los valores necesarios para la generación del modelo sintético.

7.4. CARACTERÍSTICAS ESTADÍSTICAS EN EL DOMINIO TEMPORAL.

Utilizamos los estadístico media y desviación estándar para la generación de nuestro modelo sintético, porque tanto los valores de la banda superior como los de la banda inferior son número aleatorios siguiendo una distribución normal. Suponemos que el LSH como el USH tienen una distribución normal, de ahí el cálculo de la media y desviación estándar.

Las señales sintéticas son definidas por sus valores en función del tiempo. Con estos datos temporales se calculan varios estadísticos. Estos resultados

han sido utilizados como indicadores de fallos en motores de inducción. Estos estadísticos de orden superior se definen en la Tabla 7.1.

Los datos estadísticos serán calculados y almacenados en una matriz mediante columnas, de forma que la primera y segunda columna será el valor del LSH y USH respectivamente, y a continuación se irán añadiendo los estadísticos de igual manera a como aparecen reflejados en la Tabla 7.1. Este es el procedimiento a la hora de almacenar los resultados de los diferentes estadísticos, para realizar su posterior representación gráfica. Para ello nos hemos apoyado de los archivos generados previamente en Matlab como se explicó en el capítulo anterior.

CARACTERÍSTICA ESTADÍSTICA	ECUACIÓN	COLUMNA OCUPADA EN LA MATRIZ
Momento de 1 ^{er} Orden (Promedio)	$M_1 = \frac{1}{n} \sum (x)$	3
Momento de 2 ^{do} Orden (Varianza)	$M_2 = \frac{1}{n} \sum (x - \bar{x})^2$	4
Momento de 3 ^{er} Orden	$M_3 = \frac{1}{n} \sum (x - \bar{x})^3$	5
Momento de 4 ^{to} Orden	$M_4 = \frac{1}{n} \sum (x - \bar{x})^4$	6
Cumulante de 1 ^{er} Orden	$C_1 = M_1$	7
Cumulante de 2 ^{do} Orden	$C_2 = M_2 - M_1^2$	8
Cumulante de 3 ^{er} Orden	$C_3 = M_3 - 3M_1M_2 + 2M_1^3$	9
Cumulante de 4 ^{to} Orden	$C_4 = M_4 + M_3M_1 - 3M_2^2 + 12M_2M_1^2 - 6M_1^4$	10
Cumulante de 6 ^{to} Orden	$C_6 = \frac{\sum (x - \bar{x})^6}{n * M_4^3}$	11
Skewness ó asimetría	$Skew = \frac{M_3}{(\sqrt{M_2})^3}$	12
Curtosis	$Curt = \frac{M_4}{(\sqrt{M_2})^4}$	13
Promedio de valores absolutos	$A_m = 1/n \sum x $	14
Máximo valor absoluto	$x_p = \max x $	15
Valor cuadrático medio	$x_{rms} = (1/n \sum \sqrt{ x })^2$	16
Factor de cresta	$F_c = x_p / x_{rms}$	17
Factor de forma	$F_f = x_{rms} / \bar{x} $	18

Tabla 7.1: Estadísticos utilizados y referencia en la matriz

Algunas de las variables estadísticas utilizadas tienen una interpretación geométrica sencilla, mientras que otras tienen una interpretación más compleja.

Así, el Momento 1 es simplemente el promedio de la señal. El Momento 2 es la desviación estándar o desviación típica. Esta desviación estándar es una medida de la dispersión que refleja cuánto tienden a separarse los valores concretos del promedio en una distribución. Específicamente, la desviación típica es, el promedio del cuadrado de la distancia de cada punto respecto del promedio.

A partir del modelo sintético generamos unas matrices de datos atendiendo al nivel de deslizamiento (S_{bajo} y S_{alto}), con lo que generamos dos ficheros con una extensión *.mat*, los cuales utilizamos para la representación de los estadísticos. Estos dos archivos contienen los diferentes estadísticos, y para poder sacar conclusiones sobre su correlación utilizamos una representación gráfica. La Figura 7.9 muestra un ejemplo de la representación gráfica de los estadísticos que consta de un diagrama de cajas y bigotes ó Box-Plot y un diagrama de dispersión. Ambos gráficos están divididos según el nivel de deslizamiento y severidad de fallo, representando el estadístico en función del deslizamiento.

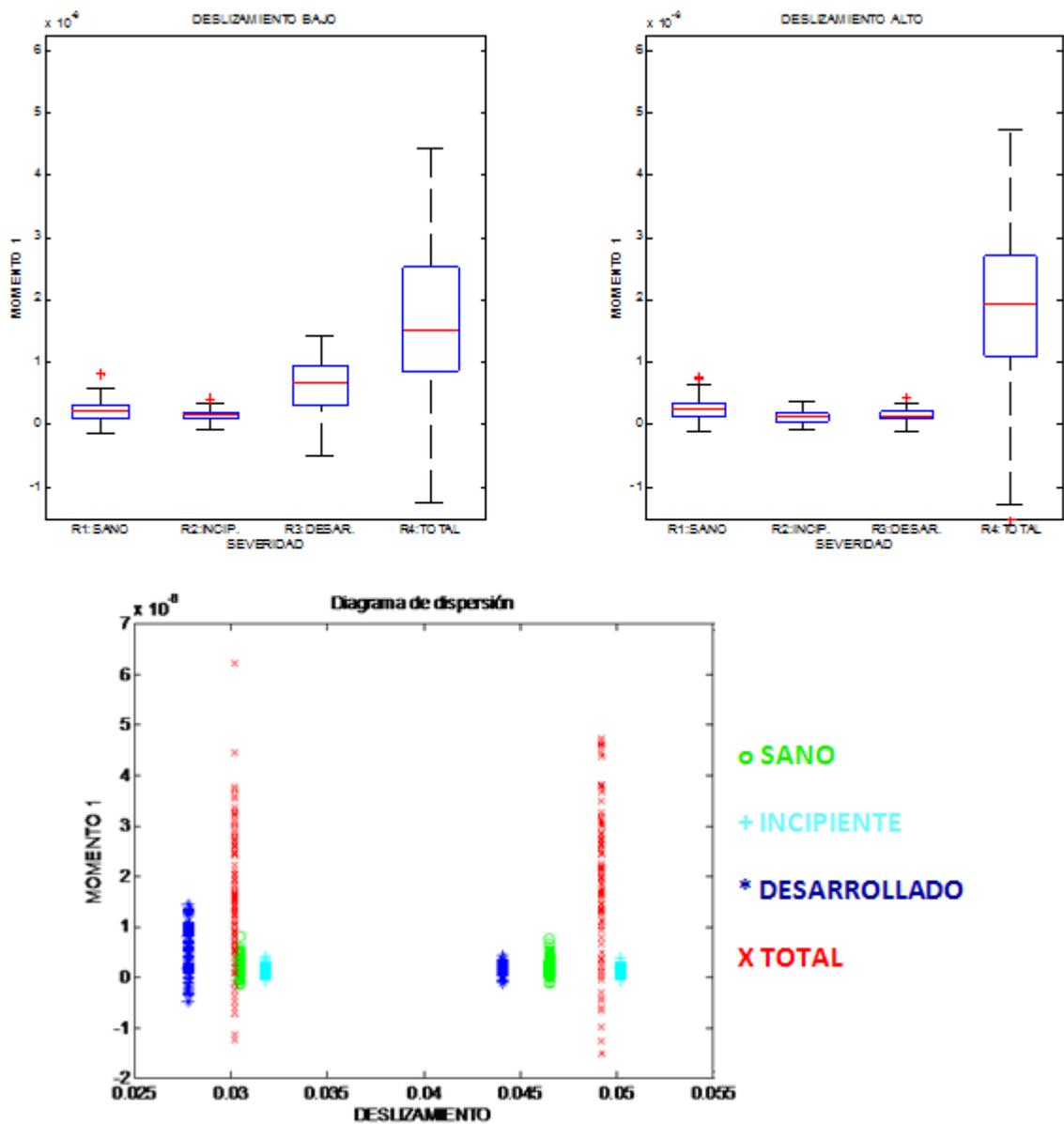


Figura 7.9: Ejemplo gráfico que utilizaremos en los estadísticos.

Al representar en el diagrama de dispersión las diferentes severidades de fallo, se puede apreciar la evolución de los diferentes estadísticos. De esta forma se puede sacar mejor las conclusiones y ver si el estadístico nos da una información rápida del estado del motor.

7.5. RESULTADOS GRÁFICOS Y CONCLUSIONES.

Primero mostramos una representación del espectro en frecuencia, de los distintos tipos de severidades, mostrando las frecuencias en las zonas donde aparecen los armónicos. Segundo añadimos los resultados gráficos de los diferentes estadísticos.

7.5.1. GRÁFICOS DE LAS SEVERIDADES SIN RUIDO

A continuación mostramos una comparativa de las severidades de fallo, de una forma ideal en la que no tuviéramos ruido:

- Motor Totalmente SANO con deslizamiento BAJO y sin ruido: Fig. 7.10.
- Motor Totalmente SANO con deslizamiento ALTO y sin ruido: Fig. 7.11.
- Motor con Fallo INCIPIENTE con deslizamiento BAJO y sin ruido: Fig. 7.12.
- Motor con Fallo INCIPIENTE con deslizamiento ALTO y sin ruido: Fig. 7.13.
- Motor con Fallo DESARROLLADO con deslizamiento BAJO y sin ruido: Fig. 7.14.
- Motor con Fallo DESARROLLADO con deslizamiento ALTO y sin ruido: Fig. 7.15.
- Motor con Fallo TOTAL con deslizamiento BAJO y sin ruido: Fig. 7.16.
- Motor con Fallo TOTAL con deslizamiento ALTO y sin ruido: Fig. 7.17.

Los armónicos se encuentran caracterizados en torno a los 47Hz para el caso del LSH y de 55Hz para el caso del USH. Pero una de las características que nos sirve para la clasificación de las severidades es la amplitud del armónico de la frecuencia, estando para los diferentes casos en torno a:

- -100dB para el caso de motor totalmente SANO.
- -80dB para el caso de un motor con fallo INCIPIENTE.
- -65dB para el caso de un motor con fallo DSARROLLADO.
- -50dB para el caso de un motor con fallo TOTAL.

Capítulo 7: Resultados de la aplicación del modelo sintético

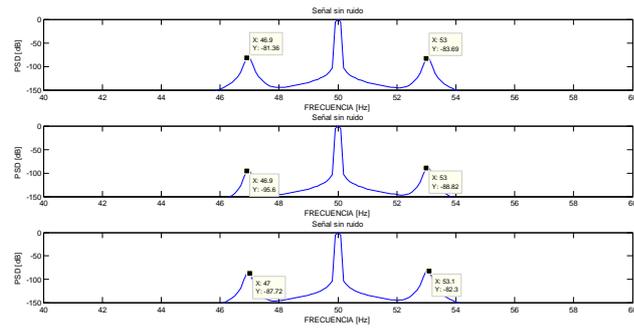


Figura 7.10: Representación del espectro de la señal de corriente para motor totalmente sano, con deslizamiento bajo y sin ruido.

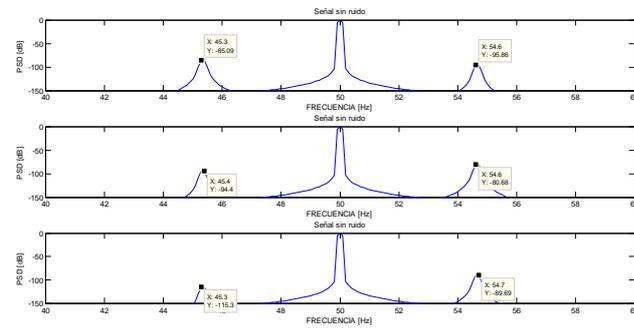


Figura 7.11: Representación del espectro de la señal de corriente para motor totalmente sano, con deslizamiento alto y sin ruido.

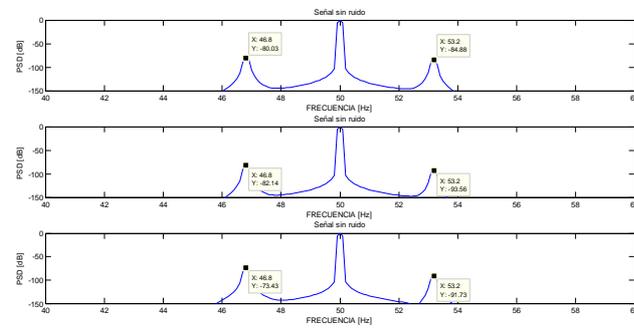


Figura 7.12: Representación del espectro de la señal de corriente para motor con fallo incipiente, deslizamiento bajo y sin ruido.

Capítulo 7: Resultados de la aplicación del modelo sintético

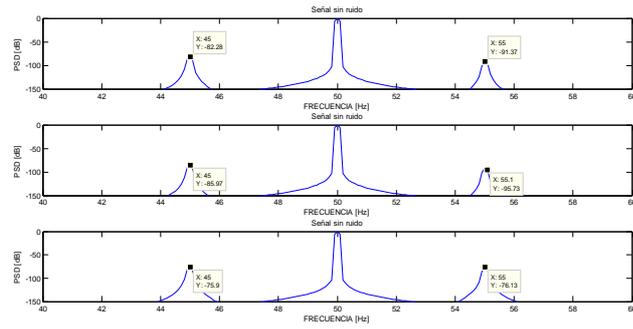


Figura 7.13: Representación del espectro de la señal de corriente para motor con fallo incipiente, deslizamiento alto y sin ruido.

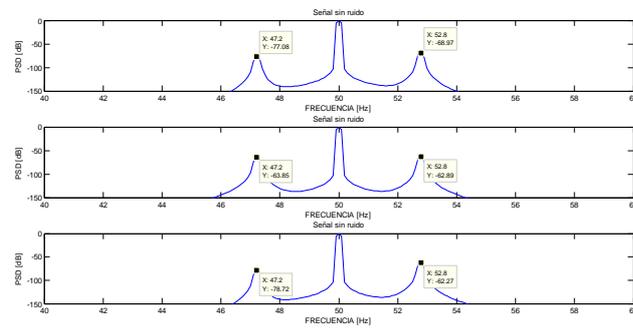


Figura 7.14: Representación del espectro de la señal de corriente para motor con fallo desarrollado, deslizamiento bajo y sin ruido.

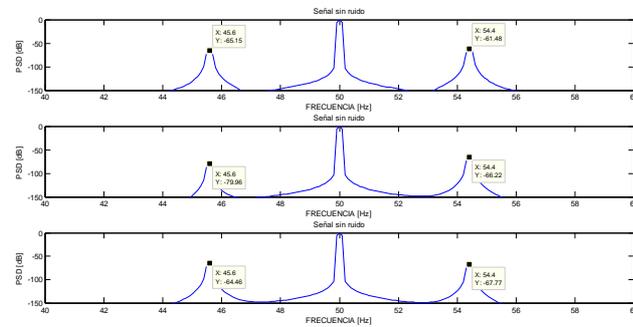


Figura 7.15: Representación del espectro de la señal de corriente para motor con fallo desarrollado, deslizamiento alto y sin ruido.

Capítulo 7: Resultados de la aplicación del modelo sintético

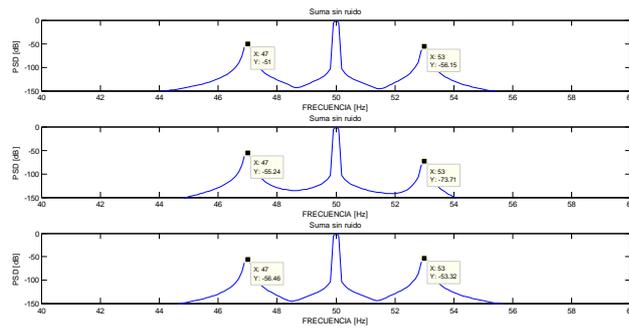


Figura 7.16: Representación del espectro de la señal de corriente para motor con fallo total, deslizamiento bajo y sin ruido.

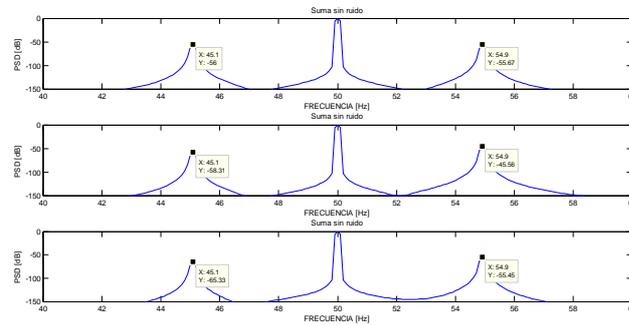


Figura 7.17: Representación del espectro de la señal de corriente para motor con fallo total, deslizamiento alto y sin ruido.

7.5.2. GRÁFICOS DE LOS ESTADÍSTICOS SIN RUIDO

En esta sección, se muestran de forma gráfica los estadísticos de orden superior calculados sobre ondas temporales sintéticas sin añadir ruido alguno. En el punto siguiente se realizará el análisis de los mismos.

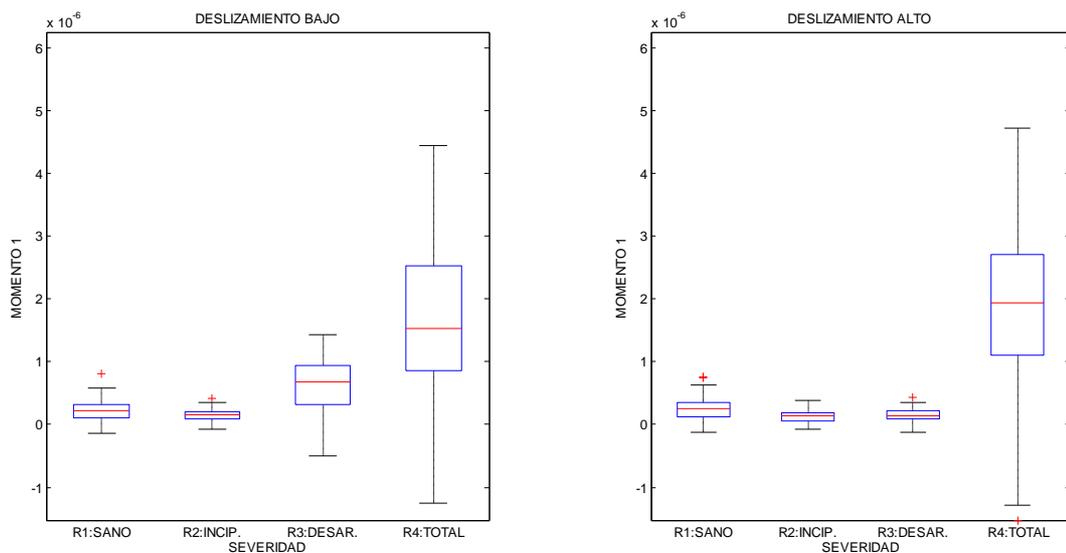


Figura 7.18: Representación Box-plot del estadístico Momento 1 .

Capítulo 7: Resultados de la aplicación del modelo sintético

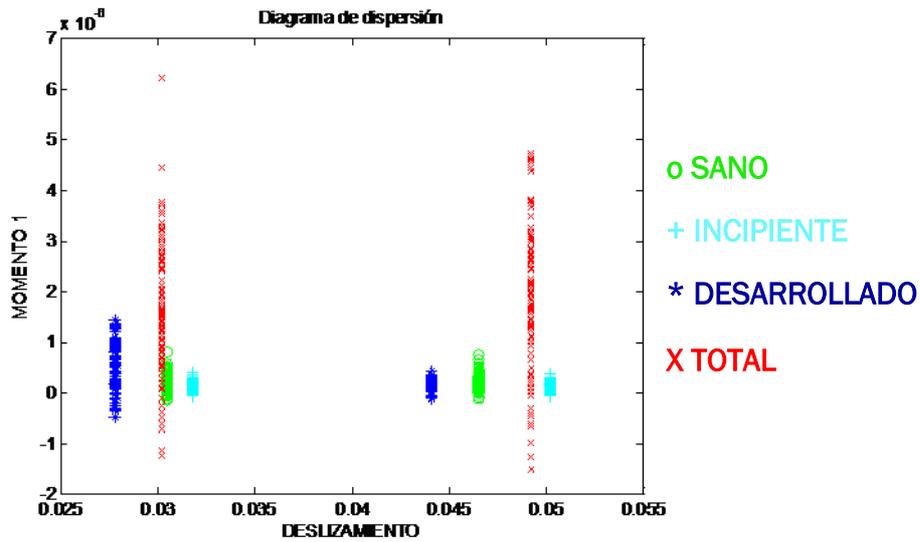


Figura 7.19: Representación diagrama de dispersión del estadístico Momento 1 .

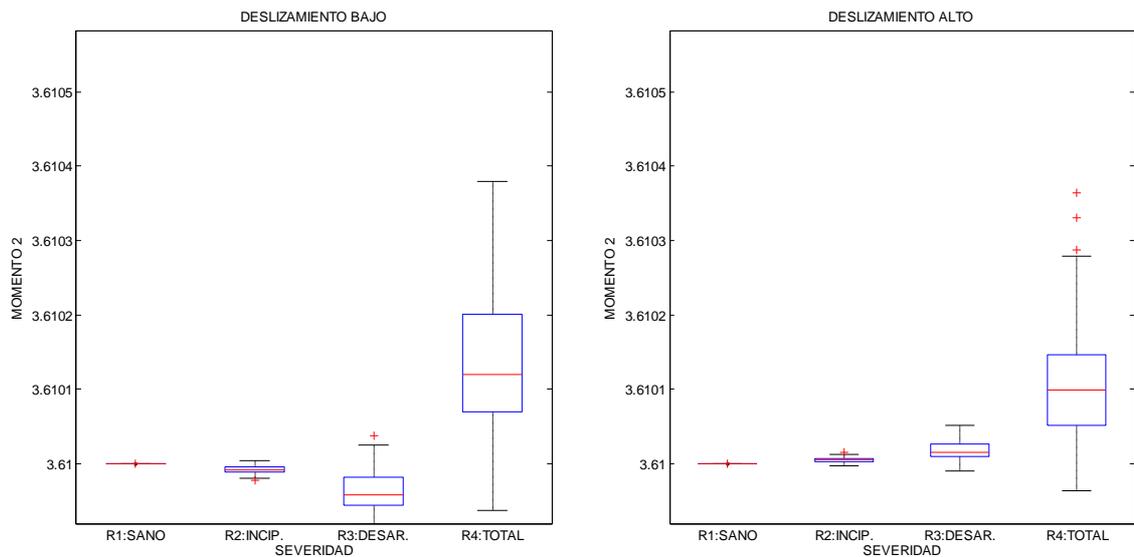


Figura 7.20: Representación Box-plot del estadístico Momento 2 .

Capítulo 7: Resultados de la aplicación del modelo sintético

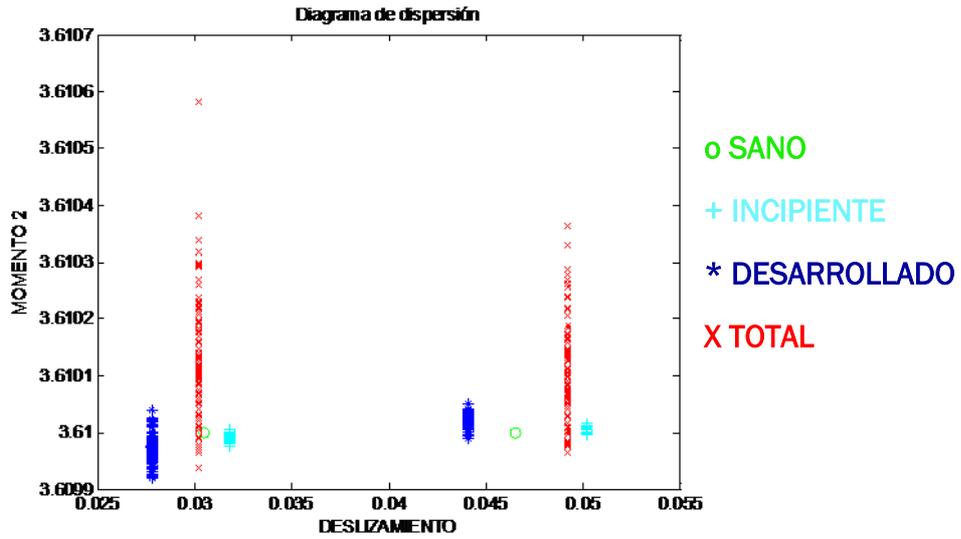


Figura 7.21: Representación diagrama de dispersión del estadístico Momento 2 .

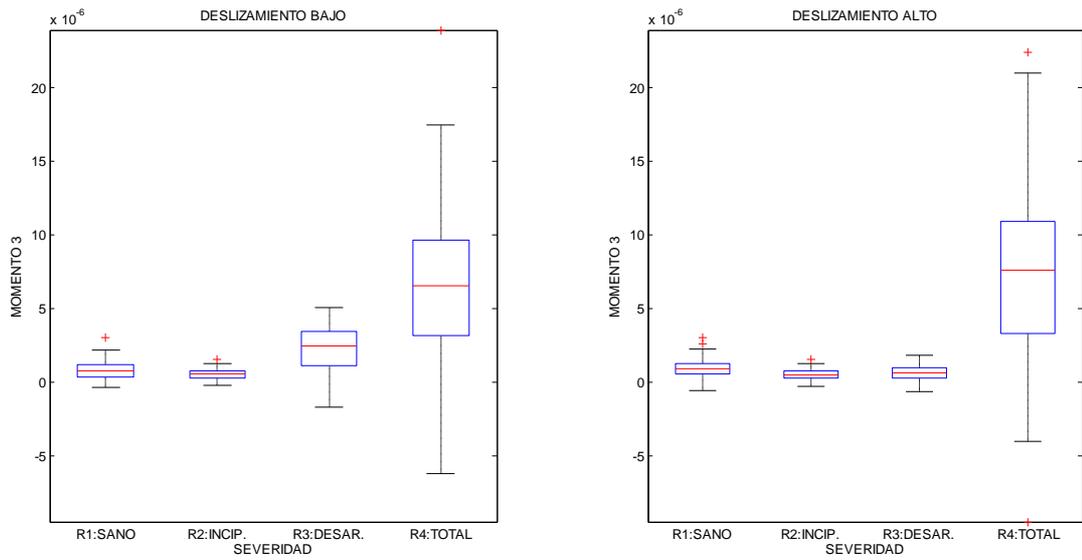


Figura 7.22: Representación Box-plot del estadístico Momento 3 .

Capítulo 7: Resultados de la aplicación del modelo sintético

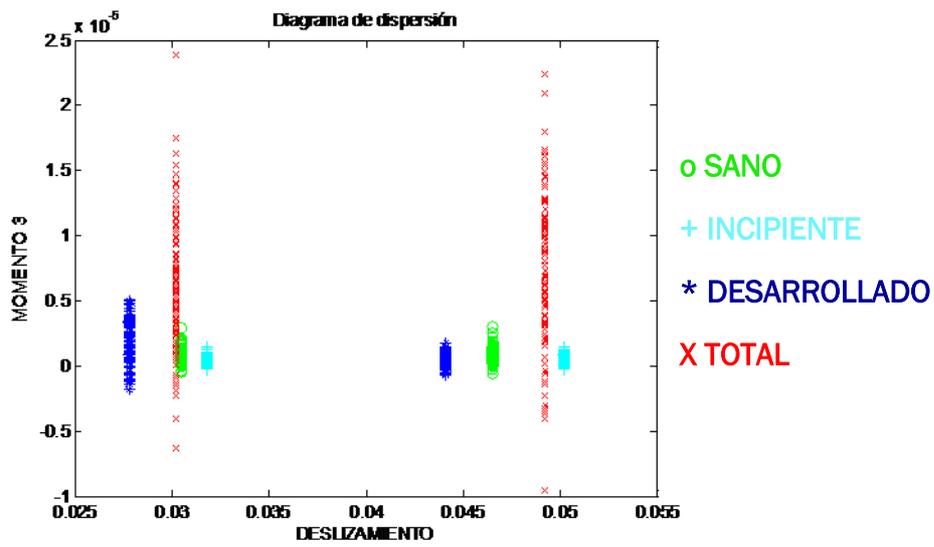


Figura 7.23: Representación diagrama de dispersión del estadístico Momento 3 .

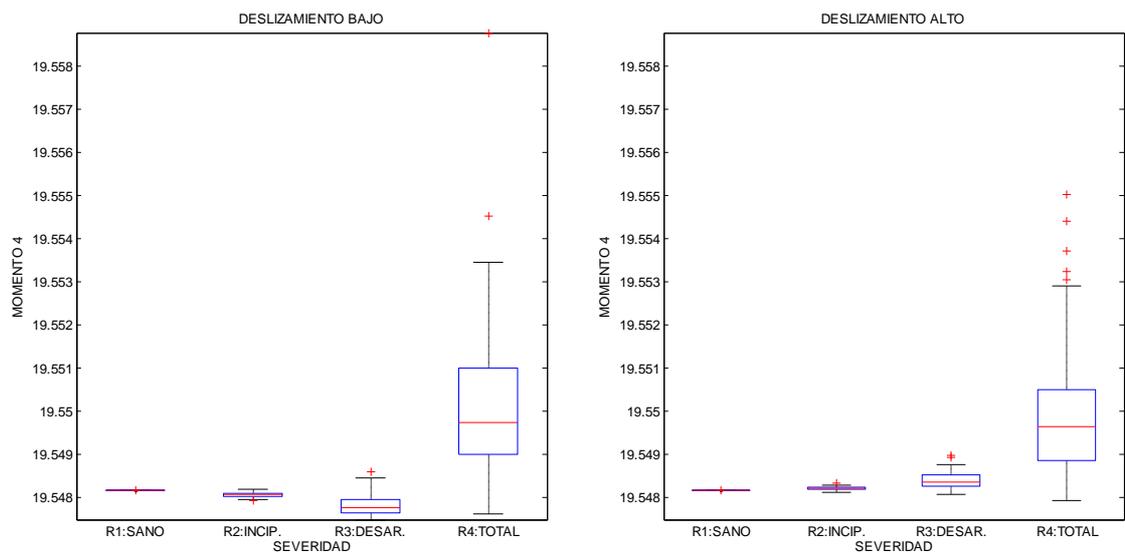


Figura 7.24: Representación Box-plot del estadístico Momento 4 .

Capítulo 7: Resultados de la aplicación del modelo sintético

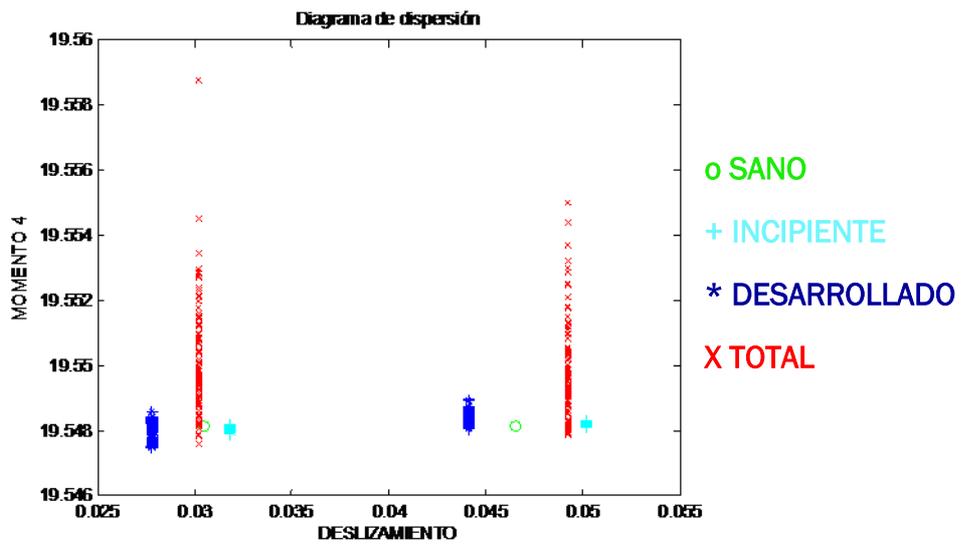


Figura 7.25: Representación diagrama de dispersión del estadístico Momento 4 .

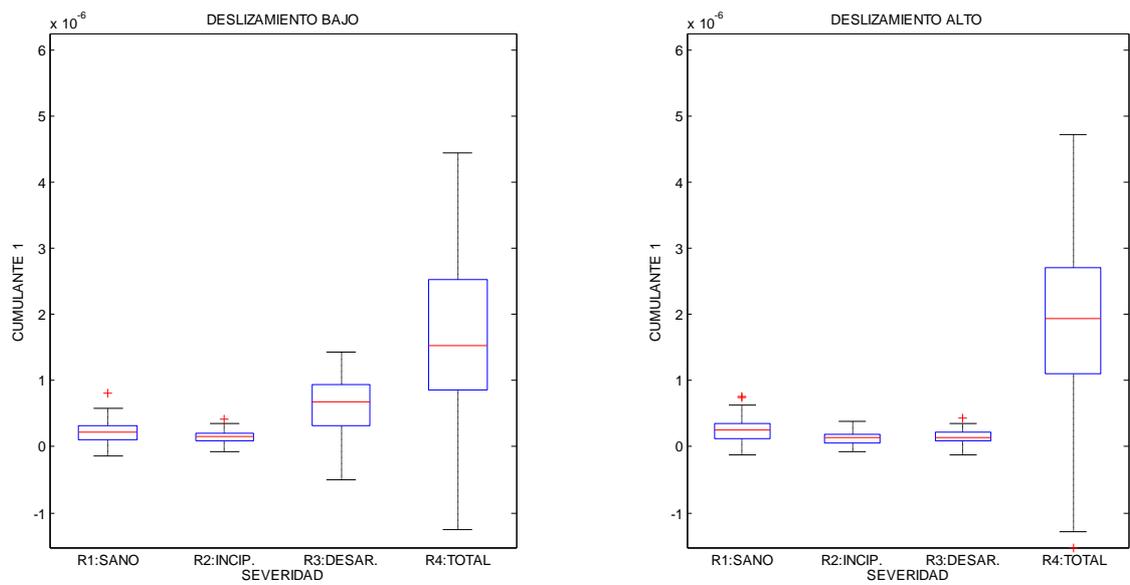


Figura 7.26: Representación Box-plot del estadístico Cumulante 1 .

Capítulo 7: Resultados de la aplicación del modelo sintético

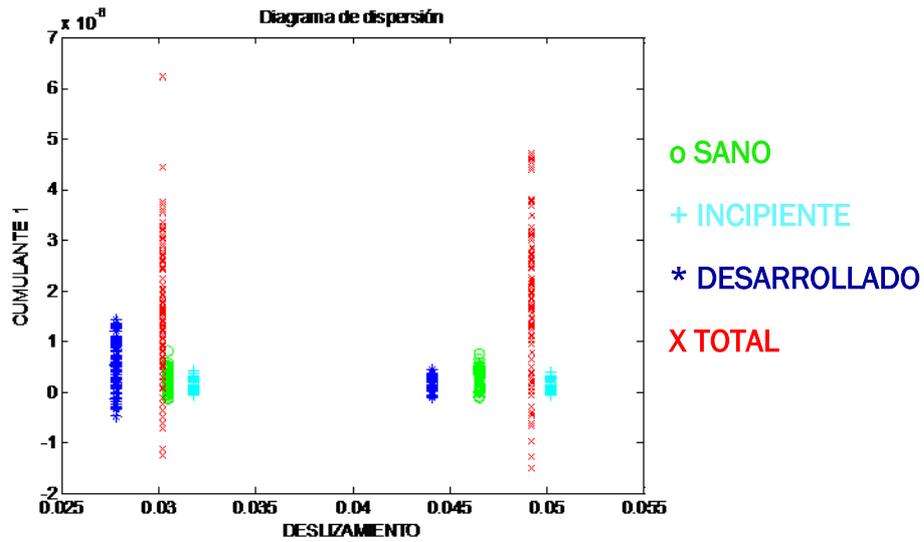


Figura 7.27: Representación diagrama de dispersión del estadístico Cumulante 1 .

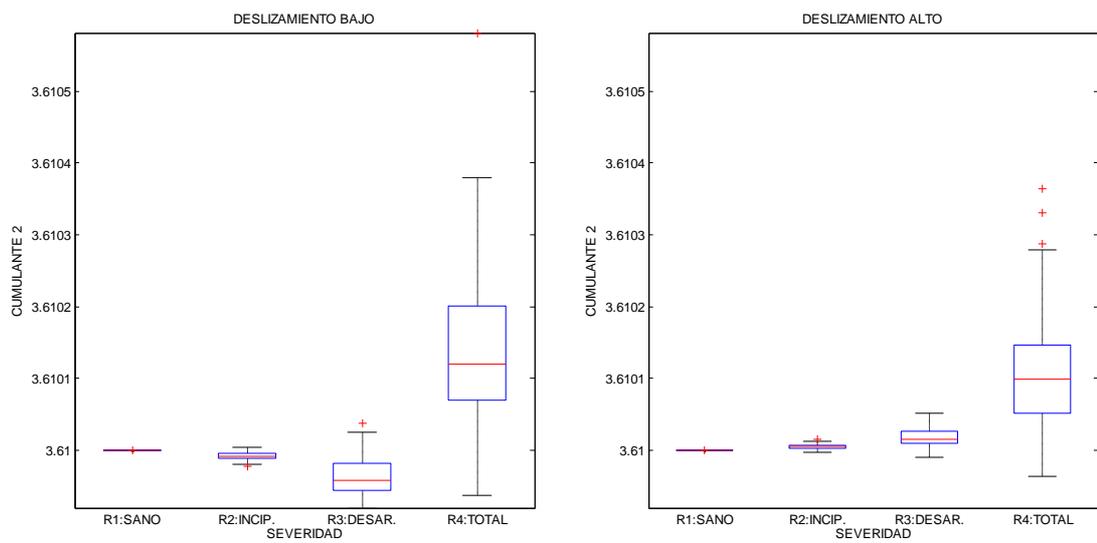


Figura 7.28: Representación Box-plot del estadístico Cumulante 2 .

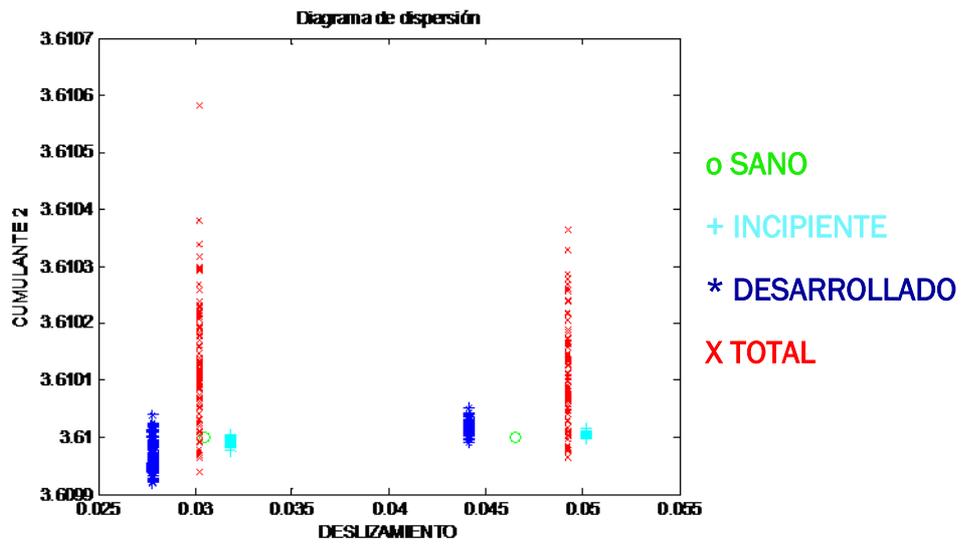


Figura 7.29: Representación diagrama de dispersión del estadístico Cumulante 2 .

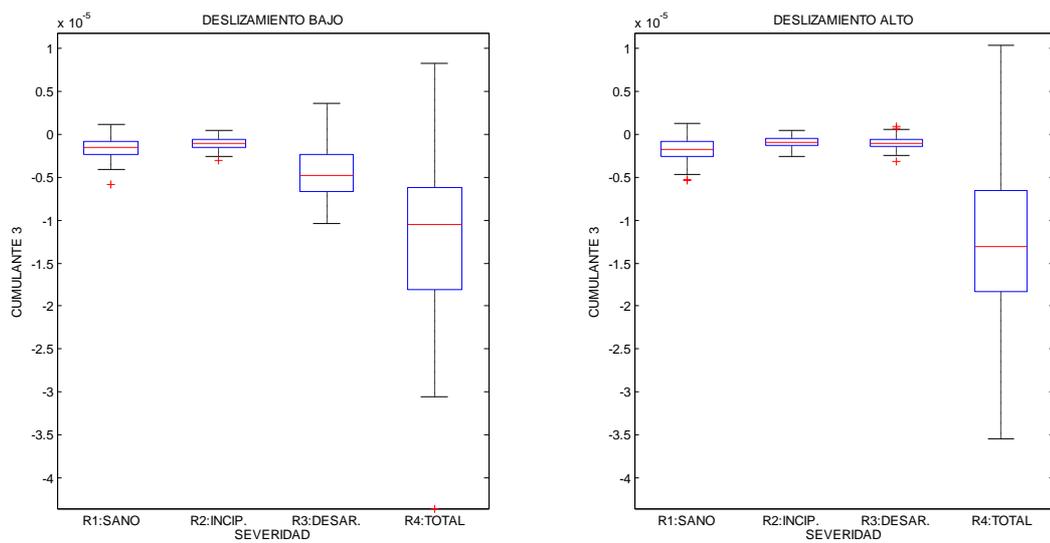


Figura 7.30: Representación Box-plot del estadístico Cumulante 3 .

Capítulo 7: Resultados de la aplicación del modelo sintético

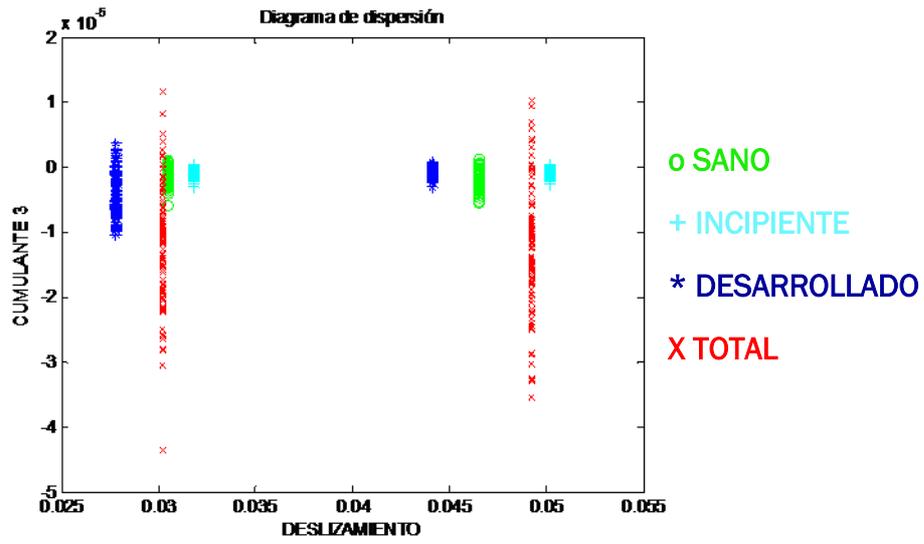


Figura 7.31: Representación diagrama de dispersión del estadístico Cumulante 3 .

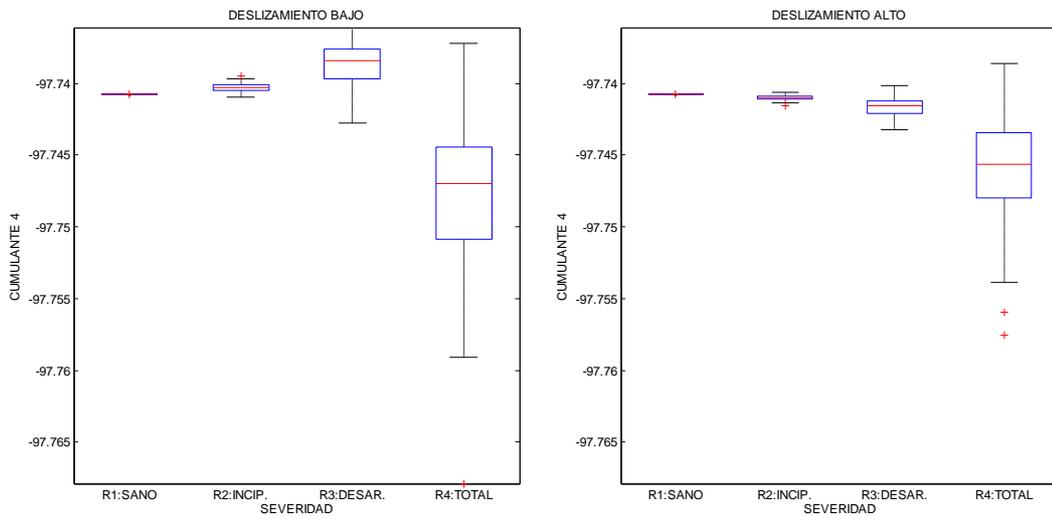


Figura 7.32: Representación Box-plot del estadístico Cumulante 4 .

Capítulo 7: Resultados de la aplicación del modelo sintético

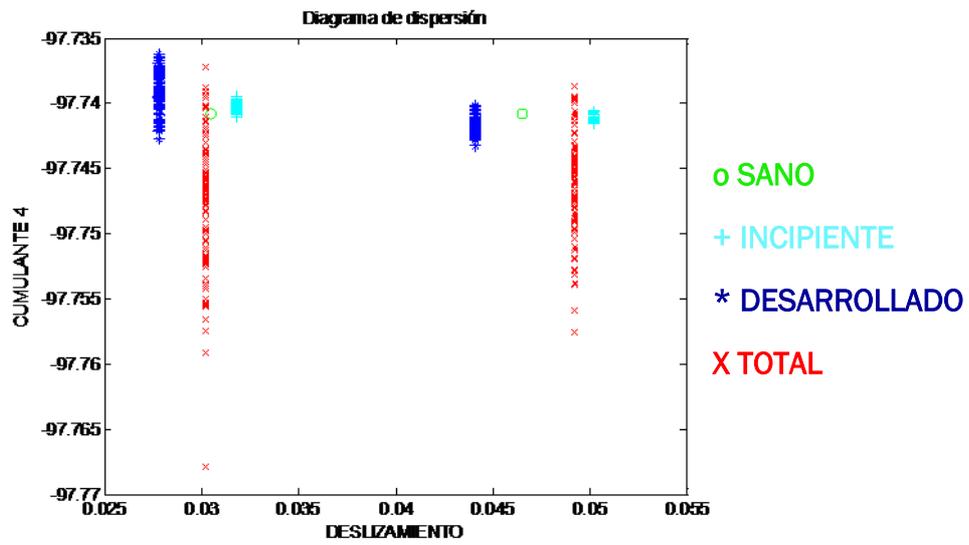


Figura 7.33: Representación diagrama de dispersión del estadístico Cumulante 4 .

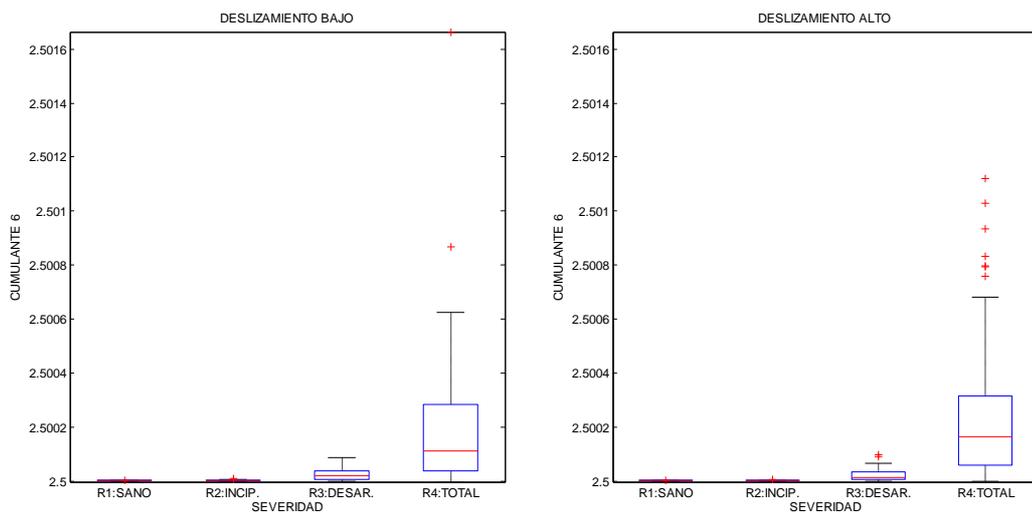


Figura 7.34: Representación Box-plot del estadístico Cumulante 6 .

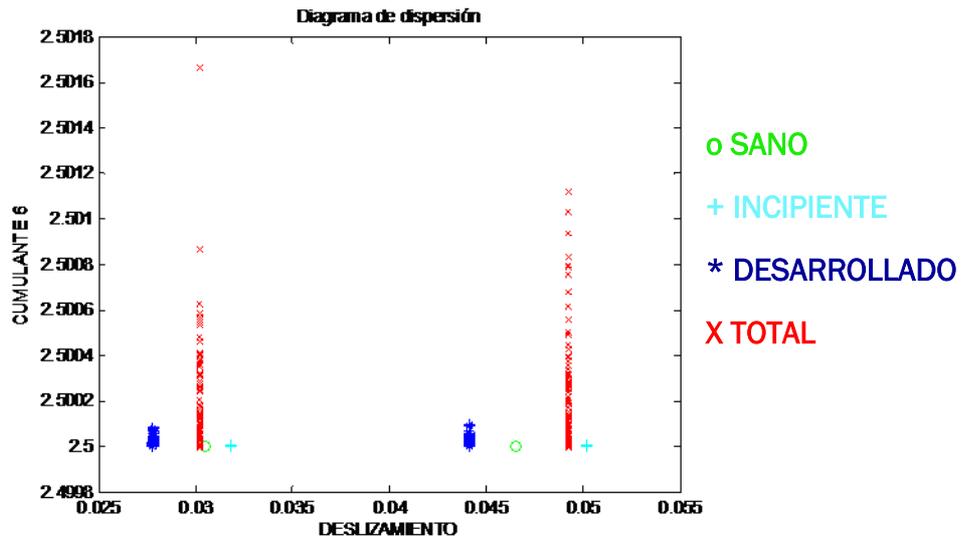


Figura 7.35: Representación diagrama de dispersión del estadístico Cumulante 6 .

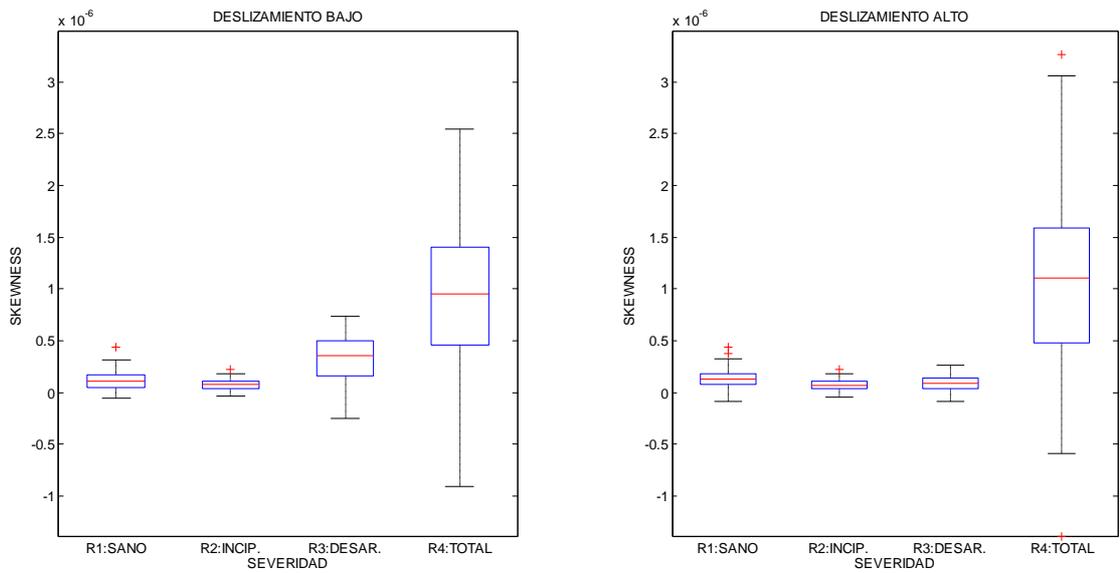


Figura 7.36: Representación Box-plot del estadístico Skewness .

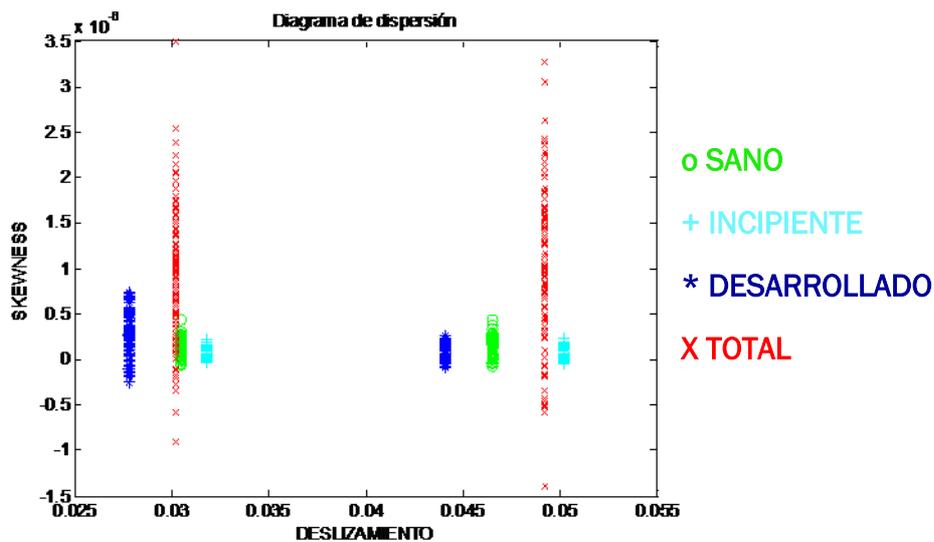


Figura 7.37: Representación diagrama de dispersión del estadístico Skewness .

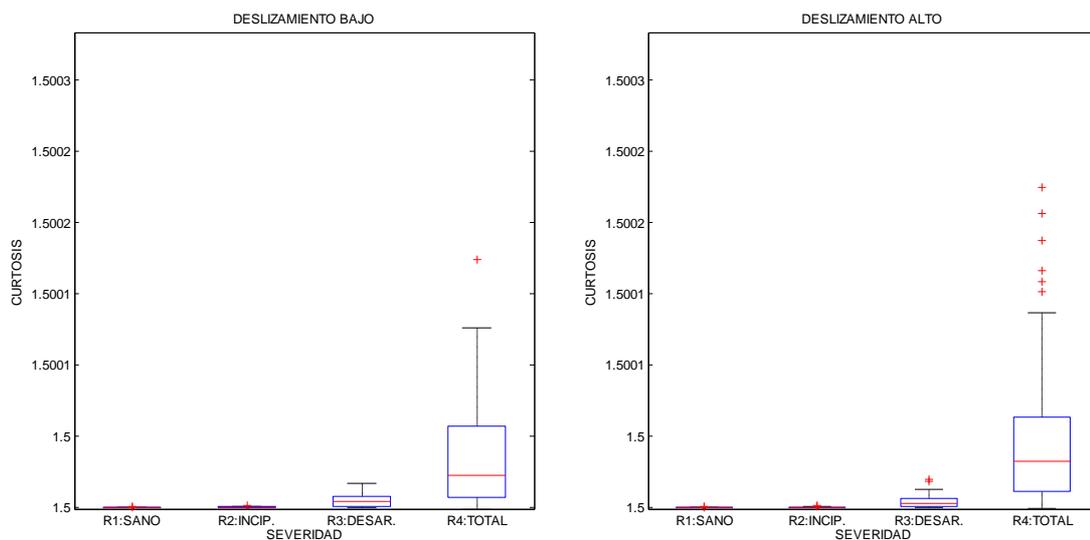


Figura 7.38: Representación Box-plot del estadístico Kurtosis .

Capítulo 7: Resultados de la aplicación del modelo sintético

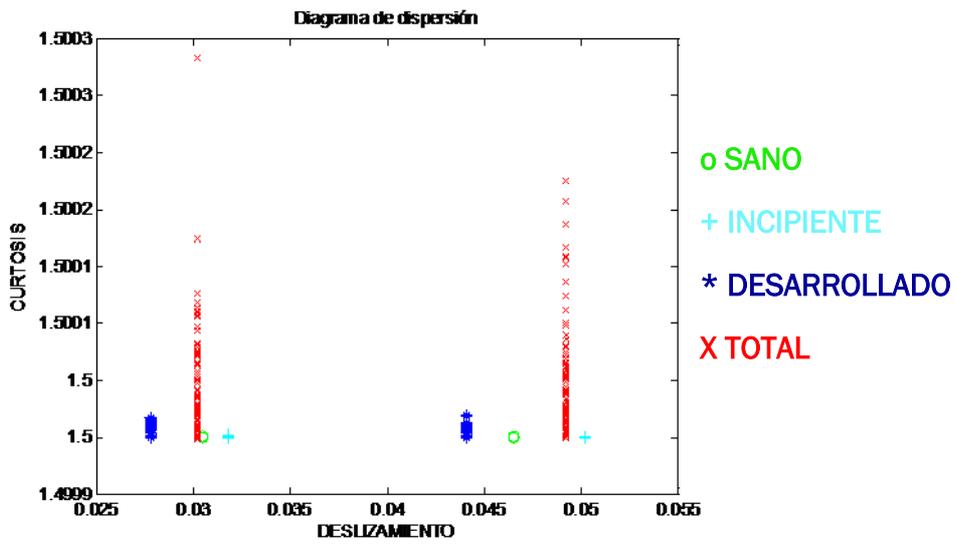


Figura 7.39: Representación diagrama de dispersión del estadístico Curtosis .

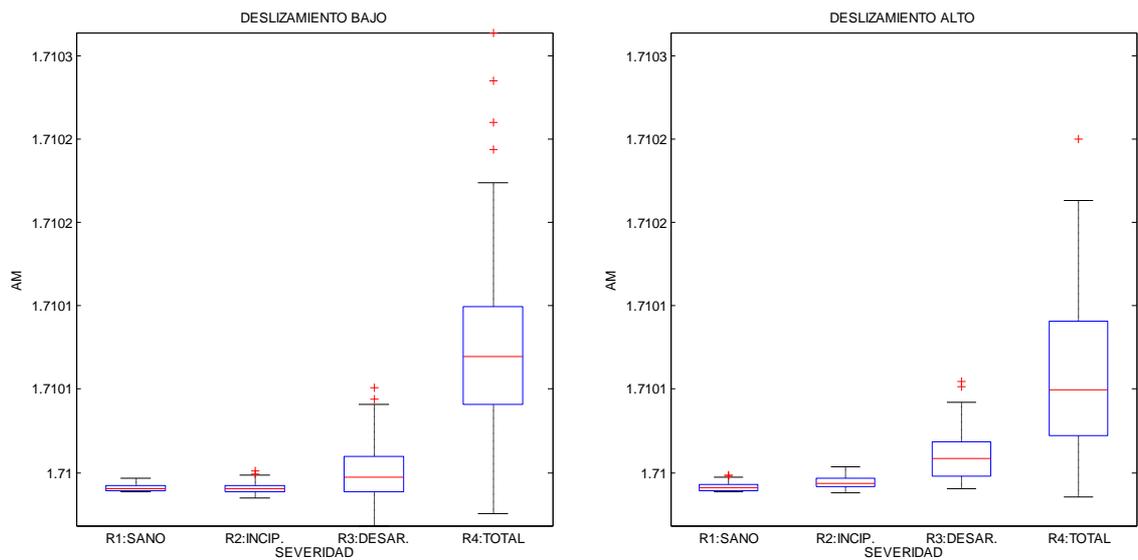


Figura 7.40: Representación Box-plot del estadístico promedio de valores absolutos .

Capítulo 7: Resultados de la aplicación del modelo sintético

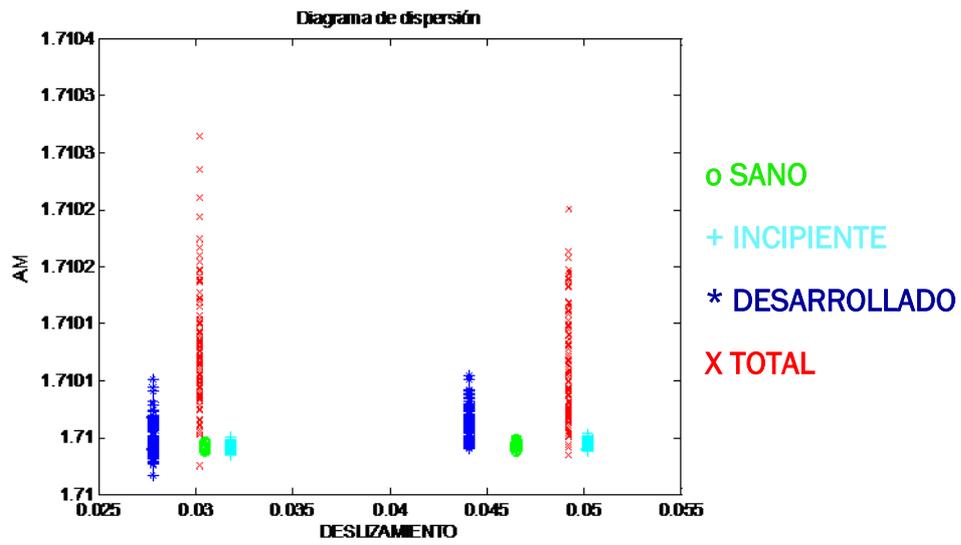


Figura 7.41: Representación diagrama de dispersión del estadístico promedio de valores absolutos .

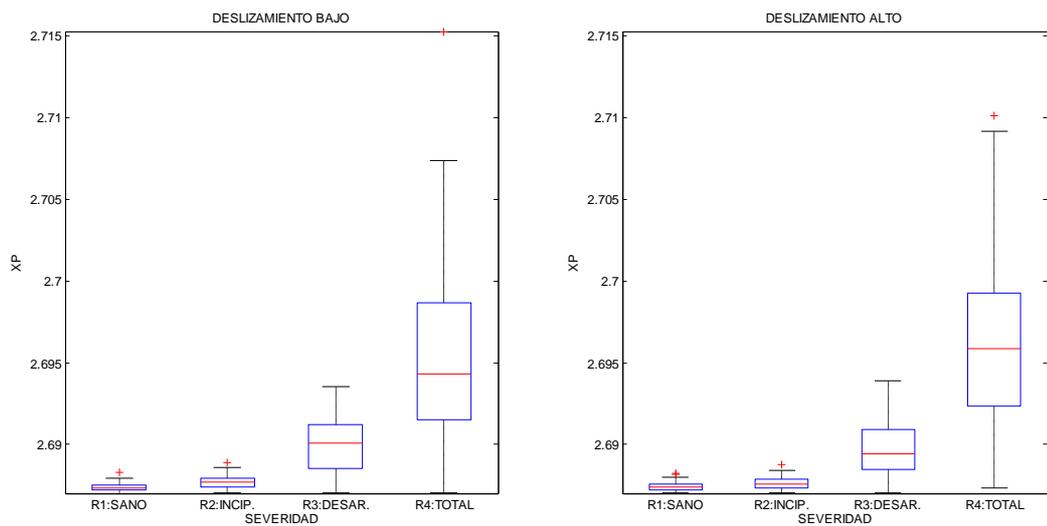


Figura 7.42: Representación Box-plot del estadístico máximo de valores absolutos .

Capítulo 7: Resultados de la aplicación del modelo sintético

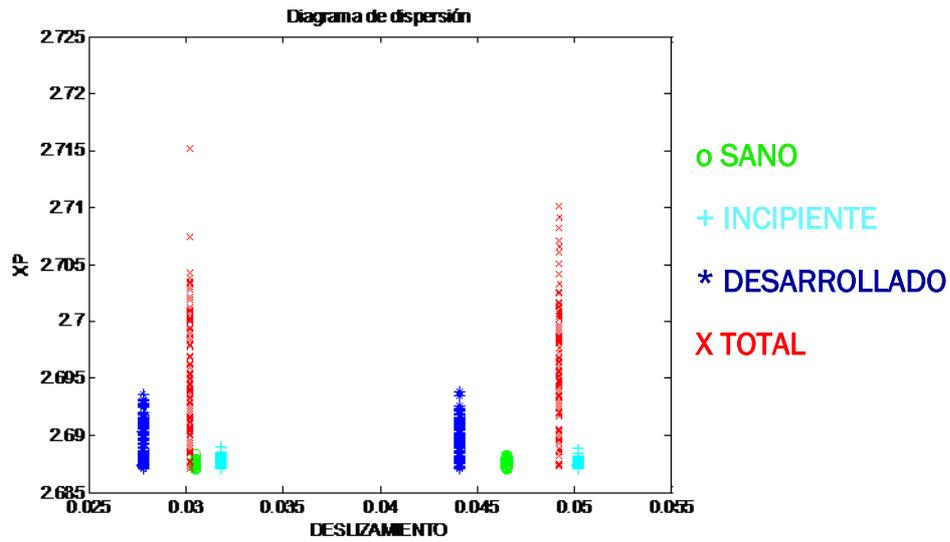


Figura 7.43: Representación diagrama de dispersión del estadístico máximo de valores absolutos .

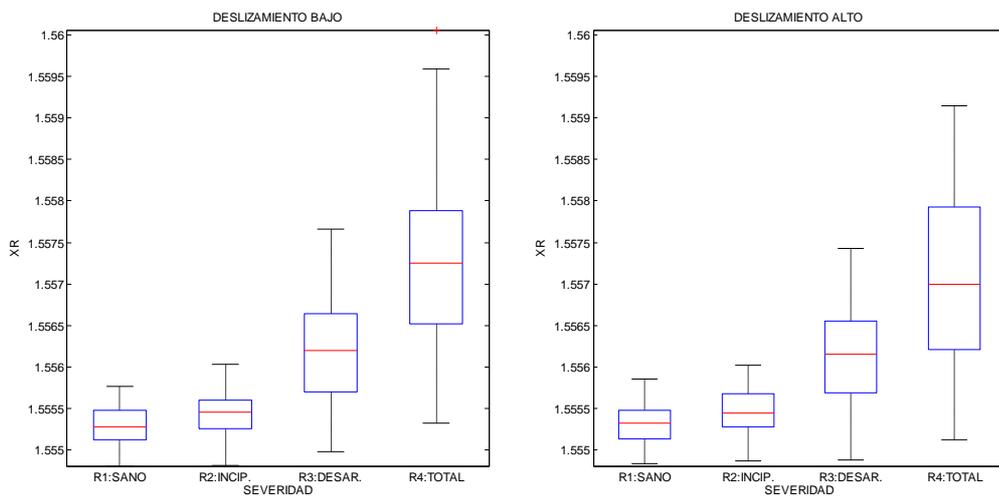


Figura 7.44: Representación Box-plot del estadístico valor cuadrático medio .

Capítulo 7: Resultados de la aplicación del modelo sintético

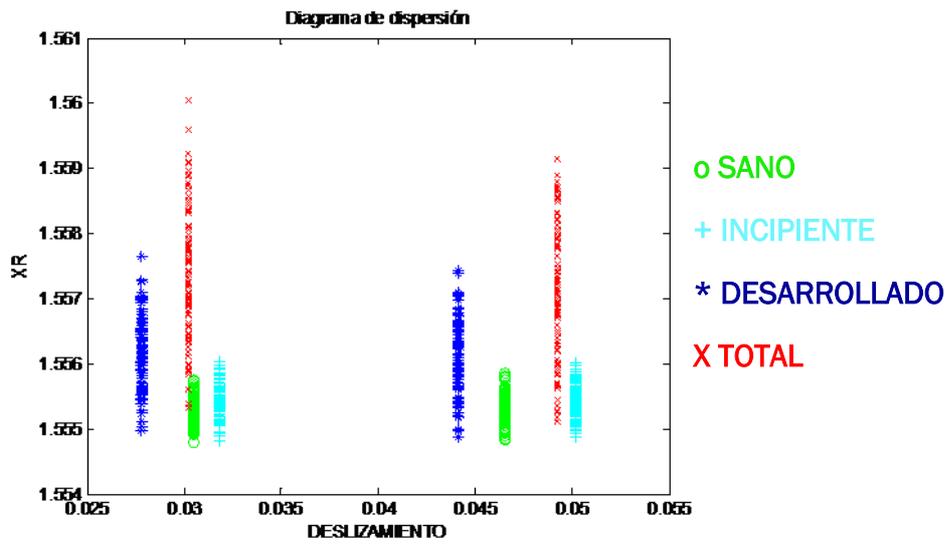


Figura 7.45: Representación diagrama de dispersión del estadístico valor cuadrático medio .

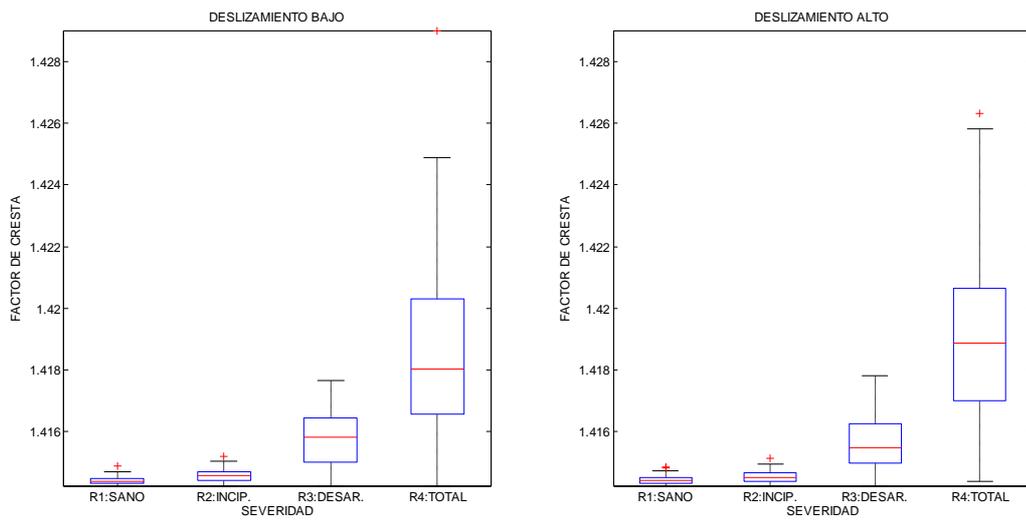


Figura 7.46: Representación Box-plot del estadístico factor de cresta .

Capítulo 7: Resultados de la aplicación del modelo sintético

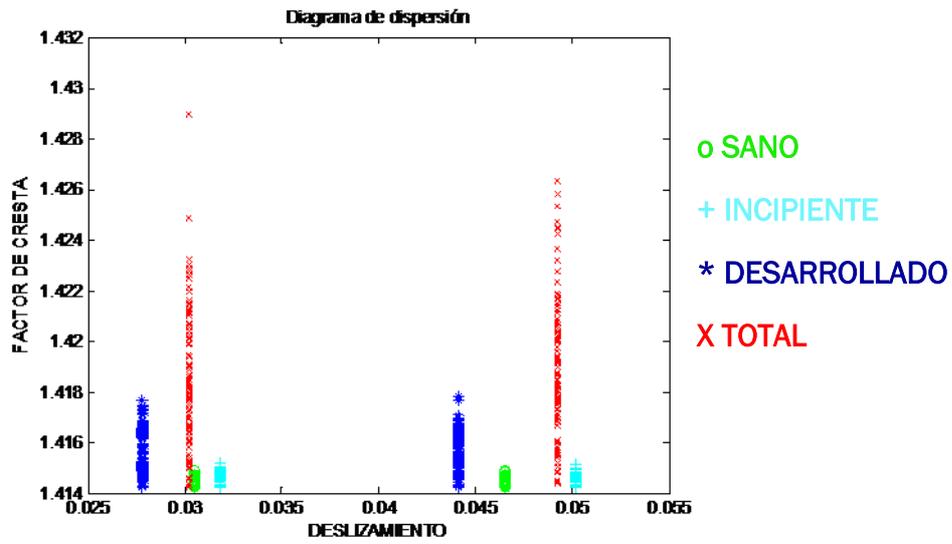


Figura 7.47: Representación diagrama de dispersión del estadístico factor de cresta .

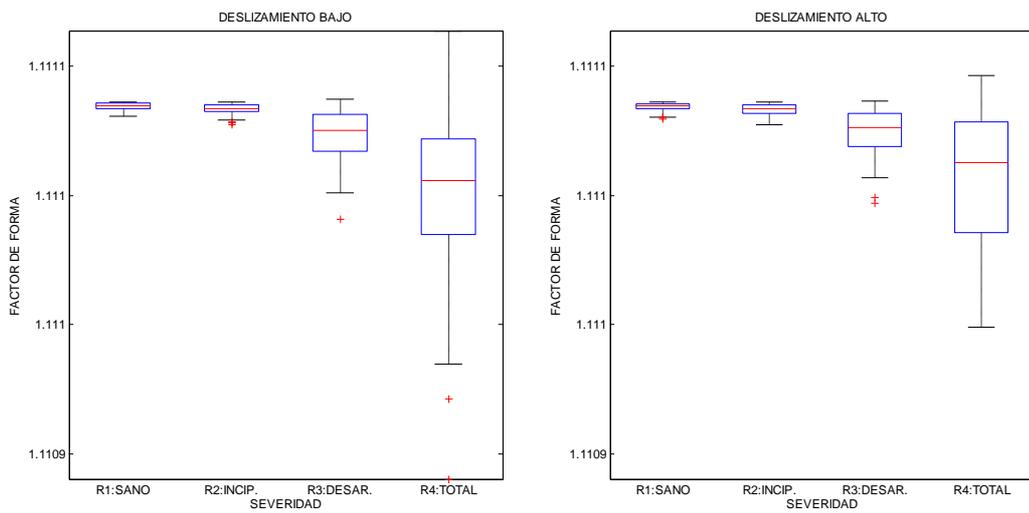


Figura 7.48: Representación Box-plot del estadístico factor de forma .

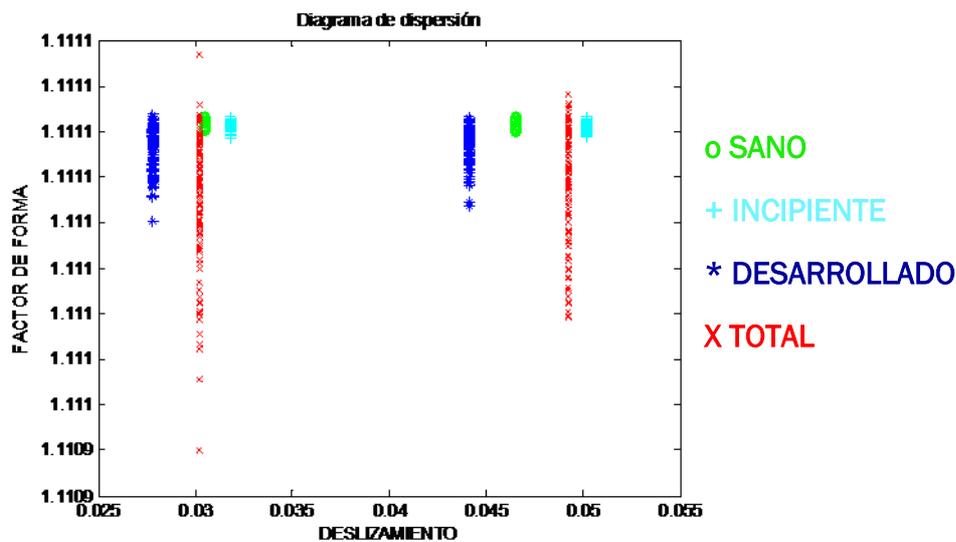


Figura 7.49: Representación diagrama de dispersión del estadístico factor de forma .

7.5.3. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Las figuras generadas, nos permiten realizar un primer análisis de la capacidad que presentan los diferentes estadísticos para discriminar entre las diferentes severidades de fallo. Cuando se emplean Box-Plots, se considera que dos grupos de datos son diferentes cuando sus respectivas cajas no se solapan, y este es el criterio que se va a emplear para realiza el análisis. Por lo tanto, un caso ideal sería aquel en que no hubiera solapamiento de ninguna de las cajas. Se dispondría entonces de una variable, en este caso un estadístico, que sería capaz por sí solo de discriminar las diferentes severidades del fallo. Si esto fuera así, no se necesitarían otras variables o patrones de fallo para realizar una detección y o diagnóstico efectivo y fiable del mismo. Por desgracia, esta no es la realidad, como se verá en el análisis posterior.

Para el caso del diagrama de dispersión, se considera que dos grupos de datos son diferentes cuanto mayor sea la separación de los puntos de un grupo con respecto a los del otro. En un caso de diagrama de dispersión ideal, sería aquel que todas las nubes de puntos tuvieran una evolución progresiva desde el motor totalmente sano hasta el fallo total en barras. no debería, por lo tanto, haber solapamiento entre las nubes de puntos que representan cada estado de fallo.

En este primer estudio, donde la señal sintética no tiene ruido, algunos estadísticos presentan un alto poder discriminante para separar las severidades consideradas. La discriminación suele ser más sencilla para el fallo desarrollado, porque para el motor totalmente sano y con fallo incipiente se suele producir un solapamiento total de las cajas en Box-Plot, y en el diagrama de dispersión no se observa diferencia alguna en la nube de

puntos, como se puede ver en las Fig. 7.44 (valor cuadrático medio), 7.46 (factor de cresta) y 7.48 (factor de forma). Esta consideración se produce para los dos niveles de deslizamiento.

Además, se produce una independencia discriminatoria para los dos niveles de deslizamiento. Para el caso de deslizamiento bajo, se observa que no hay un solapamiento de las cajas a partir del fallo desarrollado. Sin embargo, cuando tenemos un deslizamiento alto, este poder discriminatorio sólo se ve acentuado para un fallo total en barras, teniendo las cajas del resto de severidades solapadas complicando las labores de seguimiento de la evolución de fallo en el motor. Este caso, podemos observar en las Fig. 7.18 (momento 1), 7.22 (momento 3), 7.26 (cumulante 1) y 7.30 (cumulante 3). Se podrían considerar el uso de estos estadísticos en un esquema de mantenimiento correctivo, ya que son capaces de detectar sólo el fallo total de la barra.

También cabe comentar, que en las Fig. 7.25 (momento 4), 7.35 (cumulante 6) y 7.39 (curtosis) que corresponden a diagramas de dispersión, no hay separación entre los niveles de severidad sano, incipiente y desarrollado que complican la monitorización de la evolución del fallo. Esto se produce por igual en los dos niveles de deslizamiento.

Por último, aunque tengamos un poder discriminatorio alto de forma visual, hay estadísticos que presentan una dificultad a la hora de su clasificación analítica. Esto es debido a que la variación numérica que se produce es muy pequeña (en algunos casos de diez milésimas Fig. 7.48 (factor de forma), y otros casos de centésimas como se puede ver en las Figuras 7.40 (promedio de valores absolutos), 7.44 (valor cuadrático medio) ó 7.46 (factor de cresta)).

7.5.4. GRÁFICOS DE LAS SEVERIDADES CON RUIDO BAJO

En esta sección, la señal sintética tendrá un nivel de ruido bajo. Esto significa que se suma a la señal inicial una señal de ruido del 1% con respecto a la amplitud del armónico fundamental en amperios. De esta manera se consigue que el "césped" quede en torno a los -100dB. Escogemos este valor porque suele ser el nivel de ruido que se observa en la corriente de motores alimentados de red, como podemos apreciar en la Fig. 7.50.

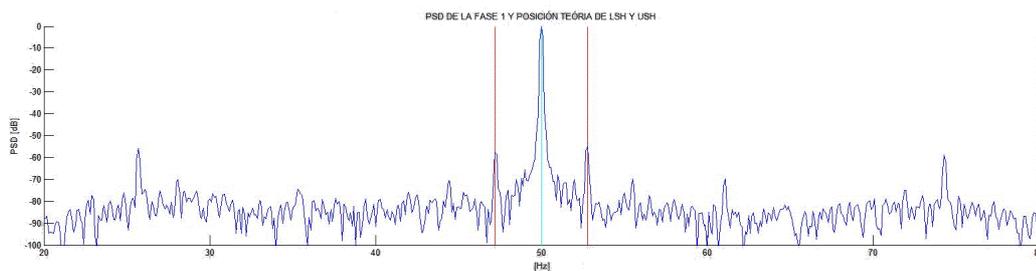


Figura 7.50: La posición de los armónicos de fallo, LSH y USH, está señalada con las líneas verticales rojas. Observar que el ruido de la señal se traduce en un "césped" alrededor de -90 dB .

Se muestran también algunas figuras como ejemplo del PSD de algunas señales sintéticas generadas con este intervalo de ruido:

- Motor Totalmente SANO con deslizamiento BAJO y ruido BAJO: Fig. 7.51.
- Motor Totalmente SANO con deslizamiento ALTO y ruido BAJO: Fig. 7.52.
- Motor con Fallo INCIPIENTE con deslizamiento BAJO y ruido BAJO: Fig. 7.53.
- Motor con Fallo INCIPIENTE con deslizamiento ALTO y ruido BAJO: Fig. 7.54.
- Motor con Fallo DESARROLLADO con deslizamiento BAJO y ruido BAJO: Fig. 7.55.
- Motor con Fallo DESARROLLADO con deslizamiento ALTO y ruido BAJO: Fig. 7.56.
- Motor con Fallo TOTAL con deslizamiento BAJO y ruido BAJO: Fig. 7.57.
- Motor con Fallo TOTAL con deslizamiento ALTO y ruido BAJO: Fig. 7.58.

Capítulo 7: Resultados de la aplicación del modelo sintético

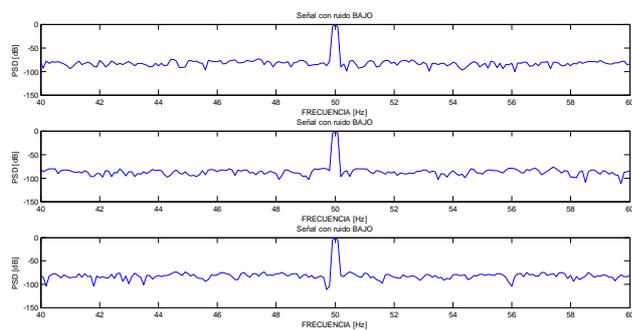


Figura 7.51: Representación del espectro de la señal de corriente para motor totalmente sano, deslizamiento bajo y nivel de ruido bajo.

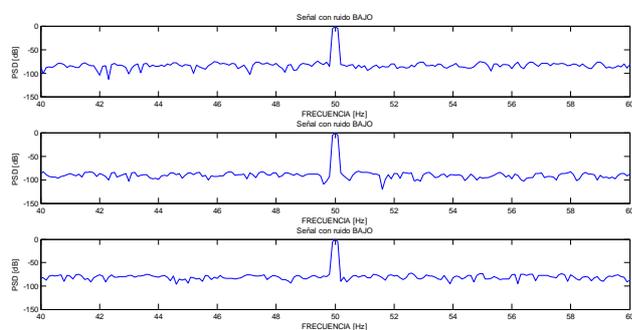


Figura 7.52: Representación del espectro de la señal de corriente para motor totalmente sano, deslizamiento alto y nivel de ruido bajo.

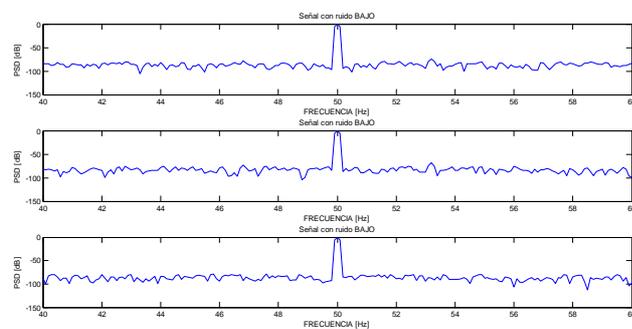


Figura 7.53: Representación del espectro de la señal de corriente para motor con fallo incipiente, deslizamiento bajo y nivel de ruido bajo.

Capítulo 7: Resultados de la aplicación del modelo sintético

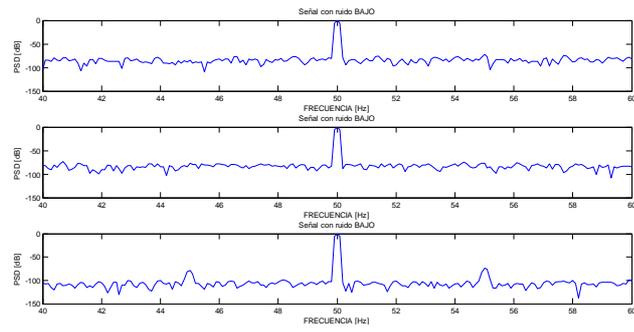


Figura 7.54: Representación del espectro de la señal de corriente para motor con fallo incipiente, deslizamiento alto y nivel de ruido bajo.

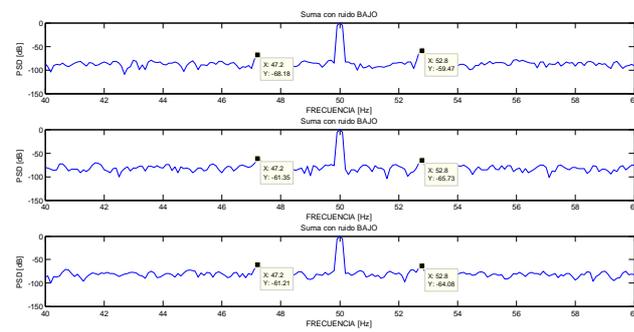


Figura 7.55: Representación del espectro de la señal de corriente para motor con fallo desarrollado, deslizamiento bajo y nivel de ruido bajo.

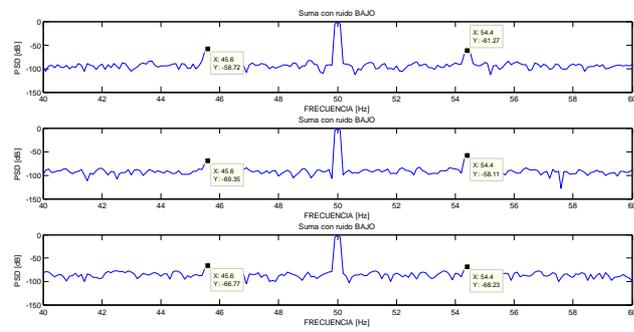


Figura 7.56: Representación del espectro de la señal de corriente para motor con fallo desarrollado, deslizamiento alto y nivel de ruido bajo.

Capítulo 7: Resultados de la aplicación del modelo sintético

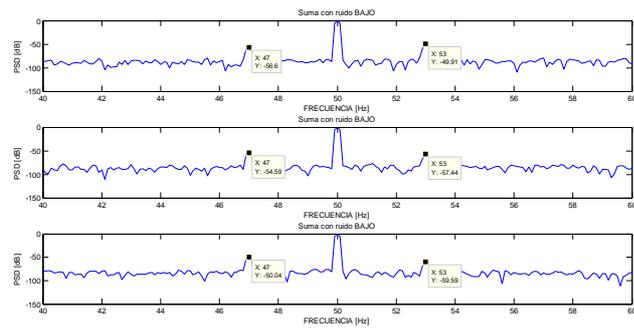


Figura 7.57: Representación del espectro de la señal de corriente para motor con fallo total, deslizamiento bajo y nivel de ruido bajo.

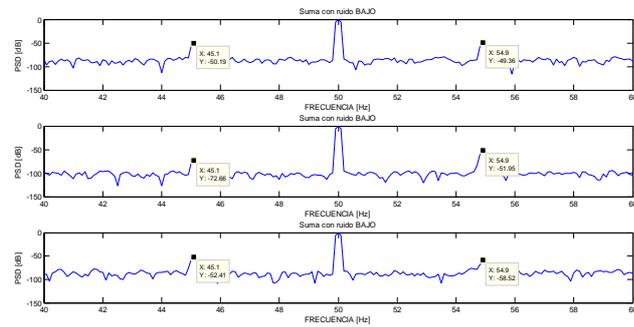


Figura 7.58: Representación del espectro de la señal de corriente para motor con fallo total, deslizamiento alto y nivel de ruido bajo.

7.5.5. GRÁFICOS DE LOS ESTADÍSTICOS CON RUIDO BAJO

En este punto tan sólo se mostrará una representación gráfica de los estadísticos de nuestro modelo sintético. Estos estadísticos se han calculado con las señales generadas con, un nivel de ruido bajo. En el punto siguiente se analizarán los resultados obtenidos.

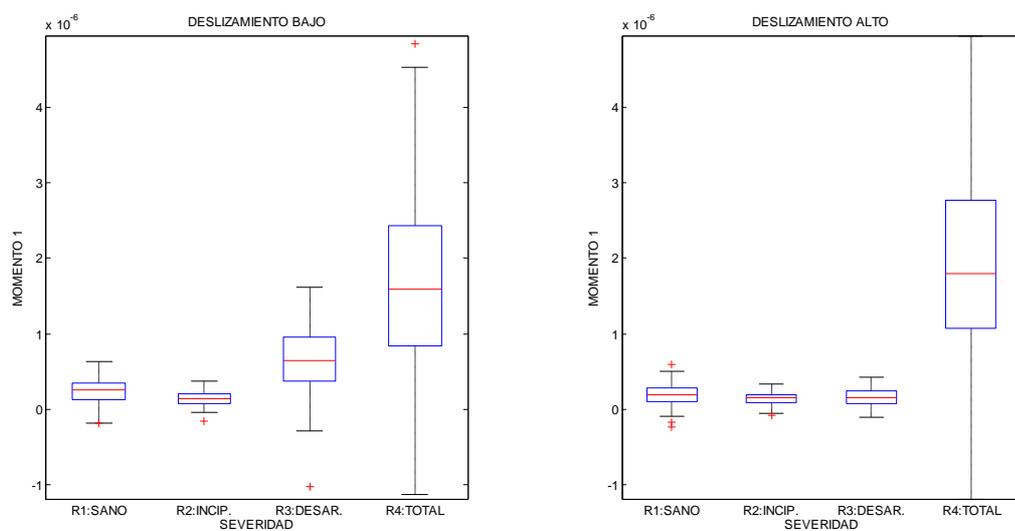


Figura 7.59: Representación Box-plot del estadístico Momento 1.

Capítulo 7: Resultados de la aplicación del modelo sintético

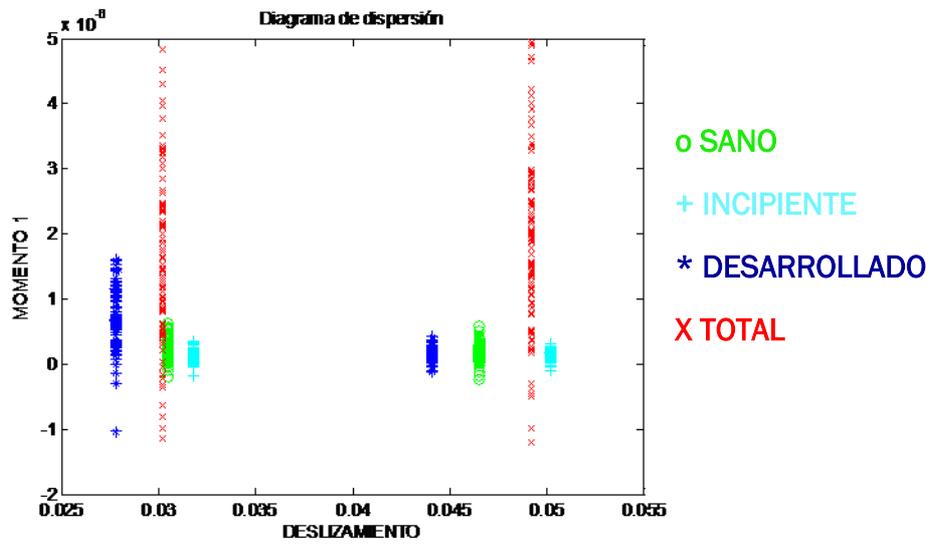


Figura 7.60: Representación diagrama de dispersión del estadístico Momento 1 .

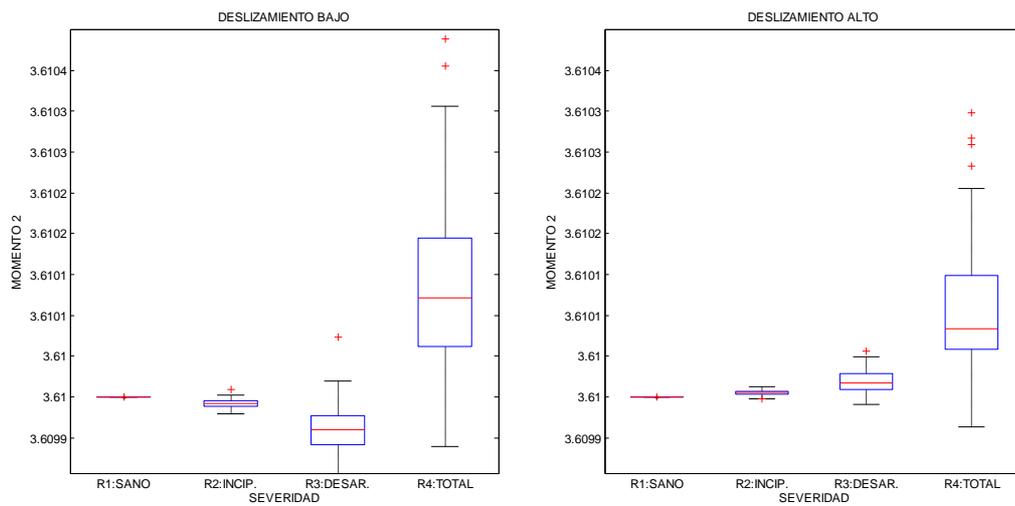


Figura 7.61: Representación Box-plot del estadístico Momento 2 .

Capítulo 7: Resultados de la aplicación del modelo sintético

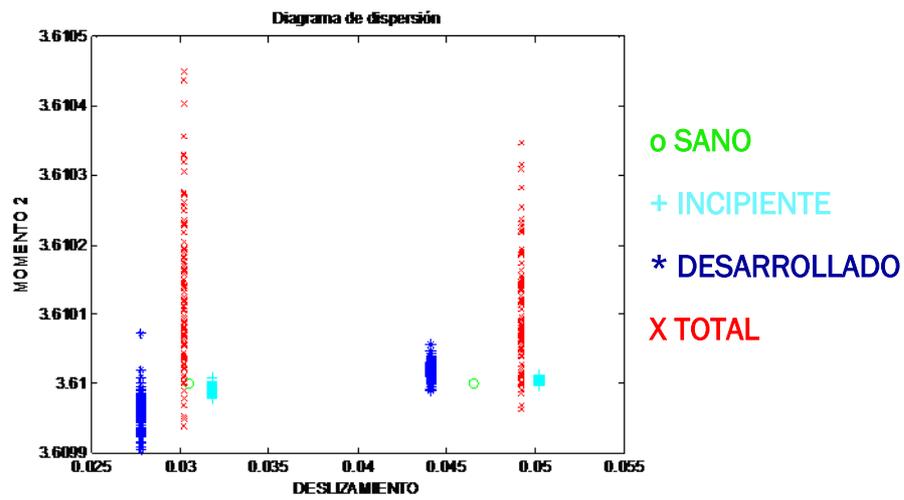


Figura 7.62: Representación diagrama de dispersión del estadístico Momento 2 .

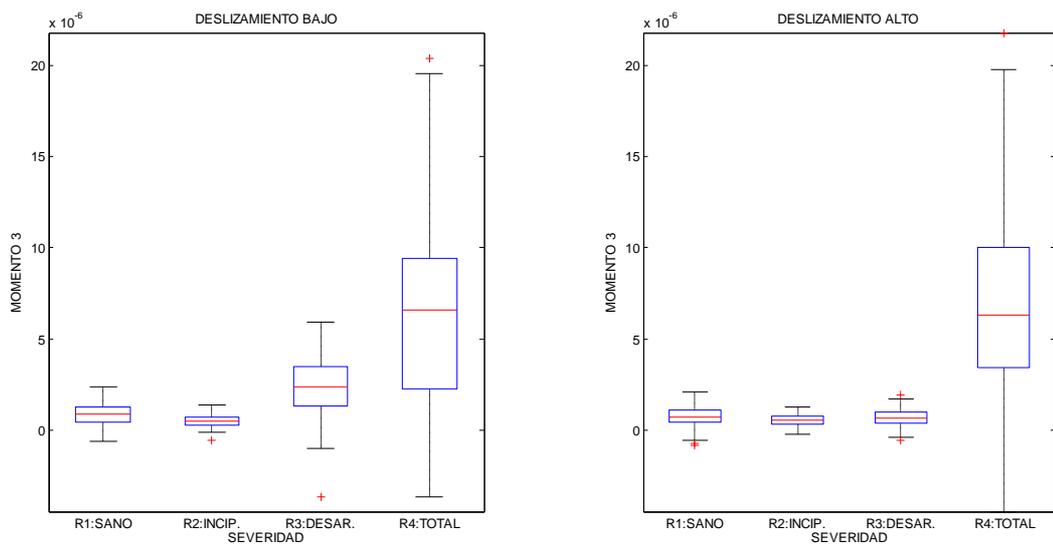


Figura 7.63: Representación Box-plot del estadístico Momento 3 .

Capítulo 7: Resultados de la aplicación del modelo sintético

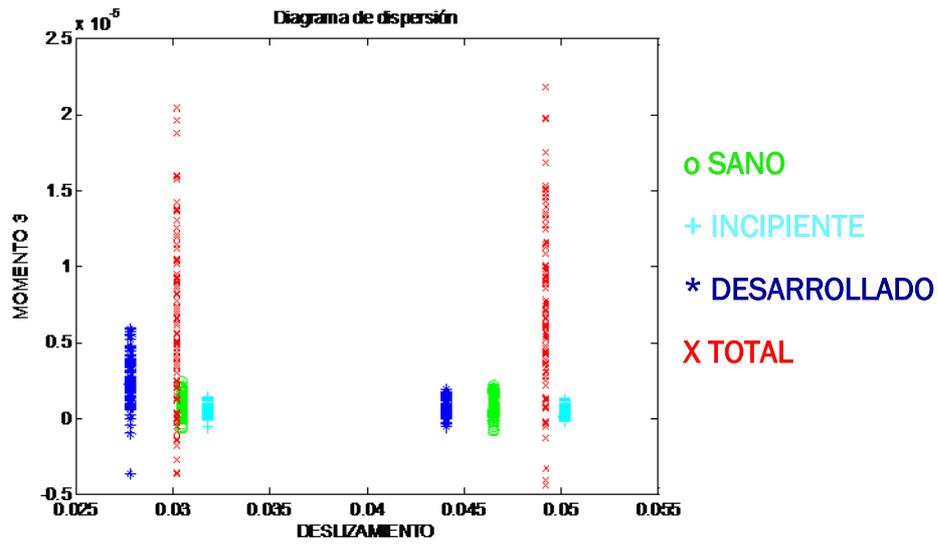


Figura 7.64: Representación diagrama de dispersión del estadístico Momento 3 .

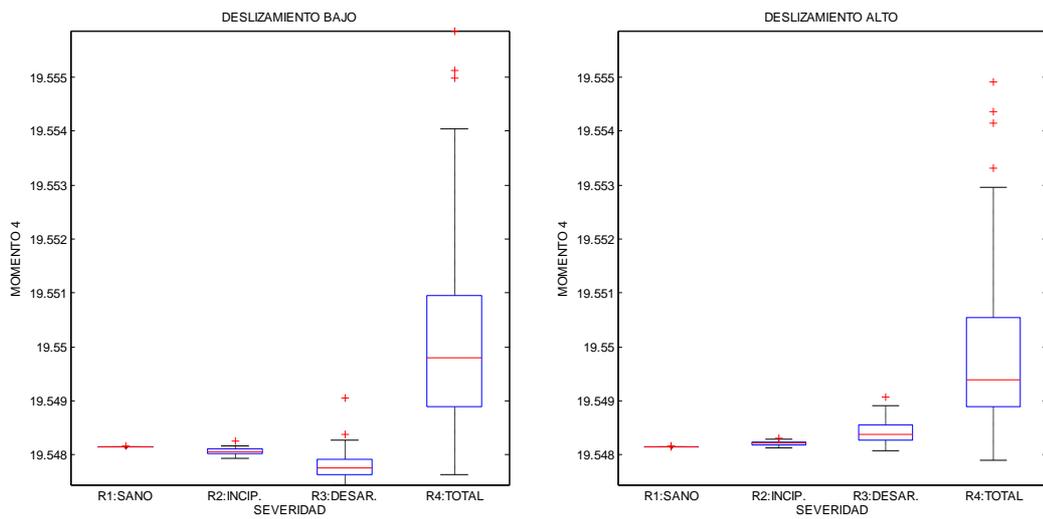


Figura 7.65: Representación Box-plot del estadístico Momento 4 .

Capítulo 7: Resultados de la aplicación del modelo sintético

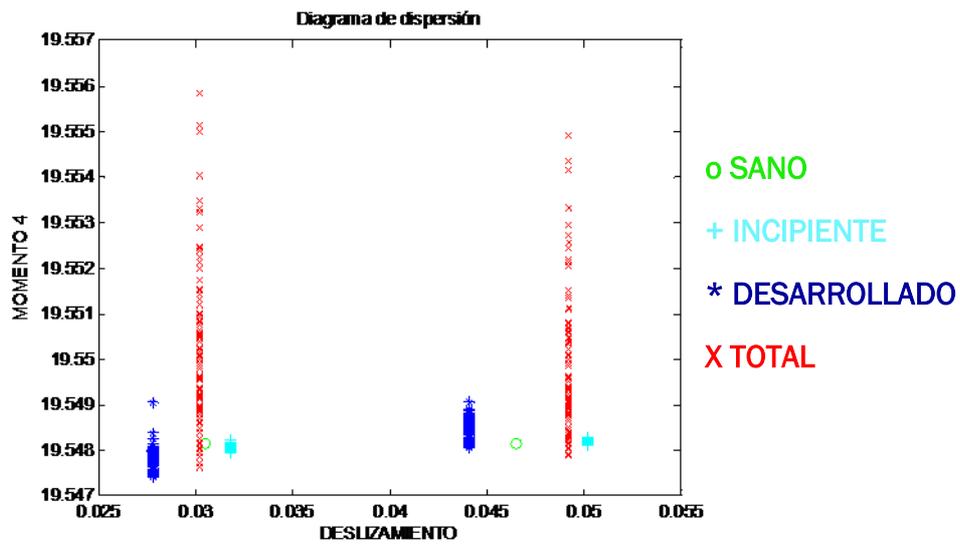


Figura 7.66: Representación Box-plot del estadístico Momento 4.

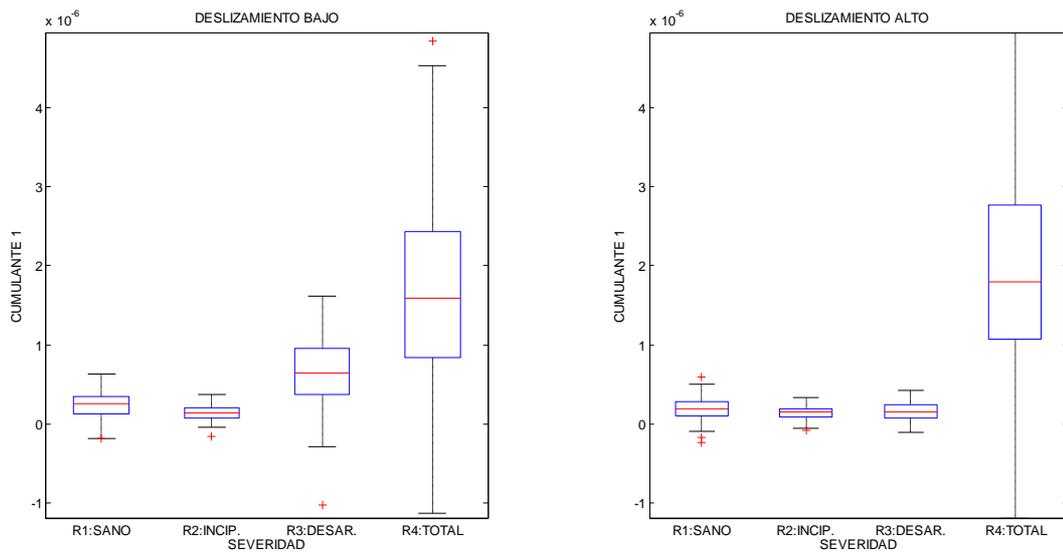


Figura 7.67: Representación Box-plot del estadístico Cumulante 1 .

Capítulo 7: Resultados de la aplicación del modelo sintético

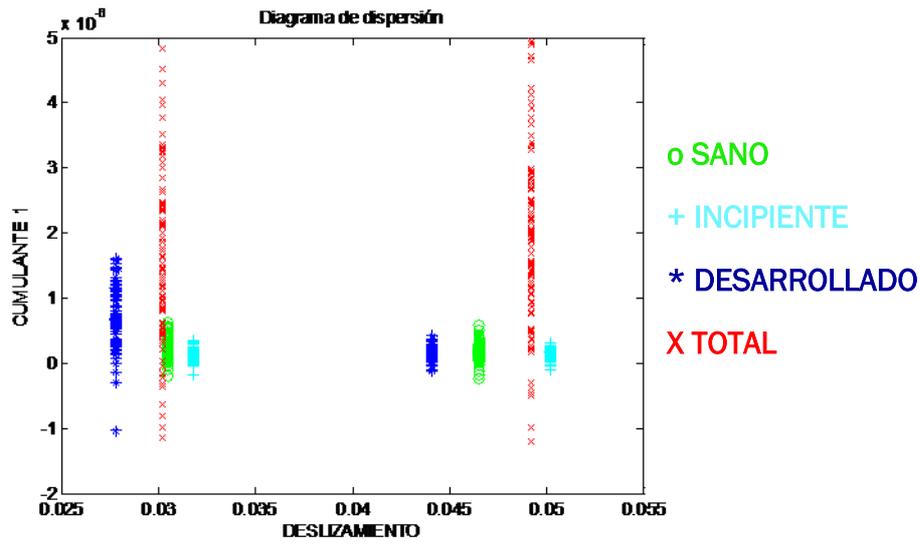


Figura 7.68: Representación diagrama de dispersión del estadístico Cumulante 1 .

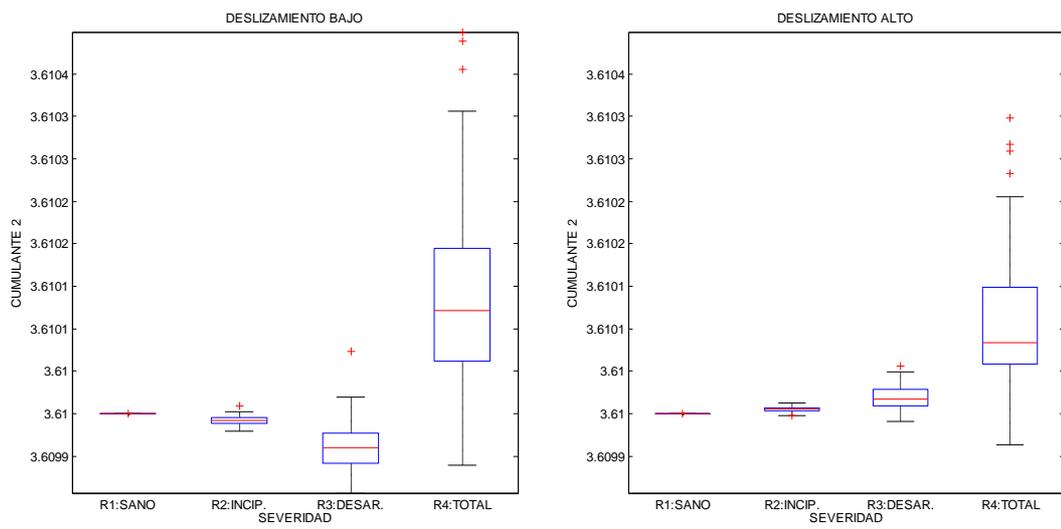


Figura 7.69: Representación Box-plot del estadístico Cumulante 2 .

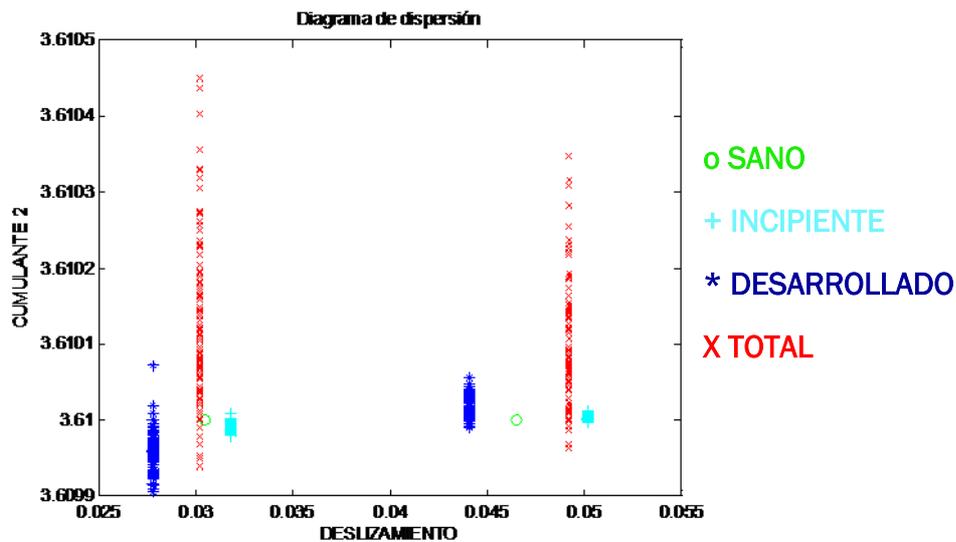


Figura 7.70: Representación diagrama de dispersión del estadístico Cumulante 2 .

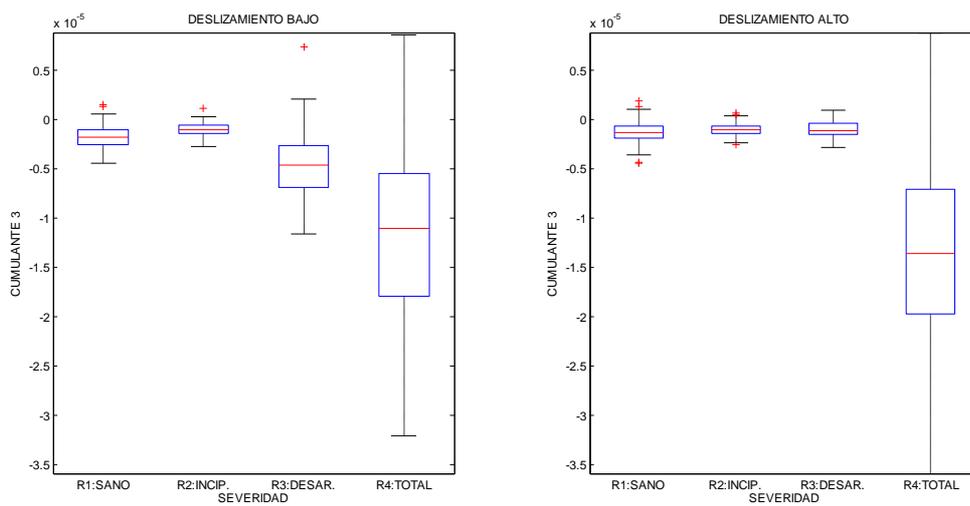


Figura 7.71: Representación Box-plot del estadístico Cumulante 3 .

Capítulo 7: Resultados de la aplicación del modelo sintético

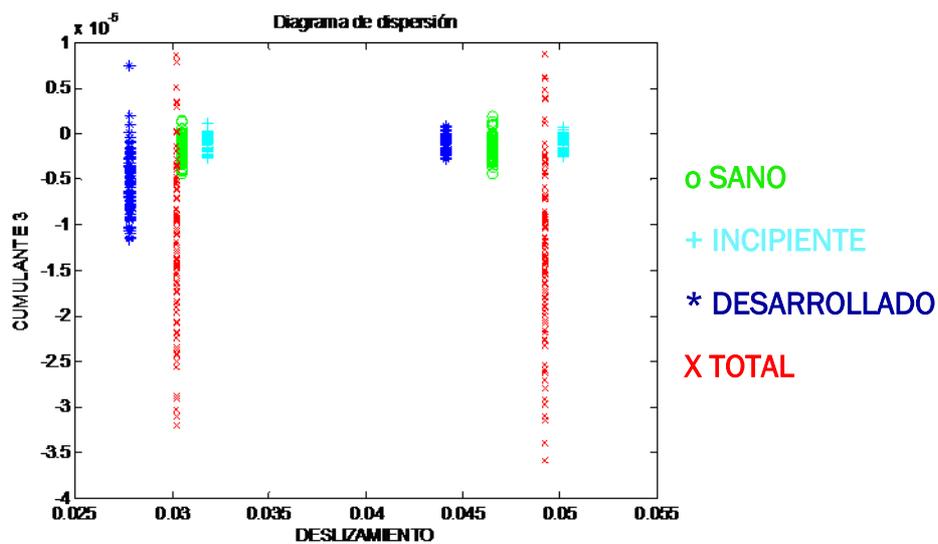


Figura 7.72: Representación diagrama de dispersión del estadístico Cumulante 3 .

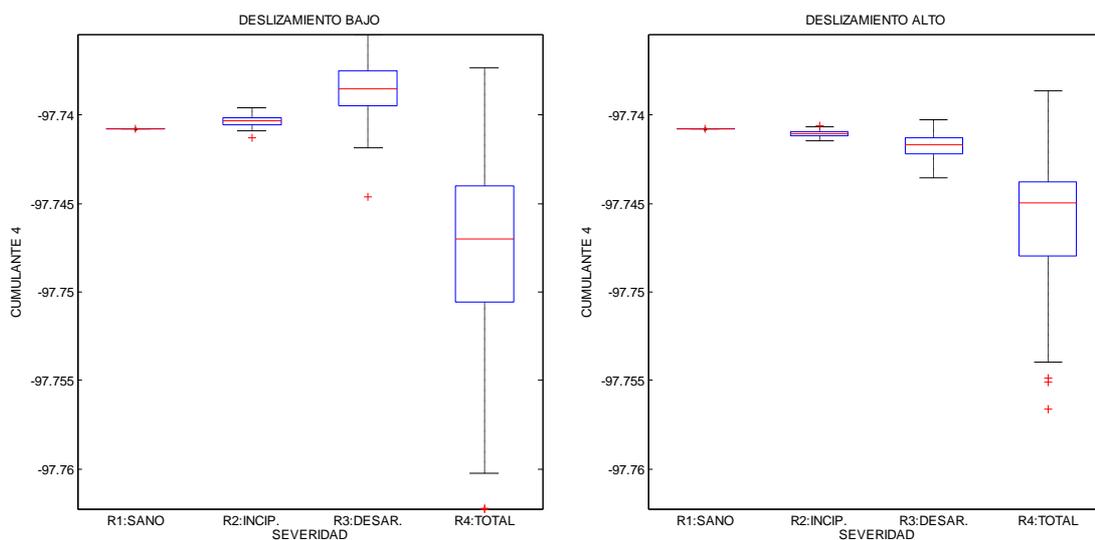


Figura 7.73: Representación Box-plot del estadístico Cumulante 4 .

Capítulo 7: Resultados de la aplicación del modelo sintético

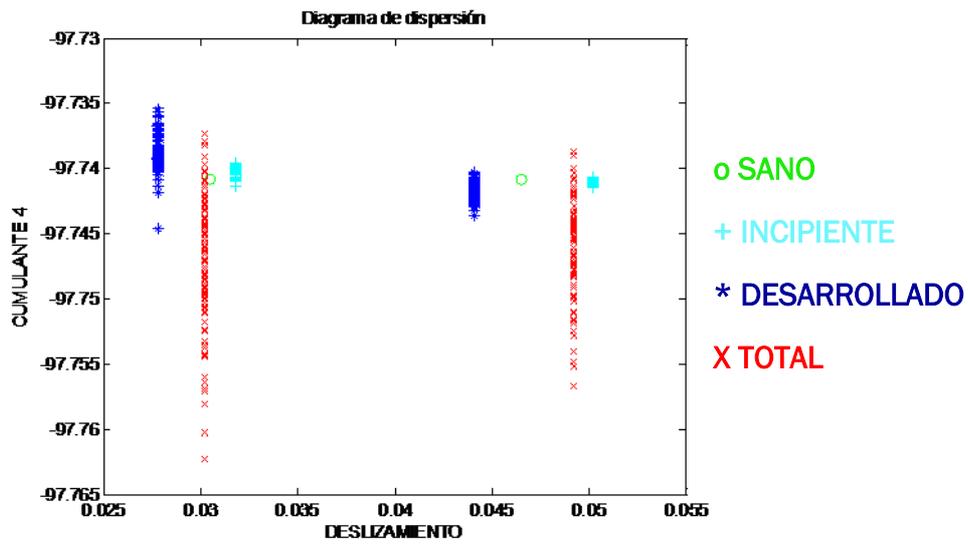


Figura 7.74: Representación diagrama de dispersión del estadístico Cumulante 4 .

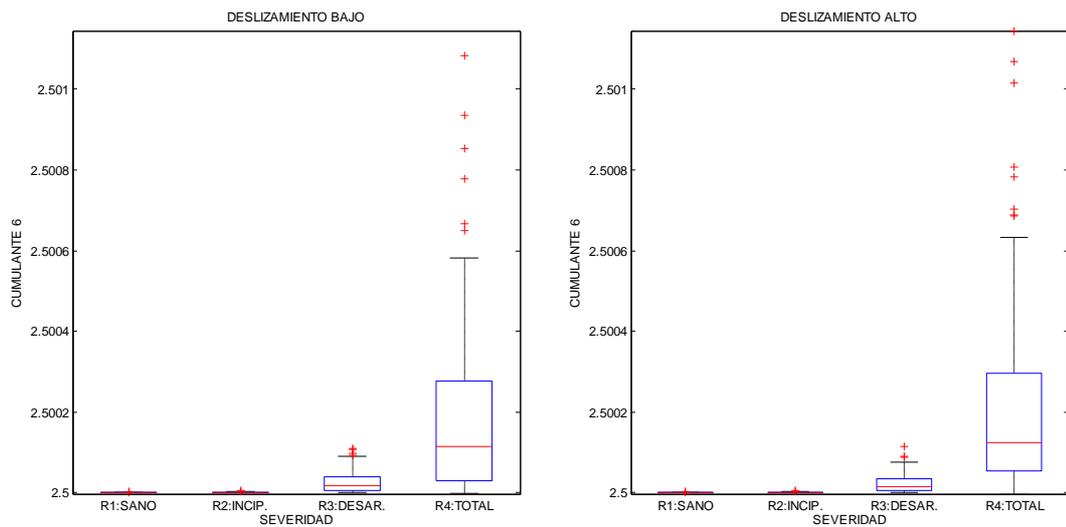


Figura 7.75: Representación Box-plot del estadístico Cumulante 6 .

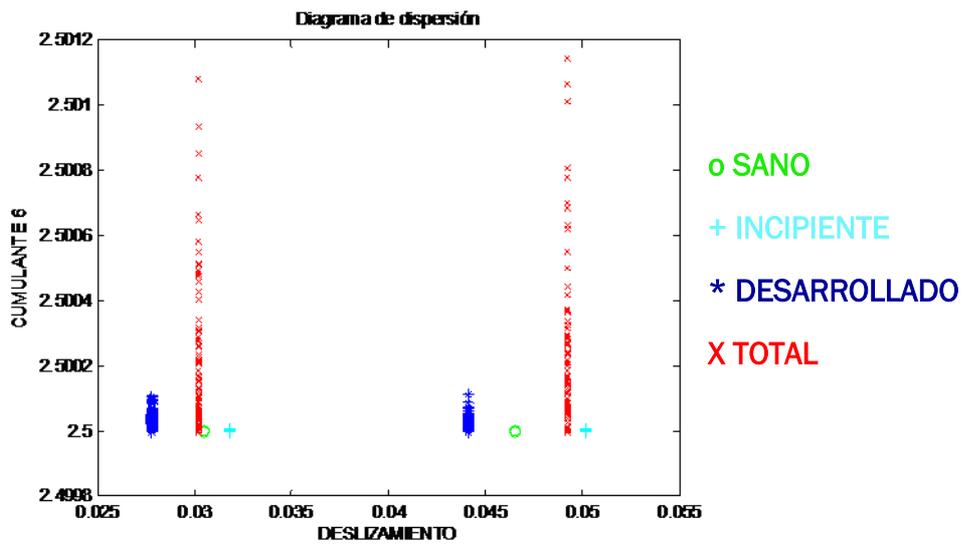


Figura 7.76: Representación diagrama de dispersión del estadístico Cumulante 6 .

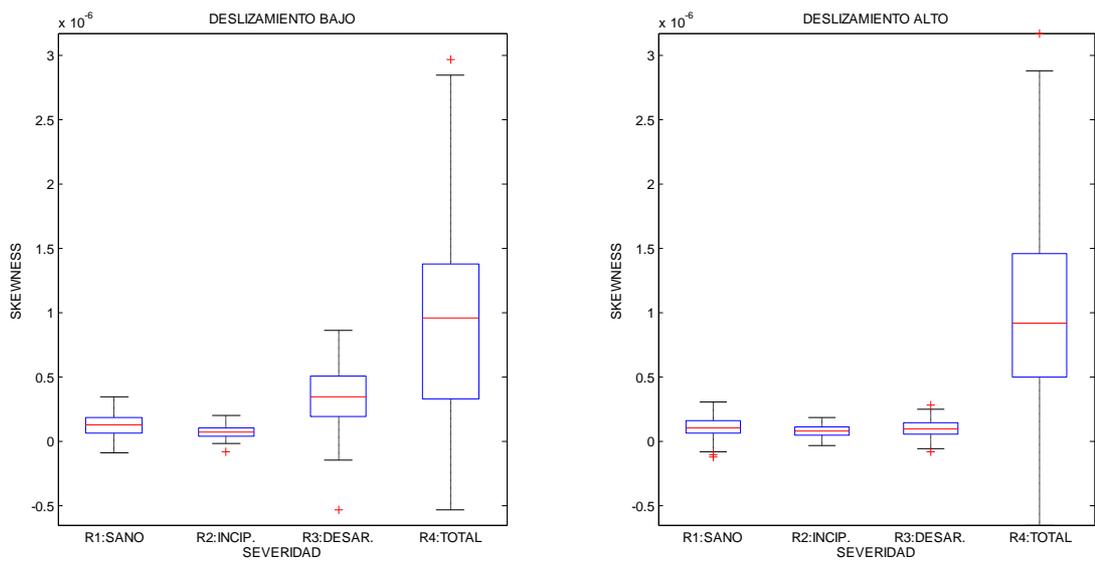


Figura 7.77: Representación Box-plot del estadístico Skewness .

Capítulo 7: Resultados de la aplicación del modelo sintético

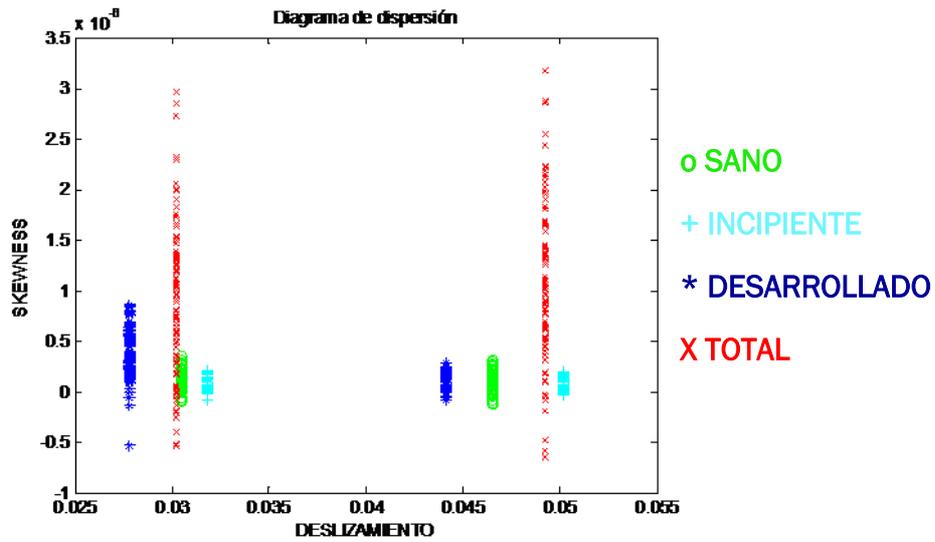


Figura 7.78: Representación diagrama de dispersión del estadístico Skewness .

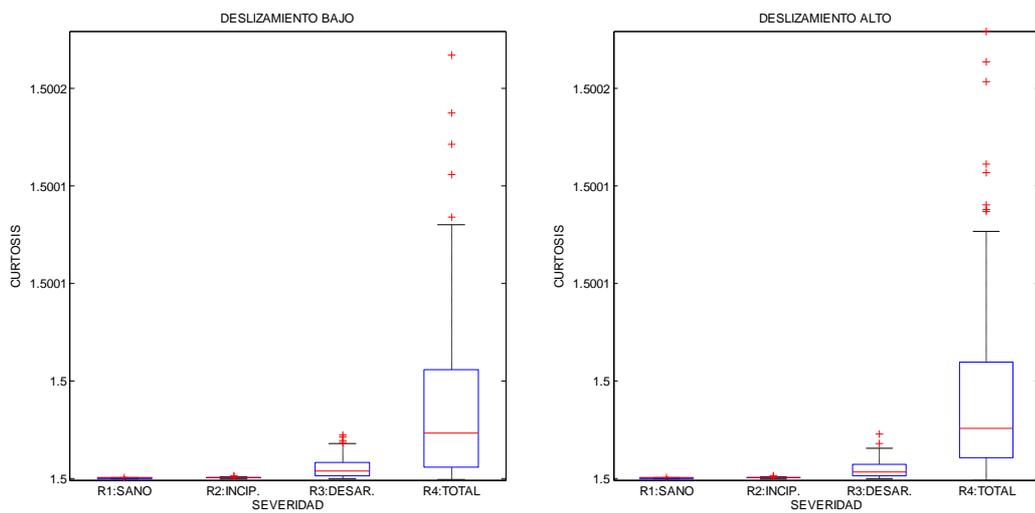


Figura 7.79: Representación Box-plot del estadístico Kurtosis .

Capítulo 7: Resultados de la aplicación del modelo sintético

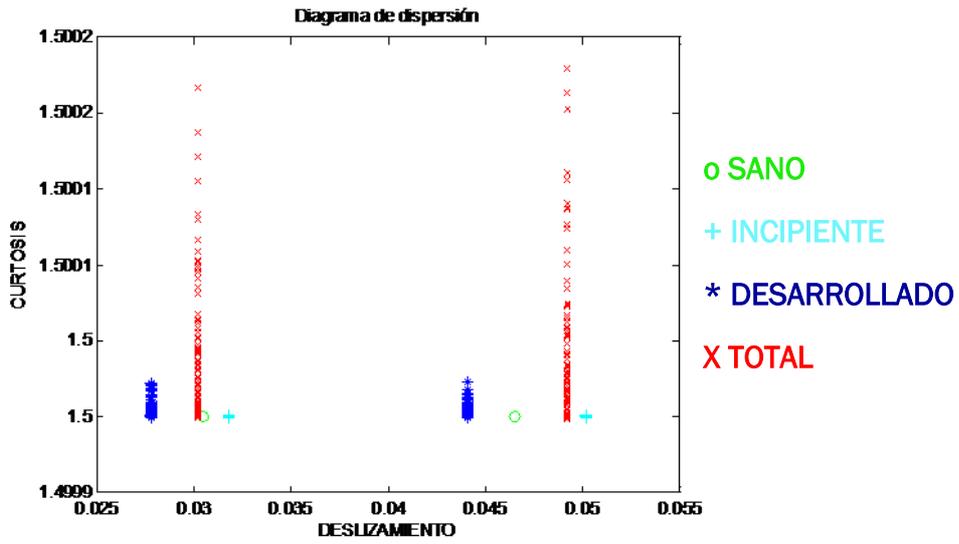


Figura 7.80: Representación diagrama de dispersión del estadístico Curtosis .

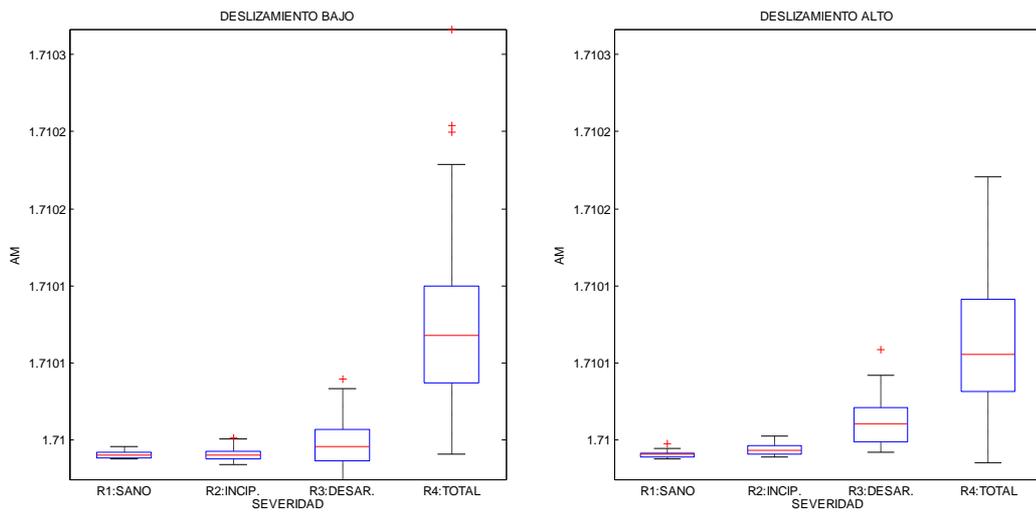


Figura 7.81: Representación Box-plot del estadístico promedio de valores absolutos .

Capítulo 7: Resultados de la aplicación del modelo sintético

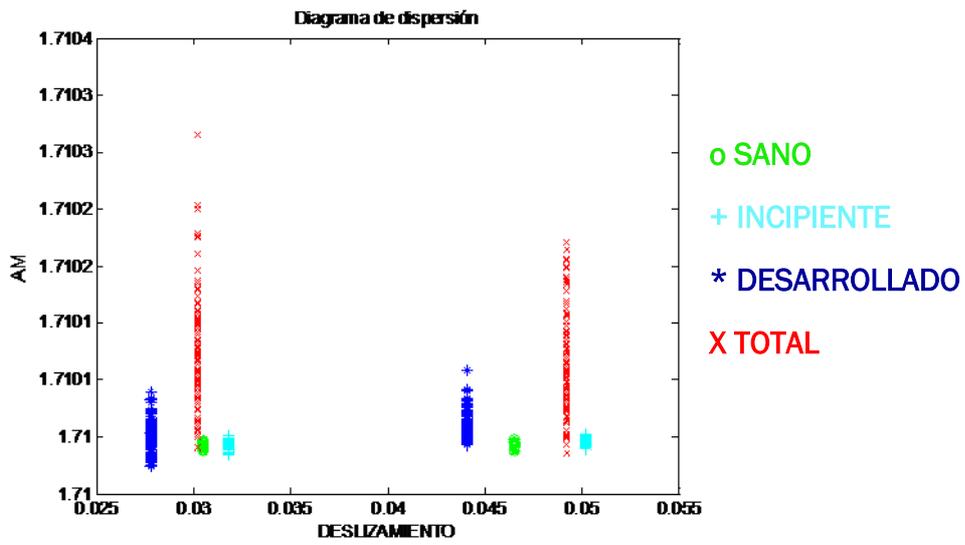


Figura 7.82: Representación diagrama de dispersión del estadístico promedio de valores absolutos .

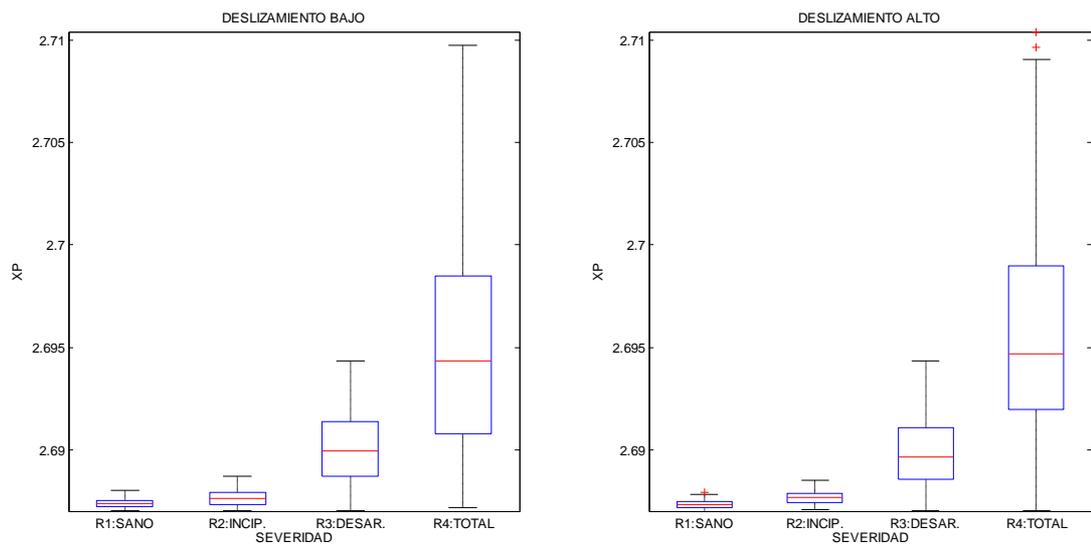


Figura 7.83: Representación Box-plot del estadístico máximo de valores absolutos .

Capítulo 7: Resultados de la aplicación del modelo sintético

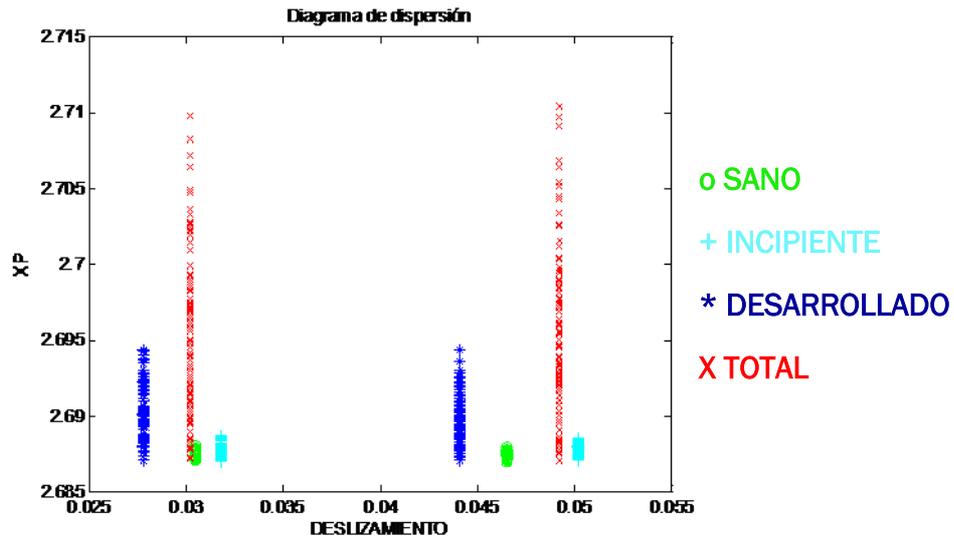


Figura 7.84: Representación diagrama de dispersión del estadístico máximo de valores absolutos .

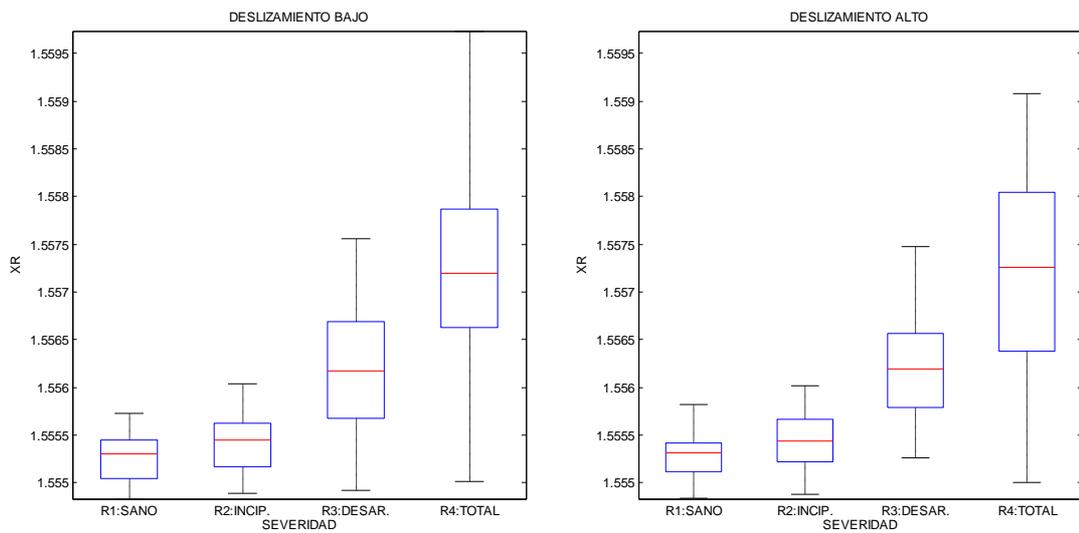


Figura 7.85: Representación Box-plot del estadístico valor cuadrático medio .

Capítulo 7: Resultados de la aplicación del modelo sintético

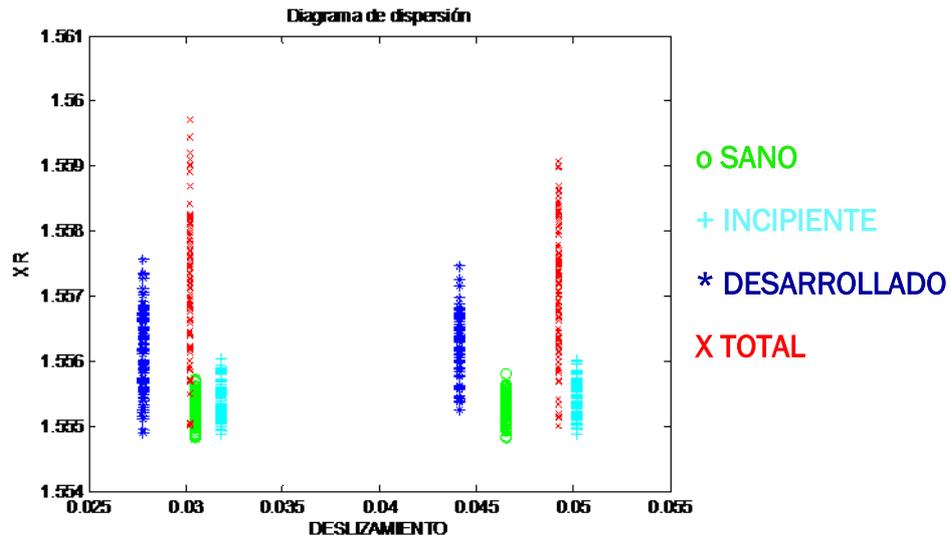


Figura 7.86: Representación diagrama de dispersión del estadístico valor cuadrático medio.

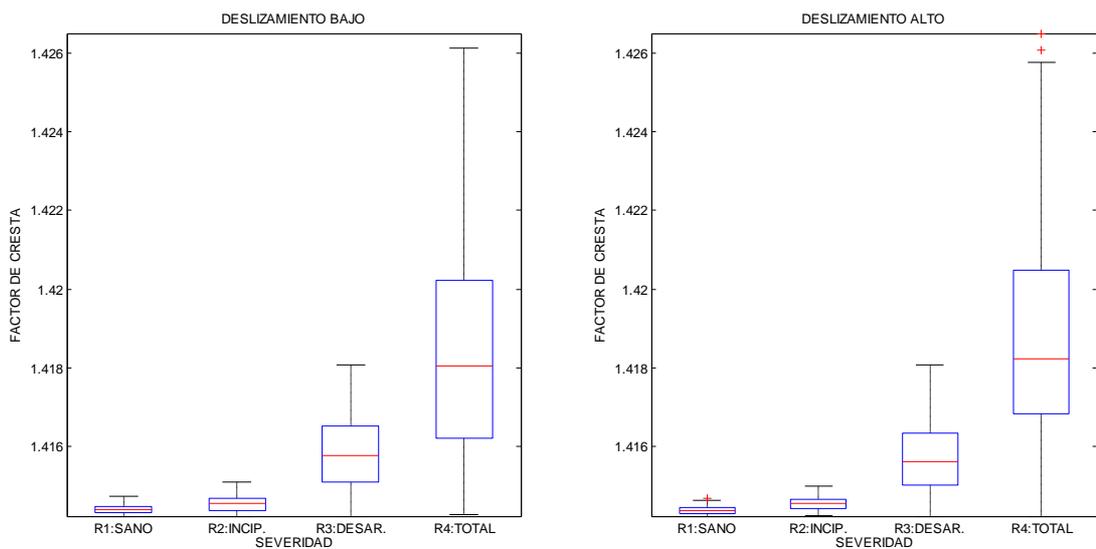


Figura 7.87: Representación Box-plot del estadístico factor de cresta .

Capítulo 7: Resultados de la aplicación del modelo sintético

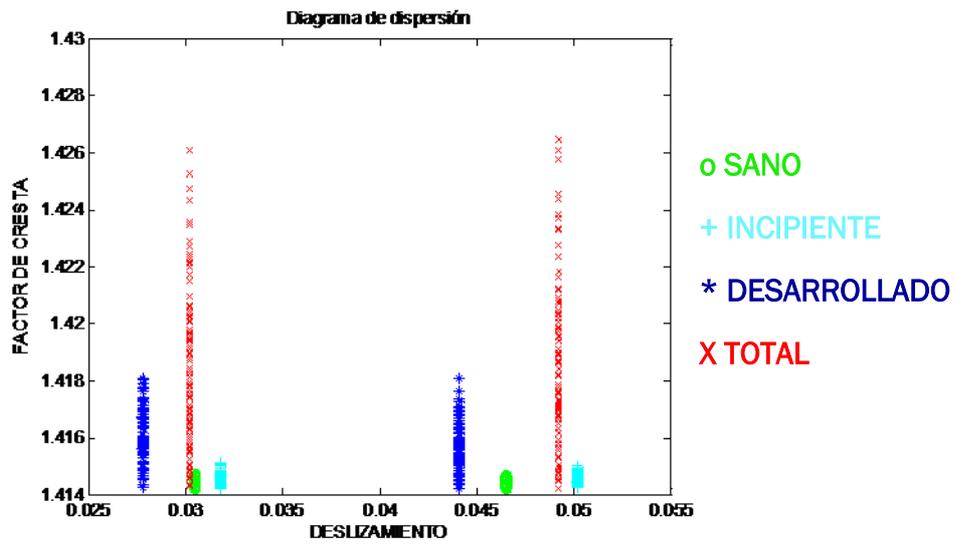


Figura 7.88: Representación diagrama de dispersión del estadístico factor de cresta.

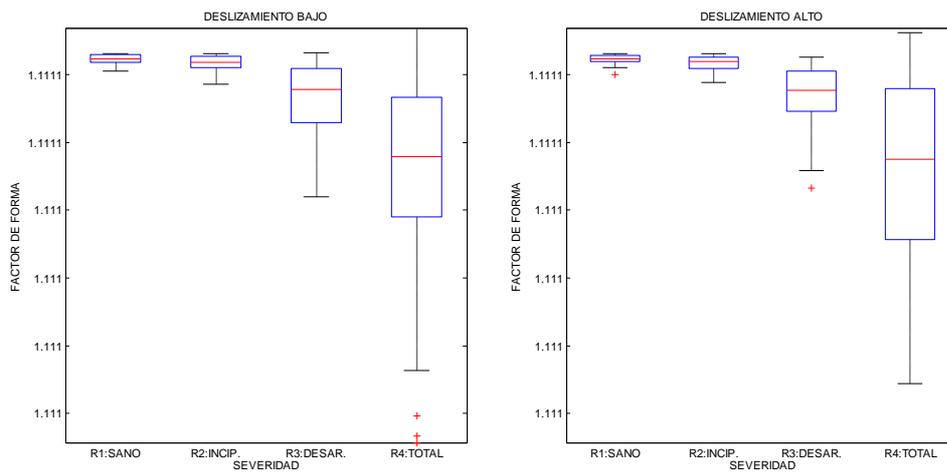


Figura 7.89: Representación Box-plot del estadístico factor de forma .

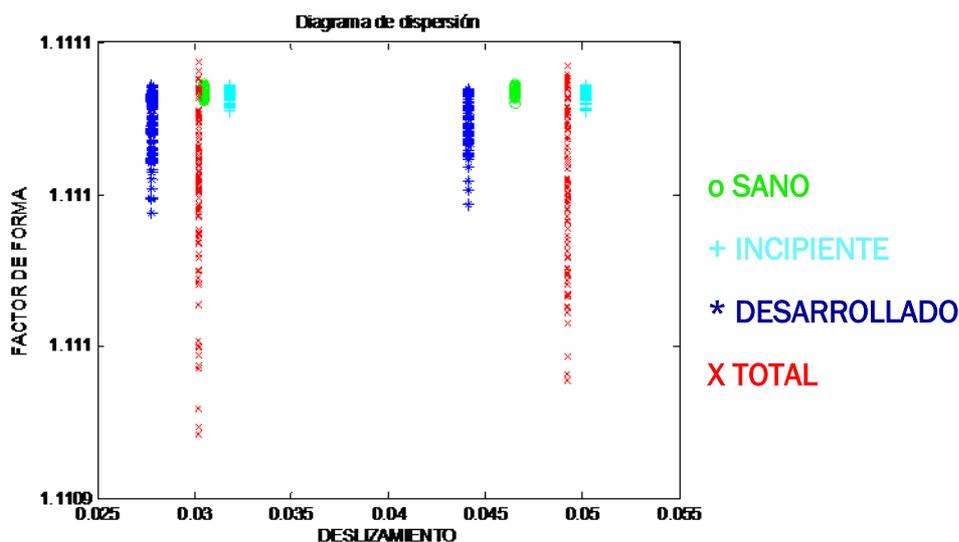


Figura 7.90: Representación diagrama de dispersión del estadístico factor de forma.

7.5.6. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Como se ha comentado con anterioridad, en este caso las señales sintéticas generadas tienen un nivel de ruido que consideramos bajo. El nivel introducido en la señal es del 1% con respecto a la amplitud del armónico fundamental, expresado en amperios.

Como se observa en las gráficas del espectro de la frecuencia, al añadir un ruido bajo se genera un "césped" o nivel de ruido en torno a los -100dB que complica la identificación de los picos de los armónicos de un fallo incipiente puesto que se confunden con los picos de ruido independientemente del nivel de deslizamiento, como se observa en las Fig. 7.53 (motor con fallo incipiente y deslizamiento bajo) y 7.54 (motor con fallo incipiente y deslizamiento alto). Sin embargo, el nivel de ruido no influye para la detección de fallos desarrollados o totales, puesto que podemos distinguir perfectamente los picos de los armónicos como se observa en las Fig. 7.55 (motor con fallo desarrollado y deslizamiento bajo), 7.56 (motor con fallo desarrollado y deslizamiento alto), 7.57 (motor con fallo total y deslizamiento bajo) y 7.58 (motor con fallo total y deslizamiento alto).

El análisis de los estadísticos, es semejante al realizado en el estudio anterior de una señal sin ruido.

Tenemos un solapamiento entre los estados sano e incipiente. En la mayoría de los casos, como antes, se suele ver bien el fallo total y ahora en algunos casos se ve el fallo desarrollado. Sin embargo, cuando tenemos un nivel de deslizamiento alto se produce un solapamiento de las cajas en los estados totalmente sano, fallo incipiente y fallo desarrollado, pudiendo discriminar a

partir del fallo total del motor. Este caso estaría más bien enfocado hacia un mantenimiento correctivo. Las figuras donde se puede ver esta comparativa son: Fig. 7.61 (momento 2), 7.65 (momento 4) ó 7.77 (skewness).

Además se observa en los diagramas de dispersión de las Figuras 7.66, 7.76, 7.80 y 7.82, una mínima variación en la dispersión entre las clases sano, incipiente y desarrollado, que dificultaría la identificación de un fallo prematuro en el motor, pudiendo observar la variación en el estadístico tan sólo cuando se produce el fallo total del motor.

También, aunque tengamos un alto nivel discriminatorio de manera visual en algunos estadísticos como se menciona en el párrafo anterior, hay estadísticos que presentan una difícil clasificación de forma numérica. Esto se debe al incremento tan pequeño que se produce (en algunos casos de diez milésimas Figuras 7.79 (curtosis), 7.81 (promedio de valores absolutos) ó 7.89 (factor de forma) y en otros casos de centésimas como en las Figuras 7.73 (cumulante 4), 7.85 (valor cuadrático medio) ó 7.87(factor de cresta)).

Por último, podremos utilizar los estadísticos de las Fig. 7.69 (cumulante 2), 7.73 (cumulante 4), 7.83 (máximo de valores absolutos), 7.85 (valor cuadrático medio), 7.87 (factor de cresta) ó 7.89 (factor de forma), para la monitorización de la evolución del fallo por su buen poder discriminatorio. Además se observa que las Fig. 7.70 (cumulante 2), 7.74 (cumulante 4), 7.84 (máximo de valores absolutos), 7.86 (valor cuadrático medio), 7.88 (factor de cresta) ó 7.90 (factor de forma), correspondiente a los diagramas de dispersión de los estadísticos, una evolución progresiva del fallo a partir de un fallo incipiente en el motor. Estos estadísticos podrían ser utilizados en un mantenimiento predictivo, como identificadores del momento óptimo en el que realizar las operaciones de mantenimiento que requiera el motor o la sustitución del mismo.

7.5.7. GRÁFICOS DE LAS SEVERIDADES CON RUIDO ALTO

Este tercer caso de estudio trata de simular lo que ocurre en la corriente de motores alimentados con inversor, donde el nivel de ruido puede llegar a ser realmente alto. En los ensayos realizados en el laboratorio se ha observado niveles de ruido desde -80 dB hasta -50 dB, como podemos observar en las Figura 7.91:

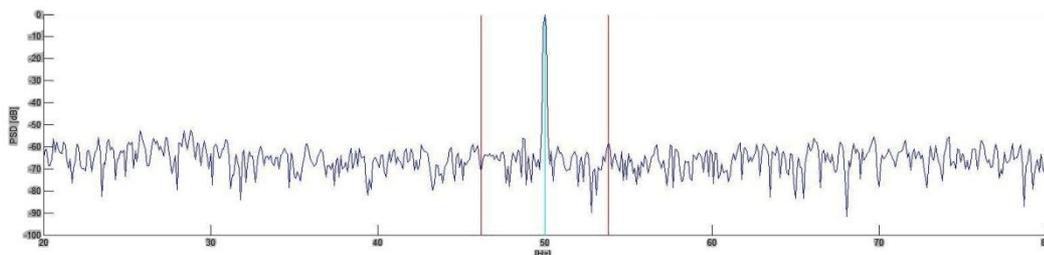


Figura 7.91: Espectro de frecuencia de un motor de inducción alimentado por variador, resaltando los armónicos superior e inferior.

Para el modelo sintético nivel de ruido ALTO, significa sumar a la señal inicial una señal de ruido del 10% con respecto a la amplitud del armónico fundamental en amperios. De forma que el "césped" quede en torno a los -60dB. A continuación, se muestran ejemplos de varias señales sintéticas generadas con este nivel de ruido:

- Motor Totalmente SANO con deslizamiento BAJO y ruido ALTO: Fig. 7.92.
- Motor Totalmente SANO con deslizamiento ALTO y ruido ALTO: Fig. 7.93.
- Motor con Fallo INCIPIENTE con deslizamiento BAJO y ruido ALTO: Fig. 7.94.
- Motor con Fallo INCIPIENTE con deslizamiento ALTO y ruido ALTO: Fig. 7.95.
- Motor con Fallo DESARROLLADO con deslizamiento BAJO y ruido ALTO: Fig. 7.96.
- Motor con Fallo DESARROLLADO con deslizamiento ALTO y ruido ALTO: Fig. 7.97.
- Motor con Fallo TOTAL con deslizamiento BAJO y ruido ALTO: Fig. 7.98.
- Motor con Fallo TOTAL con deslizamiento ALTO y ruido ALTO: Fig. 7.99.

Capítulo 7: Resultados de la aplicación del modelo sintético

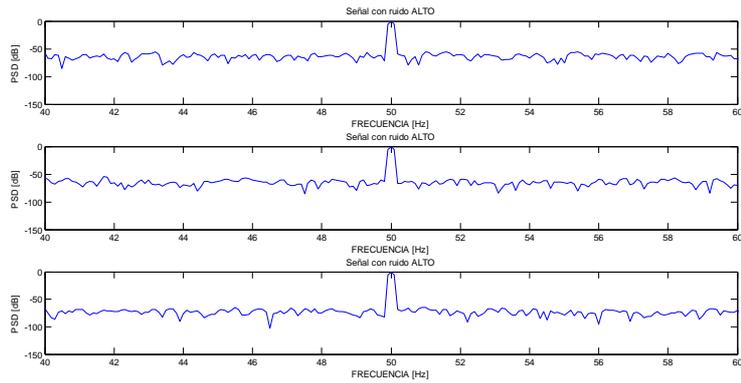


Figura 7.92: Representación del espectro de la señal de corriente para motor totalmente sano, deslizamiento bajo y nivel de ruido alto.

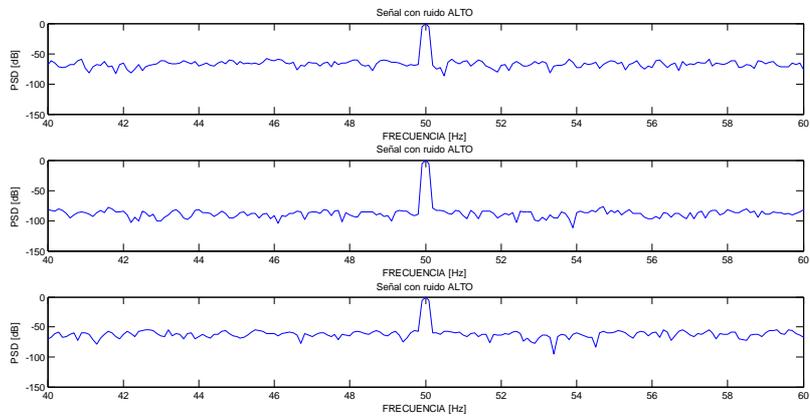


Figura 7.93: Representación del espectro de la señal de corriente para motor totalmente sano, deslizamiento alto y nivel de ruido alto.

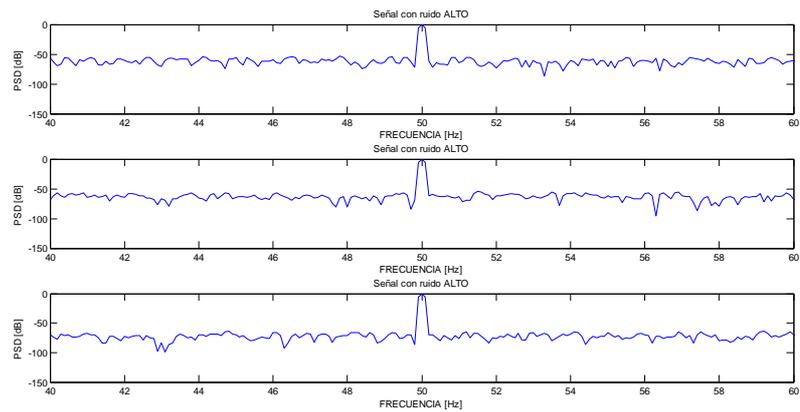


Figura 7.94: Representación del espectro de la señal de corriente para motor con fallo incipiente, deslizamiento bajo y nivel de ruido alto.

Capítulo 7: Resultados de la aplicación del modelo sintético

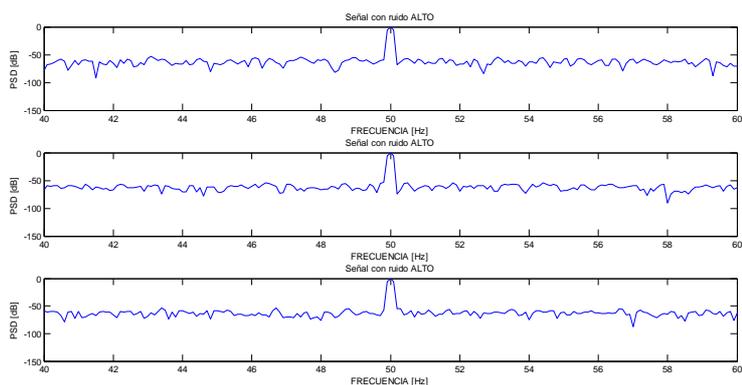


Figura 7.95: Representación del espectro de la señal de corriente para motor con fallo incipiente, deslizamiento alto y nivel de ruido alto.

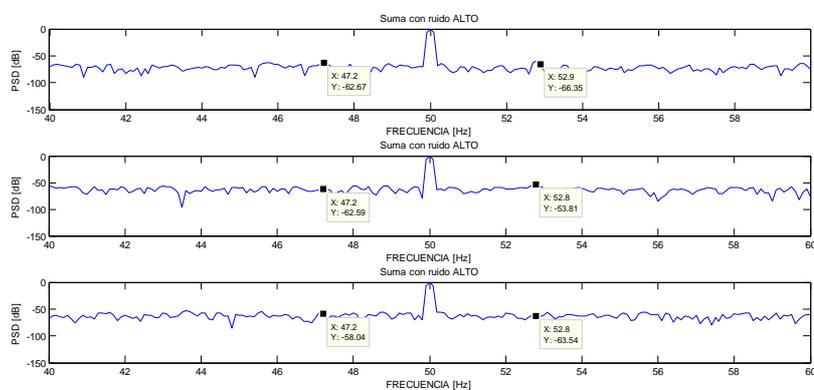


Figura 7.96: Representación del espectro de la señal de corriente para motor con fallo desarrollado, deslizamiento bajo y nivel de ruido alto.

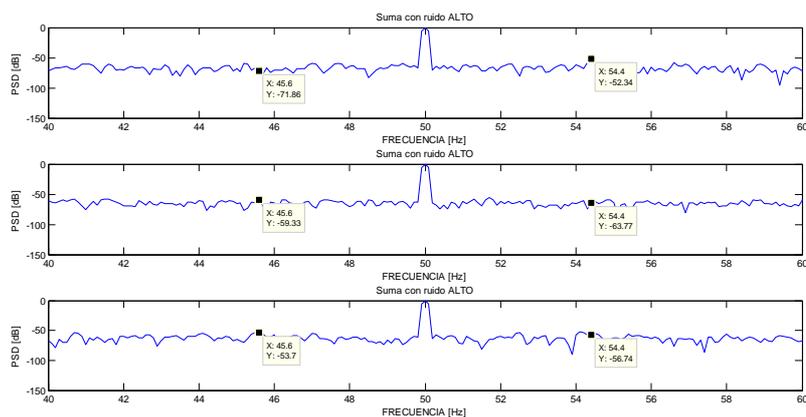


Figura 7.97: Representación del espectro de la señal de corriente para motor con fallo desarrollado, deslizamiento alto y nivel de ruido alto.

Capítulo 7: Resultados de la aplicación del modelo sintético

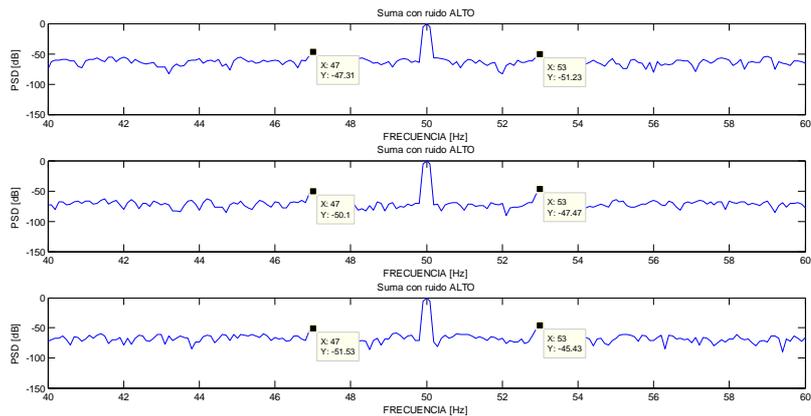


Figura 7.98: Representación del espectro de la señal de corriente para motor con fallo total, deslizamiento bajo y nivel de ruido alto.

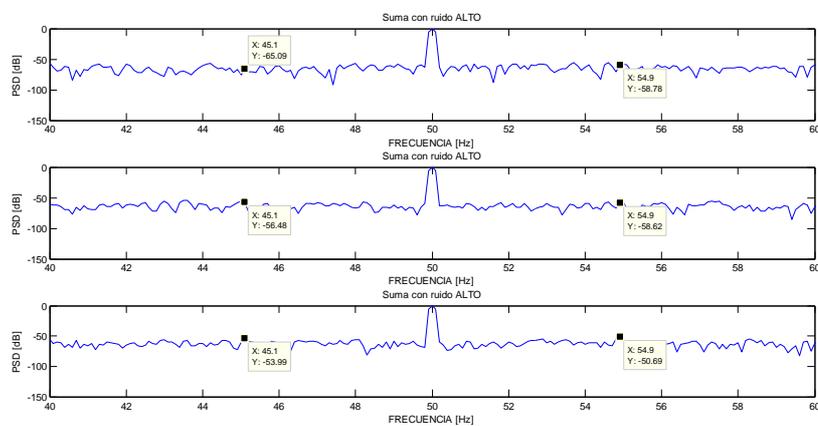


Figura 7.99: Representación del espectro de la señal de corriente para motor con fallo total, deslizamiento alto y nivel de ruido alto.

7.5.8. GRÁFICOS DE LOS ESTADÍSTICOS CON RUIDO ALTO

En este apartado, se añaden los gráficos de los estadísticos del modelo sintético, para una amplitud de ruido del 10%. Los resultados de estos estadísticos serán analizados en el punto siguiente.

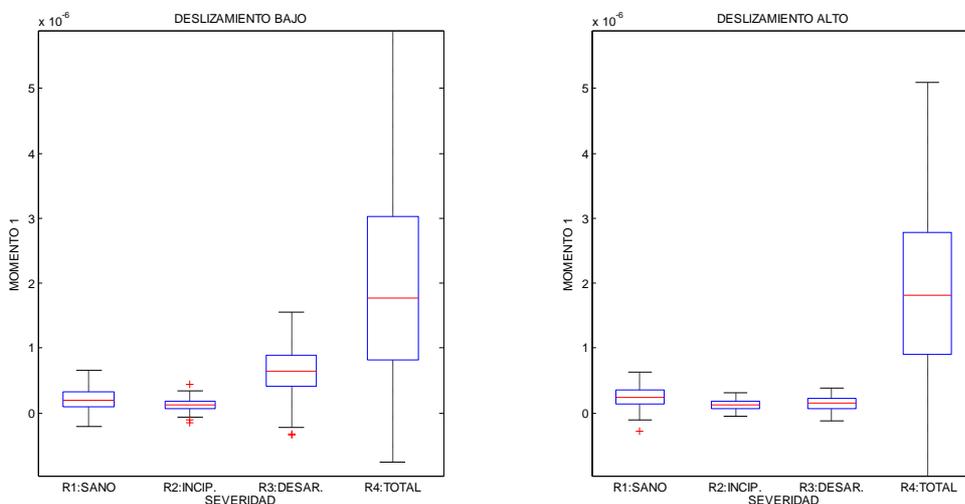


Figura 7.100: Representación Box-plot del estadístico Momento 1 .

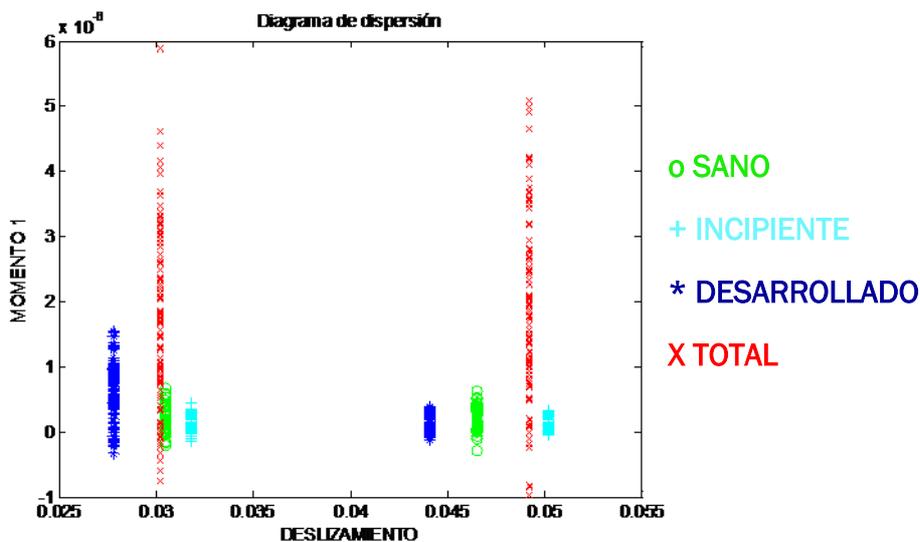


Figura 7.101: Representación diagrama de dispersión del estadístico Momento 1 .

Capítulo 7: Resultados de la aplicación del modelo sintético

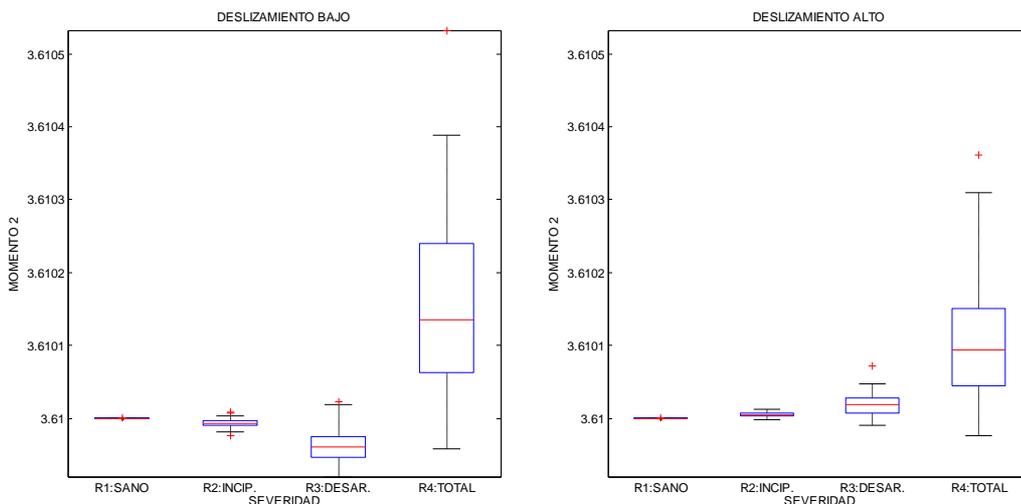


Figura 7.102: Representación Box-plot del estadístico Momento 2 .

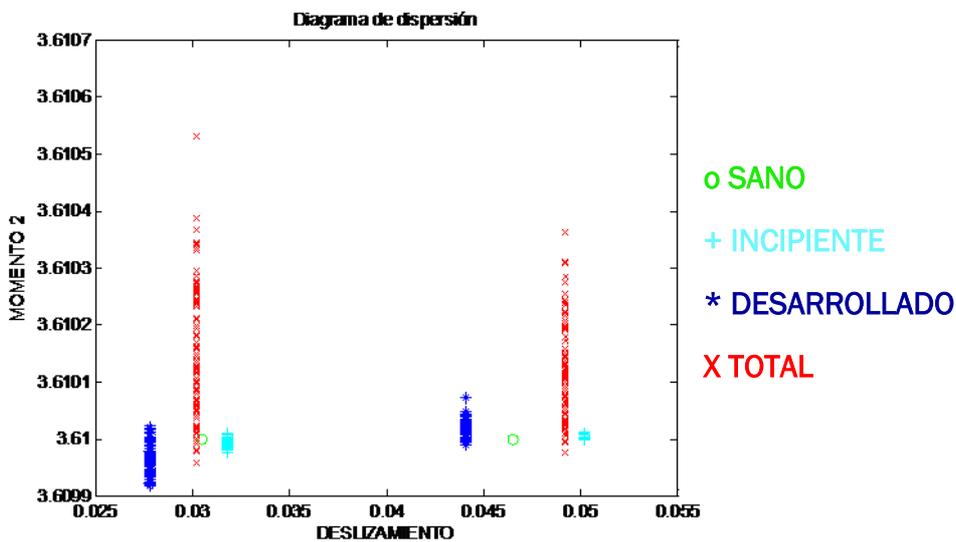


Figura 7.103: Representación diagrama de dispersión del estadístico Momento 2 .

Capítulo 7: Resultados de la aplicación del modelo sintético

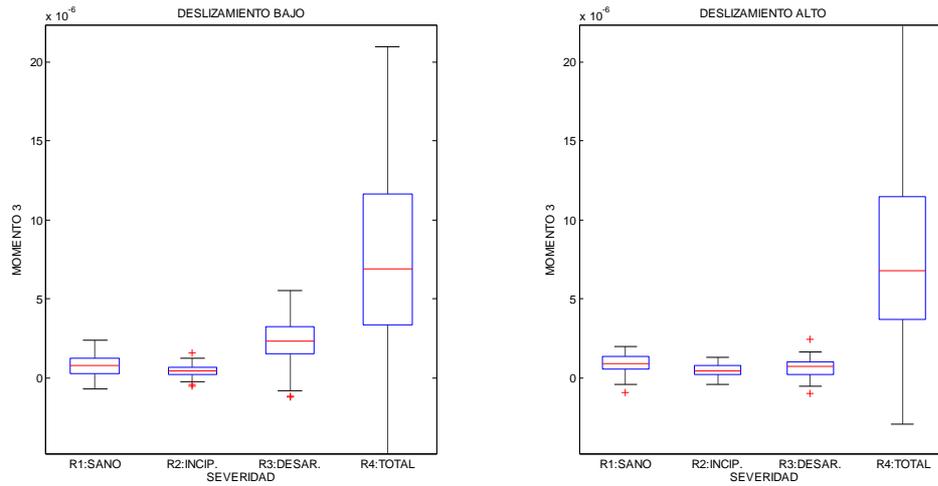


Figura 7.104: Representación Box-plot del estadístico Momento 3 .

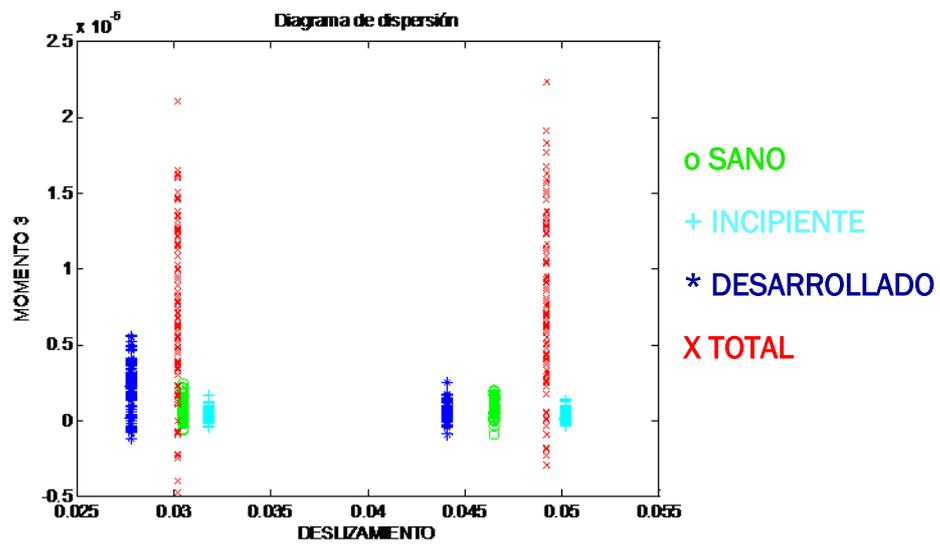


Figura 7.105: Representación diagrama de dispersión del estadístico Momento 3.

Capítulo 7: Resultados de la aplicación del modelo sintético

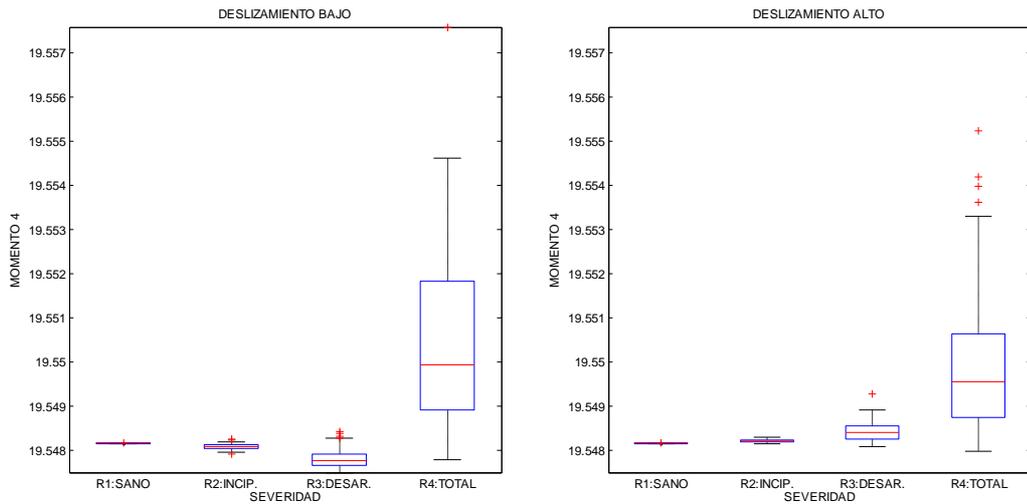


Figura 7.106: Representación Box-plot del estadístico Momento 4 .

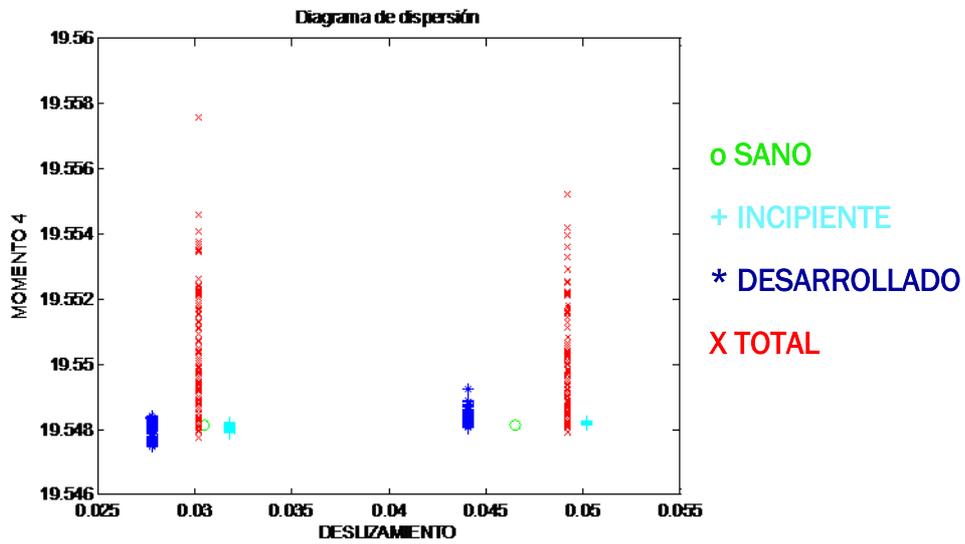


Figura 7.107: Representación diagrama de dispersión del estadístico Momento 4.

Capítulo 7: Resultados de la aplicación del modelo sintético

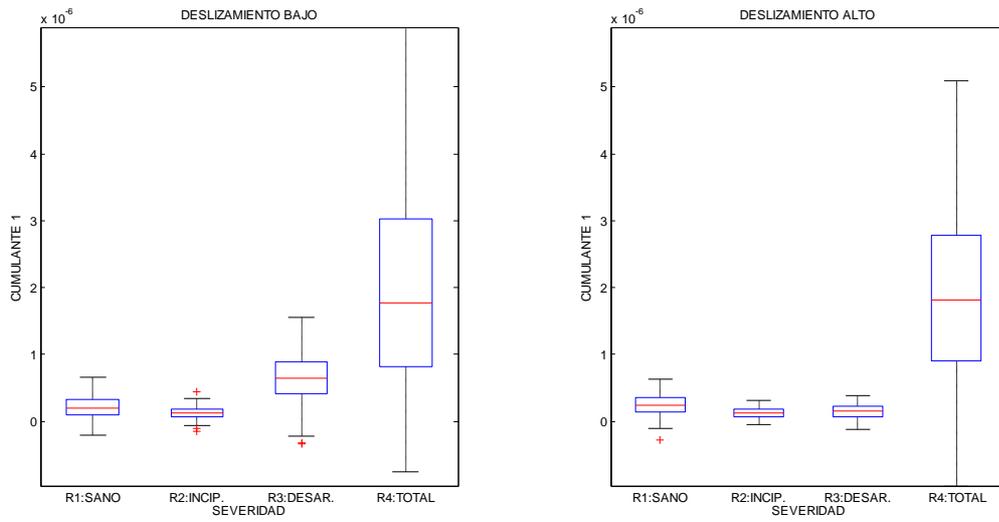


Figura 7.108: Representación Box-plot del estadístico Cumulante 1 .

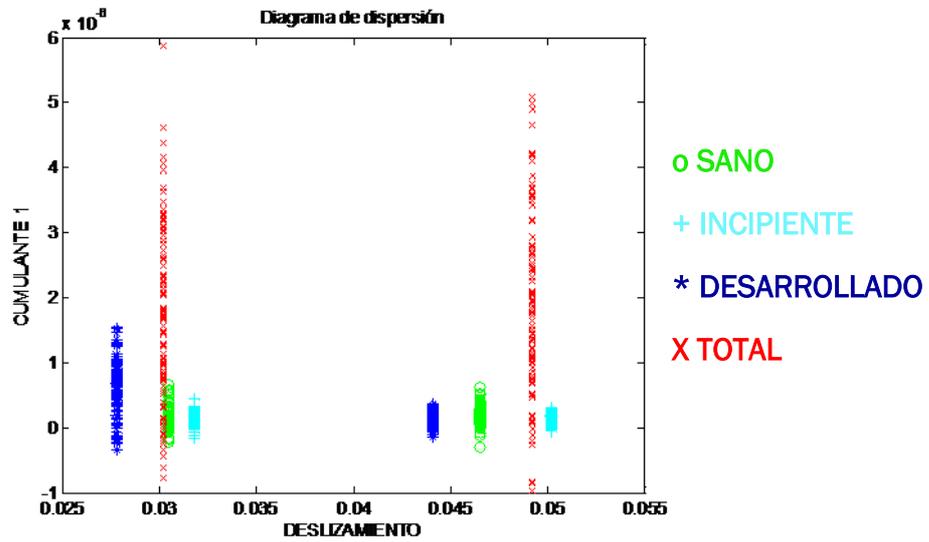


Figura 7.109: Representación diagrama de dispersión del estadístico Cumulante 1.

Capítulo 7: Resultados de la aplicación del modelo sintético

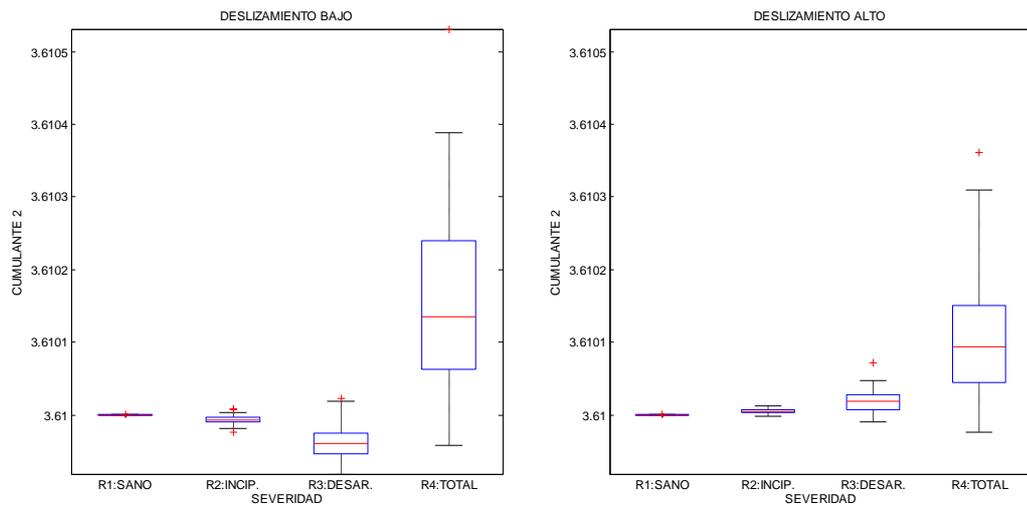


Figura 7.110: Representación Box-plot del estadístico Cumulante 2 .

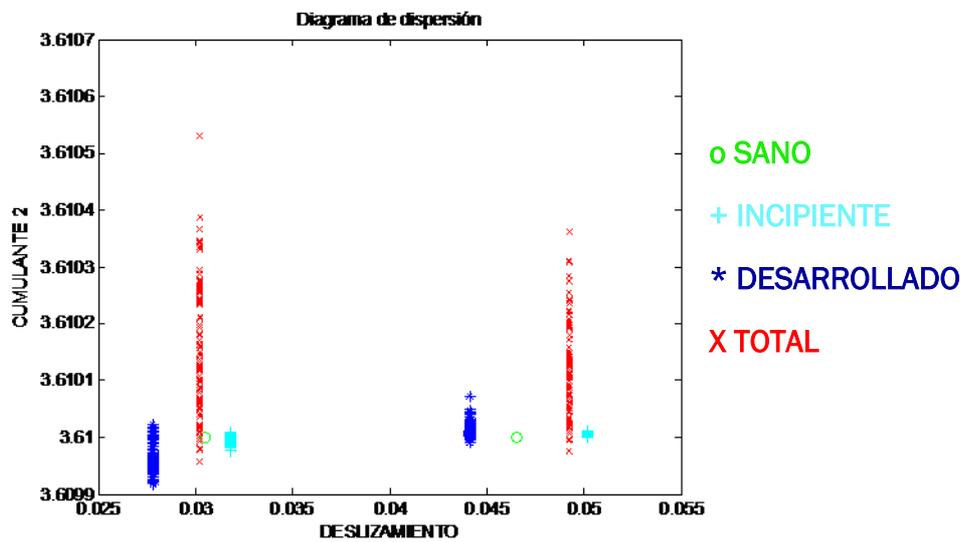


Figura 7.111: Representación diagrama de dispersión del estadístico Cumulante 2.

Capítulo 7: Resultados de la aplicación del modelo sintético

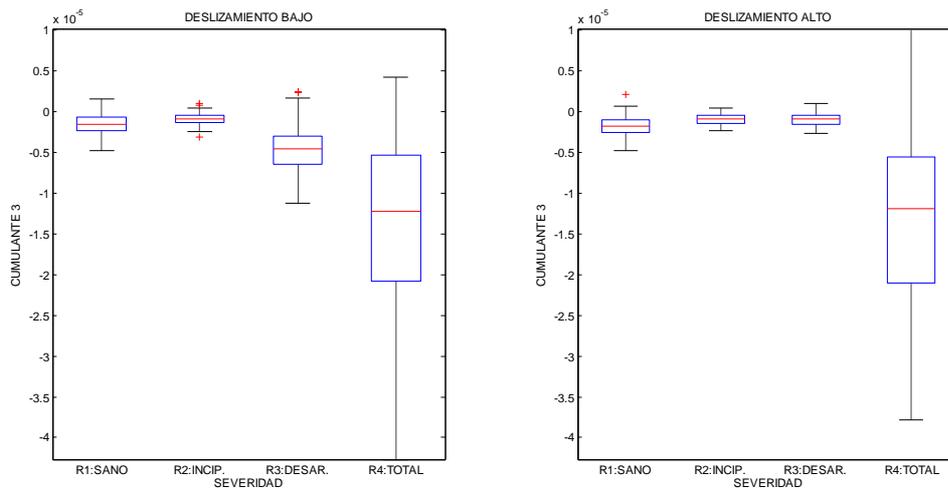


Figura 7.112: Representación Box-plot del estadístico Cumulante 3 .

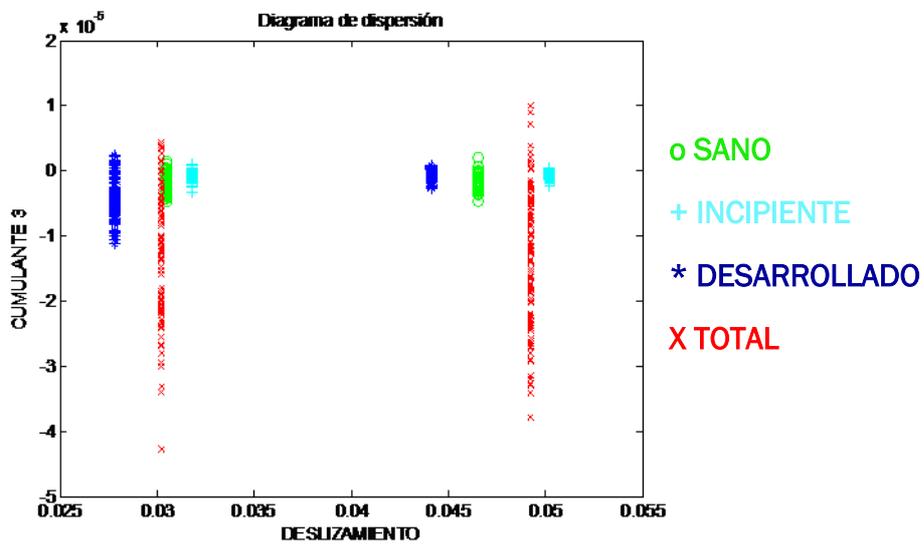


Figura 7.113: Representación diagrama de dispersión del estadístico Cumulante 3.

Capítulo 7: Resultados de la aplicación del modelo sintético

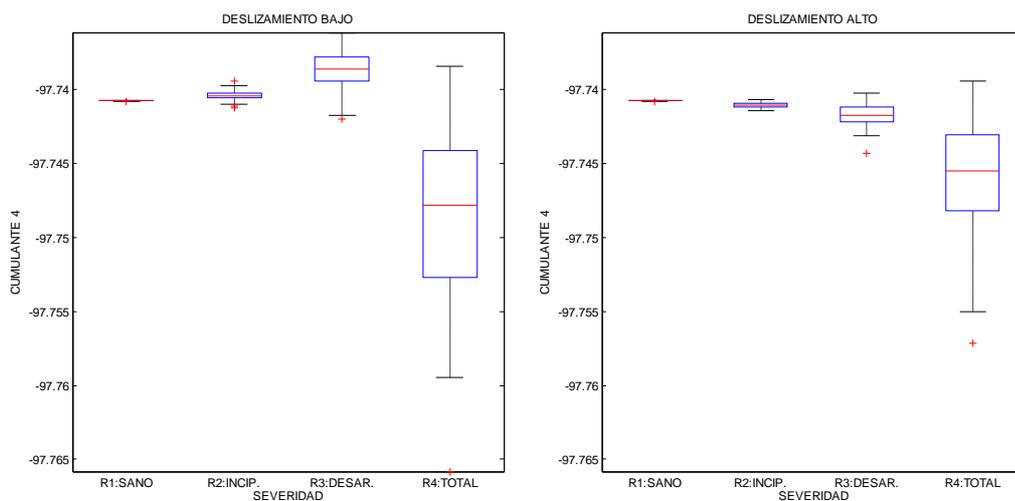


Figura 7.114: Representación Box-plot del estadístico Cumulante 4 .

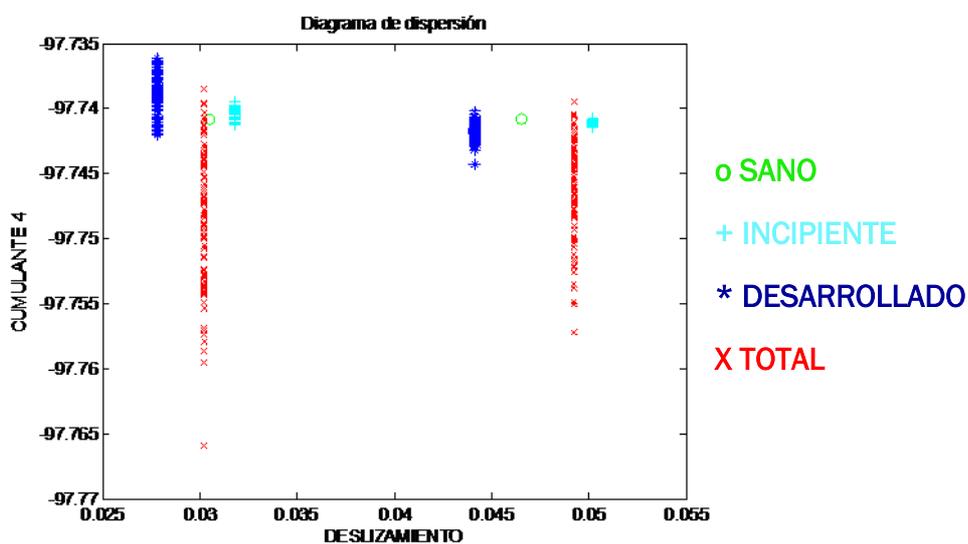


Figura 7.115: Representación diagrama de dispersión del estadístico Cumulante 4.

Capítulo 7: Resultados de la aplicación del modelo sintético

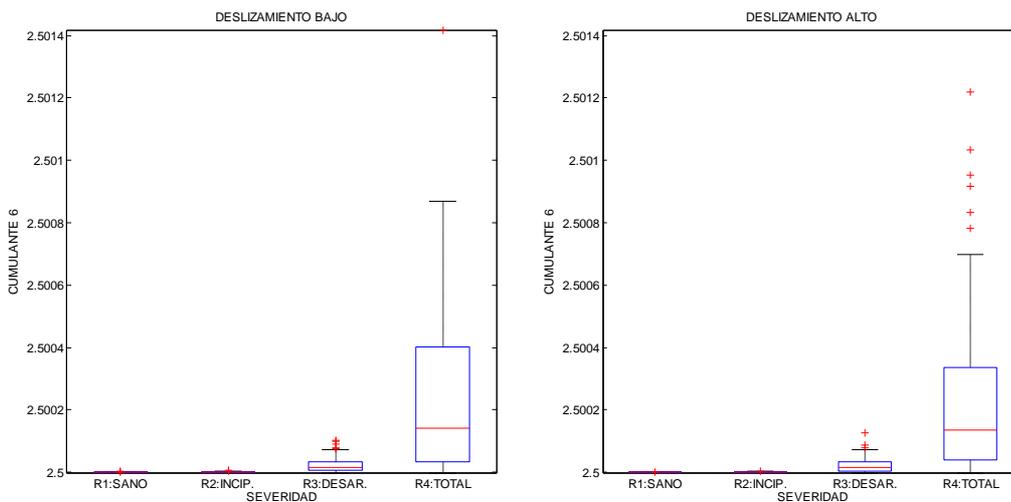


Figura 7.116: Representación Box-plot del estadístico Cumulante 6.

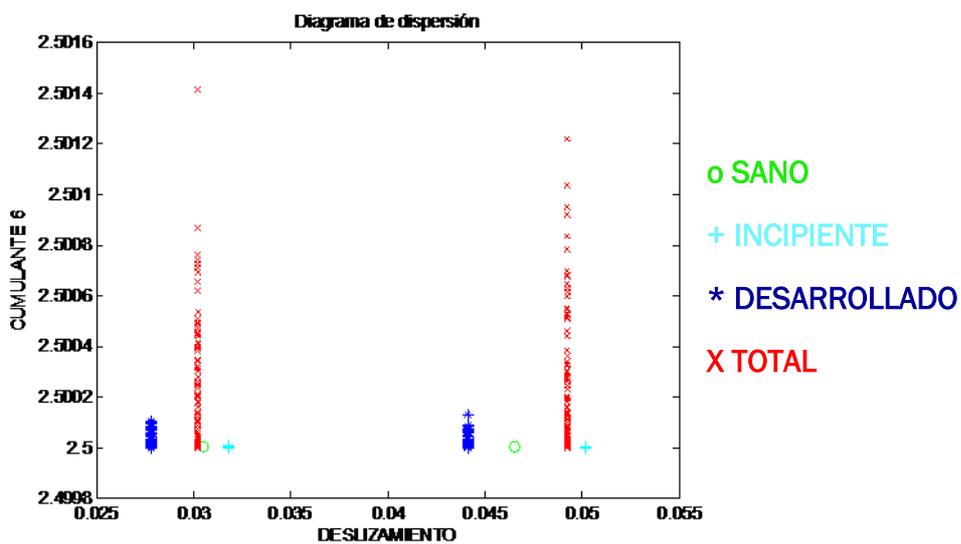


Figura 7.117: Representación diagrama de dispersión del estadístico Cumulante 6.

Capítulo 7: Resultados de la aplicación del modelo sintético

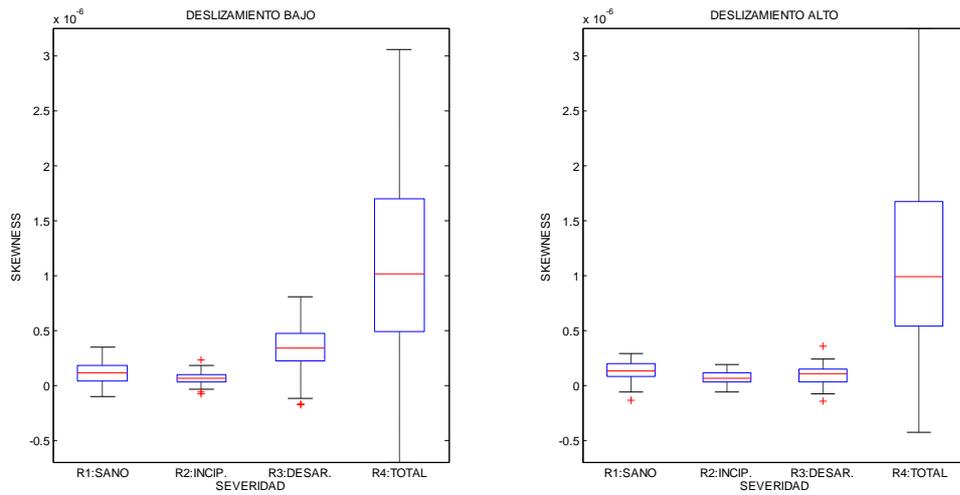


Figura 7.118: Representación Box-plot del estadístico Skewness.

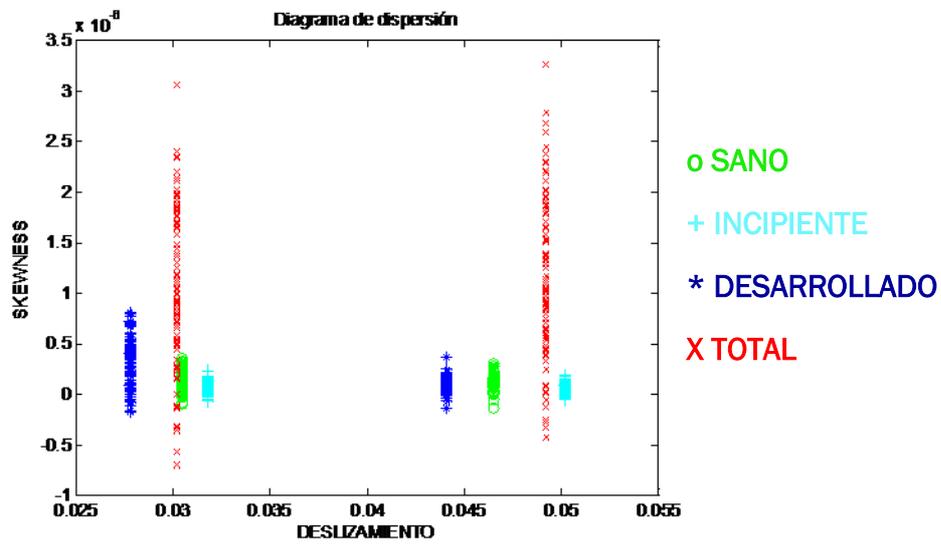


Figura 7.119: Representación diagrama de dispersión del estadístico Skewness.

Capítulo 7: Resultados de la aplicación del modelo sintético

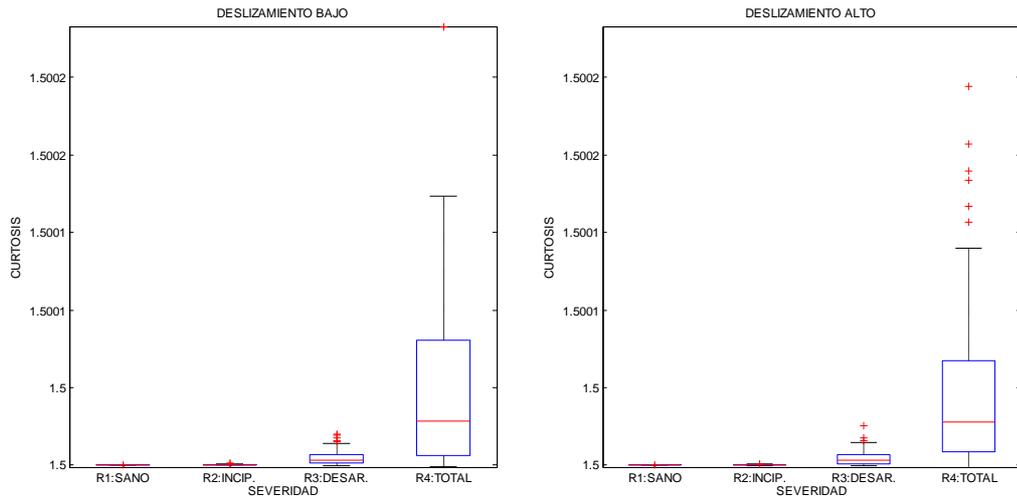


Figura 7.120: Representación Box-plot del estadístico Curtosis.

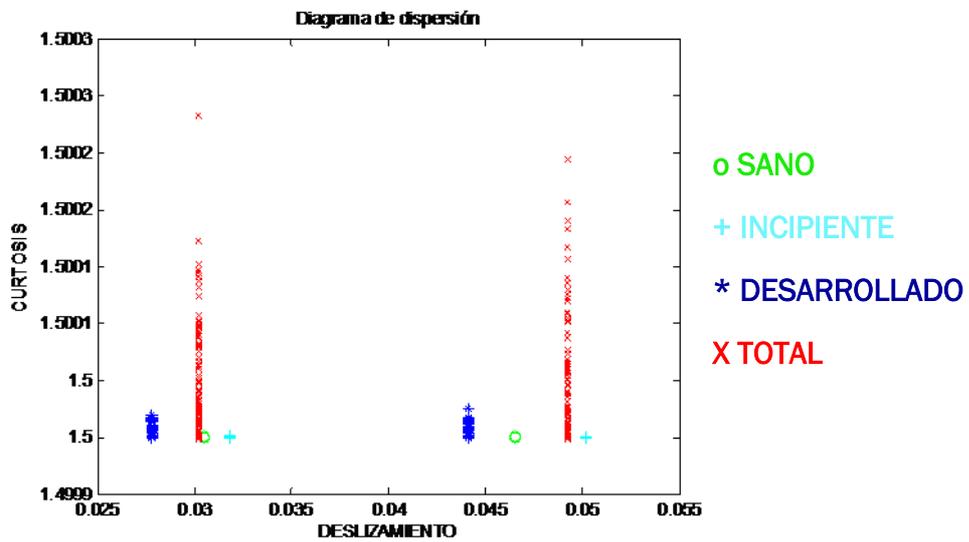


Figura 7.121: Representación diagrama de dispersión del estadístico Curtosis.

Capítulo 7: Resultados de la aplicación del modelo sintético

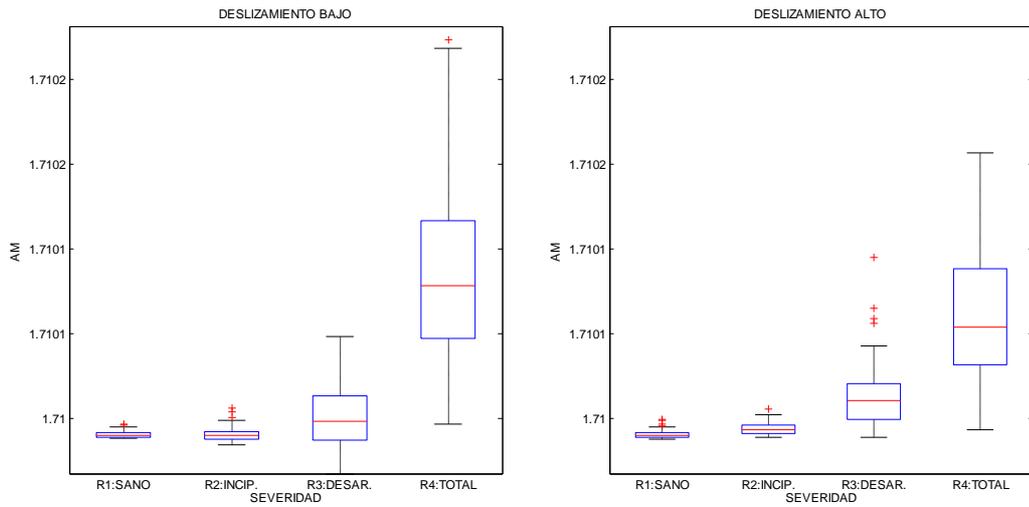


Figura 7.122: Representación Box-plot del estadístico promedio de valores absolutos.

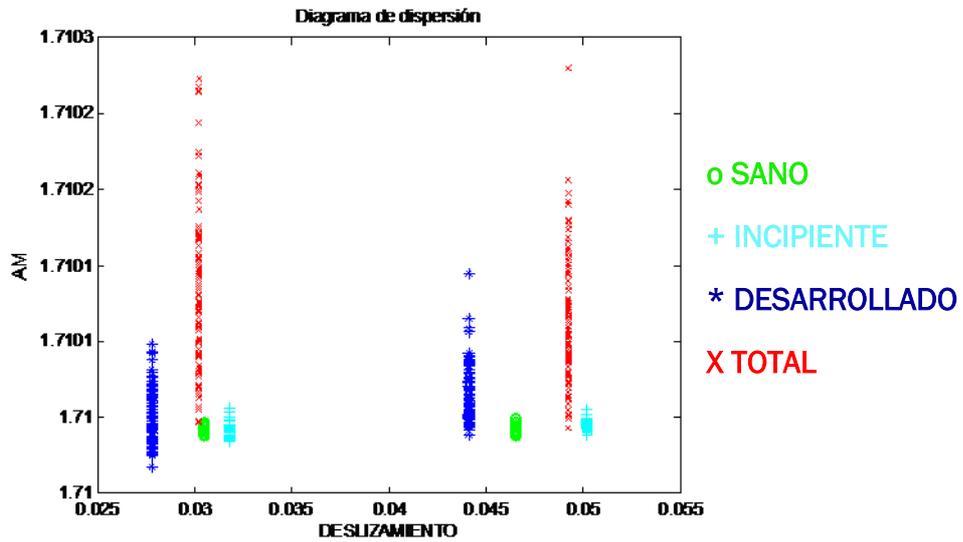


Figura 7.123: Representación diagrama de dispersión del estadístico promedio de valores absolutos.

Capítulo 7: Resultados de la aplicación del modelo sintético

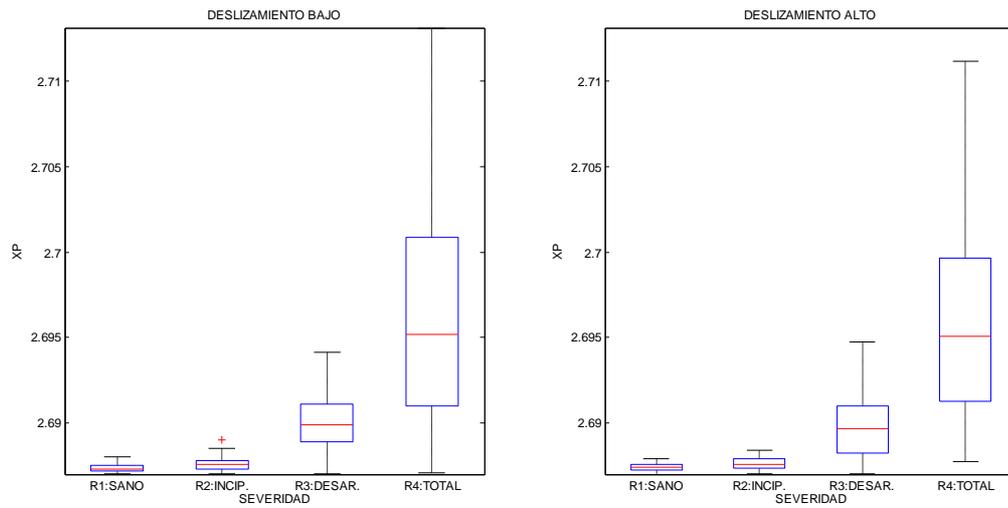


Figura 7.124: Representación Box-plot del estadístico máximo de valores absolutos.

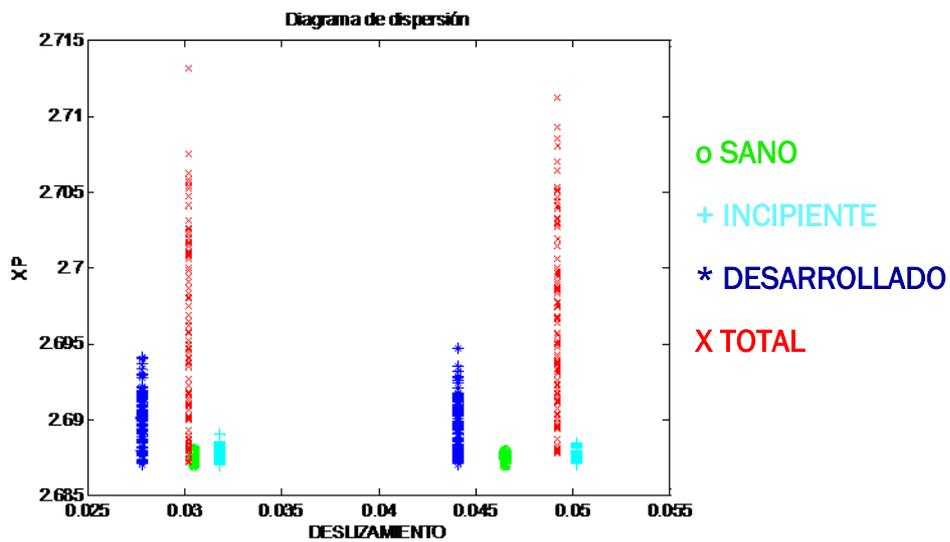


Figura 7.125: Representación diagrama de dispersión del estadístico máximo de valores absolutos.

Capítulo 7: Resultados de la aplicación del modelo sintético

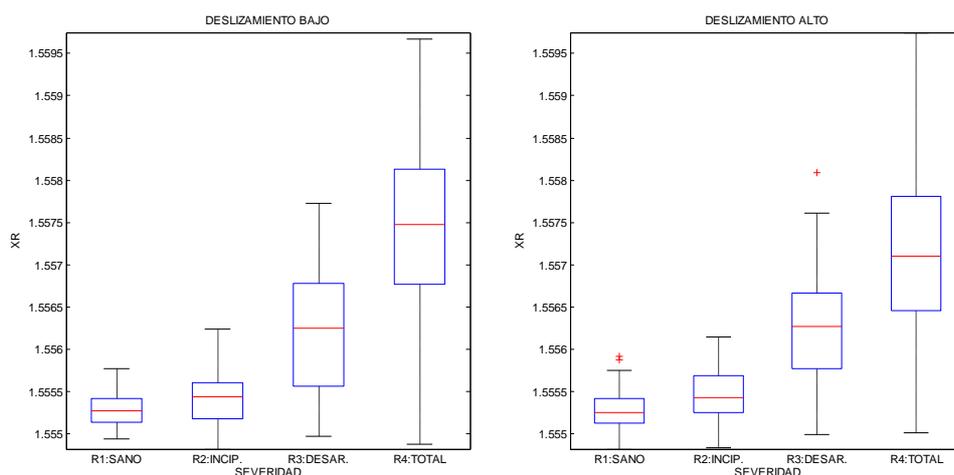


Figura 7.126: Representación Box-plot del estadístico valor cuadrático medio.

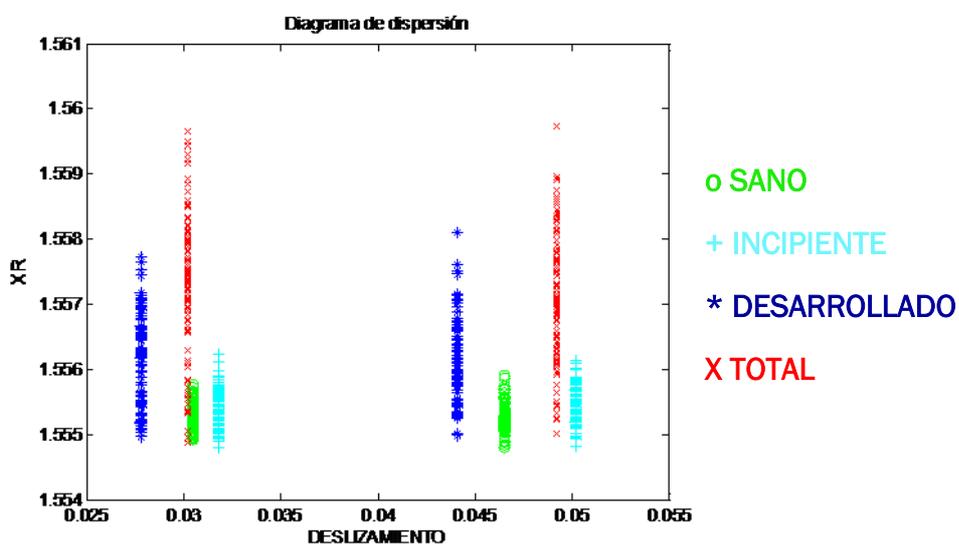


Figura 7.127: Representación diagrama de dispersión del estadístico valor cuadrático medio.

Capítulo 7: Resultados de la aplicación del modelo sintético

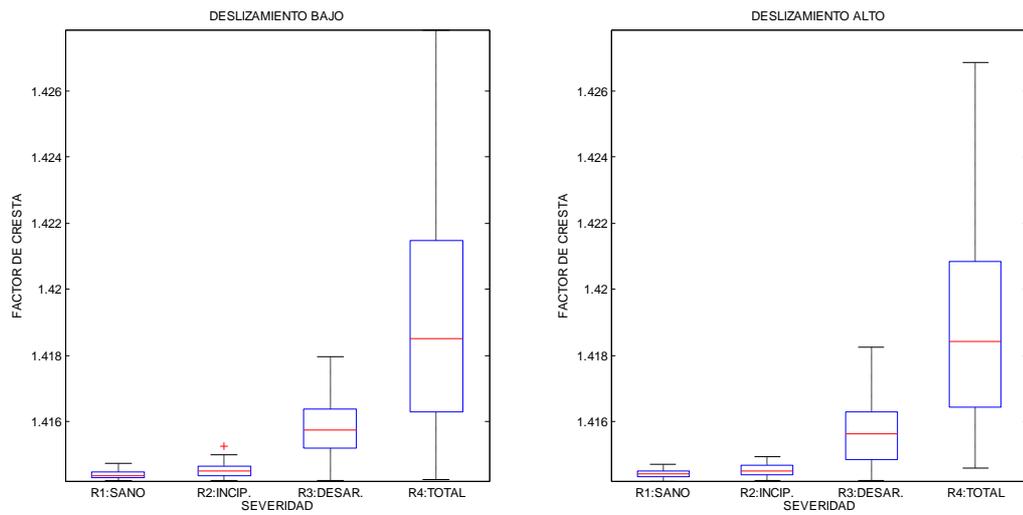


Figura 7.128: Representación Box-plot del estadístico factor de cresta.

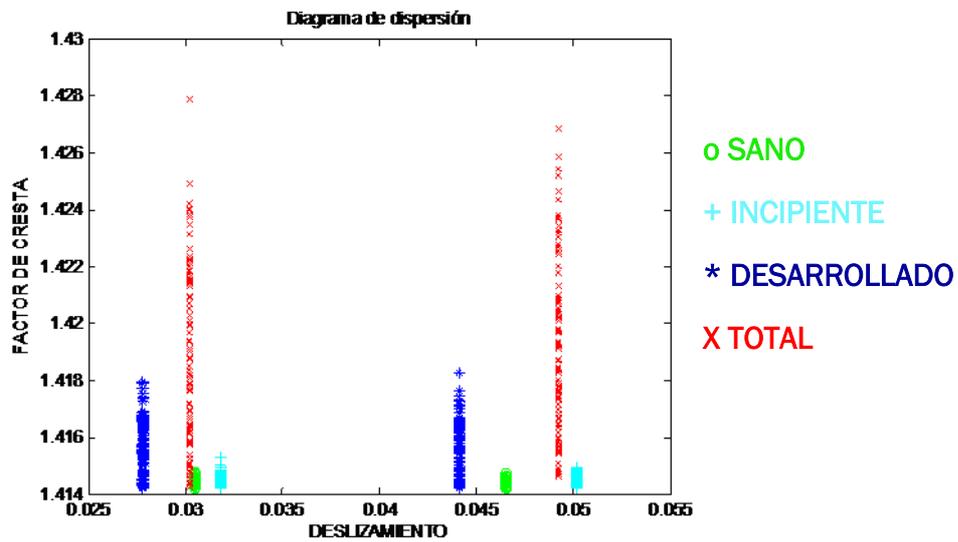


Figura 7.129: Representación diagrama de dispersión del estadístico factor de cresta.

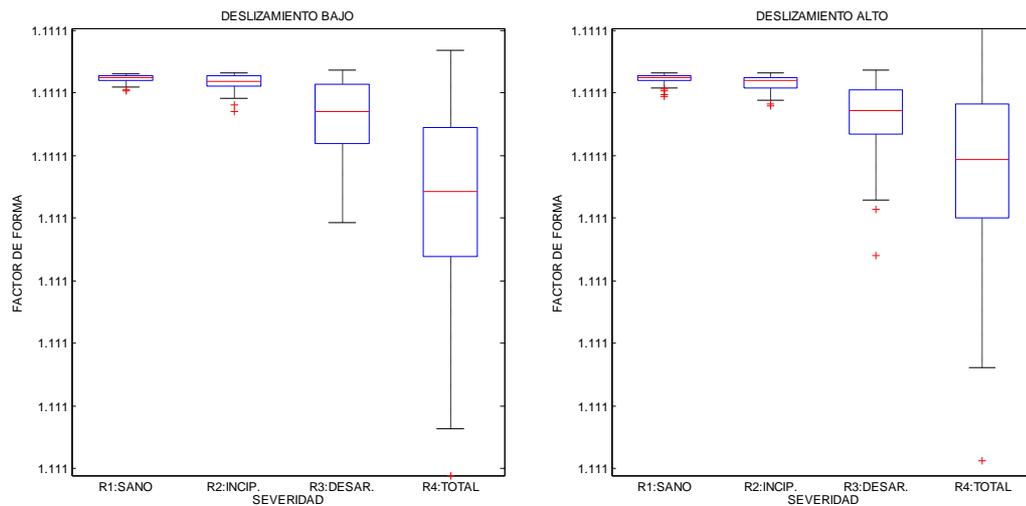


Figura 7.130: Representación Box-plot del estadístico factor de forma.

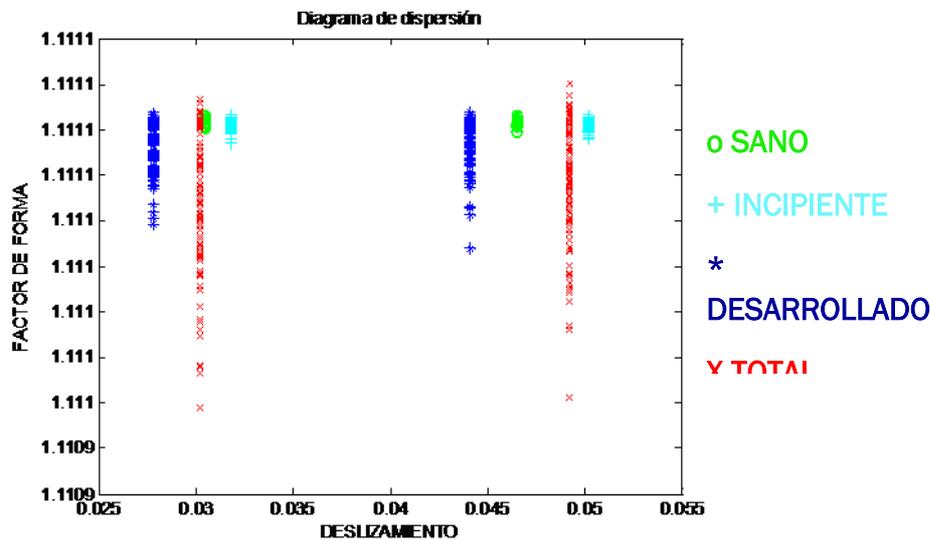


Figura 7.131: Representación diagrama de dispersión del estadístico factor de forma.

7.5.9. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Como se ha comentado con anterioridad, para la realización de este estudio se añade un nivel de ruido del 10% con respecto a la amplitud del armónico fundamental, expresado en amperios. Esto influye en el espectro de la señal, colocando el nivel de ruido o "césped" en torno a los -60 dB, y por ello complica el análisis de las severidades de fallo. Los picos de los armónicos de un motor totalmente sano, con fallo incipiente o con fallo desarrollado quedan por debajo del nivel de ruido, no pudiendo apreciar este tipo de severidades como se observa en las Fig. 7.92 (motor totalmente sano y deslizamiento bajo), 7.93 (motor totalmente sano y deslizamiento alto), 7.94 (motor con fallo incipiente y deslizamiento bajo), 7.95 (motor con fallo incipiente y deslizamiento alto), 7.96 (motor con fallo desarrollado y deslizamiento bajo) ó

7.97 (motor con fallo desarrollado y deslizamiento alto). Para el caso de fallo total, tendremos dificultad a la hora de ver los picos de los armónicos, puesto que en algunos casos del modelo sintético se solapan con los picos de nivel de ruido como se observa en las Fig. 7.98 (motor con fallo total y deslizamiento bajo) ó 7.99 (motor con fallo total y deslizamiento alto). En la industria se utilizan dispositivos como los filtros, de forma que se disminuya el nivel de ruido y de esta manera poder realizar un seguimiento del estado del motor a través de los picos de los armónicos

Con respecto al análisis de los estadísticos, se puede realizar un análisis semejante al realizado en los otros dos estudios anteriores de una señal sin ruido y con nivel de ruido bajo.

Para el caso de deslizamiento bajo, se observa solapamiento entre los estados sano e incipiente, pudiendo discriminar entre fallo desarrollado y total. Sin embargo, cuando tenemos un nivel de deslizamiento alto tenemos solapamiento entre los estados totalmente sano, fallo incipiente y fallo desarrollado, pudiendo discriminar tan solo a partir del fallo total. Las figuras donde se puede ver esta comparativa son: Fig. 7.100 (momento 1), 7.112 (cumulante 3) ó 7.118 (skewness).

En las Fig. 7.103 (momento 2), 7.107 (momento 4), 7.111 (cumulante 2) ó 7.117 (cumulante 6), una mínima variación numérica entre las severidades sano, incipiente y desarrollado, que dificulta la detección de un posible fallo prematuro en el motor, pudiendo discriminar tan solo el fallo total.

También, aunque tengamos un alto nivel discriminatorio de forma visual en determinados estadísticos como se menciona en el párrafo anterior, hay estadísticos que presentan una difícil clasificación de forma numérica. Esto se debe al incremento tan pequeño que se produce (en algunos casos de diez milésimas Fig. 7.116 (cumulante 6) ó 7.130 (factor de forma) y en otros casos de centésimas como en las Fig. 7.114 (cumulante 4) ó 7.128 (factor de cresta)).

Por último, podremos utilizar los estadísticos de las Fig. 7.103 (momento 2), 7.106 (momento 4), 7.115 (cumulante 4), 7.123 (promedio de valores absolutos), 7.125 (máximo de valores absolutos) ó 7.129 (factor de cresta), para la monitorización de la evolución del fallo por su buen poder discriminatorio. Estos estadísticos conformarían una buena herramienta para la monitorización y seguimiento de la evolución de fallo en los motores de inducción, puesto que observamos en todas las severidades de fallo una dispersión progresiva desde que tenemos el motor totalmente sano hasta su

fallo total. Estos estadísticos estarían enfocados a un mantenimiento totalmente predictivo.

Como se ha observado, el nivel de ruido no influye de ninguna manera en la variación de los estadísticos, realizándose el mismo análisis en los tres estudios. El ruido tan sólo tiene influencia cuando realizamos el análisis del espectro, pues cuanto mayor sea este nivel de ruido peor será la identificación de los picos de los armónicos como se comentó también en el capítulo anterior.

Capítulo 8

Resultados y conclusiones

8.1. INTRODUCCIÓN

Tras el desarrollo de este trabajo se ha llegado a una serie de resultados y conclusiones, que están recogidas en el siguiente capítulo. Además, en este capítulo, se citan las posibles líneas futuras de investigación en busca de una mejora de las mismas.

En la primera parte se exponen los principales resultados y conclusiones obtenidos en este proyecto. En la segunda parte, se describen las posibles líneas de investigación que surgen a raíz de la realización del mismo.

8.2. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En este estudio se ha generado un conjunto de señales sintéticas que tratan de representar la corriente que consume un motor de inducción en diferentes condiciones de la jaula del rotor. Estas señales se han generado con diferentes niveles de ruido y diferente contenido de armónico, que se asemeje al que tienen cuando en un motor real hay un fallo en barras. La amplitud de los armónicos de fallo se ha generado de forma aleatoria, siguiendo una distribución normal que se ha obtenido experimentalmente con ensayos reales en el laboratorio.

Para realizar el estudio se han calculado estadísticos de orden superior de estas señales sintéticas en el dominio del tiempo. Estos valores han empezado a utilizarse como patrones de fallo para el diagnóstico de motores de inducción. El estudio realizado en este trabajo ha abordado dos objetivos:

- La detección de las barras rotas en motores de inducción
- El diagnóstico de la severidad de la avería.

El estudio realizado, podría aplicarse a otros tipos de fallos como pueden ser: rodamientos, excentricidad, etc. A continuación se describen las principales conclusiones obtenidas realizadas en este trabajo:

El estudio desarrollado en este TFG (Trabajo Fin de Grado), aportar datos complementarios al diagnóstico de fallos de barras en un motor de inducción. La clasificación de los diferentes estados de fallo establecida, permite discriminar entre las etapas de evolución de fallo de barra rota.

Con los resultados obtenidos, se podría disponer de información para determinar el estado del motor respecto a la jaula del rotor.

Este trabajo es capaz de diagnosticar fallos incipientes en señales con ruido bajo. Esto es de vital importancia para motores, cuya criticidad en la línea de producción sea alta. Esto ayuda a su implantación de forma que pueda ser utilizada tanto para realizar el seguimiento de una avería, como para el diagnóstico ocasional de una máquina.

Los niveles de ruido resultan de vital importancia a la hora de identificar un posible fallo. Los distintos niveles de ruido son debido a la fuente de alimentación (red o variador). El nivel de ruido es importante a la hora de detectar anomalías, puesto que cuanto mayor sea este nivel, más complicado será la detección de un posible fallo.

Para el análisis de los resultados obtenidos mediante este estudio, se compara una serie de estadísticos, atendiendo a unos criterios diferentes.

Se pudo observar que, en algunos estadísticos, el nivel de deslizamiento tiene influencia a la hora de la discriminación de severidades, pudiendo discriminar entre fallo desarrollado y total para deslizamiento bajo, mientras que para el deslizamiento alto sólo se puede discriminar el fallo total.

Además, se ha observado estadísticos con un buen poder discriminatorio de forma visual, pero no se obtiene el mismo resultado cuando se realiza su análisis numérico.

Por lo tanto, nuestro modelo sintético de señales es una buena referencia para realizar el estudio del comportamiento real de señales. El nivel de ruido es un factor muy importante a la hora de la monitorización del espectro de la señal de corriente rotórica, puesto que puede dificultar la detección de fallos. Además, se observa que no todos los estadísticos aportan la misma información, y debido a ello se debe elegir adecuadamente el estadístico que se desea utilizar como herramienta para la detección de fallos en la jaula de motores de inducción.

Por último, y a modo de resumen, se comenta la clasificación por estadísticos:

Según el nivel de deslizamiento bajo, y con un buen poder discriminatorio entre fallo desarrollado y total son: momento 1, momento 3, cumulante 1, cumulante 3 y skewness.

Según el deslizamiento alto, con buen poder discriminatorio sólo en fallo total son: momento 1, momento 3, cumulante 1, cumulante 3 y skewness.

Los estadísticos que sólo permiten discriminar el fallo total, independiente del nivel de deslizamiento son: momento 2, momento 4 y cumulante 6.

Los estadísticos que permiten discriminar entre fallo desarrollado y total, independientemente del nivel de deslizamiento son: promedio de valores absolutos (A_M), máximo de valores absolutos (X_P), valor cuadrático medio (X_{rms}), factor de cresta y factor de forma.

Los estadísticos que tienen un buen poder discriminante de forma visual, pero atendiendo a su valor numérico no se obtiene este mismo resultado son: cumulante 6, curtosis, promedio de valores absolutos (A_M), máximo de valores absolutos (X_P), valor cuadrático medio (X_{rms}), factor de cresta y factor de forma.

8.3. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

A continuación se exponen las siguientes líneas de investigación, como continuación de este trabajo:

1. Para el desarrollo de este proyecto sólo se ha realizado un pequeño número de ensayos. Además, en el Dpto. de Ingeniería Eléctrica se dispone de una base de datos muy amplia. Esta base está compuesta por un gran número de ensayos de diferentes motores en distintas condiciones de carga, y diferentes fuentes de alimentación. Se propone como línea de investigación, realizar un mayor número de ensayos, para verificar si estas primeras observaciones se reafirman con un mayor rigor estadístico.
2. En este trabajo sólo se ha estudiado el problema de barras rotas. Se propone extender el estudio a otros tipos de fallos que puede sufrir un motor de inducción, como excentricidad y fallos en rodamientos. Si estos estudios previos son satisfactorios, se propone continuar a la siguiente fase correspondiente al diagnóstico, como puede ser el análisis de Redes Neuronales.
3. Estudiar las razones físicas del comportamiento de los distintos estadísticas, pues como se pudo ver en el capítulo anterior, algunos de ellos presentan una relación compleja con el estado de fallo del motor

Capítulo 9

Bibliografía

9.1. Bibliografía

En esta sección de la memoria se recoge las referencias consultadas en la elaboración de este trabajo. Las citas se ordenan por orden alfabético del primer apellido del autor y no se han referenciado en el documento.

Bergaz Sahornil, Alberto, "Detección de fallos en los rodamientos de un motor de inducción alimentado desde red y convertidor", Proyecto Fin de Carrera, 2009, Dpto. de Ingeniería Eléctrica, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid.

Cabezas Defaus, N.; Cruz Pérez, P. P.; Iglesias Martínez, M. E. y Hernández Montero, F. E., "El procesamiento estadístico de orden superior: herramienta útil para el análisis de señales", Rev. Cienc. Tecnol., 2015, nº 20, pp. 30-37.

Duque Pérez, O. y Pérez Alonso, M., *Motores de Inducción: Técnicas de Mantenimiento Predictivo*, Ed. Abecedario, 2005.

Fernández Cabanas, M.; García Melero, M.; Alonso Orcajo, G.; Cano Rodríguez, J.M. y Solares Sariago, J.M., *Técnicas para el mantenimiento y diagnóstico de máquinas eléctricas rotativas*, Ed. Marcombo, 1998.

Fraile Mora, J., *Máquinas eléctricas*. Ed. Mc Graw Hill, Quinta edición, 2013.

Gardel Sotomayor, P. E., "Aportaciones al mantenimiento predictivo de motores de inducción mediante una metodología de diagnóstico basada en el uso combinado de técnicas estadísticas y Redes Neuronales Artificiales", Tesis Doctoral, 2013, Directores: Daniel Moríñigo Sotelo, Óscar Duque Pérez. Dpto. de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Valladolid.

Hernández Montero, F. E.; Palomino Marín, E.; Atxa Uribe, V. y Ruiz Barrios, M. L., "Análisis de vibraciones para el diagnóstico aplicando procesamiento estadístico de orden superior", Ingeniería Mecánica, vol. 7, núm. 2, mayo-agosto, 2004, pp. 75-80.

Heras Mateos, A., "Estudio sobre indicaciones del estado de un motor de inducción basados en estadísticos de orden superior", Proyecto Fin de Carrera, 2014, Dpto. de Ingeniería Eléctrica, Escuela de Ingenierías Industriales. Universidad de Valladolid.

Iglesias Martínez, M. E.; López Portilla, B. M. y Hernández Montero, F. E., "Estimación de Armónicos sobre FPGA Aplicando Estadística de Orden Superior y Convolución", RIELAC, Vol. 34, nº 2, 2013 pp.48-62.

Mendel, J. M., "Tutorial on Higher-Order Statistics (Spectra) in Signal Processing and System Theory: Theoretical Results and Some Applications", Proceedings of the IEEE, vol. 19, no. 3, Marzo, 1991.

Rodríguez Oraá, B. M., "Detección de fallo de barras en motores de inducción utilizando Histogramas", Proyecto Fin de Carrera, 2013, Dpto. de Ingeniería Eléctrica, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid.

Malhotra, S.; Rachna, M. y Soni M. K., "Fault Diagnosis of Induction Motor", Proc. 1st Annual International Interdisciplinary Conference, AIIC, 2013, 24-26 Abril, Azores, Portugal.

Swami, A.; Mendel, J.M. y Nikias, C.L., *Higher-Order Spectral Analysis Toolbox for Use with MATLAB*.

Zamora Pérez, C., "Estudio de aplicación de la técnica de estimación espectral MUSIC para la detección de fallos en motores de inducción", Proyecto Fin de Carrera, 2013, Dpto. de Ingeniería Eléctrica, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid.

Capítulo 10

Anexos

10.1. Anexos

10.1.1. Código motor totalmente SANO

```

%Generación de señales aleatorias. RUBÉN DE LA ROSA LÓPEZ
close all
clear all
clc;
rng('shuffle');

%Declaración de variables.
%Valor del deslizamiento que queremos utilizar. DESL=1
deslizamiento bajo;
%DESL=2 deslizamiento alto
DESL=1;

nA=100;%Número de amplitudes que queramos generar.

% VALORES ESTADÍSTICOS
Smedia=[0.0305 0.0465];
Sdesvstd=[0.0001 0.0018];

%Amplitud de LSH y USH media y las desviaciones estándar de cada
una de
%ellas
aa1=1.9*2^(1/2);
A1=aa1*ones(1,nA)';%Fundamental

LSHamp=1.701e-4;
USHamp=1.8264e-4;
LSHdesv=9.32e-5;
USHdesv=1.2458e-4;

%DESLIZAMIENTOS UTILIZADOS.

%Generación del vector de tiempos para el muestreo de la señal.
fs=5e3;%Frecuencia de muestreo.
ti=0;%Tiempo inicial del estudio.
tf=10;%Tiempo de finalización del estudio.
At=1/fs;%Incremento de tiempos
t=ti:At:(tf-At);%Generación de los tiempos de muestreo

%Amplitudes.
f1=50;%Frecuencia de la onda fundamental que será de 50Hz.
%Los ángulos debmos expresarlos en radianes(S.I.)
gr1=0;%Expresión en grados.
desf1=(gr1*2*pi)/360;%Desfase en radianes de la onda fundamental

%Generación de la matriz vacía
matriz=zeros(100,18);

for l=1:nA
    %LSH
    A2=LSHamp.*(ones(1,1)+randn(1,1));
    f2=f1*(1-(2*Smedia(DESL)));%Expresado en Hz.
    gr2=0;%Expresión en grados de la señal 2.

```

Capítulo 10: Anexos

```
desf2=(gr2*2*pi)/360;%Conversión a radianes(S.I.)

%USH
A3=USHamp.*(ones(1,1)+randn(1,1));
f3=f1*(1+(2*Smedia(DESL)));%Expresado en Hz.
gr3=0;%Expresión en grados de la señal 3.
desf3=(gr3*2*pi)/360;%Conversión a radianes(S.I)

end

s1=(A1*sin((2*pi*f1*t)+desf1))';%Señal fundamental
s2=(A2*sin((2*pi*f2*t)+desf2))';%LSH1
s3=(A3*sin((2*pi*f3*t)+desf3))';%USH1

%Generamos independientemente la señal de ruido. Esta función
nos crea una
%matriz de n*m de dimension y unos determinados decibelios.

ampruido=0.1*aa1*rand(nA);%Amplitud de la señal de ruido.
ruido=(randn(nA,length(t)))';
%Bucle para la generación también de las amplitudes de ruido
de manera
%aleatoria.
for j=1:nA,
    ampruido = 0.1*aa1*rand(1);
    ruido(:,j) = ruido(:,j)*ampruido;
end

sumasenoidal=s1+s2+s3;
suma=sumasenoidal+ruido;

%Cálculo del resto de estadísticos

matriz(:,1)=A2;
matriz(:,2)=A3;

% La variable x contiene la corriente en el dominio del
tiempo

x=sumasenoidal;
n = size(x,1);
% Calculo de estadísticos

xrms = sqrt(sum((x.^2),1)/size((x),1)); %rms
x1=mean(x);%Media de la matriz de puntos
x1=ones(5e4,1)*x1;
% Momento 1
matriz(:,3) = sum(x)./n;
% Momento 2
matriz(:,4) = sum((x-x1).^2)/n;
% Momento 3
matriz(:,5) = sum((x-x1).^3)/n;
% Momento 4
matriz(:,6) = sum((x-x1).^4)/n;
% Cumulante 1
```

```

matriz(:,7) = matriz(:,3);
% Cumulante 2
matriz(:,8) = matriz(:,4)-matriz(:,3).^2;
% Cumulante 3
matriz(:,9) = matriz(:,5)-
((3.*matriz(:,4)).*matriz(:,3))+2.*matriz(:,3).^3;
% Cumulante 4
matriz(:,10) =
matriz(:,6)+((4.*matriz(:,5)).*matriz(:,3))-
((3.*matriz(:,4)).^2)+((12.*matriz(:,4)).*(matriz(:,3).^2))-
(6.*matriz(:,3).^4);
% Cumulante 6
matriz(:,11) = (sum((x-
x1).^6))./(n.*(matriz(:,4).^3));
% Skewness
matriz(:,12) = matriz(:,5)./((sqrt(matriz(:,4))).^3);
% Kurtosis
matriz(:,13) = matriz(:,6)./((sqrt(matriz(:,4))).^4);
% Am
matriz(:,14) = sum(abs(x))./n;
% Xp
matriz(:,15) = max((abs(x)));
% Xr
matriz(:,16) = (sum(sqrt(abs(x)))./n).^2;
% Factor de Cresta
matriz(:,17) = matriz(:,15)./xrms';
% Factor de forma
matriz(:,18) = xrms'./matriz(:,14);

% Guardar datos

if DESL==1
    save('SANO1.mat','matriz')
elseif DESL==2
    save('SANO2.mat','matriz')
end

%% REPRESENTACIÓN EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA. LO QUE REALMENTE
CALCULAMOS
%% ES LA DENSIDAD ESPECTRAL.
%Cálculo del PSD.
Hs = spectrum.periodogram('Hann');

%Espectro de la señal sin ruido.
hs = psd(Hs, sumasenoidal(:,1), 'Fs', fs, 'NFFT', fs*tf,
'SpectrumType', 'onesided');
dataespectrosumasenoidal1=[hs.Frequencies
10*log10(abs(hs.Data/max(hs.Data)))];

% %Espectro de la suma con ruido.

AA1=[];
for ii=1:nA

    hs = psd(Hs, suma(:,ii), 'Fs', fs, 'NFFT', fs*tf,
'SpectrumType', 'onesided');
    AA=[hs.Frequencies 10*log10(abs(hs.Data/max(hs.Data)))]];

```

```

AA1=[AA1,AA];

end

%Representación gráfica de los espectros calculados

% Gráfica comparativa de la señal sin ruido y con ruido
figure
subplot(2,1,1)
plot(dataespectrosumasenoidal1(:,1),
dataespectrosumasenoidal1(:,2))
xlabel('FRECUENCIA [Hz]')
ylabel('PSD [dB]')
axis([40 60 -250 0])
title('Suma sin ruido')
subplot(2,1,2)
plot(AA1(:,1), AA1(:,2))
xlabel('FRECUENCIA [Hz]')
ylabel('PSD [dB]')
axis([40 60 -250 0])
title('Suma con ruido y A=0.1')

% Representación gráfica del PSD de la señal con ruido dividido en
bloques
% de 3
ll=1;
while ll<=(nA*2)
    if ll<(nA*2)
        figure
        subplot(3,1,1)
        plot(AA1(:,ll), AA1(:,ll+1))
        xlabel('FRECUENCIA [Hz]')
        ylabel('PSD [dB]')
        axis([40 60 -150 0])
        title('Suma con ruido A1')
        end
        if (ll+2)<(nA*2)
            subplot(3,1,2)
            plot(AA1(:,ll+2), AA1(:,ll+3))
            xlabel('FRECUENCIA [Hz]')
            ylabel('PSD [dB]')
            axis([40 60 -150 0])
            title('Suma con ruido A2')
            end
            if (ll+4)<(nA*2)
                subplot(3,1,3)
                plot(AA1(:,ll+4), AA1(:,ll+5))
                xlabel('FRECUENCIA [Hz]')
                ylabel('PSD [dB]')
                axis([40 60 -150 0])
                title('Suma con ruido A3')
                end
                end
                ll=ll+6;

end

%Realizamos la Transformada de Fourier de la señal.
aaaa=nextpow2(fs*tf)
NFFT = 2^nextpow2(fs*tf)

```

```

f = fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);
Ys1 = fft(s1,NFFT)/(fs*tf);
Ys2 = fft(s2,NFFT)/(fs*tf);
Ys3 = fft(s3,NFFT)/(fs*tf);
Yr = fft(ruido,NFFT)/(fs*tf);
Ys = fft(suma,NFFT)/(fs*tf);

h3 = figure;
subplot(4,1,1)
plot(f,2*abs(Ys1(1:NFFT/2+1)))
xlabel('FRECUENCIA [Hz]')
ylabel('Amplitud del Espectro [A]')
axis([40 60 0 3])
title('s1')

subplot(4,1,2)
plot(f,2*abs(Ys2(1:NFFT/2+1)))
xlabel('FRECUENCIA [Hz]')
ylabel('Amplitud del Espectro [A]')
axis([40 60 0 3])
title('s2')

subplot(4,1,3)
plot(f,2*abs(Ys3(1:NFFT/2+1)))
xlabel('FRECUENCIA [Hz]')
ylabel('Amplitud del Espectro [A]')
axis([40 60 0 3])
title('s3')

subplot(4,1,4)
plot(f,2*abs(Yr(1:NFFT/2+1)))
xlabel('FRECUENCIA [Hz]')
ylabel('Amplitud del Espectro [A]')
axis([40 60 0 3])
title('ruido')

figure
plot(f,2*abs(Ys(1:NFFT/2+1)))
xlabel('FRECUENCIA [Hz]')
ylabel('Amplitud del Espectro [A]')
axis([40 60 0 3])
title('suma')

```

10.1.2. Código motor con fallo INCIPIENTE

```

%Generación de señales aleatorias. RUBÉN DE LA ROSA LÓPEZ
close all
clear all
clc;
rng('shuffle');

%Declaración de variables.
%Valor del deslizamiento que queremos utilizar.DESL=1
deslizamiento bajo;
%DESL=2 deslizamiento alto
DESL=1;

```

Capítulo 10: Anexos

```
nA=100;%Número de amplitudes que queramos generar.

% VALORES ESTADÍSTICOS
Smedia=[0.0318 0.0502];
Sdesvstd=[0.0003 0.0021];

%Amplitud de LSH y USH media y las desviaciones estándar de cada
una de
%ellas
aa1=1.9*2^(1/2);
A1=aa1*ones(1,nA)';%Fundamental

LSHamp=2.9718e-4;
USHamp=3.1602e-4;
LSHdesv=2.8141e-4;
USHdesv=1.6273e-4;

%DESLIZAMIENTOS UTILIZADOS.

%Generación del vector de tiempos para el muestreo de la señal.
fs=5e3;%Frecuencia de muestreo.
ti=0;%Tiempo inicial del estudio.
tf=10;%Tiempo de finalización del estudio.
At=1/fs;%Incremento de tiempos
t=ti:At:(tf-At);%Generación de los tiempos de muestreo

%Amplitudes.
f1=50;%Frecuencia de la onda fundamental que será de 50Hz.
%Los ángulos debmos expresarlos en radianes(S.I.)
gr1=0;%Expresión en grados.
desf1=(gr1*2*pi)/360;%Desfase en radianes de la onda fundamental

%Generación de la matriz vacía
matriz=zeros(100,18);

% Generamos dos amplitudes aleatorias a partir de una media y una
% desviación estándar.Generación del número fijado de USH y LSH

inf1=LSHamp-(3*LSHdesv);%LSH, para la generación de los datos
aleatorios en torno a un intervalo
sup1=LSHamp+(3*LSHdesv);
inf2=USHamp-(3*USHdesv);%USH
sup2=USHamp+(3*USHdesv);

for l=1:nA
    %LSH
    A2=LSHamp.*(ones(1,1)+randn(1,1));
    f2=f1*(1-(2*Smedia(DESL)))/2;%Expresado en Hz.
    gr2=0;%Expresión en grados de la señal 2.
    desf2=(gr2*2*pi)/360;%Conversión a radianes(S.I.)

    %USH
    A3=USHamp.*(ones(1,1)+randn(1,1));
```

Capítulo 10: Anexos

```
f3=f1*(1+(2*Smedia(DES�)));%Expresado en Hz.
gr3=0;%Expresión en grados de la señal 3.
desf3=(gr3*2*pi)/360;%Conversión a radianes(S.I)

end

s1=(A1*sin((2*pi*f1*t)+desf1))';%Señal fundamental
s2=(A2*sin((2*pi*f2*t)+desf2))';%LSH1
s3=(A3*sin((2*pi*f3*t)+desf3))';%USH1

%Generamos independientemente la señal de ruido. Esta función
nos crea una
%matriz de n*m de dimension y unos determinados decibelios.

ampruido=0.1*aa1*rand(nA);%Amplitud de la señal de ruido.
ruido=(randn(nA,length(t)))';
%Bucle para la generación también de las amplitudes de ruido
de manera
%aleatoria.
for j=1:nA,
    ampruido = 0.1*aa1*rand(1);
    ruido(:,j) = ruido(:,j)*ampruido;
end

sumasenoidal=s1+s2+s3;
suma=sumasenoidal+ruido;

%Cálculo del resto de estadísticos

matriz(:,1)=A2;
matriz(:,2)=A3;

% La variable x contiene la corriente en el dominio del
tiempo

x=sumasenoidal;
n = size(x,1);
% Calculo de estadísticos

xrms = sqrt(sum((x.^2),1)/size((x),1)); %rms
x1=mean(x);%Media de la matriz de puntos
x1=ones(5e4,1)*x1;
% Momento 1
matriz(:,3) = sum(x)./n;
% Momento 2
matriz(:,4) = sum((x-x1).^2)/n;
% Momento 3
matriz(:,5) = sum((x-x1).^3)/n;
% Momento 4
matriz(:,6) = sum((x-x1).^4)/n;
% Cumulante 1
matriz(:,7) = matriz(:,3);
% Cumulante 2
matriz(:,8) = matriz(:,4)-matriz(:,3).^2;
% Cumulante 3
```

```

        matriz(:,9) = matriz(:,5) -
        ((3.*matriz(:,4)).*matriz(:,3))+2.*matriz(:,3).^3;
        % Cumulante 4
        matriz(:,10) =
matriz(:,6)+((4.*matriz(:,5)).*matriz(:,3))-
        ((3.*matriz(:,4)).^2)+((12.*matriz(:,4)).*(matriz(:,3).^2))-
        (6.*matriz(:,3).^4);
        % Cumulante 6
        matriz(:,11) = (sum((x-
x1).^6))./(n.*(matriz(:,4).^3));
        % Skewness
        matriz(:,12) = matriz(:,5)./((sqrt(matriz(:,4))).^3);
        % Kurtosis
        matriz(:,13) = matriz(:,6)./((sqrt(matriz(:,4))).^4);
        % Am
        matriz(:,14) = sum(abs(x))./n;
        % Xp
        matriz(:,15) = max((abs(x)));
        % Xr
        matriz(:,16) = (sum(sqrt(abs(x)))./n).^2;
        % Factor de Cresta
        matriz(:,17) = matriz(:,15)./xrms';
        % Factor de forma
        matriz(:,18) = xrms'./matriz(:,14);

% Guardar datos

    if DESL==1
        save('INCIPIENTE1.mat','matriz')
    elseif DESL==2
        save('INCIPIENTE2.mat','matriz')
    end

%% REPRESENTACIÓN EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA. LO QUE REALMENTE
CALCULAMOS
%% ES LA DENSIDAD ESPECTRAL.
%Cálculo del PSD.
Hs = spectrum.periodogram('Hann');

%Espectro de la señal sin ruido.
    hs = psd(Hs, sumasenoidal(:,1), 'Fs', fs, 'NFFT', fs*tf,
'SpectrumType', 'onesided');
    dataespectrosumasenoidal1=[hs.Frequencies
10*log10(abs(hs.Data/max(hs.Data)))];

% %Espectro de la suma con ruido.

AA1=[];
for ii=1:nA

    hs = psd(Hs, suma(:,ii), 'Fs', fs, 'NFFT', fs*tf,
'SpectrumType', 'onesided');
    AA=[hs.Frequencies 10*log10(abs(hs.Data/max(hs.Data)))];
    AA1=[AA1,AA];

end

```

```

%%
%Representación gráfica de los espectros calculados

% Gráfica comparativa de la señal sin ruido y con ruido
figure
subplot(2,1,1)
plot(dataespectrosumasenoida1(:,1),
dataespectrosumasenoida1(:,2))
xlabel('FRECUENCIA [Hz]')
ylabel('PSD [dB]')
axis([40 60 -250 0])
title('Suma sin ruido')
subplot(2,1,2)
plot(AA1(:,1), AA1(:,2))
xlabel('FRECUENCIA [Hz]')
ylabel('PSD [dB]')
axis([40 60 -250 0])
title('Suma con ruido y A=0.1')

% Representación gráfica del PSD de la señal con ruido dividido en
bloques
% de 3
ll=1;
while ll<=(nA*2)
    if ll<(nA*2)
        figure
        subplot(3,1,1)
        plot(AA1(:,ll), AA1(:,ll+1))
        xlabel('FRECUENCIA [Hz]')
        ylabel('PSD [dB]')
        axis([40 60 -150 0])
        title('Suma con ruido A1')
        end
        if (ll+2)<(nA*2)
            subplot(3,1,2)
            plot(AA1(:,ll+2), AA1(:,ll+3))
            xlabel('FRECUENCIA [Hz]')
            ylabel('PSD [dB]')
            axis([40 60 -150 0])
            title('Suma con ruido A2')
            end
            if (ll+4)<(nA*2)
                subplot(3,1,3)
                plot(AA1(:,ll+4), AA1(:,ll+5))
                xlabel('FRECUENCIA [Hz]')
                ylabel('PSD [dB]')
                axis([40 60 -150 0])
                title('Suma con ruido A3')
                end
                end
                ll=ll+6;

end

%%
%Realizamos la Transformada de Fourier de la señal.
aaaa=nextpow2(fs*tf)

```

```

NFFT = 2^nextpow2(fs*tf)
f = fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);
Ys1 = fft(s1,NFFT)/(fs*tf);
Ys2 = fft(s2,NFFT)/(fs*tf);
Ys3 = fft(s3,NFFT)/(fs*tf);
Yr = fft(ruido,NFFT)/(fs*tf);
Ys = fft(suma,NFFT)/(fs*tf);

h3 = figure;
subplot(4,1,1)
plot(f,2*abs(Ys1(1:NFFT/2+1)))
xlabel('FRECUENCIA [Hz]')
ylabel('Amplitud del Espectro [A]')
axis([40 60 0 3])
title('s1')

subplot(4,1,2)
plot(f,2*abs(Ys2(1:NFFT/2+1)))
xlabel('FRECUENCIA [Hz]')
ylabel('Amplitud del Espectro [A]')
axis([40 60 0 3])
title('s2')

subplot(4,1,3)
plot(f,2*abs(Ys3(1:NFFT/2+1)))
xlabel('FRECUENCIA [Hz]')
ylabel('Amplitud del Espectro [A]')
axis([40 60 0 3])
title('s3')

subplot(4,1,4)
plot(f,2*abs(Yr(1:NFFT/2+1)))
xlabel('FRECUENCIA [Hz]')
ylabel('Amplitud del Espectro [A]')
axis([40 60 0 3])
title('ruido')

figure
plot(f,2*abs(Ys(1:NFFT/2+1)))
xlabel('FRECUENCIA [Hz]')
ylabel('Amplitud del Espectro [A]')
axis([40 60 0 3])
title('suma')

```

10.1.3. Código motor con fallo DESARROLLADO

```

%Generación de señales aleatorias. RUBÉN DE LA ROSA LÓPEZ
close all
clear all
clc;
rng('shuffle');

%Declaración de variables.
%Valor del deslizamiento que queremos utilizar
DESL=1;

nA=100;%Número de amplitudes que queramos generar.

```

Capítulo 10: Anexos

```
% VALORES ESTADÍSTICOS
Smedia=[0.0278 0.0441];
Sdesvstd=[0.0005 0.0016];

%Amplitud de LSH y USH media y las desviaciones estándar de cada
una de
%ellas
aa1=1.9*2^(1/2);
A1=aa1*ones(1,nA)';%Fundamental

LSHamp=1.026e-3;
USHamp=1.6007e-3;
LSHdesv=4.4694e-4;
USHdesv=9.2759e-4;

%DESLIZAMIENTOS UTILIZADOS.

%Generación del vector de tiempos para el muestreo de la señal.
fs=5e3;%Frecuencia de muestreo.
ti=0;%Tiempo inicial del estudio.
tf=10;%Tiempo de finalización del estudio.
At=1/fs;%Incremento de tiempos
t=ti:At:(tf-At);%Generación de los tiempos de muestreo

%Amplitudes.
f1=50;%Frecuencia de la onda fundamental que será de 50Hz.
%Los ángulos debmos expresarlos en radianes(S.I.)
gr1=0;%Expresión en grados.
desf1=(gr1*2*pi)/360;%Desfase en radianes de la onda fundamental

%Generación de la matriz vacía
matriz=zeros(100,18);

% Generamos dos amplitudes aleatorias a partir de una media y una
% desviación estándar.Gemeración del número fijado de USH y LSH

inf1=LSHamp-(3*LSHdesv);%LSH, para la generación de los datos
aleatorios en torno a un intervalo
sup1=LSHamp+(3*LSHdesv);
inf2=USHamp-(3*USHdesv);%USH
sup2=USHamp+(3*USHdesv);

for l=1:nA
    %LSH
    A2=LSHamp.*(ones(1,1)+randn(1,1));
    f2=f1*(1-(2*Smedia(DESL)));%Expresado en Hz.
    gr2=0;%Expresión en grados de la señal 2.
    desf2=(gr2*2*pi)/360;%Conversión a radianes(S.I.)

    %USH
    A3=USHamp.*(ones(1,1)+randn(1,1));
    f3=f1*(1+(2*Smedia(DESL)));%Expresado en Hz.
    gr3=0;%Expresión en grados de la señal 3.
```

Capítulo 10: Anexos

```
desf3=(gr3*2*pi)/360;%Conversión a radianes(S.I)

end

s1=(A1*sin((2*pi*f1*t)+desf1))';%Señal fundamental
s2=(A2*sin((2*pi*f2*t)+desf2))';%LSH1
s3=(A3*sin((2*pi*f3*t)+desf3))';%USH1

%Generamos independientemente la señal de ruido. Esta función
nos crea una
%matriz de n*m de dimension y unos determinados decibelios.

ampruido=0.1*aa1*rand(nA);%Amplitud de la señal de ruido.
ruido=(randn(nA,length(t)))';
%Bucle para la generación también de las amplitudes de ruido
de manera
%aleatoria.
for j=1:nA,
    ampruido = 0.1*aa1*rand(1);
    ruido(:,j) = ruido(:,j)*ampruido;
end

sumasenoidal=s1+s2+s3;
suma=sumasenoidal+ruido;

%Cálculo del resto de estadísticos

matriz(:,1)=A2;
matriz(:,2)=A3;

% La variable x contiene la corriente en el dominio del
tiempo

x=sumasenoidal;
n = size(x,1);
% Calculo de estadísticos

xrms = sqrt(sum((x.^2),1)/size((x),1)); %rms
x1=mean(x);%Media de la matriz de puntos
x1=ones(5e4,1)*x1;
% Momento 1
matriz(:,3) = sum(x)./n;
% Momento 2
matriz(:,4) = sum((x-x1).^2)/n;
% Momento 3
matriz(:,5) = sum((x-x1).^3)/n;
% Momento 4
matriz(:,6) = sum((x-x1).^4)/n;
% Cumulante 1
matriz(:,7) = matriz(:,3);
% Cumulante 2
matriz(:,8) = matriz(:,4)-matriz(:,3).^2;
% Cumulante 3
matriz(:,9) = matriz(:,5)-
((3.*matriz(:,4)).*matriz(:,3))+2.*matriz(:,3).^3;
% Cumulante 4
matriz(:,10) =
matriz(:,6)+(4.*matriz(:,5)).*matriz(:,3))-
```

Capítulo 10: Anexos

```
((3.*matriz(:,4)).^2)+((12.*matriz(:,4)).*(matriz(:,3).^2))-
(6.*matriz(:,3).^4);
    % Cumulante 6
    matriz(:,11) = (sum((x-
x1).^6))./(n.*(matriz(:,4).^3));
    % Skewness
    matriz(:,12) = matriz(:,5)./((sqrt(matriz(:,4))).^3);
    % Kurtosis
    matriz(:,13) = matriz(:,6)./((sqrt(matriz(:,4))).^4);
    % Am
    matriz(:,14) = sum(abs(x))./n;
    % Xp
    matriz(:,15) = max((abs(x)));
    % Xr
    matriz(:,16) = (sum(sqrt(abs(x)))./n).^2;
    % Factor de Cresta
    matriz(:,17) = matriz(:,15)./xrms';
    % Factor de forma
    matriz(:,18) = xrms'./matriz(:,14);

% Guardar datos

    if DESL==1
        save('DESARROLLADO1.mat','matriz')
    elseif DESL==2
        save('DESARROLLADO2.mat','matriz')
    end

%% REPRESENTACIÓN EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA. LO QUE REALMENTE
CALCULAMOS
%% ES LA DENSIDAD ESPECTRAL.
%Cálculo del PSD.
Hs = spectrum.periodogram('Hann');

%Espectro de la señal sin ruido.
    hs = psd(Hs, sumasenoidal(:,1), 'Fs', fs, 'NFFT', fs*tf,
'SpectrumType', 'onesided');
    dataespectrosumasenoidal1=[hs.Frequencies
10*log10(abs(hs.Data/max(hs.Data)))];

% %Espectro de la suma con ruido.

AA1=[];
for ii=1:nA

    hs = psd(Hs, suma(:,ii), 'Fs', fs, 'NFFT', fs*tf,
'SpectrumType', 'onesided');
    AA=[hs.Frequencies 10*log10(abs(hs.Data/max(hs.Data)))];
    AA1=[AA1,AA];

end

%%
%%Representación gráfica de los espectros calculados

% Gráfica comparativa de la señal sin ruido y con ruido
```

```

figure
subplot(2,1,1)
plot(dataespectrosumasenoidal1(:,1),
dataespectrosumasenoidal1(:,2))
xlabel('FRECUENCIA [Hz]')
ylabel('PSD [dB]')
axis([40 60 -250 0])
title('Suma sin ruido')
subplot(2,1,2)
plot(AA1(:,1), AA1(:,2))
xlabel('FRECUENCIA [Hz]')
ylabel('PSD [dB]')
axis([40 60 -250 0])
title('Suma con ruido y A=0.1')

% Representación gráfica del PSD de la señal con ruido dividido en
bloques
% de 3
ll=1;
while ll<=(nA*2)
    if ll<(nA*2)
        figure
        subplot(3,1,1)
        plot(AA1(:,ll), AA1(:,ll+1))
        xlabel('FRECUENCIA [Hz]')
        ylabel('PSD [dB]')
        axis([40 60 -150 0])
        title('Suma con ruido A1')
        end
        if (ll+2)<(nA*2)
            subplot(3,1,2)
            plot(AA1(:,ll+2), AA1(:,ll+3))
            xlabel('FRECUENCIA [Hz]')
            ylabel('PSD [dB]')
            axis([40 60 -150 0])
            title('Suma con ruido A2')
            end
            if (ll+4)<(nA*2)
                subplot(3,1,3)
                plot(AA1(:,ll+4), AA1(:,ll+5))
                xlabel('FRECUENCIA [Hz]')
                ylabel('PSD [dB]')
                axis([40 60 -150 0])
                title('Suma con ruido A3')
                end
                ll=ll+6;
    end

%%
%Realizamos la Transformada de Fourier de la señal.
aaaa=nextpow2(fs*tf)
NFFT = 2^nextpow2(fs*tf)
f = fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);
Ys1 = fft(s1,NFFT)/(fs*tf);
Ys2 = fft(s2,NFFT)/(fs*tf);
Ys3 = fft(s3,NFFT)/(fs*tf);

```

```

Yr = fft(ruido,NFFT)/(fs*tf);
Ys = fft(suma,NFFT)/(fs*tf);

h3 = figure;
subplot(4,1,1)
plot(f,2*abs(Ys1(1:NFFT/2+1)))
xlabel('FRECUENCIA [Hz]')
ylabel('Amplitud del Espectro [A]')
axis([40 60 0 3])
title('s1')

subplot(4,1,2)
plot(f,2*abs(Ys2(1:NFFT/2+1)))
xlabel('FRECUENCIA [Hz]')
ylabel('Amplitud del Espectro [A]')
axis([40 60 0 3])
title('s2')

subplot(4,1,3)
plot(f,2*abs(Ys3(1:NFFT/2+1)))
xlabel('FRECUENCIA [Hz]')
ylabel('Amplitud del Espectro [A]')
axis([40 60 0 3])
title('s3')

subplot(4,1,4)
plot(f,2*abs(Yr(1:NFFT/2+1)))
xlabel('FRECUENCIA [Hz]')
ylabel('Amplitud del Espectro [A]')
axis([40 60 0 3])
title('ruido')

figure
plot(f,2*abs(Ys(1:NFFT/2+1)))
xlabel('FRECUENCIA [Hz]')
ylabel('Amplitud del Espectro [A]')
axis([40 60 0 3])
title('suma')

```

10.1.4. Código motor con fallo TOTAL

```

%Generación de señales aleatorias. RUBÉN DE LA ROSA LÓPEZ
close all
clear all
clc;
rng('shuffle');

%Declaración de variables.
%Valor del deslizamiento que queremos utilizar.DESL=1
deslizamiento bajo;
%DESL=2 deslizamiento alto
DESL=1;

nA=100;%Número de amplitudes que queramos generar.

% VALORES ESTADÍSTICOS
Smedia=[0.0302 0.0492];

```

Capítulo 10: Anexos

```
Sdesvstd=[0.0003 0.0016];

%Amplitud de LSH y USH media y las desviaciones estándar de cada
una de
%ellas
aa1=1.9*2^(1/2);
A1=aa1*ones(1,nA)';%Fundamental

LSHamp=3.8301e-3;
USHamp=4.4553e-3;
LSHdesv=2.0561e-3;
USHdesv=2.6131e-3;

%DESLIZAMIENTOS UTILIZADOS.

%Generación del vector de tiempos para el muestreo de la señal.
fs=5e3;%Frecuencia de muestreo.
ti=0;%Tiempo inicial del estudio.
tf=10;%Tiempo de finalización del estudio.
At=1/fs;%Incremento de tiempos
t=ti:At:(tf-At);%Generación de los tiempos de muestreo

%Amplitudes.
f1=50;%Frecuencia de la onda fundamental que será de 50Hz.
%Los ángulos debmos expresarlos en radianes(S.I.)
gr1=0;%Expresión en grados.
desf1=(gr1*2*pi)/360;%Desfase en radianes de la onda fundamental

%Generación de la matriz vacía
matriz=zeros(100,18);

% Generamos dos amplitudes aleatorias a partir de una media y una
% desviación estándar.Gemeración del número fijado de USH y LSH

inf1=LSHamp-(3*LSHdesv);%LSH, para la generación de los datos
aleatorios en torno a un intervalo
sup1=LSHamp+(3*LSHdesv);
inf2=USHamp-(3*USHdesv);%USH
sup2=USHamp+(3*USHdesv);

for l=1:nA
    %LSH
    A2=LSHamp.*(ones(1,1)+randn(1,1));
    f2=f1*(1-(2*Smedia(DESL)));%Expresado en Hz.
    gr2=0;%Expresión en grados de la señal 2.
    desf2=(gr2*2*pi)/360;%Conversión a radianes(S.I.)

    %USH
    A3=USHamp.*(ones(1,1)+randn(1,1));
    f3=f1*(1+(2*Smedia(DESL)));%Expresado en Hz.
    gr3=0;%Expresión en grados de la señal 3.
    desf3=(gr3*2*pi)/360;%Conversión a radianes(S.I.)
end
```

Capítulo 10: Anexos

```
s1=(A1*sin((2*pi*f1*t)+desf1))';%Señal fundamental
s2=(A2*sin((2*pi*f2*t)+desf2))';%LSH1
s3=(A3*sin((2*pi*f3*t)+desf3))';%USH1

%Generamos independientemente la señal de ruido. Esta función
nos crea una
%matriz de n*m de dimension y unos determinados decibelios.

ampruido=0.1*aa1*rand(nA);%Amplitud de la señal de ruido.
ruido=(randn(nA,length(t)))';
%Bucle para la generación también de las amplitudes de ruido
de manera
%aleatoria.
for j=1:nA,
    ampruido = 0.1*aa1*rand(1);
    ruido(:,j) = ruido(:,j)*ampruido;
end

sumasenoidal=s1+s2+s3;
suma=sumasenoidal+ruido;

%Cálculo del resto de estadísticos

matriz(:,1)=A2;
matriz(:,2)=A3;

% La variable x contiene la corriente en el dominio del
tiempo

x=sumasenoidal;
n = size(x,1);
% Calculo de estadísticos

xrms = sqrt(sum((x.^2),1)/size((x),1)); %rms
x1=mean(x);%Media de la matriz de puntos
x1=ones(5e4,1)*x1;
% Momento 1
matriz(:,3) = sum(x)./n;
% Momento 2
matriz(:,4) = sum((x-x1).^2)/n;
% Momento 3
matriz(:,5) = sum((x-x1).^3)/n;
% Momento 4
matriz(:,6) = sum((x-x1).^4)/n;
% Cumulante 1
matriz(:,7) = matriz(:,3);
% Cumulante 2
matriz(:,8) = matriz(:,4)-matriz(:,3).^2;
% Cumulante 3
matriz(:,9) = matriz(:,5)-
((3.*matriz(:,4)).*matriz(:,3))+2.*matriz(:,3).^3;
% Cumulante 4
matriz(:,10) =
matriz(:,6)+(4.*matriz(:,5)).*matriz(:,3))-
((3.*matriz(:,4)).^2)+(12.*matriz(:,4)).*(matriz(:,3).^2))-
(6.*matriz(:,3).^4);
```

```

        % Cumulante 6
        matriz(:,11) = (sum((x-
x1).^6))./(n.*(matriz(:,4).^3));
        % Skewness
        matriz(:,12) = matriz(:,5)./((sqrt(matriz(:,4))).^3);
        % Kurtosis
        matriz(:,13) = matriz(:,6)./((sqrt(matriz(:,4))).^4);
        % Am
        matriz(:,14) = sum(abs(x))./n;
        % Xp
        matriz(:,15) = max((abs(x)));
        % Xr
        matriz(:,16) = (sum(sqrt(abs(x)))./n).^2;
        % Factor de Cresta
        matriz(:,17) = matriz(:,15)./xrms';
        % Factor de forma
        matriz(:,18) = xrms'./matriz(:,14);

% Guardar datos

    if DESL==1
        save('TOTAL1.mat','matriz')
    elseif DESL==2
        save('TOTAL2.mat','matriz')
    end

%% REPRESENTACIÓN EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA. LO QUE REALMENTE
CALCULAMOS
%% ES LA DENSIDAD ESPECTRAL.
%Cálculo del PSD.
Hs = spectrum.periodogram('Hann');

%Espectro de la señal sin ruido.
    hs = psd(Hs, sumasenoidal(:,1), 'Fs', fs, 'NFFT', fs*tf,
'SpectrumType', 'onesided');
    dataespectrosumasenoidal1=[hs.Frequencies
10*log10(abs(hs.Data/max(hs.Data)))];

% %Espectro de la suma con ruido.

AA1=[];
for ii=1:nA

    hs = psd(Hs, suma(:,ii), 'Fs', fs, 'NFFT', fs*tf,
'SpectrumType', 'onesided');
    AA=[hs.Frequencies 10*log10(abs(hs.Data/max(hs.Data)))];
    AA1=[AA1,AA];

end

%%
%Representación gráfica de los espectros calculados

% Gráfica comparativa de la señal sin ruido y con ruido
figure
subplot(2,1,1)

```

```

plot(dataespectrosumasenoidal1(:,1),
dataespectrosumasenoidal1(:,2))
xlabel('FRECUENCIA [Hz]')
ylabel('PSD [dB]')
axis([40 60 -250 0])
title('Suma sin ruido')
subplot(2,1,2)
plot(AA1(:,1), AA1(:,2))
xlabel('FRECUENCIA [Hz]')
ylabel('PSD [dB]')
axis([40 60 -250 0])
title('Suma con ruido y A=0.1')

% Representación gráfica del PSD de la señal con ruido dividido en
bloques
% de 3
ll=1;
while ll<=(nA*2)
    if ll<(nA*2)
        figure
        subplot(3,1,1)
        plot(AA1(:,ll), AA1(:,ll+1))
        xlabel('FRECUENCIA [Hz]')
        ylabel('PSD [dB]')
        axis([40 60 -150 0])
        title('Suma con ruido A1')
        end
        if (ll+2)<(nA*2)
            subplot(3,1,2)
            plot(AA1(:,ll+2), AA1(:,ll+3))
            xlabel('FRECUENCIA [Hz]')
            ylabel('PSD [dB]')
            axis([40 60 -150 0])
            title('Suma con ruido A2')
            end
            if (ll+4)<(nA*2)
                subplot(3,1,3)
                plot(AA1(:,ll+4), AA1(:,ll+5))
                xlabel('FRECUENCIA [Hz]')
                ylabel('PSD [dB]')
                axis([40 60 -150 0])
                title('Suma con ruido A3')
                end
                end
                ll=ll+6;

end

%%
%Realizamos la Transformada de Fourier de la señal.
aaaa=nextpow2(fs*tf)
NFFT = 2^nextpow2(fs*tf)
f = fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);
Ys1 = fft(s1,NFFT)/(fs*tf);
Ys2 = fft(s2,NFFT)/(fs*tf);
Ys3 = fft(s3,NFFT)/(fs*tf);
Yr = fft(ruido,NFFT)/(fs*tf);
Ys = fft(suma,NFFT)/(fs*tf);

```

```

h3 = figure;
subplot(4,1,1)
plot(f,2*abs(Ys1(1:NFFT/2+1)))
xlabel('FRECUENCIA [Hz]')
ylabel('Amplitud del Espectro [A]')
axis([40 60 0 3])
title('s1')

subplot(4,1,2)
plot(f,2*abs(Ys2(1:NFFT/2+1)))
xlabel('FRECUENCIA [Hz]')
ylabel('Amplitud del Espectro [A]')
axis([40 60 0 3])
title('s2')

subplot(4,1,3)
plot(f,2*abs(Ys3(1:NFFT/2+1)))
xlabel('FRECUENCIA [Hz]')
ylabel('Amplitud del Espectro [A]')
axis([40 60 0 3])
title('s3')

subplot(4,1,4)
plot(f,2*abs(Yr(1:NFFT/2+1)))
xlabel('FRECUENCIA [Hz]')
ylabel('Amplitud del Espectro [A]')
axis([40 60 0 3])
title('ruido')

figure
plot(f,2*abs(Ys(1:NFFT/2+1)))
xlabel('FRECUENCIA [Hz]')
ylabel('Amplitud del Espectro [A]')
axis([40 60 0 3])
title('suma')

```

10.1.5. Representación de los estadísticos de ORDEN SUPERIOR

```

clc
clear all
close all

%Cargamos las matrices con los diferentes deslizamientos y los
almacenamos
%en nuevas variables.

%% Cargar los datos con la dirección donde se encuentren nuestros
archivos
% Sano
data1=load('F:\TFG\SANO\Ruido Alto\SANO1.mat');
data2=load('F:\TFG\SANO\Ruido Alto\SANO2.mat');

% Incipiente
data3=load('F:\TFG\INCIPIENTE\Ruido Alto\INCIPIENTE1.mat');

```

Capítulo 10: Anexos

```
data4=load('F:\TFG\INCIPIENTE\Ruido Alto\INCIPIENTE2.mat');

% Desarrollado
data5=load('F:\TFG\DESARROLLADO\Ruido Alto\DESARROLLADO1.mat');
data6=load('F:\TFG\DESARROLLADO\Ruido Alto\DESARROLLADO2.mat');

% Total
data7=load('F:\TFG\TOTAL\Ruido Alto\TOTAL1.mat');
data8=load('F:\TFG\TOTAL\Ruido Alto\TOTAL2.mat');

% CAMBIO DE ESTRUCTURA A CELDA

% SANO
data1 = struct2cell(data1);
data2 = struct2cell(data2);
% INCIPIENTE
data3 = struct2cell(data3);
data4 = struct2cell(data4);
%DESARROLLADO
data5 = struct2cell(data5);
data6 = struct2cell(data6);
%TOTAL
data7 = struct2cell(data7);
data8 = struct2cell(data8);

% CAMBIO DE CELDA A MATRIZ
% SANO
data1 = cell2mat(data1);
data2 = cell2mat(data2);
% INCIPIENTE
data3 = cell2mat(data3);
data4 = cell2mat(data4);
% DESARROLLADO
data5 = cell2mat(data5);
data6 = cell2mat(data6);
%TOTAL
data7 = cell2mat(data7);
data8 = cell2mat(data8);

%%
%Distribución de los estadísticos: MOMENTO 1:3 ;MOMENTO 2:4
;MOMENTO 3:5
%;MOMENTO 4:6 ;CUMULANTE 1:7 ;CUMULANTE 2:8 ;CUMULANTE 3:9
;CUMULANTE 4:10
%;CUMULANTE 6:11 ;SKEWNESS:12 ;KURTOSIS:13 ;AM:14 ;XP:15 ;XR:16
;FACTOR DE
%CRESTA:17 ;FACTOR DE FORMA:18

close all
est=9;% Número de la columna del estadístico que queremos
analizar.

% SANO
XS=[data1(:,est),data2(:,est)];
SS=[0.0305 0.0465];
```

```

% INCIPIENTE
XI=[data3(:,est),data4(:,est)];
SI=[0.0318 0.0502];

% DESARROLLADO
XD=[data5(:,est),data6(:,est)];
SD=[0.0278 0.0441];

% TOTAL
XT=[data7(:,est),data8(:,est)];
ST=[0.0302 0.0492];

ESTADSEVER=[XS,XI,XD,XT];
DESLIZAMIENTOS=[SS,SI,SD,ST];

ESTADBAJO=[ESTADSEVER(:,1),ESTADSEVER(:,3),ESTADSEVER(:,5),ESTADSEVER(:,7)];
ESTADALTO=[ESTADSEVER(:,2),ESTADSEVER(:,4),ESTADSEVER(:,6),ESTADSEVER(:,8)];
DESLIZBAJO=char('R1:SANO','R2:INCIP.','R3:DESAR.','R4:TOTAL');
%DESLIZBAJO=[DESLIZAMIENTOS(1),DESLIZAMIENTOS(3),DESLIZAMIENTOS(5),DESLIZAMIENTOS(7)];
DESLIZALTO=[DESLIZAMIENTOS(2),DESLIZAMIENTOS(4),DESLIZAMIENTOS(6),DESLIZAMIENTOS(8)];

MAX=max(ESTADSEVER);%Valor máximo del estadístico
MIN=min(ESTADSEVER);%Valor mínimo del estadístico
maxS=max(DESLIZAMIENTOS);%Valor máximo de los deslizamientos
minS=min(DESLIZAMIENTOS);%Valor mínimo de los deslizamientos

MAX=max(MAX);
MIN=min(MIN);
maxS=max(maxS);
minS=min(minS);

figure;
subplot(1,2,1)
boxplot(ESTADBAJO,DESLIZBAJO)
title('DESLIZAMIENTO BAJO')
if est==3
    xlabel('SEVERIDAD')
    ylabel('MOMENTO 1')
elseif est==4
    xlabel('SEVERIDAD')
    ylabel('MOMENTO 2')
elseif est==5
    xlabel('SEVERIDAD')
    ylabel('MOMENTO 3')
elseif est==6
    xlabel('SEVERIDAD')
    ylabel('MOMENTO 4')
elseif est==7
    xlabel('SEVERIDAD')
    ylabel('CUMULANTE 1')
elseif est==8

```

```

        xlabel('SEVERIDAD')
        ylabel('CUMULANTE 2')
elseif est==9
        xlabel('SEVERIDAD')
        ylabel('CUMULANTE 3')
elseif est==10
        xlabel('SEVERIDAD')
        ylabel('CUMULANTE 4')
elseif est==11
        xlabel('SEVERIDAD')
        ylabel('CUMULANTE 6')
elseif est==12
        xlabel('SEVERIDAD')
        ylabel('SKEWNESS')
elseif est==13
        xlabel('SEVERIDAD')
        ylabel('CURTOSIS')
elseif est==14
        xlabel('SEVERIDAD')
        ylabel('AM')
elseif est==15
        xlabel('SEVERIDAD')
        ylabel('XP')
elseif est==16
        xlabel('SEVERIDAD')
        ylabel('XR')
elseif est==17
        xlabel('SEVERIDAD')
        ylabel('FACTOR DE CRESTA')
elseif est==18
        xlabel('SEVERIDAD')
        ylabel('FACTOR DE FORMA')
end
v = axis;
axis([v(1) v(2) MIN MAX])

subplot(1,2,2)
boxplot(ESTADALTO, DESLIZBAJO)
title('DESLIZAMIENTO ALTO')
if est==3
        xlabel('SEVERIDAD')
        ylabel('MOMENTO 1')
elseif est==4
        xlabel('SEVERIDAD')
        ylabel('MOMENTO 2')
elseif est==5
        xlabel('SEVERIDAD')
        ylabel('MOMENTO 3')
elseif est==6
        xlabel('SEVERIDAD')
        ylabel('MOMENTO 4')
elseif est==7
        xlabel('SEVERIDAD')
        ylabel('CUMULANTE 1')
elseif est==8
        xlabel('SEVERIDAD')
        ylabel('CUMULANTE 2')
elseif est==9
        xlabel('SEVERIDAD')

```

```

        ylabel('CUMULANTE 3')
elseif est==10
    xlabel('SEVERIDAD')
    ylabel('CUMULANTE 4')
elseif est==11
    xlabel('SEVERIDAD')
    ylabel('CUMULANTE 6')
elseif est==12
    xlabel('SEVERIDAD')
    ylabel('SKEWNESS')
elseif est==13
    xlabel('SEVERIDAD')
    ylabel('CURTOSIS')
elseif est==14
    xlabel('SEVERIDAD')
    ylabel('AM')
elseif est==15
    xlabel('SEVERIDAD')
    ylabel('XP')
elseif est==16
    xlabel('SEVERIDAD')
    ylabel('XR')
elseif est==17
    xlabel('SEVERIDAD')
    ylabel('FACTOR DE CRESTA')
elseif est==18
    xlabel('SEVERIDAD')
    ylabel('FACTOR DE FORMA')
end
v = axis;
axis([v(1) v(2) MIN MAX])

% GENERACIÓN DEL DIAGRAMA DE DISPERSIÓN
% SANO
figure;
%SANO
SS1=plot(ones(100,1)*SS(1),XS(:,1),'g o');
hold on
SS2=plot(ones(100,1)*SS(2),XS(:,2),'g o');
%INCIPIENTE
SI1=plot(ones(100,1)*SI(1),XI(:,1),'c +');
SI2=plot(ones(100,1)*SI(2),XI(:,2),'c +');
% DESARROLLADO
SD1=plot(ones(100,1)*SD(1),XD(:,1),'b *');
SD2=plot(ones(100,1)*SD(2),XD(:,2),'b *');
% TOTAL
ST1=plot(ones(100,1)*ST(1),XT(:,1),'r X');
ST2=plot(ones(100,1)*ST(2),XT(:,2),'r X');

title('Diagrama de dispersión')

if est==3
    ylabel('MOMENTO 1')
elseif est==4
    ylabel('MOMENTO 2')
elseif est==5
    ylabel('MOMENTO 3')

```

```

elseif est==6
    ylabel('MOMENTO 4')
elseif est==7
    ylabel('CUMULANTE 1')
elseif est==8
    ylabel('CUMULANTE 2')
elseif est==9
    ylabel('CUMULANTE 3')
elseif est==10
    ylabel('CUMULANTE 4')
elseif est==11
    ylabel('CUMULANTE 6')
elseif est==12
    ylabel('SKEWNESS')
elseif est==13
    ylabel('CURTOSIS')
elseif est==14
    ylabel('AM')
elseif est==15
    ylabel('XP')
elseif est==16
    ylabel('XR')
elseif est==17
    ylabel('FACTOR DE CRESTA')
elseif est==18
    ylabel('FACTOR DE FORMA')
end
xlabel('DESLIZAMIENTO');

```