



Universidad Politécnica de Valencia

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del diseño
Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

Trabajo de fin de grado

Aplicación de técnicas de mantenimiento
predictivo en motores de alterna en una industria
de tratamiento de acero

Autor:
Jorge Algarra Íñiguez

Tutora:
D^a. María Pilar Molina Palomares

Cotutor:
D. Jose Alfonso Antonino Daviu

Índice:

1. Antecedentes.....	5
2. Objetivos.....	6
3. Introducción.....	7
3.1. El mantenimiento industrial.....	7
3.1.1. Tipos de mantenimiento.....	8
3.2. Máquinas eléctricas rotativas.....	13
4. Técnicas de mantenimiento predictivo en motores eléctricos.....	17
4.1. Análisis de vibraciones.....	17
4.2. Análisis de temperaturas.....	18
4.3. Análisis de corrientes estatoricas.....	18
4.3.1. Excentricidades en el entrehierro.....	19
4.3.2. Rotura de barras.....	20
5. Descripción de los motores analizados.....	22
5.1. Motor 1.	22
5.2. Motor 2.....	23
5.3. Motor 3.....	23
5.4. Motor 4.....	24
5.5. Motor 5.....	25
5.6. Motor 6.....	26
5.7. Motor 7.....	26

5.8.	Motor 8.....	27
6.	Descripción de las medidas efectuadas.....	29
6.1.	Termografía infrarroja.....	29
6.2.	Mediciones de Corriente.....	30
7.	Análisis de corrientes estatoricas.....	32
7.1.	Procedimiento.....	32
7.2.	Motor 1.....	36
7.3.	Motor 2.....	41
7.4.	Motor 3.....	46
7.5.	Motor 4.....	51
7.6.	Motor 5.....	55
7.7.	Motor 6.....	61
7.8.	Motor 7.....	66
7.9.	Motor 8.....	72
7.10.	Conclusiones del análisis de corrientes.....	78
8.	Termografía infrarroja.....	81
9.	Conclusiones.....	84
10.	Bibliografía.....	85
11.	Presupuesto.....	86
	ANEXO: FICHA TÉCNICA EQUIPOS UTILIZADOS.....	87

1. Antecedentes.

El presente Trabajo de Fin de Grado constituye la culminación de los estudios del autor en el Grado en Ingeniería en Electrónica Industrial y Automática.

El trabajo ha surgido dado el interés que ha cobrado en los últimos años el campo del mantenimiento industrial y, más concretamente, el área del mantenimiento predictivo de motores eléctricos industriales. Cada vez es mayor el interés de las empresas en conocer de una forma más precisa el estado de los motores eléctricos (principalmente los de gran potencia) que operan en sus instalaciones, para una pronta detección de posibles averías, la cual permita realizar labores de mantenimiento con suficiente antelación. Esta necesidad viene dada por el alto coste que podría suponer para la empresa la parada de una línea clave y la reparación de estos motores. Además, con este conocimiento se puede evitar la necesidad de tener un gran *stock* almacenado, puesto que se podría conocer realmente cuando es necesario tener piezas de sustitución y cuáles.

Este proyecto es fruto del interés en aplicar técnicas actuales de mantenimiento predictivo a un caso real. En este caso, se ha aprovechado las facilidades concedidas por la empresa Ferrodisa S.A. para efectuar una serie de medidas en diferentes motores eléctricos que operan en una de sus plantas, de cara a la posterior aplicación de dos técnicas concretas: análisis de corrientes y termografía infrarroja. Se pretende, con este caso aplicado, familiarizarse con la aplicación de estas dos técnicas de mantenimiento predictivo, que están siendo utilizadas de forma creciente en el ámbito industrial para la determinación de la condición de motores eléctricos.

2. Objetivos.

El principal objetivo del presente Trabajo fin de Grado consiste en la aplicación de dos técnicas de mantenimiento predictivo para la determinación de la condición de diversos motores eléctricos de inducción que operan en una instalación real. Las técnicas aplicadas en el presente trabajo son: la técnica de análisis de corrientes y la termografía infrarroja.

Este objetivo general se ha desglosado en una serie de objetivos específicos que se han abordado en el trabajo, como son:

- Repasar las bases y distintas tipologías de mantenimiento industrial.
- Revisar las técnicas más usuales para el mantenimiento predictivo de motores eléctricos
- Conocer los fundamentos de las técnicas de análisis de corrientes y termografía infrarroja.
- Efectuar las medidas en planta para aplicar las técnicas de análisis de corrientes y termografía infrarroja a diferentes motores de inducción operando en una instalación real.
- Analizar las señales capturadas para la aplicación de la técnica de análisis de corrientes.
- Interpretar los resultados obtenidos y determinar, en base a ellos, la condición de cada motor analizado.

El trabajo se ha centrado en motores asíncronos (de inducción) con rotor de jaula, por ser los más ampliamente extendidos en el ámbito industrial. Las máquinas consideradas accionaban diferentes cargas, operaban en procesos de distinta naturaleza y operaban en diferentes regímenes de funcionamiento.

La técnica de análisis de corrientes se ha aplicado como herramienta principal de diagnóstico. Su aplicación ha requerido, no solamente la familiarización con el proceso de captura de las señales necesarias, sino también el manejo de los programas necesarios, basados en la aplicación de la Transformada de Fourier, para efectuar los análisis de dichas señales.

La técnica de termografía infrarroja se ha considerado como herramienta complementaria de apoyo. Su aplicación radica en mayor medida en la experiencia del termógrafo y requiere de comparación con medidas previas para una interpretación más rigurosa de sus resultados.

3. Introducción.

En este capítulo se pretende profundizar en el tema principal del trabajo, el mantenimiento industrial y en sus diferentes tipos, así como revisar el funcionamiento básico del elemento al cual le será aplicado, el motor eléctrico de inducción.

Se procederá por tanto a realizar una descripción del porqué de la necesidad de aplicar técnicas de mantenimiento en la industria moderna y cuál es el motivo de que la investigación y desarrollo de nuevas técnicas de mantenimiento sea una gran inversión dentro de la industria, que pueda marcar el nivel de competitividad final dentro de una empresa.

3.1. El mantenimiento industrial:

El mantenimiento industrial nace de la necesidad dentro de la industria competitiva actual de asegurarse el correcto funcionamiento de sus instalaciones de producción, el cual en caso de fallo grave de una máquina o, incluso, un componente de alguna de estas puede suponer una parada que conllevaría pérdidas económicas para la empresa. Esto podría ser especialmente grave en el caso de que además de una parada supusiera también la sustitución de una máquina especialmente cara, la cual podría llegar a evitarse en el caso de un correcto mantenimiento.

Es por esto que hay un creciente interés en la monitorización y control de la información que se puede obtener de la vigilancia continua o periódica del funcionamiento de una máquina como se puede saber realmente el estado interno de ésta, pudiendo de este modo ser previstos una gran cantidad de fallos: rotura y agrietamiento de barras y anillos de cortocircuito, excentricidades estáticas y dinámicas, desequilibrios y desalineaciones mecánicas, fallos en los cojinetes, pérdida en alguna fase, degradación de los aislantes, etc. De este modo, se evita la aparición de averías que pudieran resultar peligrosas para el personal o la producción. Esto lleva a una reducción de los costes y un incremento en la disponibilidad de la planta y la calidad de la producción.

Se ha podido comprobar que el mantenimiento es de gran importancia para la industria a la hora de apoyar al proceso productivo y que en caso de ser relegado a una posición secundaria separado de la producción y lejos de la toma de decisiones, repercute directamente sobre los beneficios y empeora la calidad del producto.

El desarrollo de las nuevas tecnologías como la electrónica y la informática han implicado el desarrollo de nuevos dispositivos para el análisis de máquinas en tiempo real, los cuales permiten la aplicación del llamado mantenimiento predictivo.

En máquinas eléctricas pueden ocurrir fallos tanto de tipo eléctrico como de tipo mecánico o una combinación de ambos. La mayoría de estos fallos suelen estar relacionados con el ambiente o ciclo de trabajo de la máquina y ocurren durante algún proceso transitorio, que es cuando los esfuerzos mecánicos y eléctricos a los que está sometida son mayores. De estos transitorios el más severo que una máquina eléctrica experimenta suele ser el que tiene lugar en los procesos de arranque o reenganche de

la alimentación, de modo que muchos fallos son debidos a que las máquinas sufren repetidos arranques y trabajan durante cortos espacios de tiempo.

Desde el punto de vista ambiental, puede haber problemas térmicos y de contaminación. La máquina puede estar trabajando demasiado caliente por problemas de refrigeración, condiciones ambientales severas o estar trabajando por encima de sus posibilidades de diseño.

El modo en el que los fallos pueden aparecer en una máquina eléctrica depende del tipo de máquina en cuestión, sin embargo, suele haber una serie de mecanismos de fallo comunes a todas las máquinas. También se da el hecho de que antes de cada avería suele haber una serie de evidencias que pueden ser detectadas e identificadas, pudiendo así evitarse un fallo repentino mediante un diagnóstico temprano.

A la hora de prevenir averías, existen una serie de influencias que pueden extrapolarse a casi cualquier tipo de avería y en casi cualquier tipo de industria que deben de ser tenidas en cuenta a la hora de indagar sobre el origen, evolución y posible causa de una avería.

- **Influencias intrínsecas:** como errores de proyecto, errores de fabricación, errores de montaje, esfuerzos residuales, fallos en el control de calidad o la fiabilidad de los datos empleados para el diseño.
- **Influencias aleatorias:** como condiciones ambientales, utilización indebida o mala especificación, mantenimiento inadecuado, control del proceso ineficaz o ciclos de carga.
- **Desgaste y envejecimiento:** como régimen de funcionamiento, régimen de mantenimiento, régimen técnico, condiciones tribológicas, propiedades de los materiales o medio de trabajo.

3.1.1. Tipos de Mantenimiento:

Se pueden distinguir diversos tipos de mantenimiento, dependiendo de su forma de ejecución y sus características particulares, y pueden ser clasificarse atendiendo a distintos criterios. Aquí van a ser divididos en tres grupos: correctivo, preventivo y predictivo.

Mantenimiento Correctivo:

Este es el modelo de mantenimiento más común en la pequeña y mediana empresa, además de ser el más antiguo de estos tres tipos, aunque hoy en día impera cada vez más un mantenimiento predictivo cuyos resultados a largo plazo son más eficaces. El mantenimiento correctivo se basa en la intervención en caso de avería, manifestada por el colapso de algún equipo o instalación que conlleva la interrupción súbita de la producción.

Pueden distinguirse dos modos de enfocar el mantenimiento correctivo principalmente:

- Eliminando sólo la avería, en este caso se efectúa una reparación de emergencia en la que solamente se realizará la sustitución de aquellos elementos averiados, sin indagar sobre las posibles causas de dicha avería. De esta forma sólo se resuelve el problema de forma temporal y se corre el riesgo de un pronto retorno de la avería.
- En la otra posibilidad se lleva a cabo la eliminación de la avería así como de las causas que la produjeron. Esta segunda opción es la que proporciona soluciones más duraderas y precisa de la participación de técnicos y conlleva un mayor tiempo de intervención. Es por esto que suele realizarse en las paradas programadas.

Este tipo de mantenimiento presenta algunos inconvenientes que deben ser tenidos en cuenta como las interrupciones impredecibles y la reducción de la vida útil de equipos e instalaciones. También requiere de un mayor *stock* almacenado con diferentes repuestos y, en caso de elementos de difícil adquisición, puede traer consigo un tiempo de espera.

Mantenimiento Preventivo:

Esta forma de mantenimiento surge de la necesidad de remediar los inconvenientes de mantenimiento correctivo. En este método se procede a la sustitución de las piezas o partes del sistema que pudieran causar una avería de manera periódica, determinada mediante criterios estadísticos. Por lo que la sustitución de un elemento se producirá después de un tiempo pre-programado, o al producirse una avería, en caso de que esta tuviese lugar antes de la fecha estipulada.

Debido a que es imposible saber con exactitud cuándo se va a producir una avería y, de esta forma, realizar el reemplazo justo antes de ésta, el cambio tendrá lugar antes del fin de la vida útil de la pieza en cuestión, causando de este modo un evidente desaprovechamiento de la reserva de los equipos. Es por esto que es necesario tener un adecuado criterio basado en análisis y estadísticas fiables para poder determinar los mejores tiempos de intervención, con el fin de evitar pérdidas para la empresa.

En todo plan de mantenimiento preventivo se pueden distinguir una serie de actividades características:

- Limpieza, ajustes y revisiones periódicas.
- Control de la lubricación.
- Reparación y recambio de los puntos más sensibles del sistema.
- Conservación de equipos y protección contra los agentes ambientales.
- Reparación y recambios planificados.

La principal ventaja de esta forma de mantenimiento es la reducción del número de paradas eventuales por avería derivada de la introducción de una periodicidad en el control y reparación del sistema.

Sin embargo, también se dan ciertas desventajas derivadas de la dificultad de estimar correctamente los tiempos necesarios para realizar las intervenciones, se corre el riesgo de desaprovechar parte de la vida útil de una pieza en caso de una sustitución demasiado temprana. Por otro lado, en caso de que la programación del preventivo

tenga un retraso con respecto a la avería, se trataría de un mantenimiento correctivo que acarrearía los inconvenientes anteriormente citados de este.

Es por estos últimos motivos que se puede llegar a la conclusión de que, para una adecuada aplicación del mantenimiento preventivo, se requiere del uso de modelos que optimicen su programación, ya que los tiempos recomendados por el fabricante pueden no ser los más beneficiosos para la empresa en todos los casos.

Para determinar los mejores y más adecuados tiempos de intervención se han usado siempre modelos estadísticos que determinaban el momento oportuno para interrumpir el funcionamiento de un equipo y realizar las labores de mantenimiento. Se pensaba que los sistemas una vez revisados tenían una probabilidad de avería acumulada idéntica a la de los nuevos sistemas; por tanto, se consideraba que el ciclo de vida de los equipos se reiniciaba con este cambio.

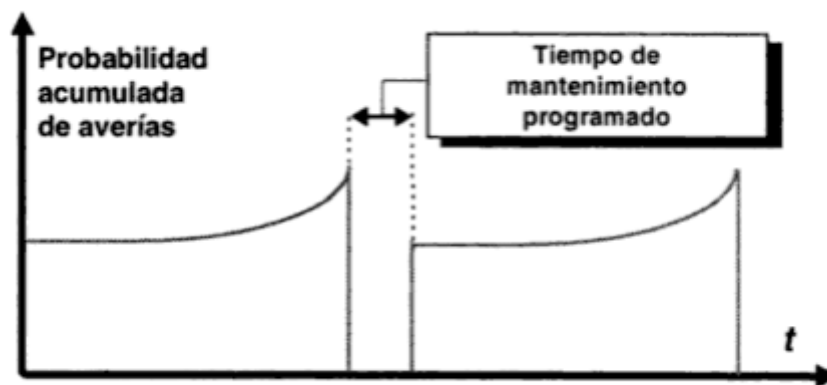


Fig. 1: Evolución de la probabilidad de avería con el tiempo según el modelo preventivo. [Fuente: 1]

Este razonamiento se ha demostrado cierto sólo para aquellas máquinas sencillas, y en algunos sistemas más complejos pero con fallos muy característicos. Sin embargo, durante los últimos treinta años se ha probado que en caso de sistemas complejos, esta conclusión no es válida y, por tanto se han desarrollado otros modelos más exactos para múltiples equipos eléctricos y mecánicos.

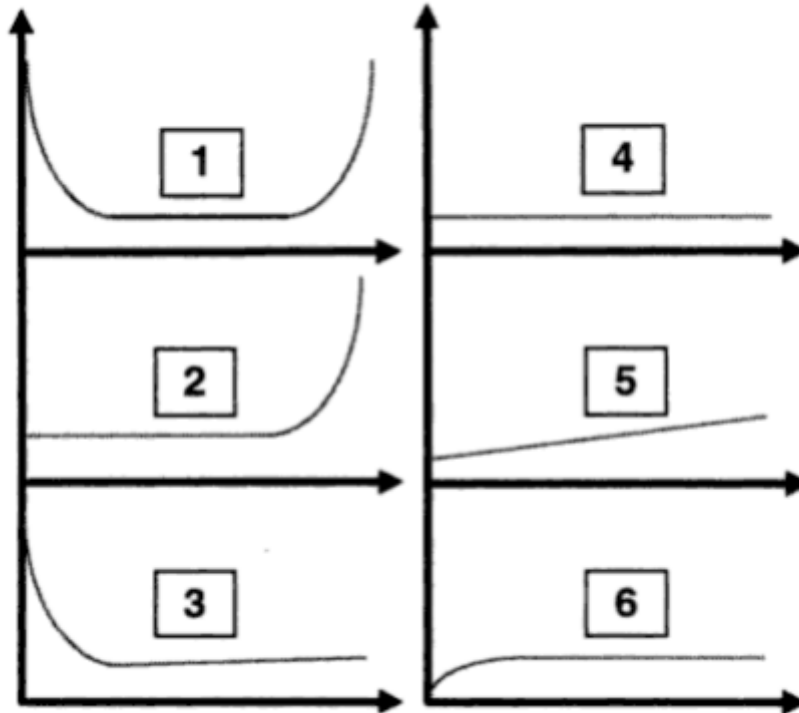


Fig. 2: Diferentes modelos probabilísticos de avería en función del tiempo. [Fuente: 1]

- *Modelo 1:* este se divide en tres zonas; en la primera zona el riesgo de fallo es muy alto y corresponde al período en el que el equipo está recién instalado, es más apreciable en los sistemas de tipo mecánico en los que los procesos tribológicos son determinantes, en los equipos eléctricos este período es casi inapreciable; la segunda zona se corresponde con la vida útil del equipo y el nivel de averías se puede considerar constante, produciéndose los fallos de forma accidental; por último, la tercera zona representa la fase de mayor actividad del mantenimiento debido a que el desgaste por el uso incrementa la posibilidad de avería.
- *Modelo 2:* presenta una primera etapa donde la probabilidad de que se produzca un fallo es prácticamente constante, finalizando con un período de desgaste durante el que el número de averías se incrementa.
- *Modelo 3:* empieza con una tasa elevada que se reduce drásticamente hasta un valor mínimo para volver a incrementarse de forma constante y lenta.
- *Modelo 4:* presenta una probabilidad de fallo constante a cualquier edad; en este modelo las averías se producen de forma aleatoria y no dependen del desgaste.
- *Modelo 5:* este modelo presenta una probabilidad de fallo ligeramente creciente pero en el que no existe una edad de desgaste definida.
- *Modelo 6:* la probabilidad de avería con el equipo recién instalado es muy baja y crece hasta tener un valor prácticamente constante con el uso.

Sabiendo a que modelo pertenece un determinado componente, se puede realizar un plan de mantenimiento que asegure el máximo aprovechamiento de su vida útil sin desperdiciar los recursos de la empresa.

Mantenimiento Predictivo:

El mantenimiento predictivo es un tipo de mantenimiento en el que se relaciona una variable física característica de una máquina con el desgaste o estado de ésta. Se trata de un seguimiento organizado con medición periódica o continua para comparar estos resultados con unos patrones preestablecidos, con el fin de conocer el instante exacto en el que se debería producir la intervención de mantenimiento.

Los inconvenientes de este tipo de mantenimiento derivan principalmente de su forma de aplicación, algunos ejemplos son:

- Limitaciones a la hora de elegir la instrumentación de medida y diagnóstico, dada por la necesidad de no desviar a la máquina de su funcionamiento normal durante el análisis. A las técnicas aplicadas durante el normal funcionamiento de una máquina, sin perturbar dicho funcionamiento, se las conoce como técnicas no invasivas.
- Se requiere una mayor inversión inicial para obtener los equipos adecuados de medida y recolección de datos.
- Necesidad de un alto nivel de formación para los técnicos de mantenimiento, pues deben dominar el manejo de equipos de alto nivel tecnológico y conocer en profundidad tanto el funcionamiento de las máquinas como las disciplinas relacionadas con ellas.

También presenta diversas ventajas que pueden ayudar a la empresa en las labores de mantenimiento como:

- Determinación óptima del tiempo para realizar el mantenimiento preventivo y mayor aprovechamiento de la reserva de uso de piezas y equipos así como una reducción al mínimo de las emergencias correctivas.
- Ejecución sin interrumpir ni alterar el normal funcionamiento de las instalaciones.
- Mejora del conocimiento sobre el funcionamiento y estructura del sistema.
- Mejores condiciones de seguridad e higiene en la planta.
- Mejora en el control de fiabilidad de los elementos y consecución de información para los fabricantes.

Sin embargo, en algunos casos particulares el mantenimiento predictivo puede ser menos recomendable que las otras formas de mantenimiento tradicional:

- No se aplica en aquellos sistemas en los que existe un reglamento que establece el número máximo de horas de funcionamiento de las instalaciones; para este caso se aplica el mantenimiento preventivo según dichos periodos.
- Tampoco se aplica en aquellos sistemas en los que la detección de la avería es costosa y/o poco fiable, ni cuando la reposición se puede realizar a bajo coste y de forma inmediata.

Los parámetros a tener en cuenta para el control del funcionamiento de la máquina, el tipo de inspección, la instrumentación necesaria, etc... dependerán del equipo de producción y de su función. Para elegir la extensión e intensidad de la aplicación del mantenimiento predictivo se tendrán en cuenta criterios de responsabilidad económica,

dependientes de los costes de reparación y producción. Los equipos a los que se les pueden aplicar técnicas de control de estado con probada eficacia son básicamente los siguientes:

- Máquinas rotativas
- Motores eléctricos.
- Equipos estáticos.
- Aparataje eléctrica.
- Instrumentación.

Tradicionalmente la única técnica de diagnóstico aplicada en el mantenimiento predictivo en máquinas rotativas era el análisis de vibraciones, sin embargo, en la actualidad se han desarrollado diferentes métodos para la detección de fallos en este tipo de máquinas como pueden ser el análisis físico-químico de lubricantes, mediciones del par, la velocidad, la temperatura, el ruido, el estudio del grado de deterioro de los cojinetes, niveles de desalineación o desequilibrio de las partes móviles rotativas y el seguimiento de otras variables de la máquina que sufren alguna alteración con la presencia de averías.

Estos parámetros también pueden aplicarse en el caso del mantenimiento de motores eléctricos puesto que se trata de máquinas rotativas. Además, se le pueden añadir otros parámetros más específicos como el equilibrio de fases, la aparición de consumos anómalos, anomalías en las corrientes de alimentación, temperatura de los devanados.

En el caso de equipos estáticos se deben tener en cuenta parámetros como la corrosión, la fisuración, el desgaste, las fugas o el estado de las empaquetaduras.

La instrumentación electrónica presenta menos parámetros que los equipos anteriormente mencionados. Por norma general, estos equipos están más sometidos al control de la función que desempeñan que a la valoración de manifestaciones propias de su funcionamiento.

3.2. Máquinas eléctricas rotativas

Son aquellas máquinas en las que se produce una transformación de energía eléctrica a energía mecánica (conocidas como motores), o bien una transformación de energía mecánica a energía eléctrica (conocidas como generadores o dinamos).

Estas máquinas pueden dividirse principalmente en máquinas de corriente continua y máquinas de corriente alterna. Dentro del grupo de corriente alterna se pueden subdividir, a grandes rasgos, en máquinas de inducción o asíncronas y máquinas síncronas.

Corriente Continua	Motores	
	Generadores (dinamos)	
Corriente Alterna	Motores	Inducción o asíncronos
		Síncronos
	Generadores	Inducción o asíncronos
		Síncronos

Máquinas de Corriente Continua:

Son aquellas máquinas eléctricas que generan o se alimentan de corriente continua. Se trata de máquinas reversibles, es decir, la misma máquina puede trabajar como generador o como motor.

Generalmente están formadas por las siguientes partes:

- *Inductor (estator)*: Se trata de un electroimán formado por un número par de polos. La bobina que lo rodea es la encargada de producir el campo magnético al circular por ellas la corriente de excitación.
- *Inducido (rotor)*: Es una pieza giratoria con núcleo magnético envuelta por un devanado de inducido, sobre el cual actúa el campo magnético.
- *Colector de delgas*: Es un anillo de láminas de cobre conocidas como delgas, situado en el eje del rotor que sirve para conectar las bobinas del inducido con el circuito exterior a través de las escobillas.
- *Escobillas*: Son unas piezas de grafito que conectan el las delgas con los bornes de conexión del inducido.

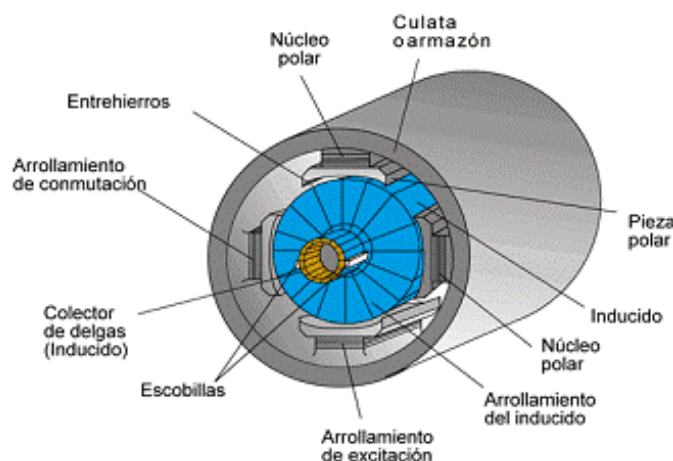


Fig. 3: Motor de corriente continua.

El funcionamiento de una maquina eléctrica rotativa de continua como motor está basado en la ley de Lorentz, según la cual cuando un conductor por el que pasa una

corriente eléctrica es sometido a un campo magnético, el conductor sufre una fuerza perpendicular al plano formado por el campo magnético y la corriente:

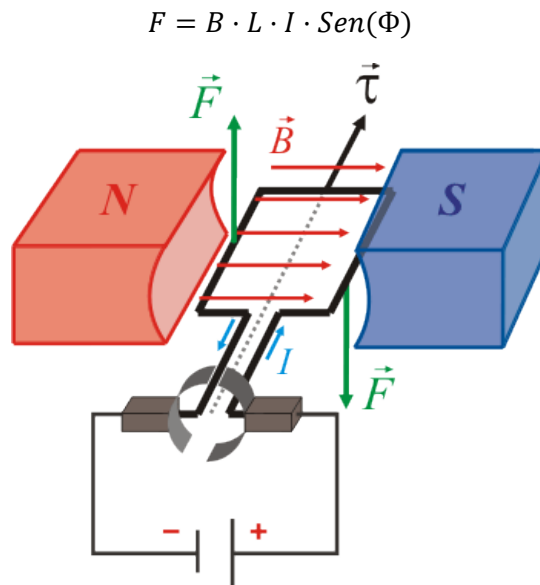


Fig. 4: Ejemplo de motor según la ley de Lorentz.

Máquinas de Corriente Alterna:

Son aquellas en las que la alimentación tiene lugar utilizando este tipo de corriente. Los motores de corriente alterna se pueden clasificar en dos tipos:

- *Síncronos*: son aquellos en las que la velocidad de giro del rotor es la misma que la velocidad de giro del campo magnético. Los motores síncronos son poco utilizados, debido a ciertos inconvenientes que presentan, empleándose solo en aplicaciones muy específicas (muy elevadas potencias).
- *Asíncronos o de inducción*: en las que la velocidad de giro del rotor es inferior a la de rotación de campo magnético del estator. La amplia mayoría de los motores empleados son asíncronos trifásicos debido a su sencillez, rendimiento y robustez, además pueden ser empleados en instalaciones monofásicas mediante la conexión de un condensador. Por ello nos vamos a centrar en este tipo de motores.

Para conseguir un campo magnético giratorio hay que tener en cuenta que el campo creado por una corriente senoidal al circular por una bobina es también de tipo senoidal lo cual implica que cambia de sentido en el tiempo en cada inversión por cero. Por este motivo y para crear un campo giratorio se necesitan aplicar dos o más campos senoidales desfasados entre sí. La velocidad de giro de este campo o velocidad de sincronismo vendrá dada por la expresión:

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \text{ [rpm]}$$

Donde f es la frecuencia de red y p el número de pares de polos del motor.

Motor Tipo Jaula de Ardilla:

En este trabajo todos los motores a los que se les ha realizado tanto el análisis de corriente como la termografía han sido motores del tipo jaula de ardilla, por este motivo se va a realizar una pequeña descripción de las características principales de los motores de este tipo.

Los motores jaula de ardilla o, más bien, con rotor de jaula, se caracterizan porque este rotor, que externamente parece solo un cilindro instalado en un eje, internamente está compuesto por una serie de barra paralelas conductoras hechas de cobre o aluminio e instaladas de forma longitudinal. Estas barras están cortocircuitadas en sus extremos mediante unos anillos de cortocircuito. El conjunto se asemeja a la rueda de un hámster (ver figura 5).

Al alimentarse el devanado trifásico del estator con un sistema trifásico de tensiones aparece un campo magnético giratorio a la velocidad de sincronismo. El movimiento relativo entre este campo y el rotor induce una fuerza electromotriz debido a la variación del flujo concatenado en la jaula. Esta fuerza electromotriz produce corrientes en las barras, las cuales, a su vez da lugar a fuerzas que actúan tangentes al rotor, dando por resultado un esfuerzo de torsión para dar vuelta al eje. El resultado es un giro del rotor que tiende a seguir al campo magnético del estator, pero nunca alcanza su velocidad. La diferencia en velocidad entre el rotor (n) y el campo magnético del estator (velocidad de sincronismo n_s) se llama "deslizamiento" y aumenta con el nivel de carga.

A menudo, los conductores se inclinan levemente a lo largo de la longitud del rotor para reducir ruido y para reducir las fluctuaciones del esfuerzo de torsión que pudieron resultar, a algunas velocidades, y debido a las interacciones con las barras del estátor. El número de barras en la jaula de la ardilla se determina según las corrientes inducidas en las bobinas del estátor y por lo tanto según la corriente a través de ellas. Las construcciones que ofrecen menos problemas de regeneración emplean números primos de barras." [2]

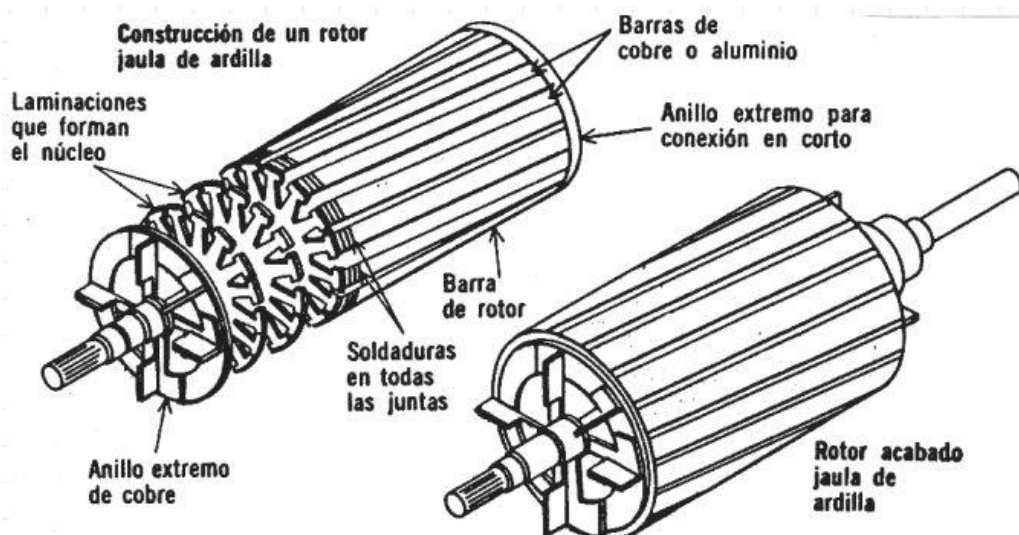


Fig.5 Esquema motor jaula de ardilla. [<http://www.ticgalicia.com/2016/06/el-motor-de-jaula-de-ardilla-la-base-de.html>]

4. Técnicas de mantenimiento predictivo en motores eléctricos.

Aunque existen diversas técnicas de mantenimiento predictivo que se pueden aplicar a motores eléctricos, este trabajo se va a centrar en la aplicación de una de ellas: el análisis de las corrientes estáticas. También se analizarán algunas imágenes tomadas con cámara térmográfica de algunos de los motores a tratar.

Antes de describir las diferentes técnicas disponibles, se expondrán los principales elementos que pueden fallar en una máquina eléctrica. Estos pueden dividirse en cuatro subgrupos principales:

1. *Fallos en el estator*: según ciertos estudios, los defectos en el estator representan aproximadamente el 40% de los fallos en motores de inducción y se agrupan principalmente en dos categorías: fallos por apertura de una fase y fallos por cortocircuito entre las espiras de una fase (debido al deterioro del aislamiento).
2. *Fallos en el rotor*, que incluyen efectos similares a los del estator en motores de rotor bobinado, o rotura de barras y del anillo de cortocircuito para motores jaula de ardilla; típicamente constituyen alrededor del 10-15% de los fallos.
3. *Fallos mecánicos* como pueden ser daños en los rodamientos, excentricidades, eje doblado y desalineamientos. Suponen en torno a un 40% de los casos.
4. *Otras averías*, que representan el tanto por cien restante.

Para tratar de obtener un diagnóstico precoz de dónde y cuándo se va a producir una avería, existen una serie de técnicas de monitorización y medida de las variables de riesgo de una máquina.

4.1. Medida de Vibraciones.

Se define vibración como el movimiento oscilatorio de las partículas de un sólido. Se pueden clasificar en dos tipos claramente diferenciados: deterministas y aleatorias. En el primer caso, siempre pueden ser definidas por ecuaciones matemáticas que representen la evolución del parámetro en concreto en función del tiempo. Habitualmente se trata de oscilaciones periódicas debidas a las imperfecciones propias de la máquina. En el caso de las vibraciones aleatorias, no se pueden definir mediante ecuaciones matemáticas, tan solo por métodos estadísticos. Éstas no responden a ningún patrón periódico, y suelen estar causadas por una fuerza que actúa durante un periodo de tiempo y luego desaparece.

Con el objetivo de detectar los fallos y averías en máquinas eléctricas a través del análisis de vibraciones deberán analizarse las de tipo determinista pues es en estas

donde aparecen las anomalías en forma cíclica de la respuesta vibratoria que producen los fallos.

Generalmente se utiliza un acelerómetro para medir la magnitud de estas vibraciones ya que posee un amplio rango dinámico de frecuencias, robustez, fiabilidad y unas reducidas dimensiones. Estos funcionan produciendo una señal eléctrica proporcional a la aceleración de la máquina en la que están instalados.

El análisis de vibraciones es la técnica más extendida a nivel industrial para el diagnóstico de fallos en motores eléctricos, si bien se ha probado adecuada para fallos de índole mecánica y no tanto para otros fallos de naturaleza eléctrica como fallos en el rotor o estator.

4.2. Medida de Temperatura.

La aparición de altas temperaturas en un motor, ya sea por una alta temperatura ambiente o bien por un fallo interno, es una causa de riesgo de fallo muy a tener en cuenta a la hora de establecer un plan de mantenimiento.

Para la monitorización y detección de zonas de elevada temperatura en la superficie del motor, se puede utilizar el método de la termografía infrarroja. A través de esta técnica, se genera un mapeado de las temperaturas en la superficie del motor. En caso de aparición de picos de temperatura muy grandes en una parte concreta del motor se puede intervenir esta zona en concreto y así evitar problemas mayores que afecten seriamente a la integridad del motor.

La técnica de termografía se ha utilizado con profusión durante años para la inspección de líneas e instalaciones eléctricas, pero su aplicación al diagnóstico de fallos en motores eléctricos es creciente y está extendiéndose a pasos agigantados en la industria.

4.3. Análisis de las Corrientes Estatoricas del Motor.

Se trata de una técnica en la que, en su versión más extendida, se realiza un análisis en el dominio de la frecuencia de la señal de corriente demandada por el motor. El objetivo es evaluar la amplitud de ciertas componentes, que son amplificadas por la presencia de ciertas averías como roturas de barra o excentricidades. Mayores amplitudes son indicativas de un nivel mayor de severidad de la avería, lo cual permite determinar la salud de las partes diagnosticadas mediante la evaluación de la amplitud de estas componentes.

A través de este método es posible identificar fallos como roturas de barras del rotor, roturas de anillos del rotor, excentricidad del rotor e incluso fallos en rodamientos.

El presente trabajo se ha centrado principalmente en la búsqueda y detección de dos fallos concretos: las excentricidades que puedan existir en la máquina, y la presencia de roturas de barras.

4.3.1. Excentricidades.

Las excentricidades en el entrehierro de una máquina eléctrica engloban diversos fallos causados por no estar perfectamente alineados el rotor y el estator, o también cuando uno de estos dos elementos no presenta una redondez perfectamente homogénea.

Se puede considerar que existe excentricidad en una máquina eléctrica cuando su entrehierro no es uniforme, es decir, la distancia en todos los puntos entre rotor y estator presenta variaciones, ya sea al girar como en estado estático. Actualmente este entrehierro en las máquinas eléctricas es de un tamaño muy reducido (suele ser de pocos milímetros). Por esta razón, es de vital importancia para la integridad del motor conseguir que sea perfectamente uniforme.

Existen dos tipos de excentricidades (aunque se puede dar el caso de combinaciones de ambas de diferentes maneras): excentricidad estática y excentricidad dinámica.

Se denomina *excentricidad estática* a la que viene dada por una distorsión del tamaño del entrehierro en la que su valor mínimo se mantiene en una posición fija. Se da básicamente de dos formas: producida por una forma ovalada del estator o bien por un incorrecto posicionamiento del rotor.

Para encontrar la frecuencia en la cual aparecerán los efectos de las vibraciones estáticas se utiliza la siguiente expresión:

$$f_{estatica} = \left[\left((k \cdot N) \cdot \left(\frac{1-s}{p} \right) \right) \pm v \right] \cdot f$$

Donde “N” es el número de ranuras de la máquina, “s” el deslizamiento, “p” el número de pares de polos, “f” la frecuencia de alimentación, “k” una constante siempre mayor o igual que cero y “v” es el orden de los armónicos de alimentación que se desea tener en cuenta.

En el caso de una *excentricidad dinámica* el punto de mínima distancia del entrehierro gira junto con el rotor y, por lo tanto, va cambiando de posición en el tiempo. Este tipo de excentricidad puede ser causada por una forma ovalada del rotor o por que el centro de giro del rotor este desfasado con respecto del centro geométrico de rotación.

Con el fin de determinar si existen o no excentricidades en un motor que puedan ser motivo de peligrosidad para el funcionamiento de éste, las técnicas más empleadas en la industria son el análisis espectral de las corrientes de alimentación de la máquina y el análisis de vibraciones.

Cuando existen excentricidades en el entrehierro de una máquina asíncrona se produce una modificación en la forma de éste, lo cual se traduce en cambios en la onda que representa la fuerza magneto motriz y se producirán fuerzas que sobresaldrán a la frecuencia de giro de la máquina. Por lo tanto existen una serie de frecuencias asociadas a la presencia de estas excentricidades.

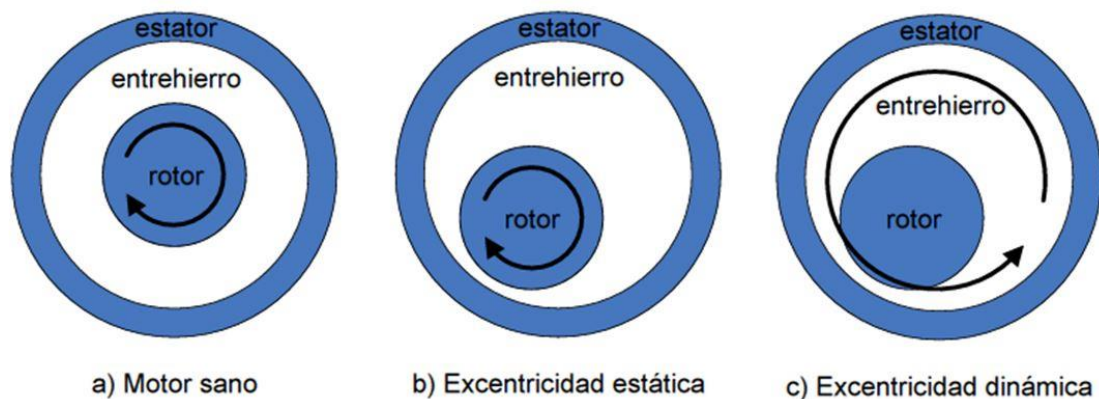


Fig.6: Posibles tipos de excentricidades de entrehierro.
 [http://www.testmotors.com/es/portfolio-item/deteccion-excentricidad-motor/]

En el caso de la aparición de excentricidades estas no suelen ser exclusivamente de uno de los dos tipos antes expuestos, sino como una combinación de ambos (excentricidad mixta).

Para el análisis llevado a cabo en este proyecto se ha realizado un cálculo de excentricidades teniendo en cuenta que aparecerá una combinación de ambos tipos (excentricidad mixta) según la expresión:

$$f_{exc} = f_1 \cdot \left[1 \pm m \cdot \left(\frac{1-s}{p} \right) \right]$$

Esta expresión es válida para detectar las frecuencias provocadas por excentricidades mixtas que son las que se suelen dar en la realidad ya que es inevitable tener un cierto grado de excentricidad estática y dinámica combinadas.

Si los armónicos principales de excentricidad superan un cierto umbral, se considera que la excentricidad puede resultar peligrosa. Este umbral de alarma es de 20 dB por encima de la media del ruido.

Una excesiva excentricidad provoca esfuerzos inadecuados sobre los rodamientos e, incluso, puede acabar provocando el roce entre estator y rotor, con el consiguiente daño del aislamiento y fallo catastrófico del motor.

4.3.2. Rotura de barras

La rotura de barras es una de las principales maneras de fallo que tiene un motor, especialmente en motores de alta potencia que arrancan frecuentemente bajo carga. El transitorio de arranque es el que más esfuerzos provoca en las barras del rotor, ya que durante este transitorio aparecen las mayores corrientes en dichas barras debido a la diferencia de velocidades entre el rotor y el campo del estator.

Esta rotura de las barras suele empezar a darse en las partes de éstas que no están sujetas por el cuerpo del rotor, es decir, en las zonas cercanas al de la unión al anillo de cortocircuito o en el propio anillo.

Cuando existen barras rotas en un motor la simetría del rotor queda destruida lo que se traduce en la aparición de un campo giratorio que genera armónicos en la corriente del estator de acuerdo con la expresión:

$$f_{brb1} = f_1 \cdot \left[l \cdot \left(\frac{1-s}{p} \right) \right] \pm s$$

Donde f_1 es la frecuencia de alimentación, p el número de pares de polos y s el deslizamiento en tanto por uno.

Otra expresión que se utiliza en la literatura es la siguiente (con $k=1,2,3\dots$):

$$f_{brb2} = f_1 \cdot [1 \pm 2 \cdot k \cdot s]$$

El método más utilizado para el diagnóstico de las posibilidades de rotura de barras consiste en la monitorización de los dos armónicos más cercanos a la frecuencia fundamental que se dan a las frecuencias $f_1 \cdot (1 \pm 2s)$, que se obtienen de la expresión anterior para $k=1$. Este método puede no ser el más fiable en el caso del deslizamiento sea muy reducido, en este caso los armónicos pueden aparecer enmascarados por el armónico principal. También estos armónicos pueden confundirse a veces con otras causas que no son averías (como oscilaciones en la carga). Para solventar este último problema y llegar a un diagnóstico más fiable, existen estudios más complejos en los que se analizan los armónicos laterales entorno al quinto armónico de la frecuencia fundamental, concretamente a $f_1 \cdot (5-4s)$ y $f_1 \cdot (5-6s)$.

Para saber si el motor se encuentra sano se debe observar la magnitud de ganancia que alcanzan estos armónicos. En el caso de los armónicos laterales entorno a la frecuencia fundamental, $f_1 \cdot (1 \pm 2s)$, se puede considerar que el motor está sano cuando el armónico $f_1 \cdot (1-2s)$ se encuentra por debajo de -55 dB. Cuando la magnitud se encuentra entre -55 dB y -45 dB se considera que este motor empieza a presentar riesgo de rotura de barras o empieza a presentar fisuras. En el caso de estar entre -40 dB y -35 dB se considera que hay, al menos, una barra rota y cuando es superior a -35 dB existen varias barras rotas. Estos márgenes funcionan tan solo para el análisis de armónico lateral inferior $f_1 \cdot (1-2s)$.

Umbral de Fallo Empleados	
>-55 dB	No hay peligro de rotura de barras
-55 a -45 dB	Zona de alarma de Rotura
< -45 dB	Fallo por rotura de barras

5. Motores Analizados.

Este proyecto se ha llevado a cabo sobre algunos de los motores de una industria dedicada al tratamiento de acero, especialmente corte, embutición y tratamiento superficial.

Todos los motores analizados son de motores de inducción, pues la técnica de análisis de fallos empleada está diseñada para ser aplicada con mayor fiabilidad en estos, especialmente del tipo jaula de ardilla. Aunque todos los motores son del mismo tipo todos ellos presentan regímenes de trabajo muy diferentes y soportan diferentes niveles de carga. Por estas razones se espera obtener resultados claramente diferenciados que demuestren la efectividad de la técnica de análisis de corrientes para el mantenimiento industrial.

A continuación se describirán las principales características de estos motores así como una breve introducción a sus funciones concretas.

5.1. Motor 1.

Este motor se sitúa en un línea de corte longitudinal de chapa, es decir, corta una bobina a lo largo dividiendo en diferentes bobinas de una anchura determinada; concretamente, este motor controla el grupo hidráulico de la entrada de la bobina.



Fig. 7: Fotografía del Motor 1.

Potencia: 30 kW	V inducido : 220/380 V
I inducido : 59/100 A	Velocidad nominal : 1475 rpm
Tipo : Trifásico, jaula de ardilla	Marca : ISGEV
Motor sin variador de frecuencia.	

5.2. Motor 2.

El segundo motor elegido trabaja en otra línea de corte longitudinal como bomba hidráulica general de la línea. Se ilustra este motor en la Figura 8.

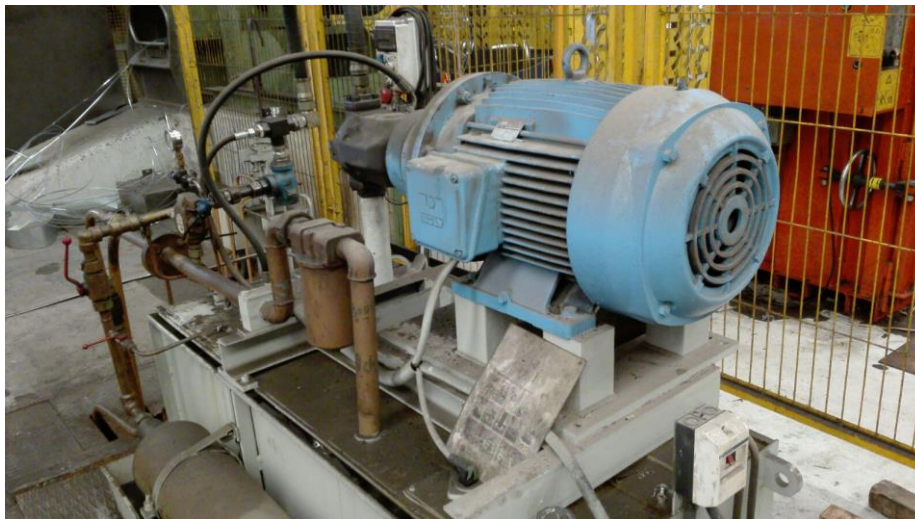


Fig. 8: Fotografía del Motor 2.

Potencia: 37 kW	V inducido : 380/660 V
I inducido : 69/40 A	Velocidad nominal : 1470 rpm
Tipo : Trifásico, jaula de ardilla	Marca : ISGEV
Motor sin variador de frecuencia.	

5.3. Motor 3.

En este caso el motor trabaja como compresor de aire para abastecer a una de las naves de la fábrica.



Fig. 9: Fotografía del Motor 3.

Potencia: 75 kW	V inducido : 380/660 V
I inducido : 140 A	Velocidad nominal : 1480 rpm
Tipo : Trifásico, jaula de ardilla	Marca : Siemens
Motor sin variador de frecuencia.	

5.4. Motor 4.

El motor número cuatro controla el accionamiento del compresor de aire comprimido para la nave adyacente a la del tercero.

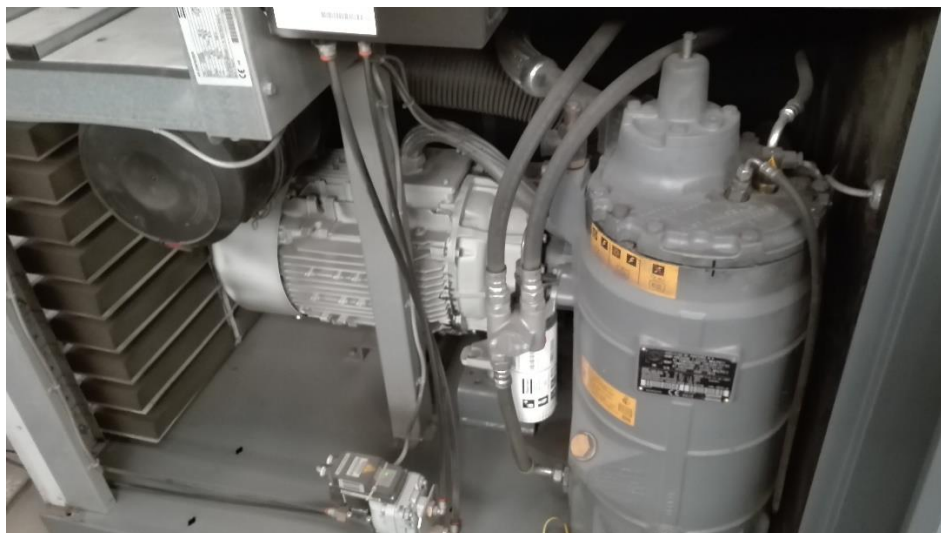


Fig.10: Fotografía del Motor 4.

Potencia: 45 kW	V inducido : 380 V
I inducido : 100 A	Velocidad nominal : 2490 rpm
Tipo : Trifásico, jaula de ardilla	Marca : Atlas Copco
Motor con variador de frecuencia.	

5.5. Motor 5.

El motor número cinco funciona como bomba hidráulica en una prensa. Esta máquina hace corte en las láminas de chapa que le entran, siguiendo un molde concreto proporcionado por un cliente, dando como resultado piezas de chapa que bien pueden ser parte de un coche, ollas, bandejas, etc..



Fig. 11: Fotografía del Motor 5.

Potencia: 30 kW	V inducido : 400/690 V
I inducido : 55/31 A	Velocidad nominal : 1465 rpm
Tipo : Trifásico, jaula de ardilla	Marca : CIME
Motor sin variador de frecuencia.	

5.6. Motor 6.

Este motor funciona como accionamiento del grupo hidráulico en una línea de corte longitudinal.



Fig.12: Fotografía del Motor 6.

Potencia: 22 kW	V inducido : 400/690 V
I inducido : 40/23 A	Velocidad nominal : 1470 rpm
Tipo : Trifásico, jaula de ardilla	Marca : FIMET
Motor sin variador de frecuencia.	

5.7. Motor 7.

El motor siete está situado en la misma línea de corte longitudinal que el sexto y acciona el grupo hidráulico del virutero.



Fig.13: Fotografía del Motor 7.

Potencia: 30 kW	V inducido : 400/690 V
I inducido : 59/34 A	Velocidad nominal : 1470 rpm
Tipo : Trifásico, jaula de ardilla	Marca : ABB
Motor sin variador de frecuencia.	

5.8. Motor 8.

Este motor funciona como bomba hidráulica de la cizalla volante de una línea de corte transversal. Este tipo de corte es en el cual entra una bobina que se va desplegando y se la corta de manera transversal, dejando a la salida láminas de chapa.

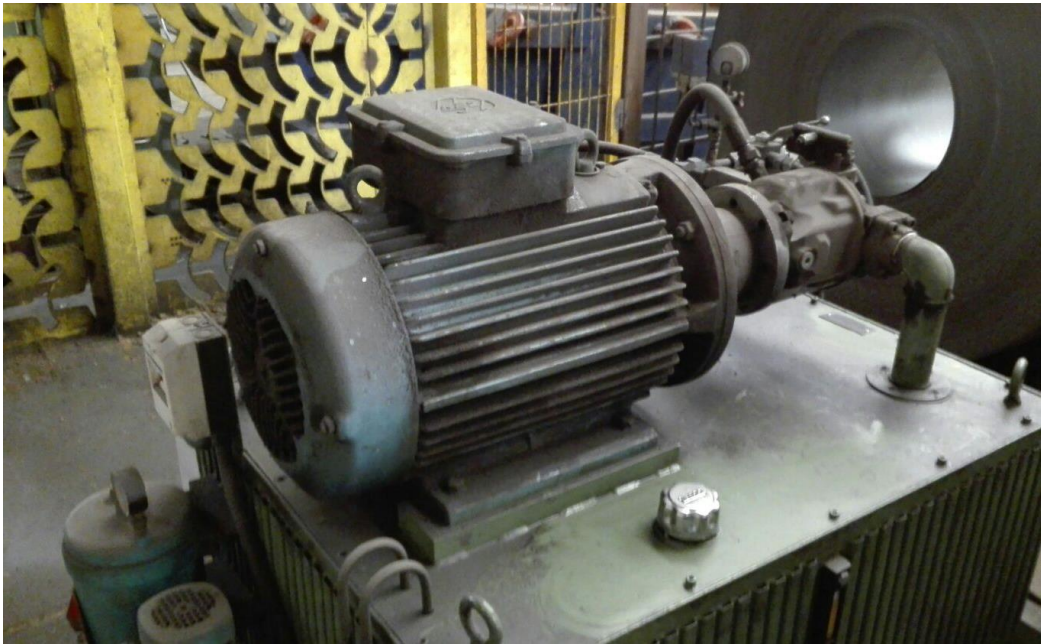


Fig.14: Fotografía del Motor 8.

Potencia: 22 kW	V inducido : 220/380 V
I inducido : 74/43 A	Velocidad nominal : 1460 rpm
Tipo : Trifásico, jaula de ardilla	Marca : MEZ FRENSA
Motor sin variador de frecuencia.	

6. Descripción de las medidas efectuadas.

Como se ha mencionado previamente, el objetivo de este trabajo es el de aplicar dos técnicas de mantenimiento predictivo en motores de corriente alterna, con el objetivo de evaluar el estado de éstos y analizar los posibles beneficios de la aplicación de estas técnicas. Por ello, y dado el carácter práctico del proyecto, se requería de datos obtenidos con motores reales que se pudieran analizar. Con el fin de obtener estos datos, se llevaron a cabo una serie de mediciones sobre el terreno en los motores que fueron seleccionados para el proyecto.

Las técnicas que se aplicaron fueron la termografía infrarroja y el análisis de las corrientes estatoricas de los motores. Ambas técnicas requieren equipos concretos y diferentes para obtener estas mediciones, los cuales se describen a continuación.

6.1. Termografía infrarroja.

Como ya se ha explicado con anterioridad, esta técnica consiste en un análisis de los puntos calientes que se pueden dar en un motor en operación. Estos puntos calientes son indicativos de posibles fallos que pueden llegar a causar graves daños a éste e incluso provocar una avería grave que suponga la completa inutilización del motor.

Para aplicar esta técnica, se requiere de un equipo capaz de tomar fotografías térmicas de los motores en las que aparezcan los puntos calientes que se van a evaluar. Este equipo recibe el nombre de cámara termográfica. Existe una amplia variedad de cámaras en el mercado con funcionalidades, características y precios muy diferentes.

En el caso de este proyecto, la cámara termográfica empleada fue una Fluke Ti25. La toma de medidas con este equipo es de especial sencillez pues tan sólo se trata de fotografiar las zonas del motor que se crea de riesgo.

Cabe no obstante apuntar que, si bien a captura de imágenes es relativamente sencilla, la interpretación de éstas de cara a detectar un posible fallo radica en buena medida en la experiencia del termógrafo y en la comparación con imágenes previas, de las cuales se carecía en este proyecto. Por tanto, en este trabajo solamente se usará la técnica como herramienta complementaria para detectar posible fallos evidentes que pudieran existir en los motores analizados.



Fig.15: Cámara termografica Fluke Ti25.

6.2. Mediciones de corriente.

En el caso del análisis de corrientes se requería monitorizar el funcionamiento de los motores utilizando un osciloscopio que permitiera registrar la forma de onda de las corrientes en régimen permanente y, en algunos casos, en arranque.

Las medidas se hacen fase por fase individualmente en cada motor para determinar la forma de onda de la corriente en el dominio del tiempo que posteriormente, mediante cálculos matemáticos en Matlab, se pasará al dominio de la frecuencia para así obtener la gráfica que mostrará los picos de la ganancia.

En este proyecto se monitorizo cada motor durante 100 segundos para obtener una suficiente resolución para la transformada de Fourier.

Para obtener más seguridad en los análisis se realizaron dos mediciones diferentes para cada motor. La frecuencia de muestreo es 5000 muestras/segundo en todas las mediciones



Fig.16: Medición de corriente.



Fig.17: Osciloscopio utilizado.

7. Análisis de corrientes estáticas.

Como se ha venido explicando previamente, el objetivo principal de este proyecto ha sido el de aplicar técnicas de mantenimiento predictivo en diferentes motores industriales para detectar posibles fallos.

En esta sección se expondrá el procedimiento seguido para el diagnóstico de excentricidades y rotura de barras a través del análisis de las corrientes estáticas de los motores seleccionados.

Se espera obtener un diagnóstico lo más preciso posible que ayude a trazar un plan de mantenimiento preventivo efectivo para alargar la vida útil de los motores al máximo o determinar si existen riesgos de fallo inminente que puedan ocasionar la consiguiente parada de la máquina y, por lo tanto, de la producción para así prevenir estos efectuando un cambio en las partes dañadas del motor o, en caso de extrema gravedad, del motor completo.

7.1. Procedimiento.

Como primer paso se efectuaron una serie de mediciones en cada uno de los motores para obtener los datos de corriente que servirán para efectuar los análisis necesarios para la determinación de excentricidades y de roturas de barras. En la sección de mediciones se ha explicado ya como estas fueron tomadas. También se comentó que para cada motor se tomaron dos mediciones en distintos momentos, registrando las corrientes por dos de las fases en cada una de ellas.

Los datos tomados en cada motor han sido luego procesados en Matlab para obtener las representaciones gráficas de las ondas de corriente en función del tiempo. Para abrir dichos ficheros extraídos directamente del osciloscopio se requiere un programa especial que en este caso se ha llamado *lee_yoko.m*.

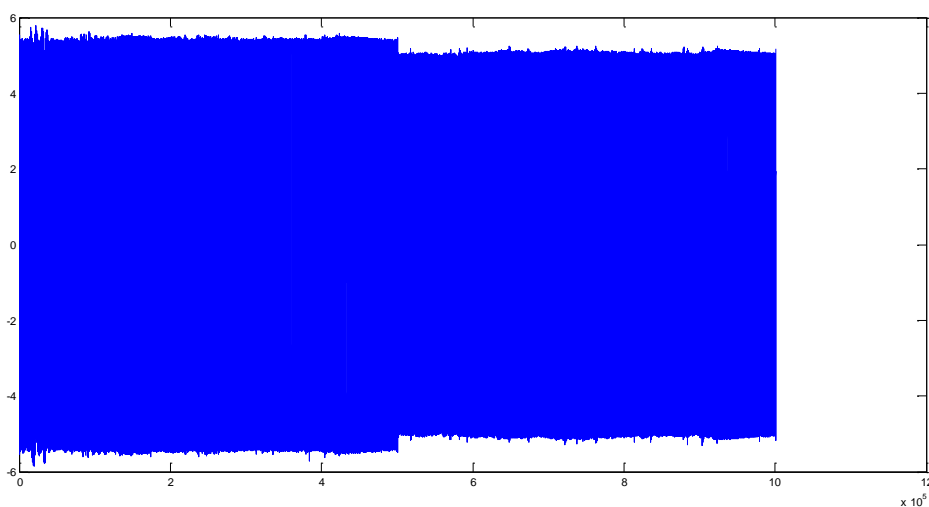


Fig.18: Onda de la corriente en función del tiempo de las dos fases medidas.

Como se observa cada fichero concatena las dos formas de onda edidas (una por cada fase) en un solo vector. Es necesario, por tanto dividir dicho vector para obtener la corriente de cada fase. Las instrucciones siguientes permiten almacenar la primera mitad del vector en la variable `i1_perm` que contiene la corriente de la fase 1. La Figura 19 muestra la forma de onda de tal señal.

```
>>i1_perm=onda_leida(1:end/2);  
>> plot(i1_perm)
```

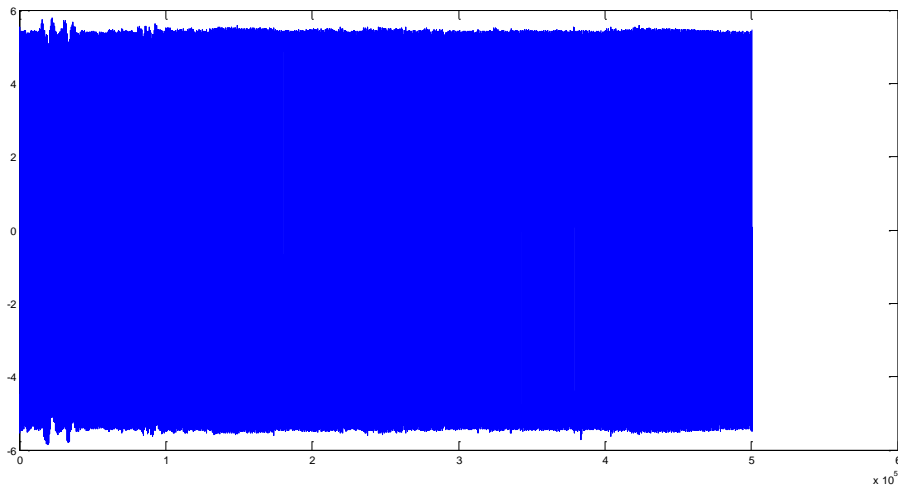


Fig.19: Onda de corriente en función del tiempo solo una fase.

Una vez obtenida la onda de corriente de una fase, se debe volver a cortar (truncar) la onda, para quedarse solamente con la parte de ésta que se muestra más estable, pues es esta parte la que dará mejores resultados una vez se le aplique la transformada de Fourier.

Dependiendo del caso, la onda puede llegar a mostrar picos de corriente que se corresponderían con un funcionamiento poco estable del motor, que en determinados instantes realiza un mayor sobreesfuerzo puntual (transitorios). Se debe tratar de suprimir estos picos de la onda a la que le será aplicada la transformada de Fourier pues podrían llevar a componentes indeseadas en el espectro.

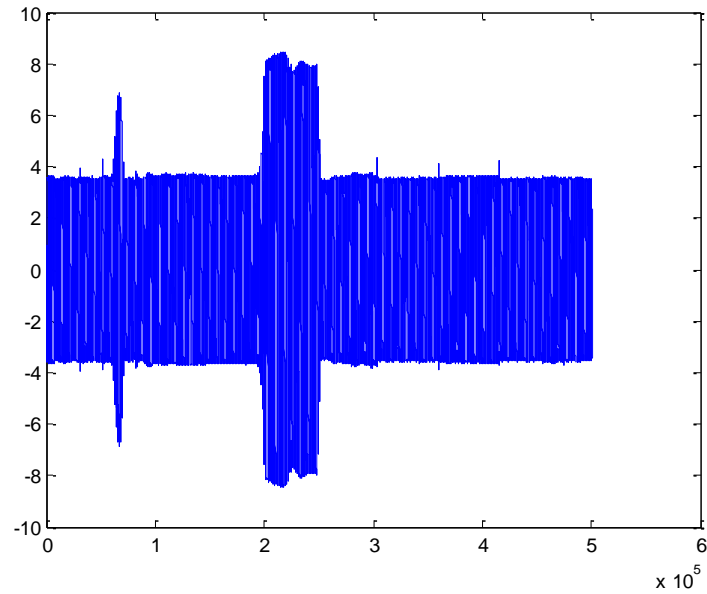


Fig.20: Ejemplo de onda con pico de corriente

En este caso particular se podría obtener como onda al que aplicar la transformada de Fourier la parte posterior al pico de corriente, pues es la más estable.

```
>> i1=i1_perm(300001:500000);
>> plot(i1)
```

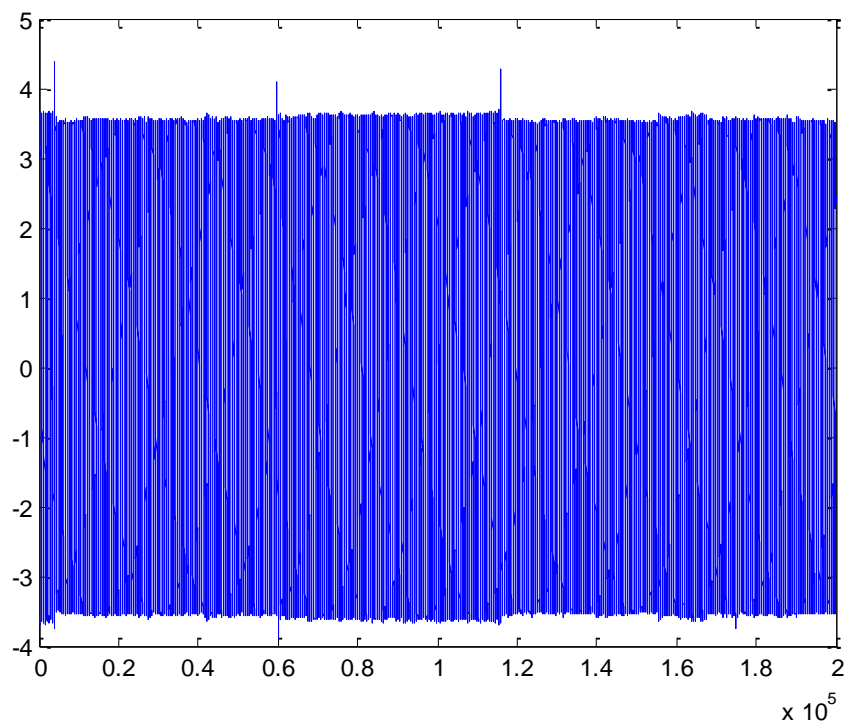


Fig.21: Onda de corriente ampliada a la zona más estable.

Una vez se ha obtenido una onda lo más estable posible, se deberá proceder a realizar la transformada de Fourier para pasar la onda al dominio de la frecuencia.

Para evitar cálculos matemáticos demasiado complejos, ésta se ha procesado a través de un fichero al que se ha llamado lee_yoko_desarrolloDB1.m. Previamente se debe realizar un cálculo para el número de divisiones por segundo que el programa va a procesar con unas simples formulas:

$$TiempoTotal = \frac{N^{\circ} \text{ Total de muestras}}{\text{frecuencia de muestreo}}$$

En el caso de este proyecto la frecuencia de muestreo ha sido de 5000 en todas las mediciones.

$$\frac{\text{Segundos}}{\text{división}} = \frac{TiempoTotal}{10}$$

Una vez obtenido el número de segundos por división se ejecuta el fichero lee_yoko_desarrolloDB1.m para procesar la onda seleccionada.

Este programa dará como resultado una representación de la onda previamente seleccionada en el dominio de la frecuencia a partir del cual se obtendrán los valores de las variables que darán el diagnóstico del estado del motor.

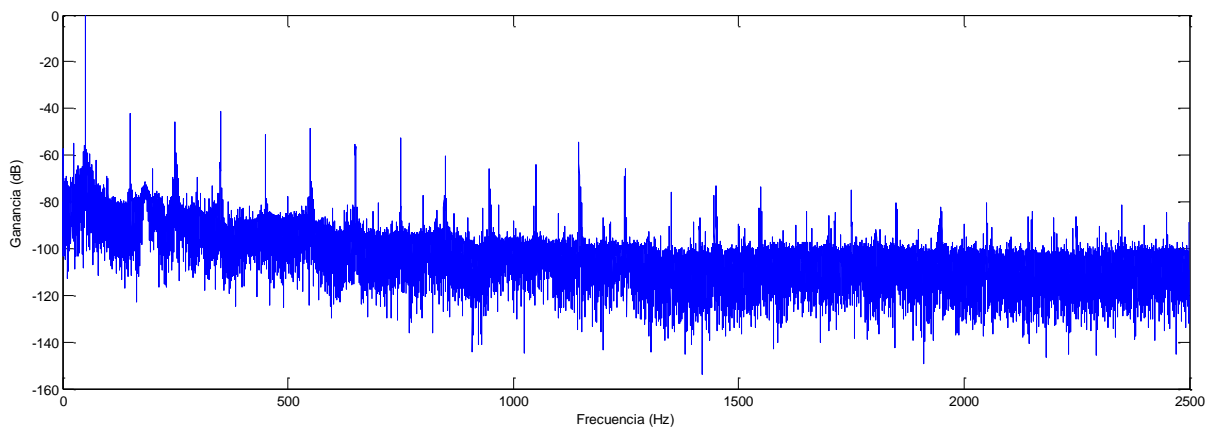


Fig.22: Ejemplo onda en función de la frecuencia.

Para calcular ahora la existencia de excentricidades se deben analizar los picos entorno a las frecuencias de 25 y 75 Hz, concretamente los picos se ubicaran ligeramente después de 25 Hz y ligeramente antes de 75 Hz (para máquina con dos pares de polos según la expresión anteriormente comentada, para las excentricidades mixtas). Una vez obtenida esta frecuencia y a través de la expresión $f_{exc} = f \cdot (1 \pm m \cdot (\frac{1-s}{p}))$ se obtiene el deslizamiento que será usado para obtener las frecuencias entorno al armónico principal que determinarán si existe o no peligro de rotura de barras usando las expresiones:

$$f_{Li} = f \cdot (1 - 2s)$$

$$f_{Ls} = f \cdot (1 + 2s)$$

Con estas frecuencias y a través del gráfico obtenido en Matlab se pueden calcular las respectivas amplitudes y, dependiendo de éstas, determinar el nivel de rotura de barras, así como el nivel de excentricidad.

A continuación, se aplica el procedimiento descrito a los diferentes motores:

7.2. Motor 1.

- 0000.FLD:

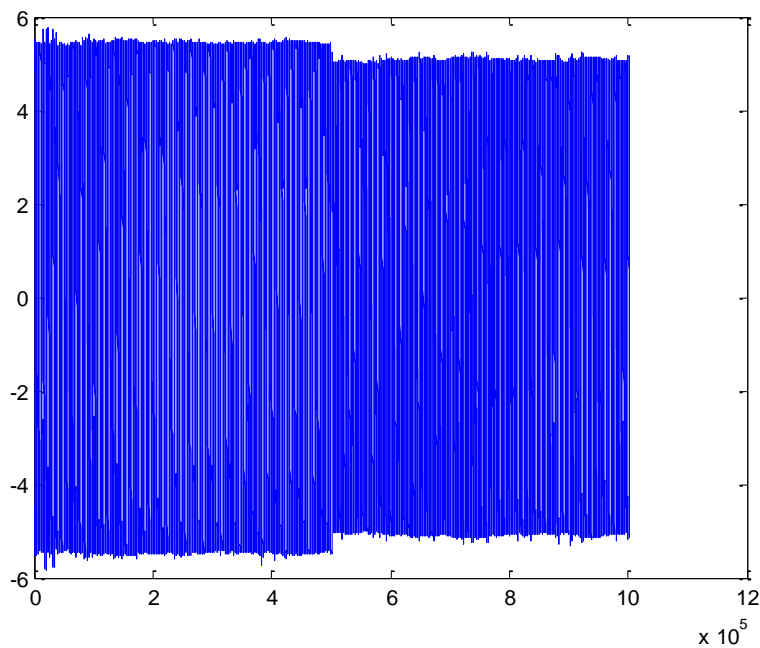


Fig.23: Onda de corriente 0000.FLD.

Como se puede observar en la imagen se encuentran aquí representadas las mediciones de ambas fases una a continuación de la otra. Para el análisis de la corriente de este motor se seleccionó una fracción de la corriente total de 200000 muestras. De aquí se halla el número de seg/división a introducir en el programa de la transformada de Fourier.

$$TiempoTotal = \frac{N^{\circ} \text{ Total de muestras}}{\text{frecuencia de muestreo}} = \frac{200000}{5000} = 40$$

$$\frac{\text{Segundos}}{\text{división}} = \frac{\text{TiempoTotal}}{10} = 4 \text{ seg/div}$$

El espectro de la corriente tendrá la siguiente forma:

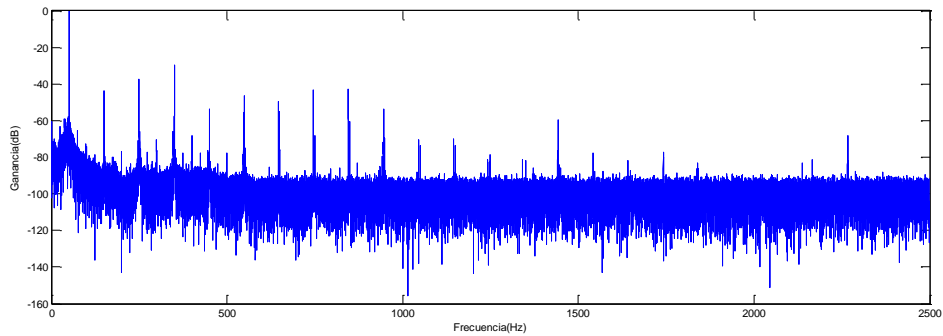


Fig.24: Representación en dominio de la frecuencia de 0000.FLD.

Ampliando el rango de frecuencias entre 0 y 100 Hz, se obtiene una mejor visibilidad del primer armónico y las componentes a estudiar. Se observa que la frecuencia de alimentación queda en 49.975 Hz exactamente pero para los cálculos se puede aproximar a 50 Hz.

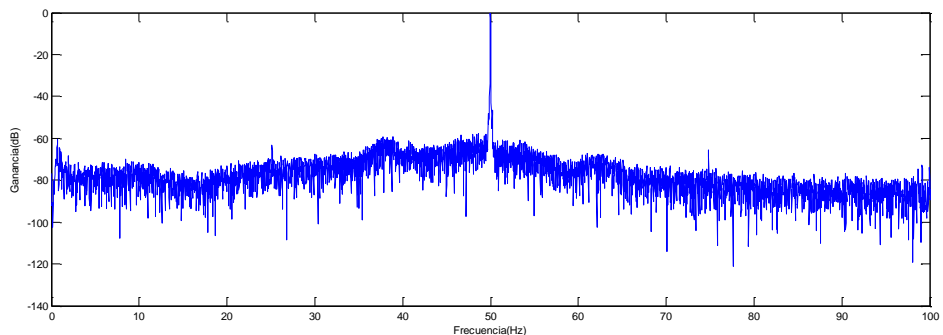


Fig.25: Ampliación de la representación en frecuencia de 0 a 100 Hz.

$$f_{exc(-)} = f \cdot \left(1 - \left(\frac{1-s}{p}\right)\right) = 50 \cdot \left(1 - \left(\frac{1-s}{2}\right)\right) = 50 - 25 + 25s = 25 + 25s$$

$$f_{exc(+)} = f \cdot \left(1 + \left(\frac{1-s}{p}\right)\right) = 50 \cdot \left(1 + \left(\frac{1-s}{2}\right)\right) = 50 + 25 - 25s = 75 - 25s$$

Para encontrar el valor del deslizamiento, s , se deben observar los picos de ganancia que aparecen cerca de 25 y 75 Hz respectivamente para obtener la frecuencia exacta a la que aparecen estos picos y, sustituyendo en una de las ecuaciones superiores y resolviendo, hallar el deslizamiento.

A 25.125 Hz se encuentra el pico de ganancia que llega a -63.25dB. Comparando no la media de la componente del ruido que en este caso es -80dB se puede deducir que **no existen excentricidades**, pues hay menos de 20 dB de diferencia.

$$f_{exc(-)} = 25 + 25s = 25.125 \text{ Hz} \rightarrow s = 0.005$$

Una vez obtenido el deslizamiento se pueden hallar las frecuencias laterales que determinaran la existencia o no de peligro de rotura de barras.

$$f_{Li} = f \cdot (1 - 2s) = 50 \cdot (1 - 2 \cdot 0.005) = 49.5 \text{ Hz}$$

$$f_{Ls} = f \cdot (1 + 2s) = 50 \cdot (1 + 2 \cdot 0.005) = 50.5 \text{ Hz}$$

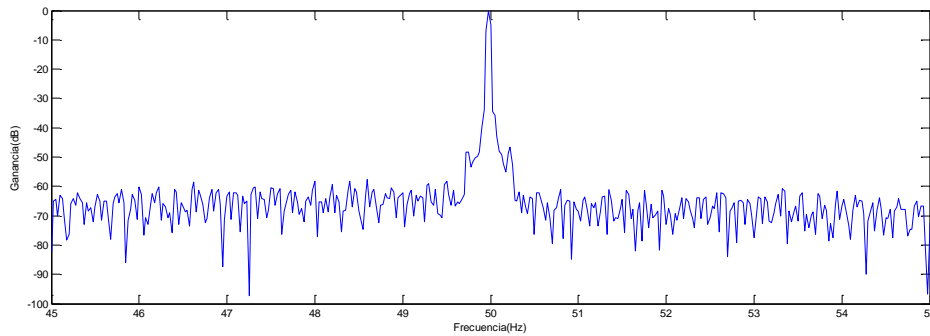


Fig.26: Ampliación entre 45 y 55 Hz.

A 49.5 Hz se observa un pico que llega a -58.2 dB y a 50.5 Hz un pico de -63 dB. De acuerdo con estos resultados **no existe por el momento peligro de rotura de barras**.

0001.FLD

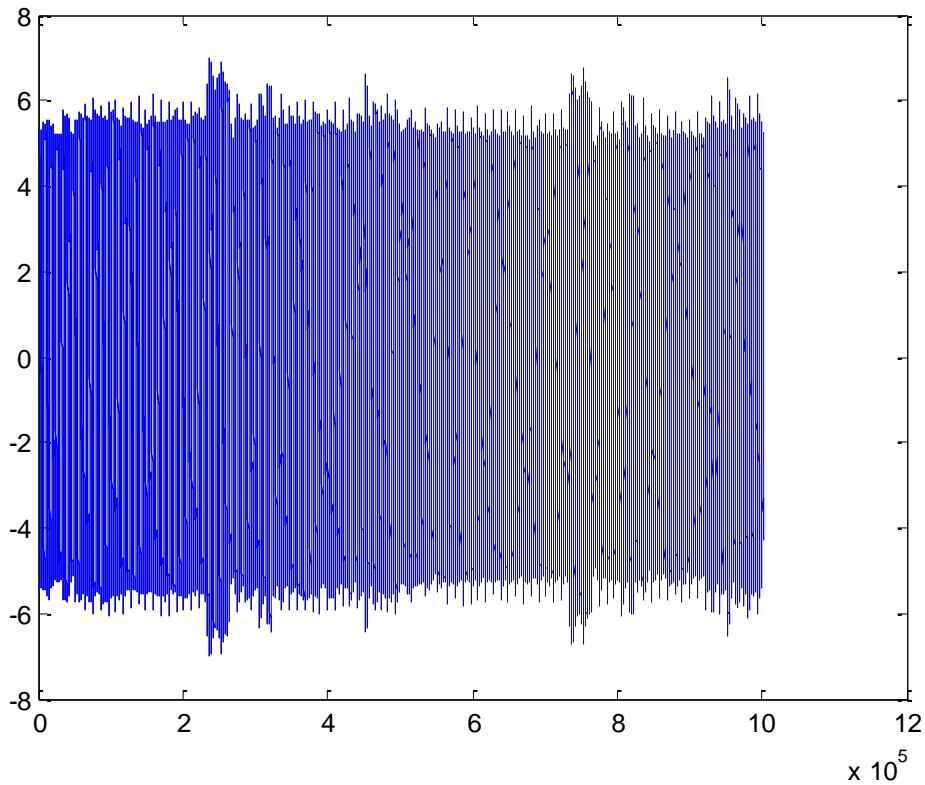


Fig.27: Onda de corriente 0001.FLD.

Para la segunda medición del segundo motor se ha buscado también escoger una fracción de la onda completa de 200000 muestras que fueran lo más estables posible, en este caso se observan algunos picos de corriente correspondientes a mayores esfuerzos puntuales del motor.

$$TiempoTotal = \frac{N^{\circ} \text{ Total de muestras}}{\text{frecuencia de muestreo}} = \frac{200000}{5000} = 40$$

$$\frac{\text{Segundos}}{\text{división}} = \frac{TiempoTotal}{10} = 4 \text{ seg/div}$$

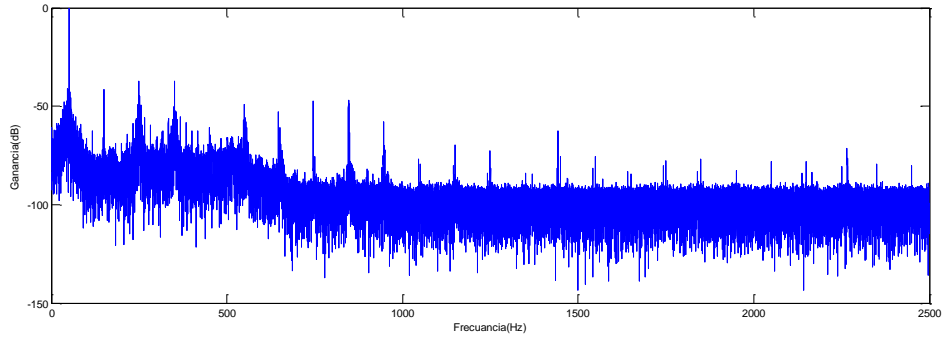


Fig.28: Representación de 0001.FLD en el dominio de la frecuencia.

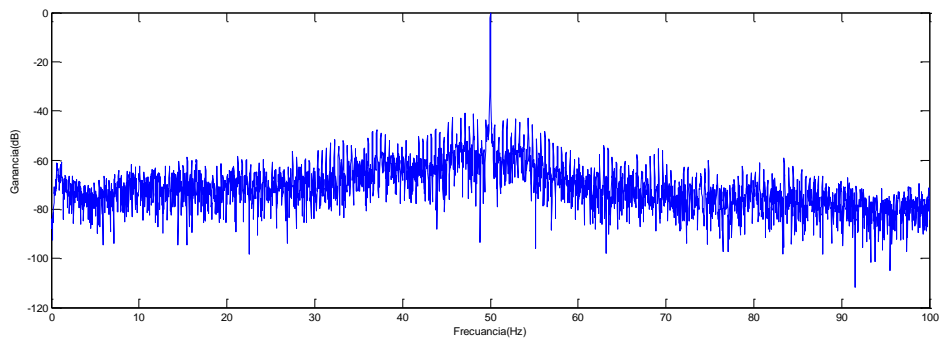


Fig.29: Ampliación entre 0 y 100 Hz.

$$f_{exc(-)} = f \cdot \left(1 - \frac{1-s}{p}\right) = 50 \cdot \left(1 - \frac{1-s}{2}\right) = 50 - 25 + 25s = 25 + 25s$$

$$f_{exc(+)} = f \cdot \left(1 + \frac{1-s}{p}\right) = 50 \cdot \left(1 + \frac{1-s}{2}\right) = 50 + 25 - 25s = 75 - 25s$$

En este caso la $f_{exc(-)}$ se encuentra a 25.15 Hz y llega hasta -61 dB y la por lo que al compararla con la media del ruido que en este caso está a -70 dB se **confirma que este motor no presenta riesgo de excentricidades.**

$$f_{exc(-)} = 25 + 25s = 25.15 \text{ Hz} \rightarrow s = 0.006$$

$$f_{Li} = f \cdot (1 - 2s) = 50 \cdot (1 - 2 \cdot 0.006) = 49.4 \text{ Hz}$$

$$f_{Ls} = f \cdot (1 + 2s) = 50 \cdot (1 + 2 \cdot 0.006) = 50.6 \text{ Hz}$$

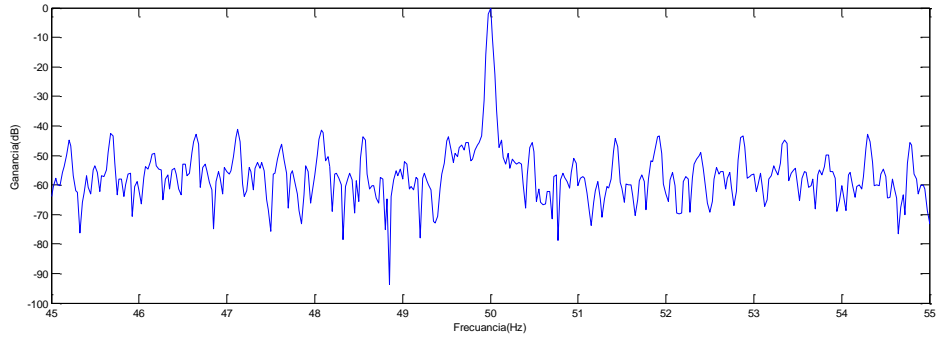


Fig.30: Ampliación entre 45 y 55 Hz.

A 49.4 dB se observa un pico de -70.6 dB y a 50.6 el pico de la ganancia llega hasta -66.8 dB por lo que **se confirma que no existe riesgo de rotura de barras por el momento.**

7.3. Motor 2.

0002.FLD

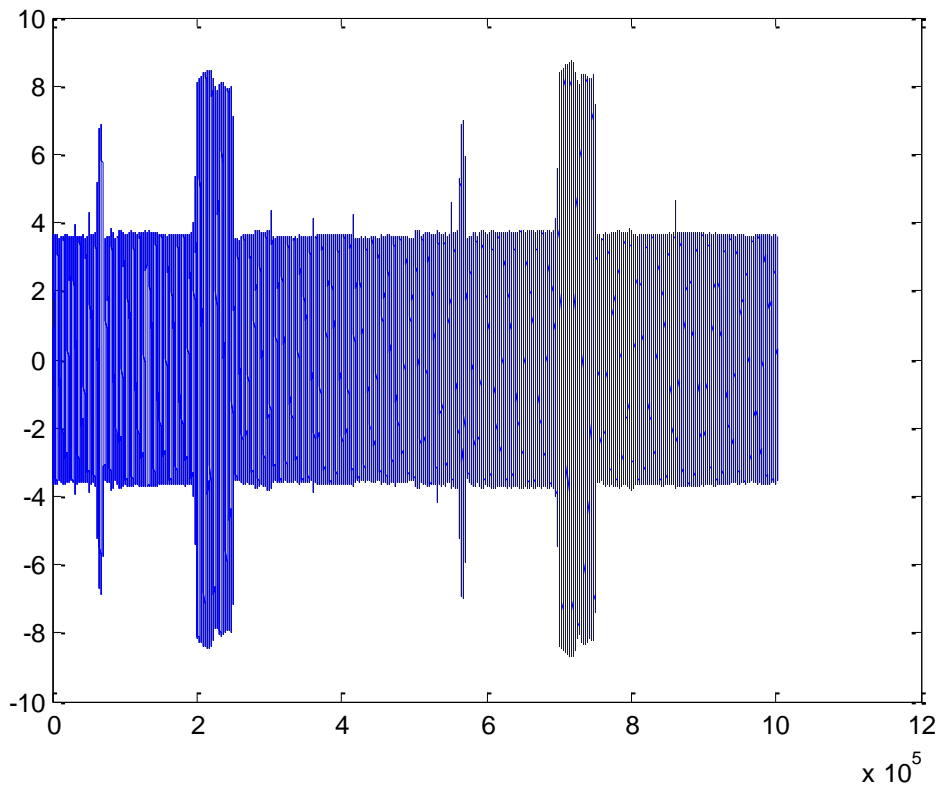


Fig.31: Onda de corriente 0002.FLD.

En este caso se ha escogido también una parte de la onda total de 200000 muestras buscando evitar los picos de corriente.

$$TiempoTotal = \frac{N^{\circ} Total de muestras}{frecuencia de muestreo} = \frac{200000}{5000} = 40$$

$$\frac{Segundos}{división} = \frac{TiempoTotal}{10} = 4 \text{ seg/div}$$

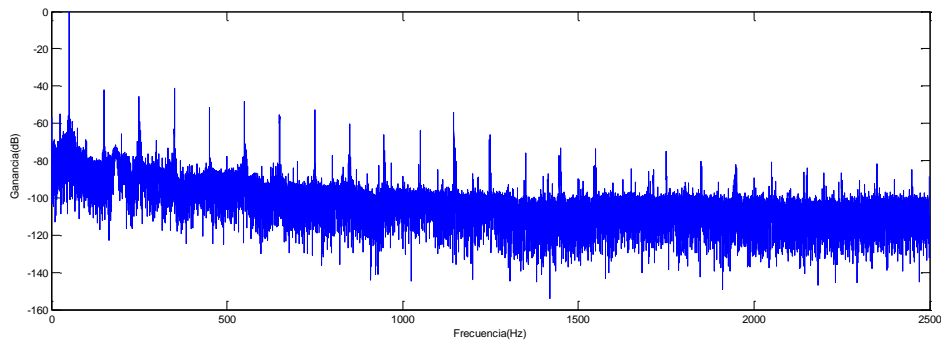


Fig.32: Representación en frecuencia de 0002.FLD.

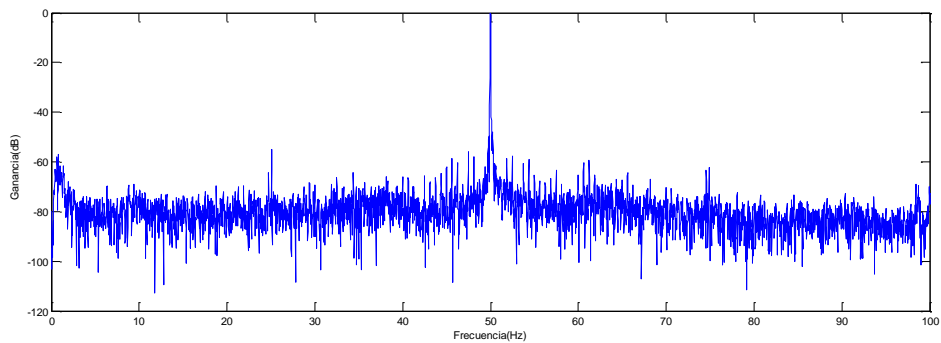


Fig.33: Ampliación entre 0 y 100 Hz.

$$f_{exc(-)} = f \cdot \left(1 - \left(\frac{1-s}{p}\right)\right) = 50 \cdot \left(1 - \left(\frac{1-s}{2}\right)\right) = 50 - 25 + 25s = 25 + 25s$$

$$f_{exc(+)} = f \cdot \left(1 + \left(\frac{1-s}{p}\right)\right) = 50 \cdot \left(1 + \left(\frac{1-s}{2}\right)\right) = 50 + 25 - 25s = 75 - 25s$$

En este caso la $f_{exc(-)}$ se da a 25.075 Hz y el pico de ganancia llega hasta -55 dB mientras que la media del ruido se observa en unos -80 dB por lo que en este caso el motor **sí que presenta excentricidades en el entrehierro.**

$$f_{exc(-)} = 25 + 25s = 25.075 \text{ Hz} \rightarrow s = 0.003$$

$$f_{Li} = f \cdot (1 - 2s) = 50 \cdot (1 - 2 \cdot 0.006) = 49.7 \text{ Hz}$$

$$f_{Ls} = f \cdot (1 + 2s) = 50 \cdot (1 + 2 \cdot 0.006) = 50.3 \text{ Hz}$$

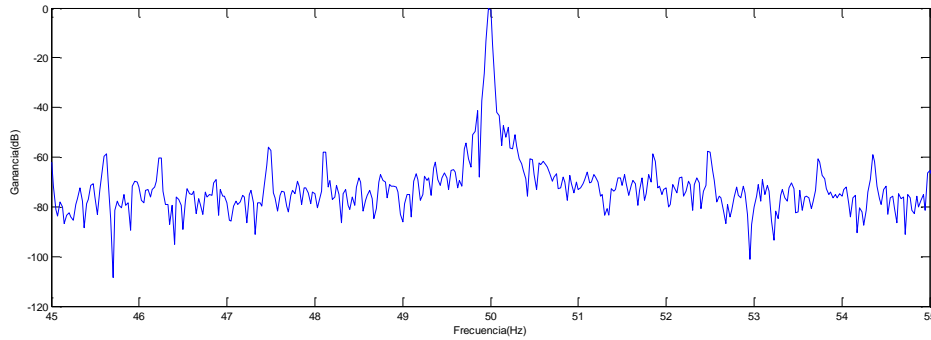


Fig.34: Ampliación entre 45 y 55 Hz.

En la frecuencia lateral izquierda de 49.7 Hz el motor llega hasta los -55 dB y en la derecha situada a 50.3 Hz el pico llega hasta los -57 dB. De estos resultados se deduce que **no existe riesgo de barras fracturadas** pero que el motor está cerca de entrar en el área de barras desgastadas que se da de -55 a -45 dB.

0003.FLD

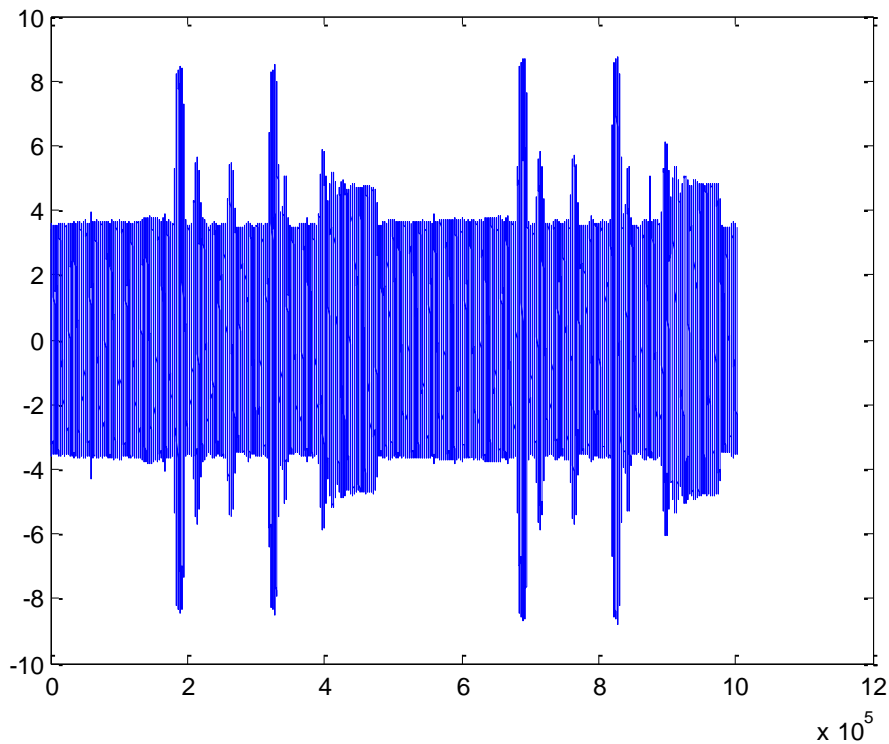


Fig.35: Onda de corriente 0003.FLD

Debido a que en esta medida la onda de la corriente presenta más picos se ha escogido una parte de 170000 muestras en la zona más estable para realizar los cálculos. Por esto el número de divisiones por minuto a introducir en el programa resultará ser menor que anteriormente:

$$TiempoTotal = \frac{N^{\circ} \text{ Total de muestras}}{\text{frecuencia de muestreo}} = \frac{170000}{5000} = 34$$

$$\frac{\text{Segundos}}{\text{división}} = \frac{TiempoTotal}{10} = 3.4 \text{ seg/div}$$

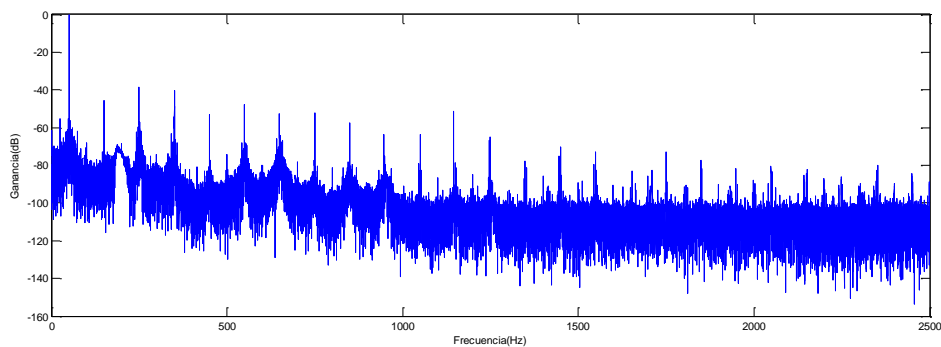


Fig.36: Representación en el dominio de la frecuencia de 0003.FLD.

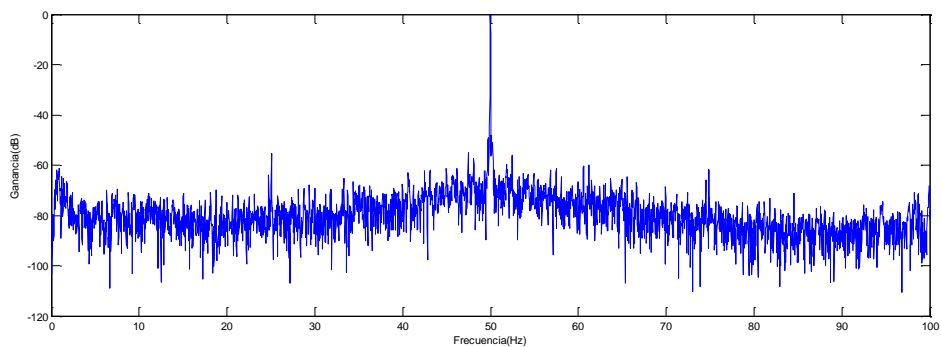


Fig.37: Ampliación entre 0 y 100 Hz.

En este caso particular la frecuencia de suministro que aparece se encuentra bastante desviada de 50 Hz, aparece a 45.92 Hz, por lo que no se puede aproximar si se esperan cálculos exactos.

$$\begin{aligned} f_{exc(-)} &= f \cdot \left(1 - \left(\frac{1-s}{p}\right)\right) = 45.92 \cdot \left(1 - \left(\frac{1-s}{2}\right)\right) = 45.92 - 22.96 + 22.96s \\ &= 22.96 + 22.96s \end{aligned}$$

$$f_{exc(+)} = f \cdot \left(1 + \frac{1-s}{p}\right) = 45.92 \cdot \left(1 + \frac{1-s}{2}\right) = 45.92 + 22.96 - 22.95s$$

$$= 68.88 - 22.96s$$

Para el caso de estas mediciones la $f_{exc(-)}$ se halla a 23.027 Hz se encuentra un pico que llega a -55.4 dB y la media del ruido se encuentra a unos -85 dB por lo que se **confirma la existencia de excentricidades en el rotor de este motor.**

$$f_{exc(-)} = 22.96 + 22.96s = 23.027 \text{ Hz} \rightarrow s = 0.00292$$

$$f_{Li} = f \cdot (1 - 2s) = 45.92 \cdot (1 - 2 \cdot 0.00292) = 45.65 \text{ Hz}$$

$$f_{Ls} = f \cdot (1 + 2s) = 45.92 \cdot (1 + 2 \cdot 0.00292) = 46.188 \text{ Hz}$$

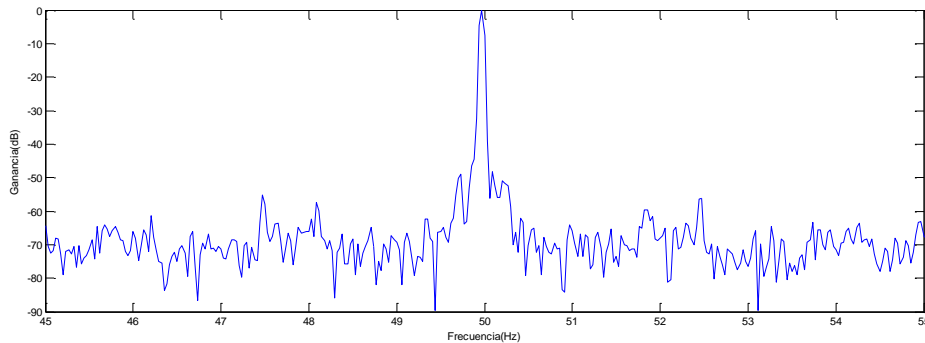
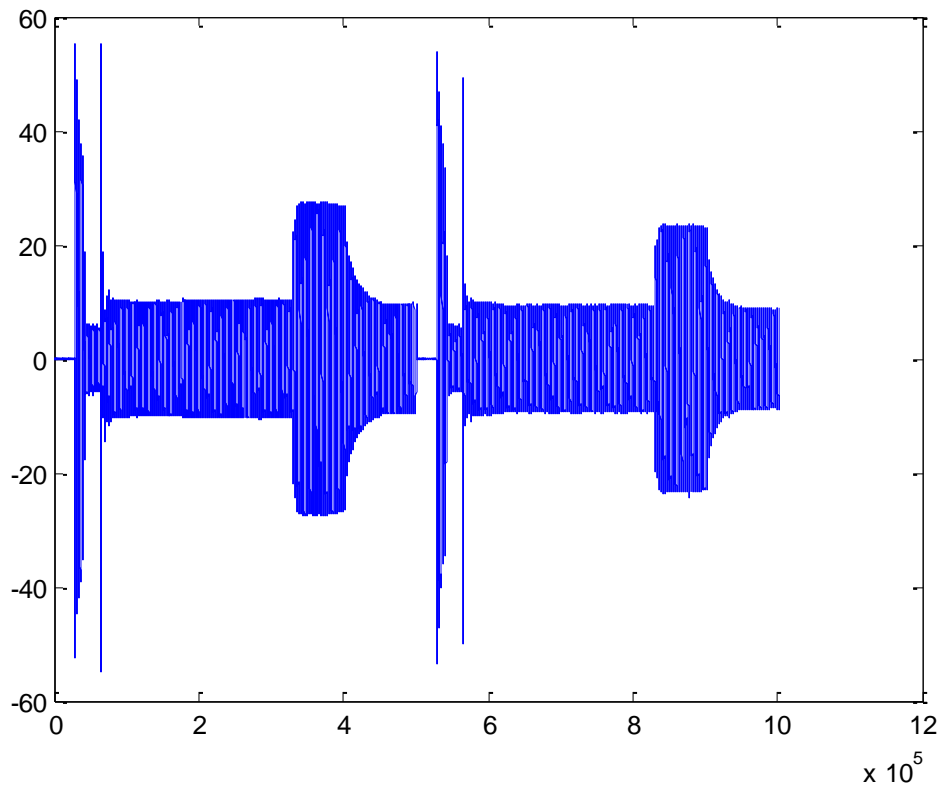


Fig.38: Ampliación entre 45 y 55 Hz.

A 45.65 Hz se observa un pico de -54.9 dB y a 46.188 Hz se encuentra un pico de -52.8 dB. Según con lo mostrado por estos picos se observa que hay posibilidades de barras desgastadas aunque **no existe demasiado peligro para el motor en este momento.**

7.4. Motor 3.

0004.FLD



Fif.39: Onda de corriente 0004.FLD.

En el caso de esta medición se monitorizó tanto el arranque como el régimen permanente por ello se observan grandes picos de corrientes al principio que se corresponden con la arrancad. Sin embargo, para realizar el análisis de corrientes se escogió una vez más una parte de la onda lo más estable posible, en este caso de 200000 muestras.

$$TiempoTotal = \frac{N^{\circ} \text{ Total de muestras}}{\text{frecuencia de muestreo}} = \frac{200000}{5000} = 40$$

$$\frac{\text{Segundos}}{\text{división}} = \frac{TiempoTotal}{10} = 4 \text{ seg/div}$$

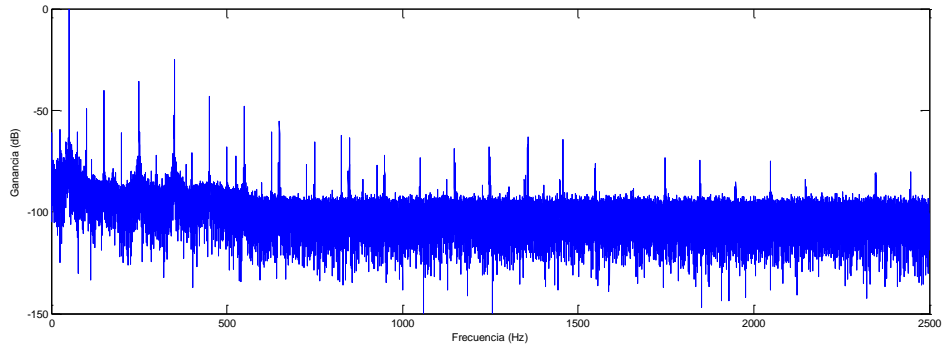


Fig.40: Representación en frecuencia de 0004.FLD

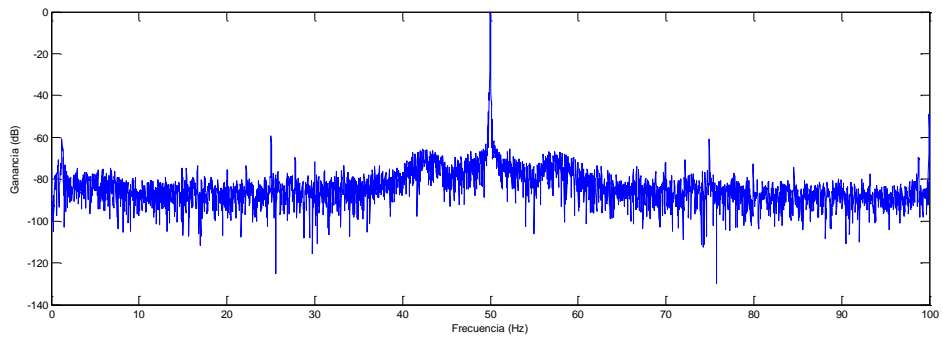


Fig.41: Ampliación entre 0 y 100 Hz.

$$f_{exc(-)} = f \cdot \left(1 - \left(\frac{1-s}{p}\right)\right) = 50 \cdot \left(1 - \left(\frac{1-s}{2}\right)\right) = 50 - 25 + 25s = 25 + 25s$$

$$f_{exc(+)} = f \cdot \left(1 + \left(\frac{1-s}{p}\right)\right) = 50 \cdot \left(1 + \left(\frac{1-s}{2}\right)\right) = 50 + 25 - 25s = 75 - 25s$$

Para el caso del motor número tres la $f_{exc(-)}$ aparece a 25.025 Hz y el pico de ganancia alcanza los -59.43 dB mientras que la media del ruido en esa zona se halla a -85 dB por lo que se puede observar que este motor **presenta claramente excentricidades entre el rotor y el estator.**

$$f_{exc(-)} = 25 + 25s = 25.025 \text{ Hz} \rightarrow s = 0.001$$

$$f_{Li} = f \cdot (1 - 2s) = 50 \cdot (1 - 2 \cdot 0.001) = 49.9 \text{ Hz}$$

$$f_{Ls} = f \cdot (1 + 2s) = 50 \cdot (1 + 2 \cdot 0.002) = 50.1 \text{ Hz}$$

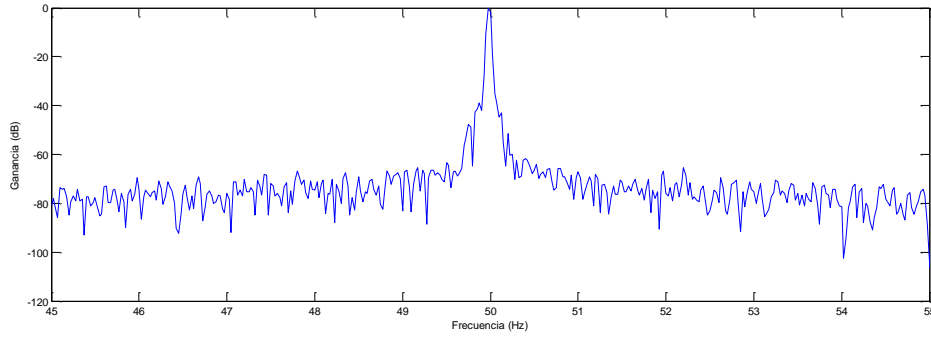


Fig.42: Ampliación entre 45 y 55 Hz.

A la frecuencia lateral izquierda de 49.9 Hz se observa un pico de ganancia que llega hasta -42 dB y en la frecuencia lateral derecha de 50.1 Hz el pico llega hasta -44.8 dB. De acuerdo con estos resultados el motor número tres presenta un serio desgaste de barras que **podría implicar una barra ya completamente rota** por lo que este motor debería someterse a reparaciones urgentes para prevenir la rotura de más barras.

0005.FLD

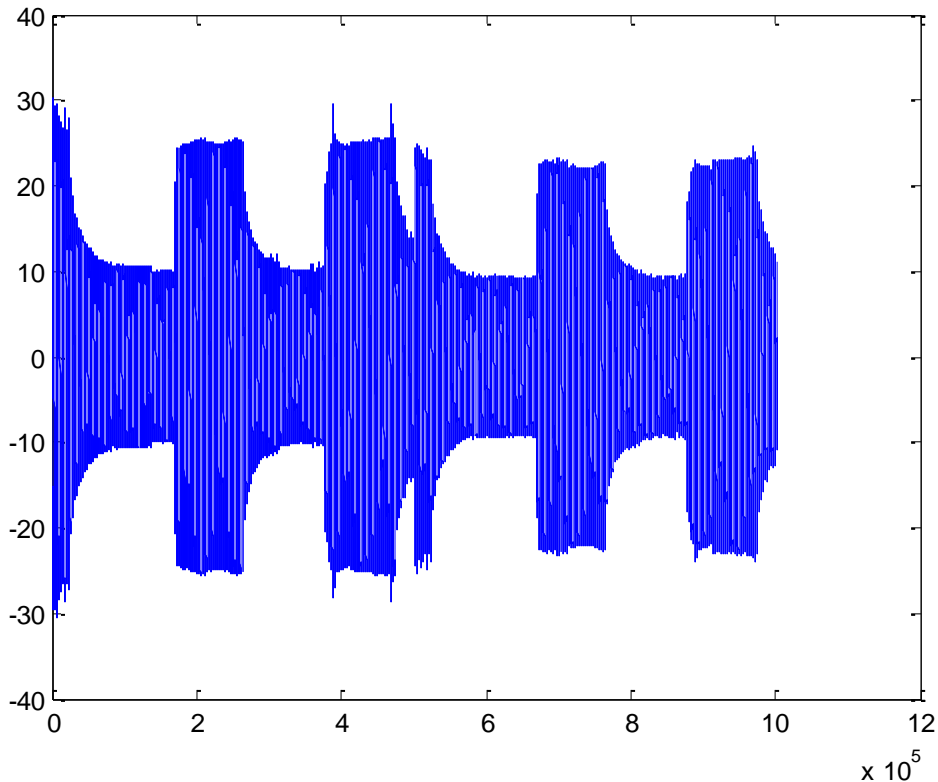


Fig.43: Onda de corriente 0005.FLD.

Debido a la inestabilidad de la onda de corriente, que presenta diversos momentos en los que el motor reclama más corriente, se ha tenido que escoger un período más corto de lo recomendado para realizar la transformada de Fourier de 99000 muestras para obtener un mejor resultado en frecuencia. El único problema que puede presentar

escoger períodos más cortos es que el resultado en frecuencia es menos detallados y se puede perder información por que los picos de ganancia se superpongan unos a otros.

$$TiempoTotal = \frac{N^{\circ} \text{ Total de muestras}}{\text{frecuencia de muestreo}} = \frac{99000}{5000} = 19.8$$

$$\frac{\text{Segundos}}{\text{división}} = \frac{TiempoTotal}{10} = 1.98 \text{ seg/div}$$

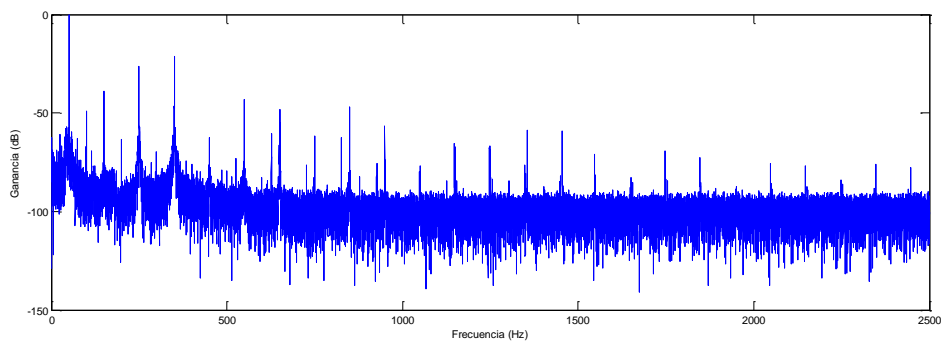


Fig.44: Representación en frecuencia de 0005.FLD.

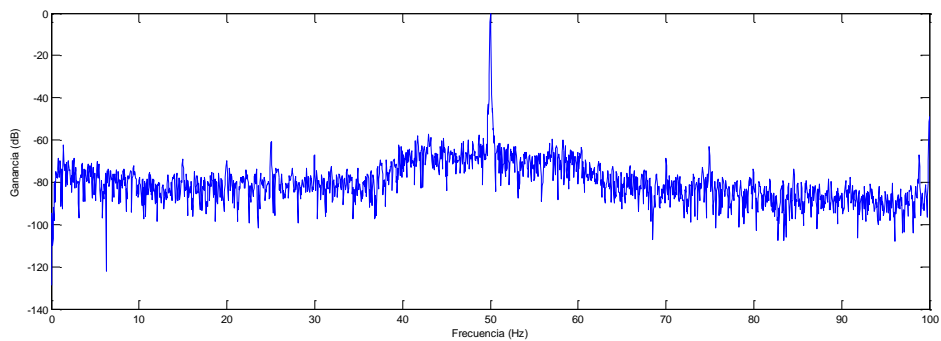


Fig.45: Ampliación entre 0 y 100 Hz.

$$f_{exc(-)} = f \cdot \left(1 - \left(\frac{1-s}{p}\right)\right) = 50 \cdot \left(1 - \left(\frac{1-s}{2}\right)\right) = 50 - 25 + 25s = 25 + 25s$$

$$f_{exc(+)} = f \cdot \left(1 + \left(\frac{1-s}{p}\right)\right) = 50 \cdot \left(1 + \left(\frac{1-s}{2}\right)\right) = 50 + 25 - 25s = 75 - 25s$$

En este caso el pico de la $f_{exc(-)}$ aparece a 25.05 Hz y llega hasta los -61 dB mientras que la media del ruido se encuentra a unos -83 dB por lo que se puede observar que, al estar el pico un poco más de 20 dB por encima de la media del ruido, en este motor aparecen **ciertas excentricidades en el entrehierro del rotor y el estator.**

$$f_{exc(-)} = 25 + 25s = 25.05 \text{ Hz} \rightarrow s = 0.002$$

$$f_{Li} = f \cdot (1 - 2s) = 50 \cdot (1 - 2 \cdot 0.002) = 49.8 \text{ Hz}$$

$$f_{Ls} = f \cdot (1 + 2s) = 50 \cdot (1 + 2 \cdot 0.002) = 50.2 \text{ Hz}$$

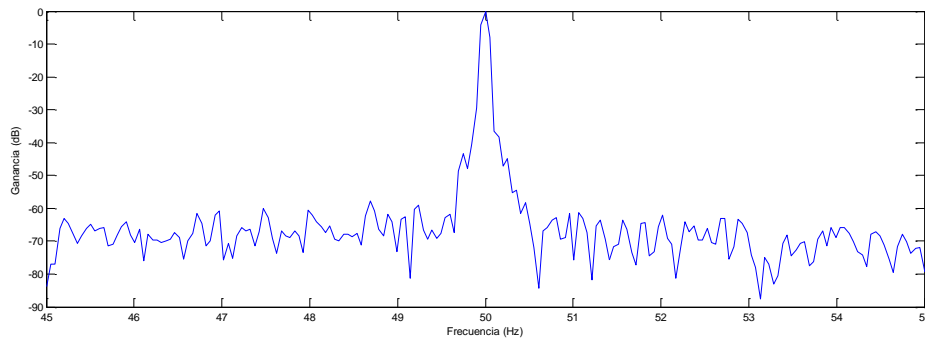


Fig.46: Ampliación entre 45 y 55 Hz.

La primera lateral se encuentra a 49.8 Hz y presenta un pico de ganancia que llega hasta -47.7 dB. La segunda frecuencia lateral se encuentra a 50.2 Hz y su pico de ganancia llega hasta -46.7 dB. Según estos resultados este motor está en la zona de peligro de rotura de barras y podría **incluso presentar alguna rota.** Sería recomendable una revisión completa del motor para reparar las posibles roturas de las barras o efectuar algún cambio.

7.5. Motor 4.

0006.FLD

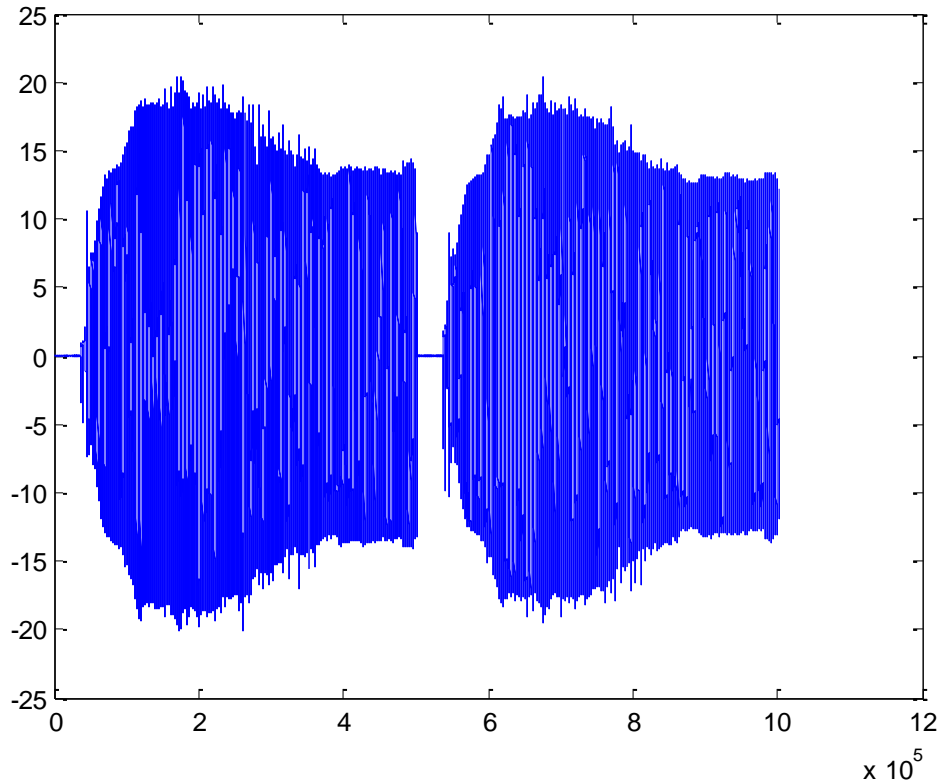


Fig.47: Onda de corriente 0006.FLD.

Este motor tiene la diferencia con respecto a los demás de llevar incorporado un variador de frecuencia que controla la velocidad de giro de este motor mediante un control de la frecuencia de suministro de la corriente. También es el único de los motores analizados que tiene un solo par de polos en lugar de dos, aunque esto sólo debería afectar a la ecuación final para hallar el deslizamiento s .

Ya que el motor lleva variador de frecuencia el arranque del motor no será tan brusco como en el caso de la medición 0004.FLD. Sin embargo, a la hora de analizar los datos esto lleva a que la zona que debiera ser procesada a través de la transformada de Fourier sea más corta. Para tratar de que el resultado de la transformada sea lo más detallado posible se ha elegido el período final de la onda capturada, el cual es más estable que el comienzo, que tiene una duración de 120000 muestras.

$$TiempoTotal = \frac{N^{\circ} \text{ Total de muestras}}{\text{frecuencia de muestreo}} = \frac{120000}{5000} = 24$$

$$\frac{\text{Segundos}}{\text{división}} = \frac{\text{TiempoTotal}}{10} = 2.4 \text{ seg/div}$$

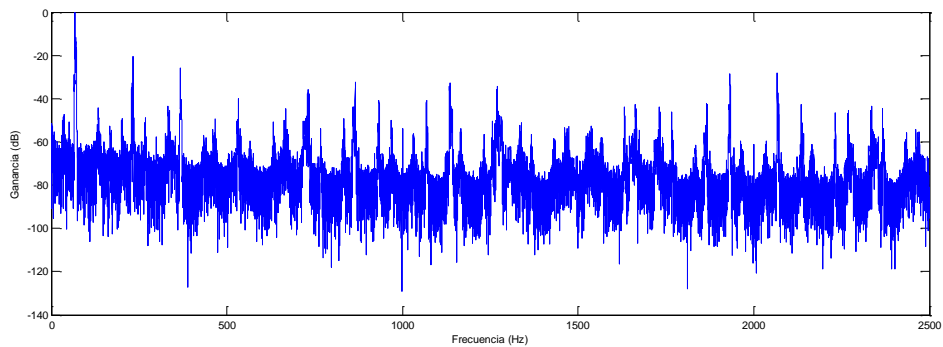


Fig.48: Representación en frecuencia de 0006.FLD.

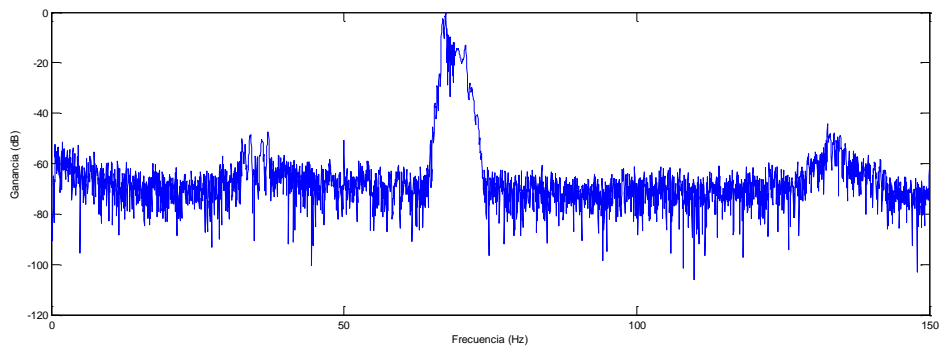


Fig.49: Ampliación entre 0 y 120 Hz.

Como se puede observar en las representaciones la frecuencia de suministro no aparece a 50 Hz sino que viene dirigida por el variador el cual trata de adaptarla según las necesidades de funcionamiento del motor. Esto hace que las frecuencias requeridas para el análisis aparezcan desplazadas y por lo tanto el método que se está empleando de **análisis de corrientes para los motores de este proyecto no sea efectivo.**

0007.FLD

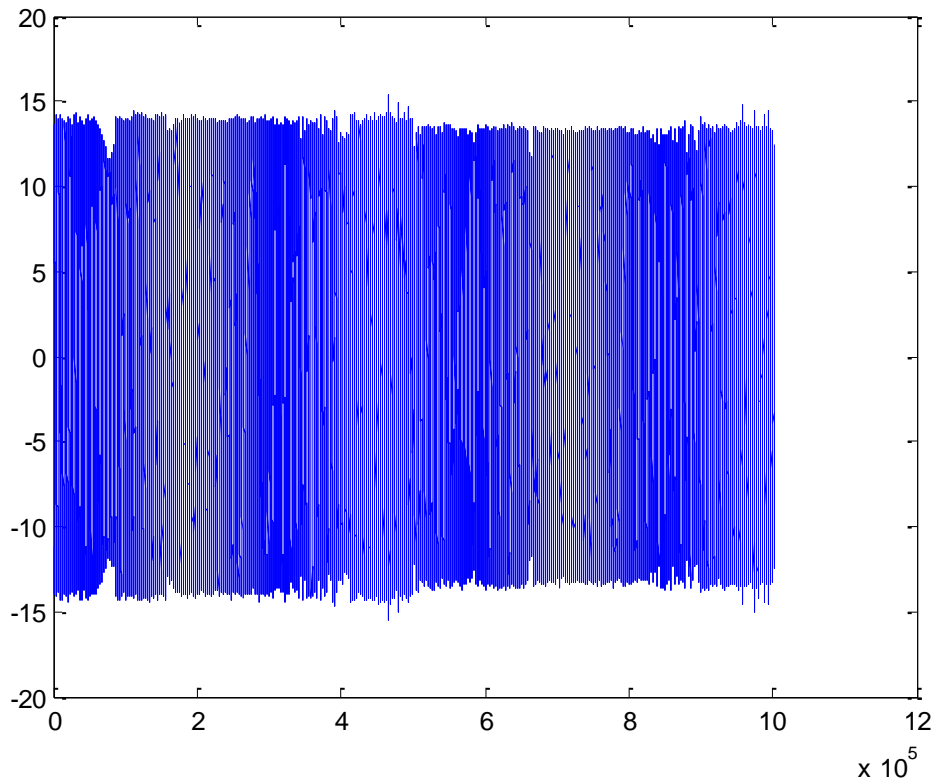


Fig.50: Onda de corriente 0007.FLD.

La segunda medición para el motor 4 se realizó trabajando este en régimen permanente para poder compararse posteriormente con la realizada del arranque más permanente.

Ya que esta medición resulto más estable pues se trataba de un funcionamiento en régimen permanente se ha podido escoger un mayor período para el análisis mediante transformada de Fourier. Este periodo es de 200000 muestras.

$$TiempoTotal = \frac{N^{\circ} \text{ Total de muestras}}{\text{frecuencia de muestreo}} = \frac{200000}{5000} = 40$$

$$\frac{\text{Segundos}}{\text{división}} = \frac{TiempoTotal}{10} = 4 \text{ seg/div}$$

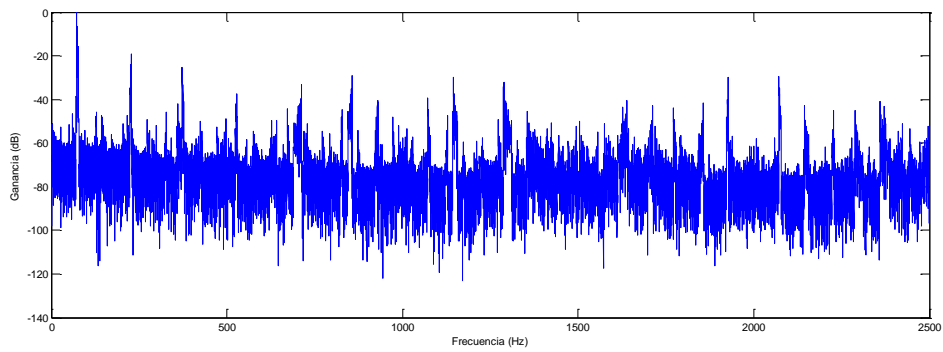


Fig.51: Representación en el dominio de la frecuencia de 0007.FLD.

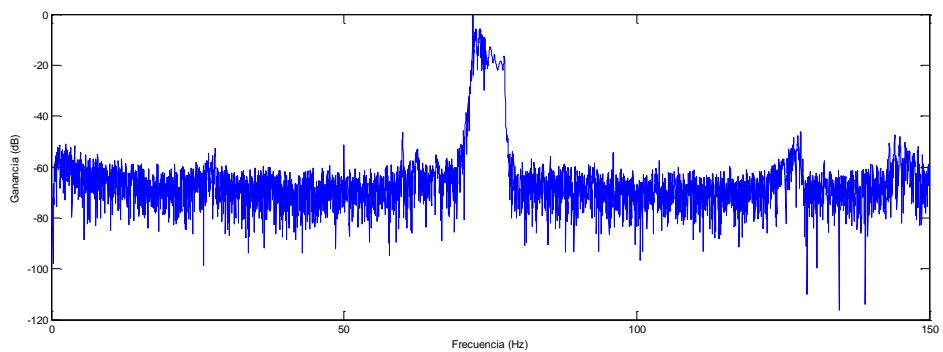


Fig.52: Ampliación entre 0 y 120 Hz.

Como se puede observar el resultado de esta medición sigue siendo inválido para realizar el análisis mediante el método utilizado hasta ahora debido a que tanto el armónico principal como el resto de los armónicos aparecen desplazados.

De estos resultados se puede llevar a la conclusión de que el método de análisis de corrientes no resulta efectivo para ser aplicado en algunos motores que funcionen mediante variador de frecuencia. En estos casos, se debería de aplicar técnicas diferentes para determinar su condición.

Sin embargo, lo que impide que este método sea aplicado es también la gran ventaja de los motores que usan variador de frecuencia pues gracias a este el funcionamiento del motor es menos brusco en momentos de mayor carga puntal y el desgaste que sufre el motor es mucho menor que en aquellos que funcionan sin variador.

7.6. Motor 5.

0008.FLD

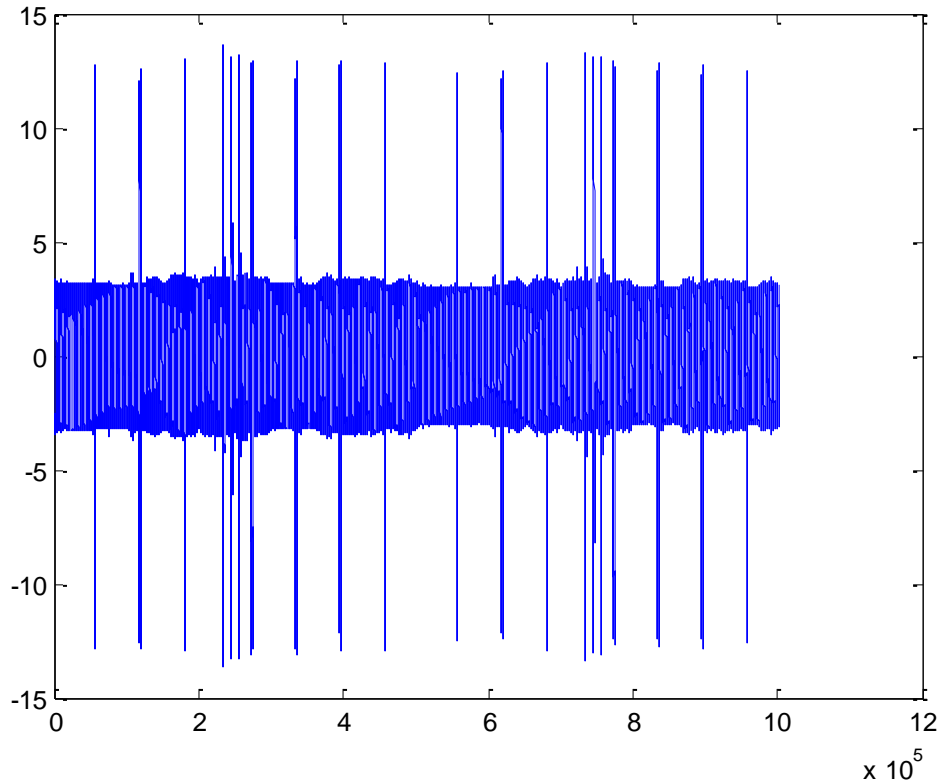


Fig.53: Onda de corriente 0008.FLD.

Como se puede observar fácilmente en la representación de la corriente el funcionamiento de este motor es bastante inestable. Esto es debido a que este motor trabaja en una prensa que corta chapa de forma periódica y cada uno de los picos de corriente que se pueden observar en la imagen se corresponde con uno de estos cortes por tanto mientras el motor sea analizado en su funcionamiento habitual en la máquina la corriente medida no podrá ser totalmente estable.

Para tratar de realizar el análisis con mayor claridad se ha escogido que el período a ser procesado mediante transformada de Fourier sea de 200000 muestras.

$$TiempoTotal = \frac{N^{\circ} \text{ Total de muestras}}{\text{frecuencia de muestreo}} = \frac{200000}{5000} = 40$$

$$\frac{\text{Segundos}}{\text{división}} = \frac{TiempoTotal}{10} = 4 \text{ seg/div}$$

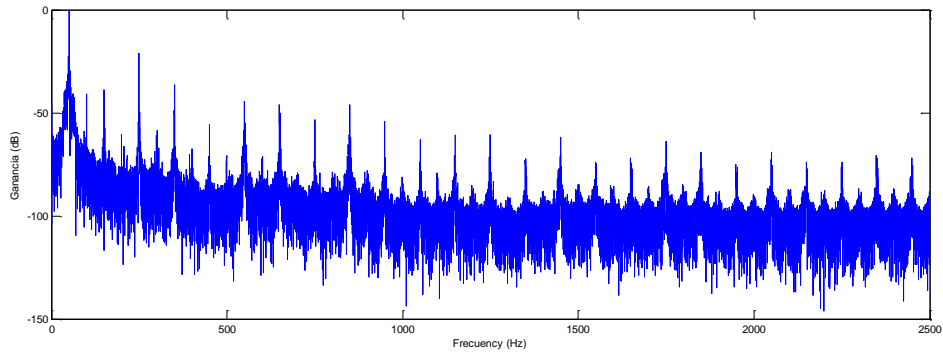


Fig.54: Representación en el dominio de la frecuencia de 0008.FLD

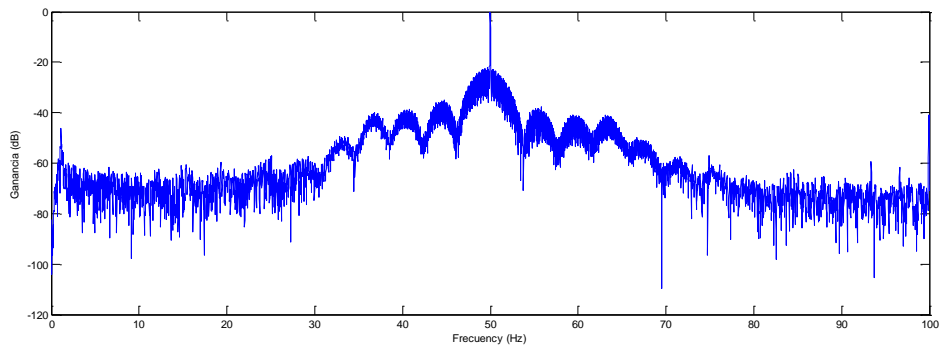


Fig.55: Ampliación entre 0 y 100 Hz.

Al ampliar el pico de la frecuencia de suministro se puede ver que esta aparece ligeramente desplazada estando situada a 49.975 Hz lo cual no es demasiado y puede ser aproximado a realizar los cálculos.

$$f_{exc(-)} = f \cdot \left(1 - \left(\frac{1-s}{p}\right)\right) = 50 \cdot \left(1 - \left(\frac{1-s}{2}\right)\right) = 50 - 25 + 25s = 25 + 25s$$

$$f_{exc(+)} = f \cdot \left(1 + \left(\frac{1-s}{p}\right)\right) = 50 \cdot \left(1 + \left(\frac{1-s}{2}\right)\right) = 50 + 25 - 25s = 75 - 25s$$

En el caso de esta medición la $f_{exc(-)}$ puede ser detectada a 25.05 Hz y presenta un pico de ganancia que llega hasta -57 dB mientras que la media del ruido en la zona del pico se encuentra a aproximadamente -67 dB. Según estos resultados la diferencia entre el pico de $f_{exc(-)}$ y la media del ruido es inferior a 20 dB por lo que el diagnóstico debería ser que **no se dan excentricidades en el entrehierro de este motor.**

$$f_{exc(-)} = 25 + 25s = 25.05 \text{ Hz} \rightarrow s = 0.002$$

$$f_{Li} = f \cdot (1 - 2s) = 50 \cdot (1 - 2 \cdot 0.002) = 49.8 \text{ Hz}$$

$$f_{Ls} = f \cdot (1 + 2s) = 50 \cdot (1 + 2 \cdot 0.002) = 50.2 \text{ Hz}$$

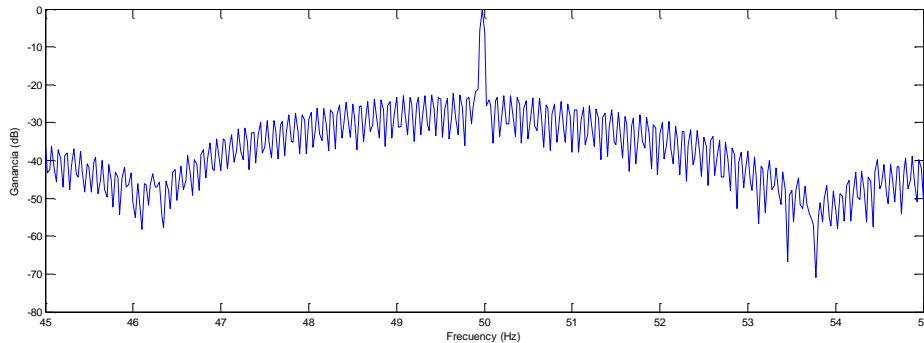


Fig.56: Ampliación entre 45 y 55 Hz.

En la primera de las frecuencias laterales el pico de la ganancia llega hasta -23.85 dB y el segundo pico se encuentra a -27.2 dB. Según estos resultados este motor presentaría diversas barras rotas.

Como se ha podido observar en las figuras 55 y 56 la gráfica resultante es muy diferente de lo que debería de ser la representación de la corriente de un motor. Esto puede ser debido a que la corriente que ha sido transformada presentaba demasiados picos y no era lo suficientemente estable para ser transformada con efectividad. Se trata de graficas realmente extrañas **que hacen llegar a la conclusión de que el análisis en este caso no es realmente efectivo.**

Los resultados aquí obtenido son por lo tanto nulos y no conducen a un diagnostico realista del estado del motor. Es por esto que este método parece no resultar el más adecuado para ser aplicado a motores que tiene un funcionamiento de este tipo y por lo tanto si se desea conocer el estado real del motor deberán de aplicársele métodos más complejos como el análisis del arranque.

0009.FLD

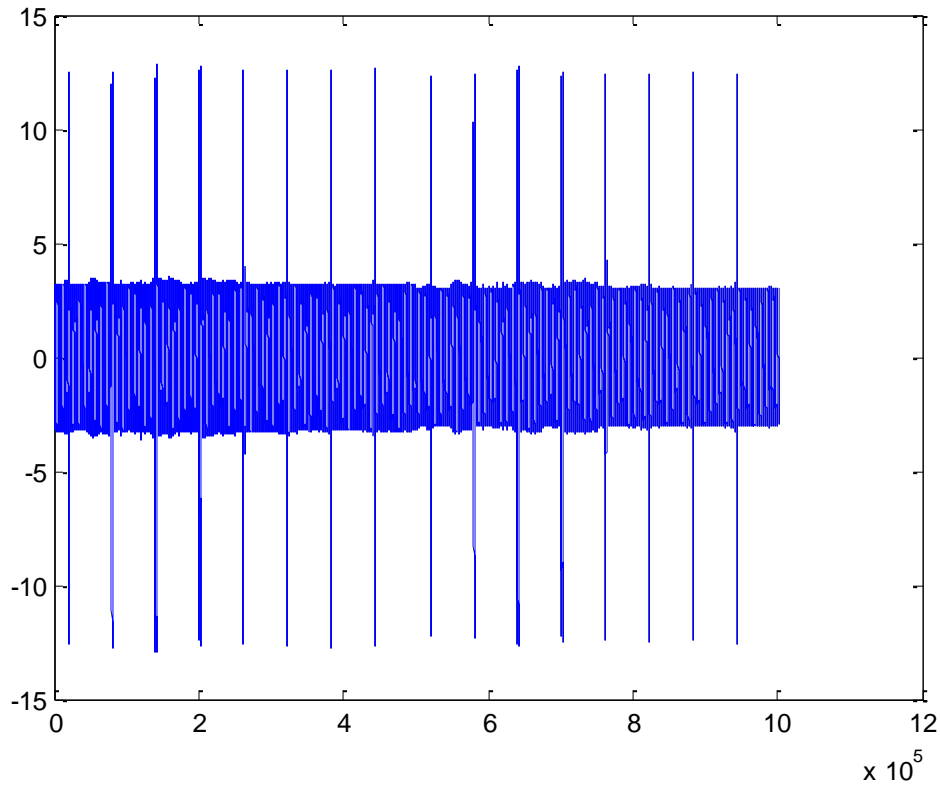


Fig.57: Onda de corriente 0009.FLD.

En el caso de la segunda medición para el motor 5, la 0009.FLD, se sigue observando a aparición de picos de corriente durante el funcionamiento del motor. Como ya se ha explicado antes esto es debido a la clase de funcionamiento que tiene este motor.

Para intentar lograr la mejor claridad posible se ha escogido un período de 200000 muestras sin evitar, pues no es posible, el que algunos de estos picos de corriente estén incluidos en él.

$$TiempoTotal = \frac{N^{\circ} \text{ Total de muestras}}{\text{frecuencia de muestreo}} = \frac{200000}{5000} = 40$$

$$\frac{\text{Segundos}}{\text{división}} = \frac{TiempoTotal}{10} = 4 \text{ seg/div}$$

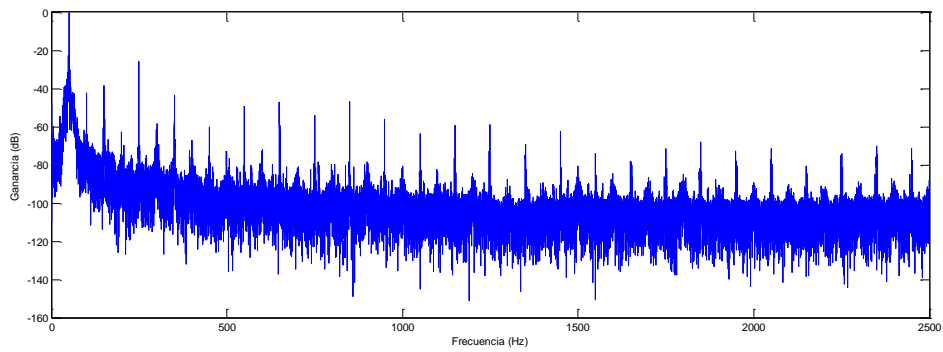


Fig.58: Representación en el dominio de la frecuencia de 0009.FLD

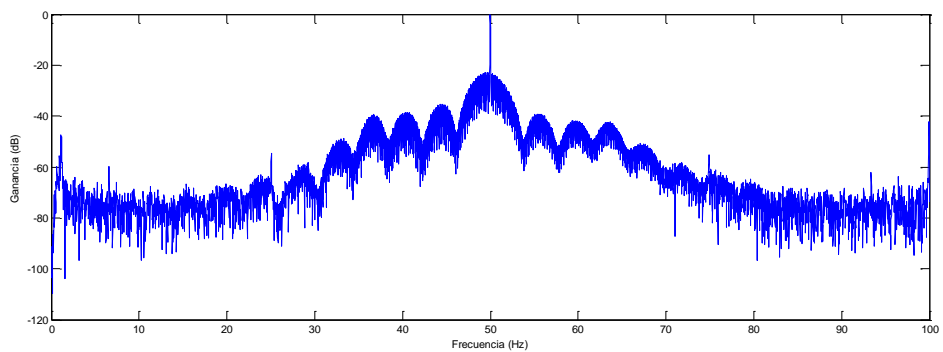


Fig.59: Ampliación entre 0 y 100 Hz.

Al igual que pasaba con la medición 0008.FLD en este caso la respuesta en frecuencia no es realista debido a los picos de corriente de la medición que impiden que la transformada de Fourier sea efectiva.

Se va a tratar de efectuar el análisis acorde con lo que la representación de arriba muestra pero este podría ser de dudosa veracidad.

$$f_{exc(-)} = f \cdot \left(1 - \left(\frac{1-s}{p}\right)\right) = 50 \cdot \left(1 - \left(\frac{1-s}{2}\right)\right) = 50 - 25 + 25s = 25 + 25s$$

$$f_{exc(+)} = f \cdot \left(1 + \left(\frac{1-s}{p}\right)\right) = 50 \cdot \left(1 + \left(\frac{1-s}{2}\right)\right) = 50 + 25 - 25s = 75 - 25s$$

Al realizar la ampliación alrededor de 25 Hz se observa que la $f_{exc(-)}$ aparece a 25.05 Hz y presenta un pico de ganancia que llega hasta -54.6 dB. Esto al ser comparado con la media del ruido en esa zona que es de -73 dB aproximadamente sería indicativo de que en este motor **no se da la presencia de excentricidades** en el entrehierro del rotor y el estator.

$$f_{exc(-)} = 25 + 25s = 25.05 \text{ Hz} \rightarrow s = 0.002$$

$$f_{Li} = f \cdot (1 - 2s) = 50 \cdot (1 - 2 \cdot 0.002) = 49.8 \text{ Hz}$$

$$f_{Ls} = f \cdot (1 + 2s) = 50 \cdot (1 + 2 \cdot 0.002) = 50.2 \text{ Hz}$$

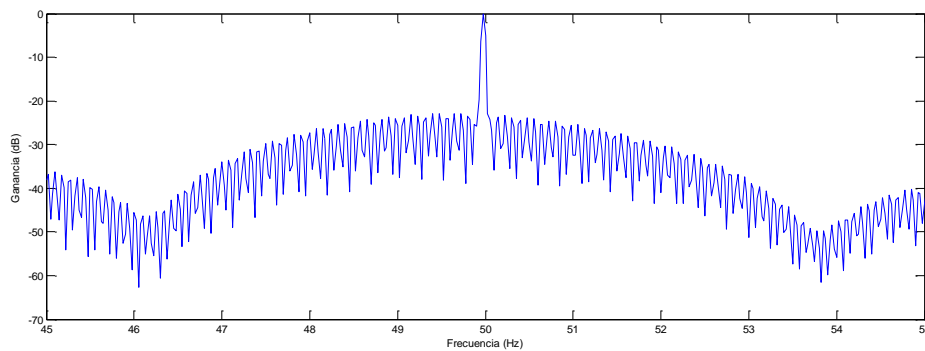


Fig.60: Ampliación entre 45 y 55 Hz.

A 49.8 Hz la ganancia llega hasta los -24 dB ya 50.2 Hz esta llega hasta -29.8 dB. Según estos resultados el motor presenta severos daños en las barras y más de una rota.

Como se puede deducir de unos resultados tan negativos el análisis de este motor no tiene veracidad y no indica el estado real del motor, el cual según esto debería estar prácticamente incapaz de operar.

Del análisis del motor número 5 se llega a la conclusión de que en motores que trabajen en un régimen tan inestable de funcionamiento **no se puede aplicar correctamente esta técnica de mantenimiento predictivo** y se debería, en caso de encontrar un diagnóstico realista, realizar una captura de la corriente durante la arrancada y aplicarle a estos resultados un análisis diferente al que se ha aplicado en este proyecto mucho más complejo.

7.7. Motor 6.

0010.FLD

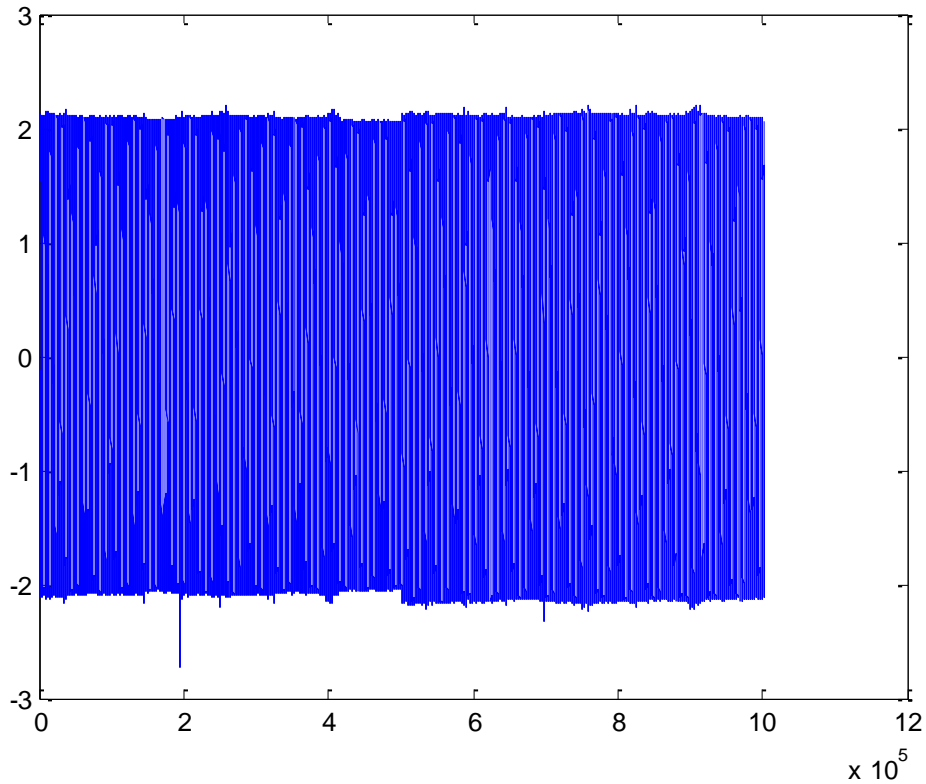


Fig.61: Onda de corriente 0010.FLD.

Para realizar este análisis se ha escogido un fragmento de 200000 muestras para llevar a cabo procesar en el programa de Matlab.

$$TiempoTotal = \frac{N^{\circ} \text{ Total de muestras}}{\text{frecuencia de muestreo}} = \frac{200000}{5000} = 40$$

$$\frac{\text{Segundos}}{\text{división}} = \frac{TiempoTotal}{10} = 4 \text{ seg/div}$$

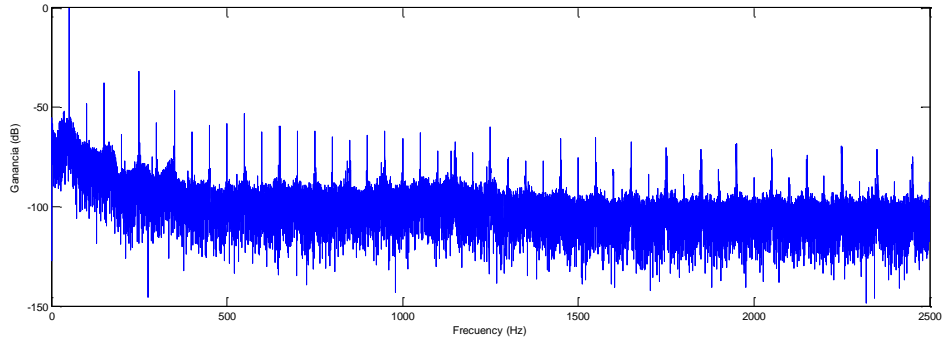


Fig.62: Representación en el dominio de la frecuencia de 0010.FLD.

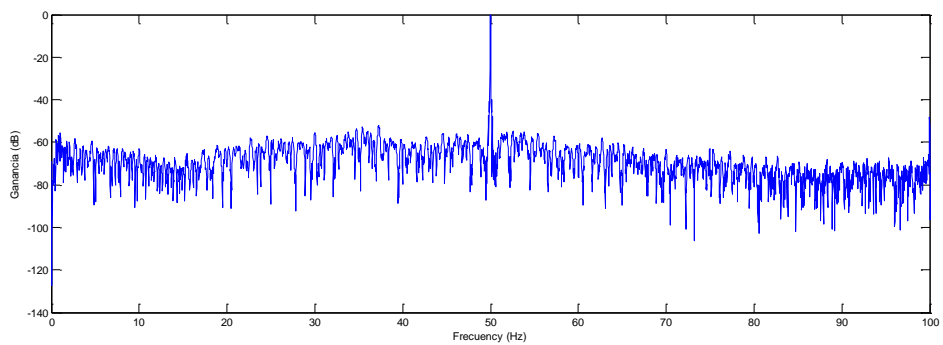


Fig.63: Ampliación entre 0 y 100 Hz.

$$f_{exc(-)} = f \cdot \left(1 - \left(\frac{1-s}{p}\right)\right) = 50 \cdot \left(1 - \left(\frac{1-s}{2}\right)\right) = 50 - 25 + 25s = 25 + 25s$$

$$f_{exc(+)} = f \cdot \left(1 + \left(\frac{1-s}{p}\right)\right) = 50 \cdot \left(1 + \left(\frac{1-s}{2}\right)\right) = 50 + 25 - 25s = 75 - 25s$$

En este caso particular la $f_{exc(-)}$ se encuentra a 25.05 Hz y presenta un pico de ganancia que llega hasta -59 dB mientras que la media del ruido se encuentra a -70 dB por lo que en este caso no se da la **existencia de excentricidades en el entrehierro del rotor y el estator.**

$$f_{exc(-)} = 25 + 25s = 25.05 \text{ Hz} \rightarrow s = 0.002$$

$$f_{Li} = f \cdot (1 - 2s) = 50 \cdot (1 - 2 \cdot 0.002) = 49.8 \text{ Hz}$$

$$f_{Ls} = f \cdot (1 + 2s) = 50 \cdot (1 + 2 \cdot 0.002) = 50.2 \text{ Hz}$$

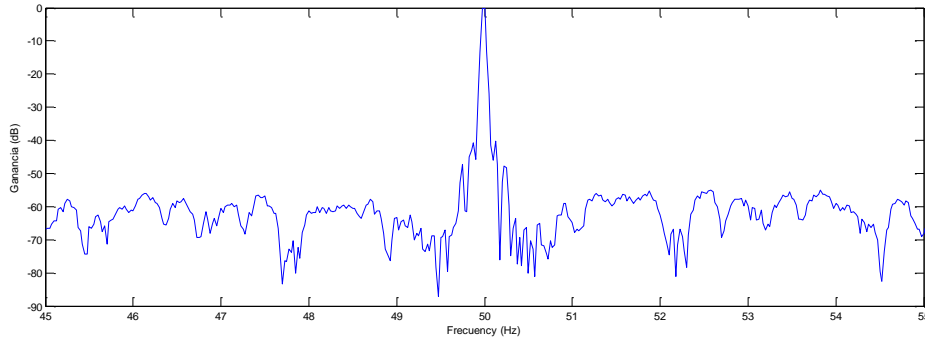


Fig.64: Ampliación entre 45 y 55 Hz.

En la primera frecuencia lateral de 49.8 Hz se observa un pico de ganancia que llega hasta -61.44 dB mientras que en la segunda frecuencia lateral situada a 50.2 Hz se observa que el pico de ganancia llega hasta -52.2 dB. Según el pico hallado en la segunda de las frecuencias laterales este motor **podría presentar cierto peligro de rotura de barras, no demasiado alto, pero teniendo un resultado en la primera frecuencia que indica la ausencia de peligro** se recomendaría hacer más pruebas a este motor para asegurar un resultado más definitivo. Sin embargo como ya se ha mencionado el riesgo de rotura no es demasiado alto por el momento.

0011.FLD

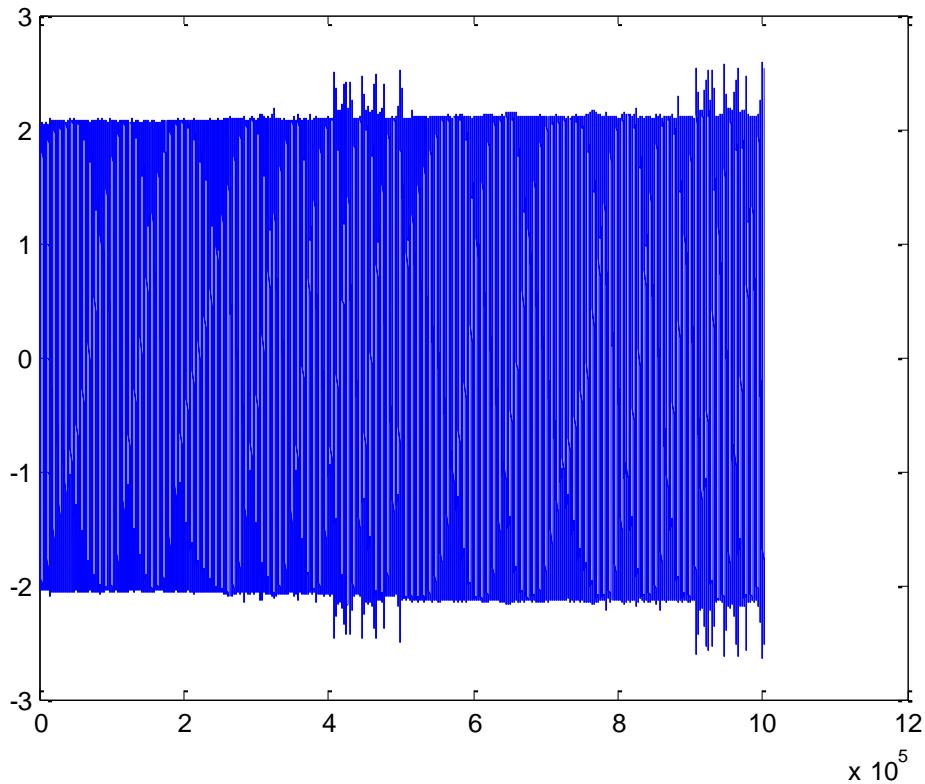


Fig.65: Onda de corriente 0011.FLD.

Para la transformación al dominio de la frecuencia de esta onda de corriente se escogió un período de 200000 muestras.

$$TiempoTotal = \frac{N^{\circ} \text{ Total de muestras}}{\text{frecuencia de muestreo}} = \frac{200000}{5000} = 40$$

$$\frac{\text{Segundos}}{\text{división}} = \frac{TiempoTotal}{10} = 4 \text{ seg/div}$$

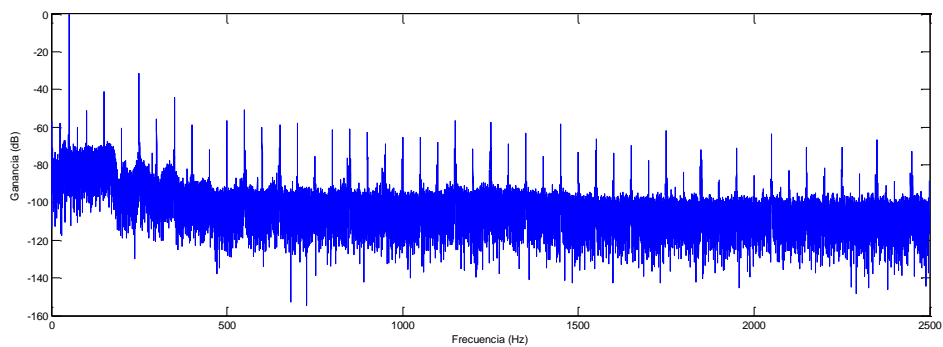


Fig.66: Representación en el dominio de la frecuencia de 0011.FLD.

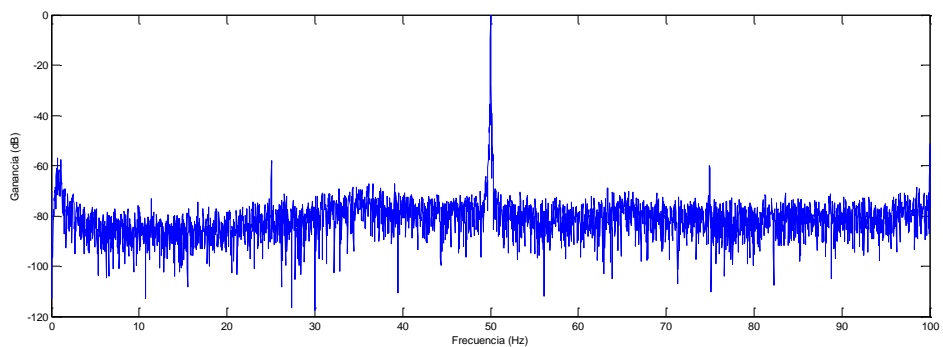


Fig.67: Ampliación entre 0 y 100 Hz.

$$f_{exc(-)} = f \cdot \left(1 - \left(\frac{1-s}{p}\right)\right) = 50 \cdot \left(1 - \left(\frac{1-s}{2}\right)\right) = 50 - 25 + 25s = 25 + 25s$$

$$f_{exc(+)} = f \cdot \left(1 + \left(\frac{1-s}{p}\right)\right) = 50 \cdot \left(1 + \left(\frac{1-s}{2}\right)\right) = 50 + 25 - 25s = 75 - 25s$$

La $f_{exc(-)}$ en el caso de esta medición aparece a 25.05 Hz y presenta un pico de ganancia que llega hasta -58.14 dB. La media de la ganancia del ruido en este fragmento es de -80 dB por lo que se aprecia que hay más de 20 dB de diferencia con el pico de $f_{exc(-)}$ por lo que se puede observar claramente que en este motor aparecen **ciertas excentricidades en el entrehierro.**

$$f_{exc(-)} = 25 + 25s = 25.05 \text{ Hz} \rightarrow s = 0.002$$

$$f_{Li} = f \cdot (1 - 2s) = 50 \cdot (1 - 2 \cdot 0.002) = 49.8 \text{ Hz}$$

$$f_{Ls} = f \cdot (1 + 2s) = 50 \cdot (1 + 2 \cdot 0.002) = 50.2 \text{ Hz}$$

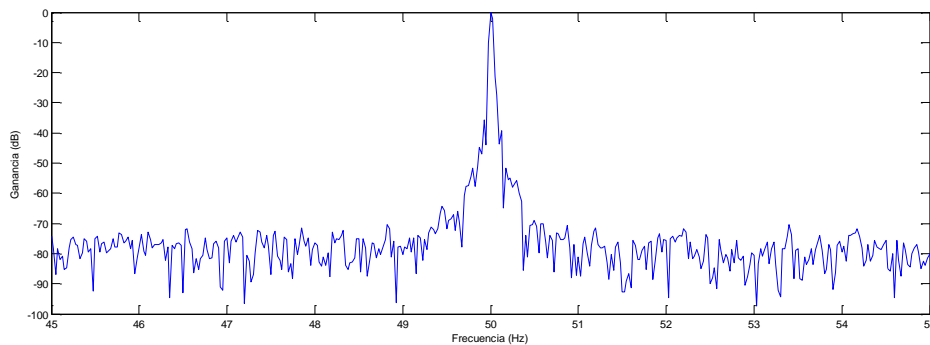


Fig.68: Ampliación entre 45 y 55 Hz.

Para la frecuencia lateral izquierda situada a 49.8 Hz aparece un pico de ganancia de -52 dB y para la frecuencia lateral derecha aparece un pico que llega hasta los -55 dB . Por lo tanto se puede concluir que este motor **empieza a presentar desgaste de barras aunque no existe por el momento peligro de rotura inminente ni es este desgaste demasiado elevado.**

7.8. Motor 7.

0012.FLD

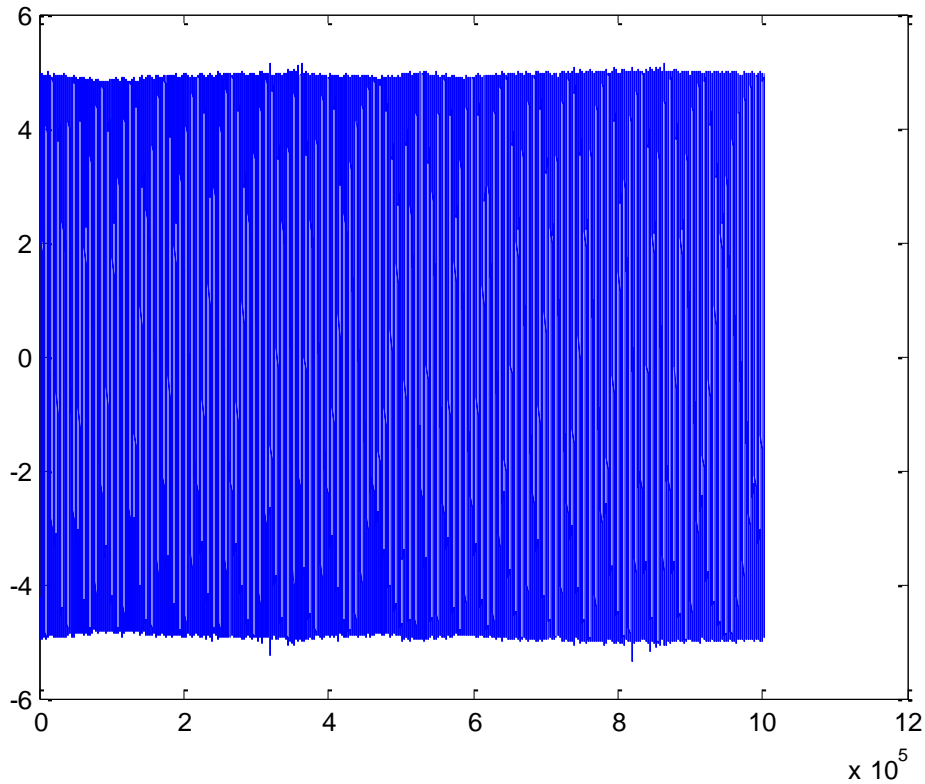


Fig.69. Onda de corriente 0012.FLD.

Como se puede observar la representación de la corriente en este caso es bastante estable a lo largo de toda la medida y por ello se pudo escoger un fragmento de 200000 muestras bastante estables para procesar en el fichero de Matlab.

$$TiempoTotal = \frac{N^{\circ} \text{ Total de muestras}}{\text{frecuencia de muestreo}} = \frac{200000}{5000} = 40$$

$$\frac{\text{Segundos}}{\text{división}} = \frac{TiempoTotal}{10} = 4 \text{ seg/div}$$

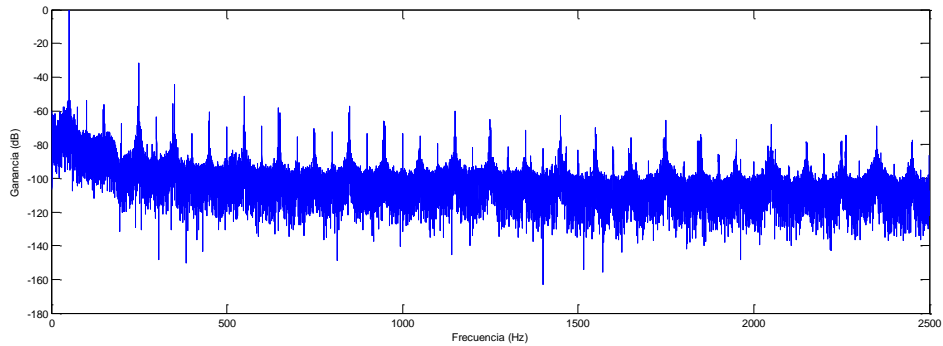


Fig.70: Representación en el dominio de la frecuencia de 0012.FLD.

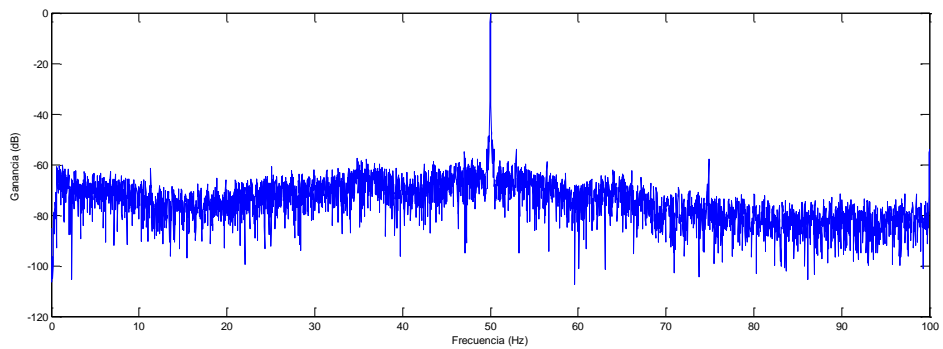


Fig.71: Ampliación entre 0 y 100 Hz.

$$f_{exc(-)} = f \cdot \left(1 - \frac{1-s}{p}\right) = 50 \cdot \left(1 - \frac{1-s}{2}\right) = 50 - 25 + 25s = 25 + 25s$$

$$f_{exc(+)} = f \cdot \left(1 + \frac{1-s}{p}\right) = 50 \cdot \left(1 + \frac{1-s}{2}\right) = 50 + 25 - 25s = 75 - 25s$$

En este caso la $f_{exc(-)}$ aparece a 25.1 Hz y en ella el pico de ganancia llega hasta los -60.74 dB mientras que la media del ruido se encuentra a unos -73 dB. De acuerdo con estos resultados este motor **no presentaría excentricidades en el rotor** ni se encuentra cercano a presentarlas.

$$f_{exc(-)} = 25 + 25s = 25.1 \text{ Hz} \rightarrow s = 0.004$$

$$f_{Li} = f \cdot (1 - 2s) = 50 \cdot (1 - 2 \cdot 0.004) = 49.6 \text{ Hz}$$

$$f_{Ls} = f \cdot (1 + 2s) = 50 \cdot (1 + 2 \cdot 0.004) = 50.4 \text{ Hz}$$

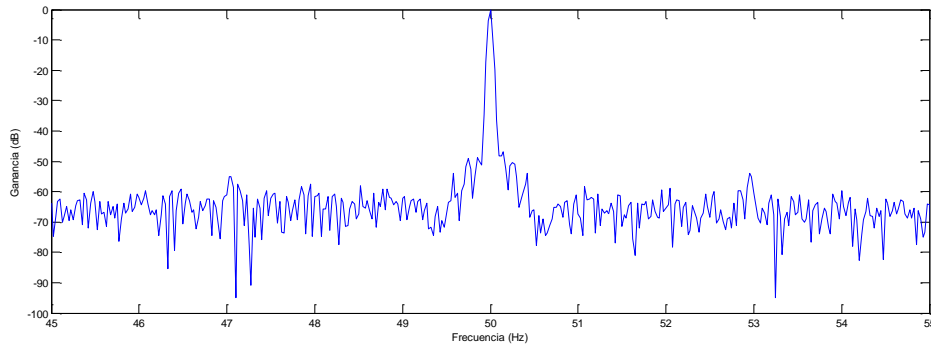


Fig.72: Ampliación entre 45 y 55 Hz.

Para el caso de esta medición la primera frecuencia lateral hallada a 49.6 Hz presenta un pico de -62 dB y la segunda frecuencia lateral en 50.4 Hz presenta un pico de -57.6 dB. Analizando estos resultados se llega a la conclusión de que este motor **no presenta ningún riesgo de rotura de barras** ya que estas se encuentran en un casi perfecto estado.

0013.FLD

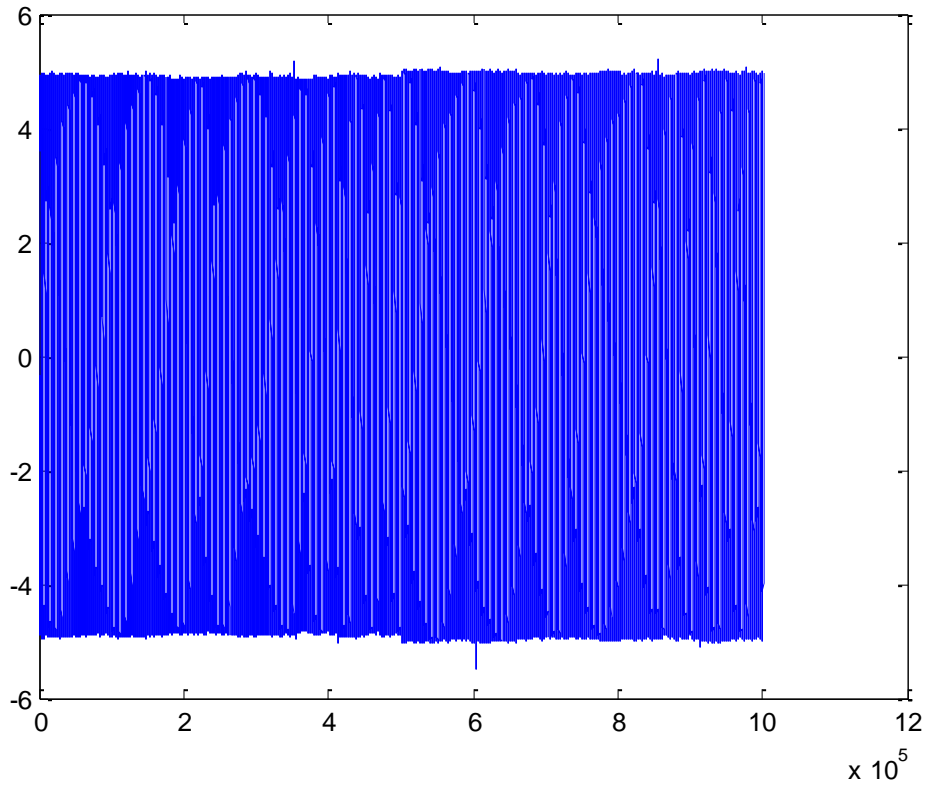


Fig.73: Onda de corriente 0013.FLD.

Para el caso de la onda 0013.FLD se eligió un período de 200000 para transformar a dominio de la frecuencia y realizar el análisis.

$$TiempoTotal = \frac{N^{\circ} \text{ Total de muestras}}{\text{frecuencia de muestreo}} = \frac{200000}{5000} = 40$$

$$\frac{\text{Segundos}}{\text{división}} = \frac{TiempoTotal}{10} = 4 \text{ seg/div}$$

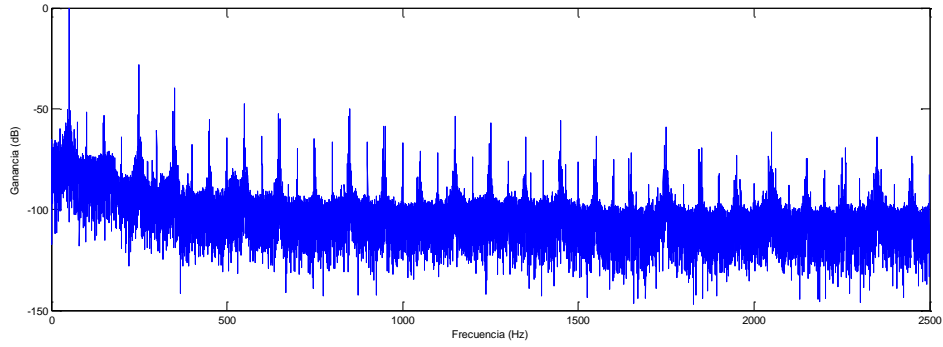


Fig.74: Representación en el dominio de la frecuencia de 0013.FLD.

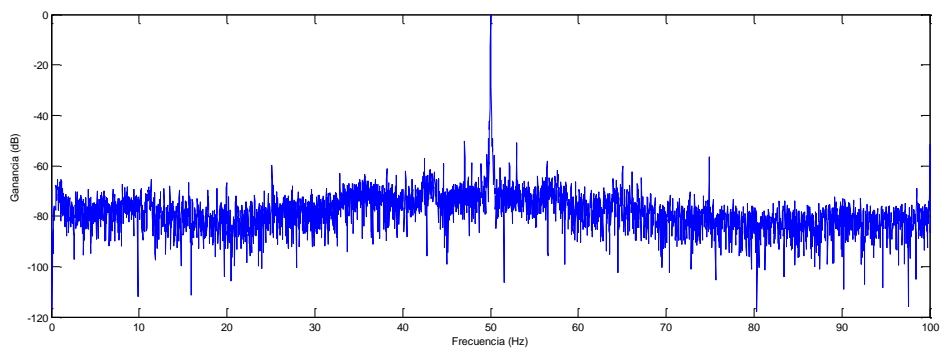


Fig.75: Ampliación entre 0 y 100 Hz.

$$f_{exc(-)} = f \cdot \left(1 - \left(\frac{1-s}{p}\right)\right) = 50 \cdot \left(1 - \left(\frac{1-s}{2}\right)\right) = 50 - 25 + 25s = 25 + 25s$$

$$f_{exc(+)} = f \cdot \left(1 + \left(\frac{1-s}{p}\right)\right) = 50 \cdot \left(1 + \left(\frac{1-s}{2}\right)\right) = 50 + 25 - 25s = 75 - 25s$$

En este caso la $f_{exc(-)}$ se puede encontrar a 25.1 Hz y en ella se observa un pico de ganancia que llega hasta -60.25 dB cuando la media del ruido en esta zona es de -80 dB. Por esto se puede ver fácilmente que **no se da la existencia de excentricidades** en este motor aunque podía estar cercano a presentar cierto desgaste por el uso que le llevaría a padecer de excentricidades en un futuro.

$$f_{exc(-)} = 25 + 25s = 25.1 \text{ Hz} \rightarrow s = 0.004$$

$$f_{Li} = f \cdot (1 - 2s) = 50 \cdot (1 - 2 \cdot 0.004) = 49.6 \text{ Hz}$$

$$f_{Ls} = f \cdot (1 + 2s) = 50 \cdot (1 + 2 \cdot 0.004) = 50.4 \text{ Hz}$$

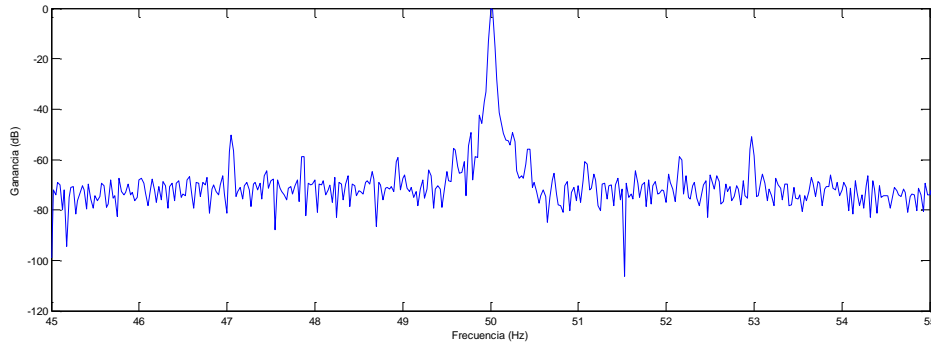


Fig.76: Ampliación entre 45 y 55 Hz.

A la frecuencia de 49.6 Hz se puede observar que la ganancia llega hasta -56.3 dB y a la frecuencia de 50.4 Hz la ganancia alcanza un valor de -62 dB. Como se puede observar aplicando el análisis habitual estos picos de ganancia están por encima del rango de peligro, entre -55 y -45 dB, por lo que **no hay peligro de rotura de barras ni estas presentan un desgaste demasiado elevado.**

7.9. Motor 8.

0014.FLD

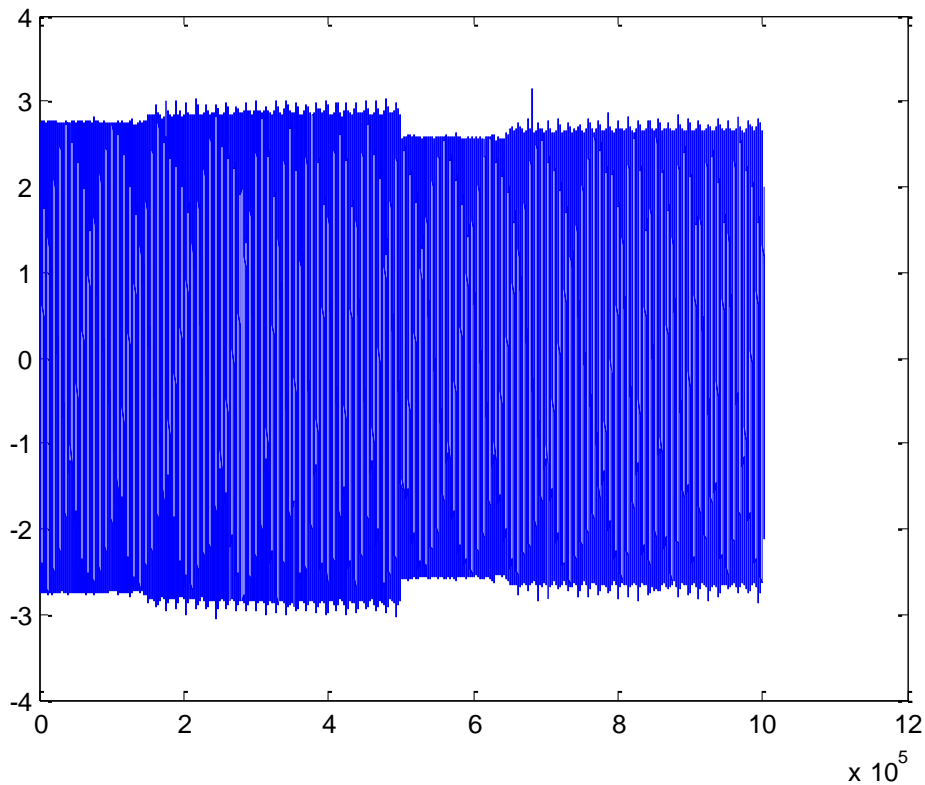


Fig.77: Onda de corriente 0014.FLD.

Debido a que en la mayor parte de la onda capturada el motor tuvo un funcionamiento no completamente lineal la onda resultante presenta diversos picos de corriente no muy grandes y constantes que podrían, una vez procesada la onda en Matlab, llevar a un error de diagnóstico se ha escogido un fragmento al comienzo de la onda de 150000 muestras para realizar la transformada.

$$TiempoTotal = \frac{N^{\circ} \text{ Total de muestras}}{\text{frecuencia de muestreo}} = \frac{150000}{5000} = 30$$

$$\frac{\text{Segundos}}{\text{división}} = \frac{TiempoTotal}{10} = 3 \text{ seg/div}$$

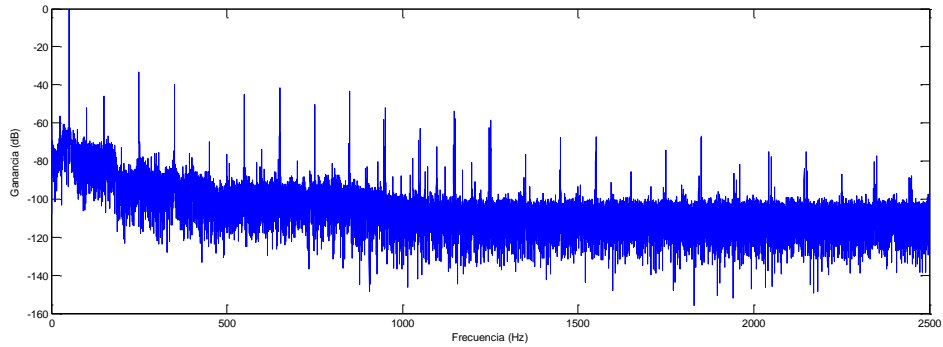


Fig.78: Representación en el dominio de la frecuencia de 0014.FLD.

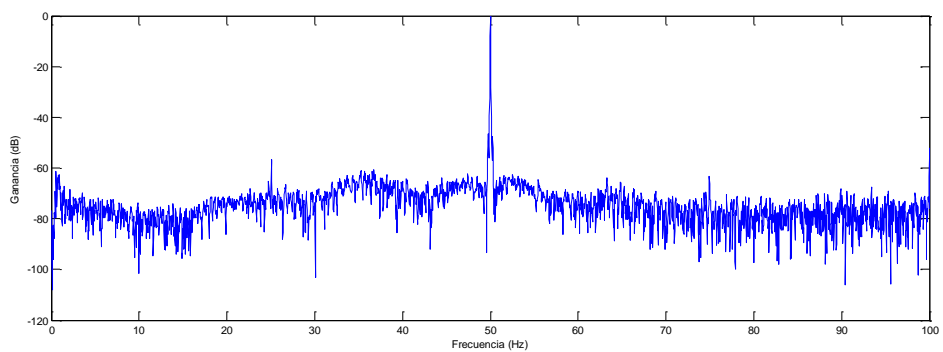


Fig.79: Ampliación entre 0 y 100 Hz.

$$f_{exc(-)} = f \cdot \left(1 - \left(\frac{1-s}{p}\right)\right) = 50 \cdot \left(1 - \left(\frac{1-s}{2}\right)\right) = 50 - 25 + 25s = 25 + 25s$$

$$f_{exc(+)} = f \cdot \left(1 + \left(\frac{1-s}{p}\right)\right) = 50 \cdot \left(1 + \left(\frac{1-s}{2}\right)\right) = 50 + 25 - 25s = 75 - 25s$$

Al observar la representación se puede hallar fácilmente la $f_{exc(-)}$ que en este caso aparece a 25.1 Hz en la cual el pico de la ganancia llega hasta -56.7 dB mientras que la media del ruido para este caso se encuentra alrededor de -73 dB. Al comparar ambos valores se observa fácilmente que la diferencia entre ambos no es superior a 20 dB por lo que se puede concluir que este motor **no presenta excentricidades en el entrehierro.**

$$f_{exc(-)} = 25 + 25s = 25.1 \text{ Hz} \rightarrow s = 0.004$$

$$f_{Li} = f \cdot (1 - 2s) = 50 \cdot (1 - 2 \cdot 0.004) = 49.6 \text{ Hz}$$

$$f_{Ls} = f \cdot (1 + 2s) = 50 \cdot (1 + 2 \cdot 0.004) = 50.4 \text{ Hz}$$

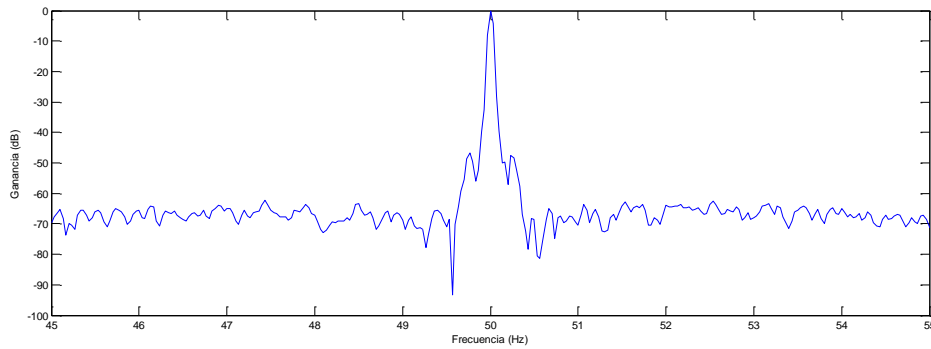


Fig.80: Ampliación entre 45 y 55 Hz.

Para la primera frecuencia lateral situada a 49.6 Hz se puede apreciar que la ganancia llega hasta -70.2 dB. En el caso de la segunda frecuencia lateral situada a 50.4 Hz el pico de la ganancia llega hasta -72.4 dB. De acuerdo con estos resultados el motor 8 se encuentra alejado de la zona de peligro de rotura o desgaste de barras y se considera que no lo estará por el momento. **Este se trata de un motor realmente sano si se tienen en cuenta estos resultados.**

0015.FLD

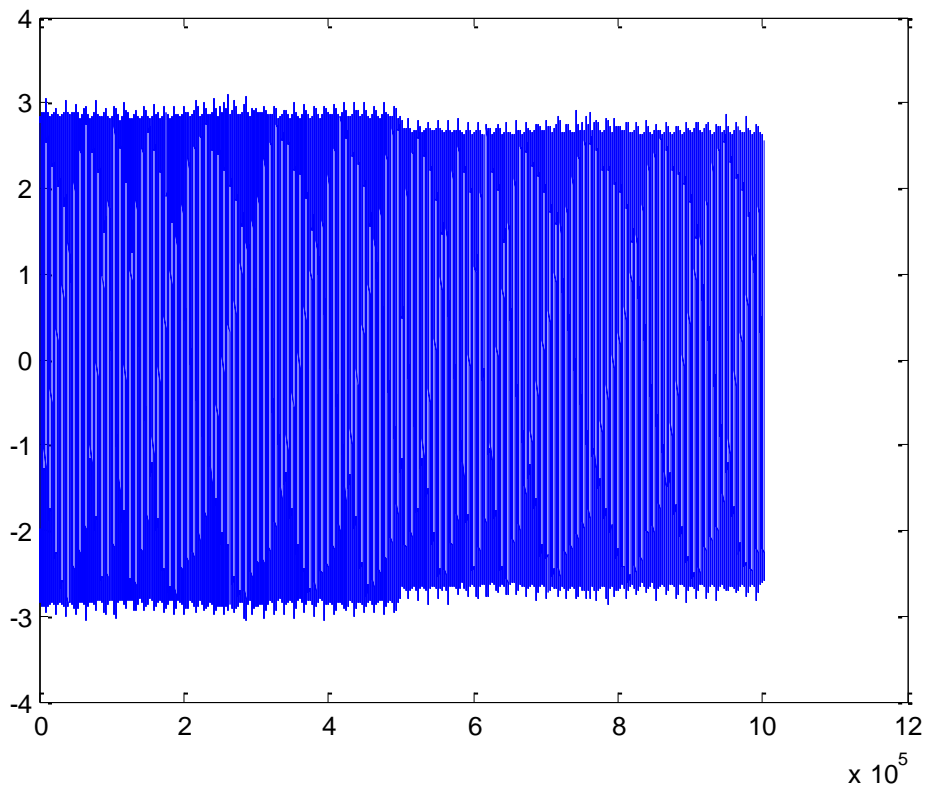


Fig.81: Onda de corriente 0015.FLD.

En el caso de esta medición a lo largo de todo el funcionamiento el motor presenta pequeños picos de corriente que podrían causar que la transformada de Fourier no saliera adecuadamente. Sin embargo, dado que toda la onda capturada se encuentra en el mismo estado, se ha escogido un fragmento de 200000 muestras para tratar de obtener un resultado lo más nítido posible.

$$TiempoTotal = \frac{N^{\circ} \text{ Total de muestras}}{\text{frecuencia de muestreo}} = \frac{200000}{5000} = 40$$

$$\frac{\text{Segundos}}{\text{división}} = \frac{TiempoTotal}{10} = 4 \text{ seg/div}$$

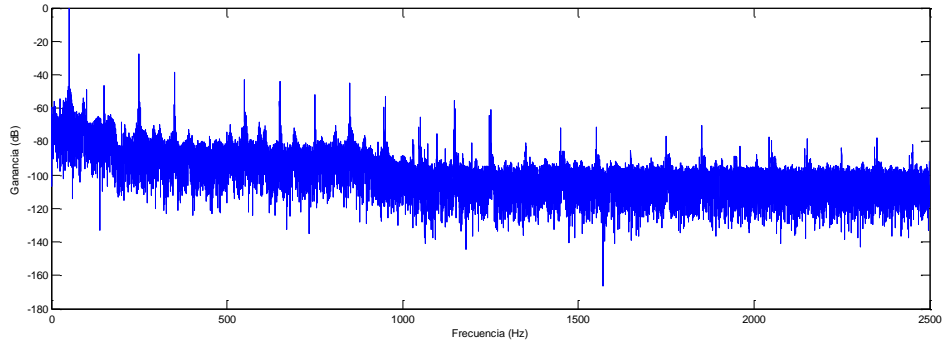


Fig.82: Representación en el dominio de la frecuencia de 0015.FLD.

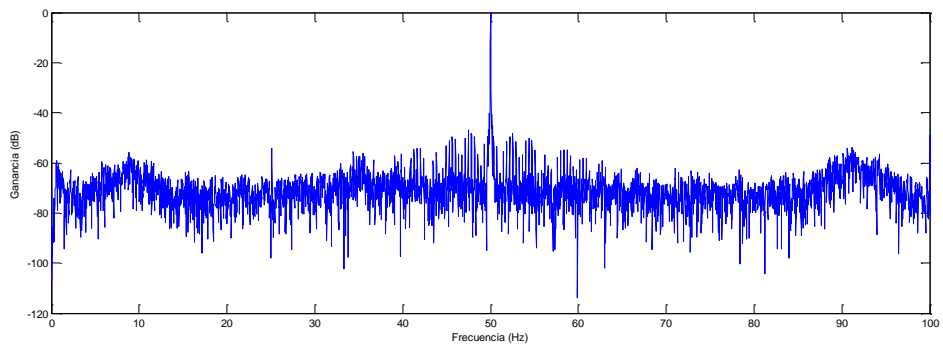


Fig.83: Ampliación entre 0 y 100 Hz.

$$f_{exc(-)} = f \cdot \left(1 - \frac{1-s}{p}\right) = 50 \cdot \left(1 - \frac{1-s}{2}\right) = 50 - 25 + 25s = 25 + 25s$$

$$f_{exc(+)} = f \cdot \left(1 + \frac{1-s}{p}\right) = 50 \cdot \left(1 + \frac{1-s}{2}\right) = 50 + 25 - 25s = 75 - 25s$$

Como se puede observar en la representación en Matlab al ampliar la gráfica la $f_{exc(-)}$ aparece a 25.1 Hz y presenta un pico de ganancia que llega hasta -54.3 dB. En este caso la media del ruido en la zona es de entre -73 y -74 dB por lo que se considera que este motor **no presenta excentricidades** o presenta unas realmente insignificantes pero habrá que tenerlo en cuenta posteriormente cuando el desgaste lleve a la aparición de algunas más serias.

$$f_{exc(-)} = 25 + 25s = 25.1 \text{ Hz} \rightarrow s = 0.004$$

$$f_{Li} = f \cdot (1 - 2s) = 50 \cdot (1 - 2 \cdot 0.004) = 49.6 \text{ Hz}$$

$$f_{Ls} = f \cdot (1 + 2s) = 50 \cdot (1 + 2 \cdot 0.004) = 50.4 \text{ Hz}$$

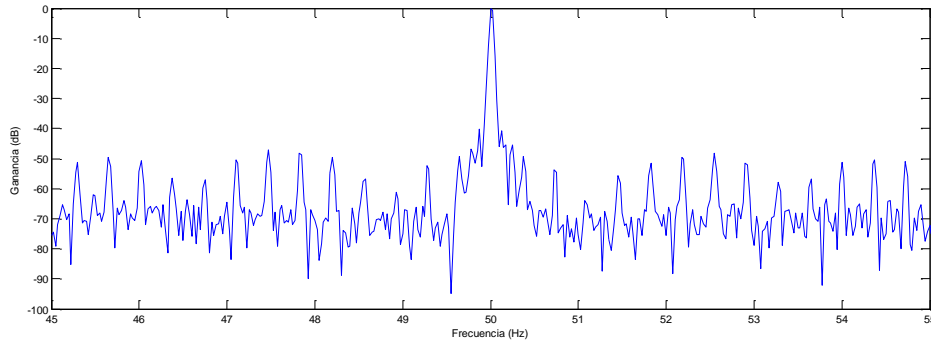


Fig.84: Ampliación entre 45 y 55 Hz.

Para la primera frecuencia lateral en 49.6 Hz se puede observar un pico de ganancia que llega hasta -64 dB y para la segunda frecuencia lateral se observa un pico que llega hasta -54.7 dB. Esta diferencia da lugar a duda y por lo tanto examinar otras mediciones previas a realizar un diagnóstico definitivo del motor sería recomendable. Sin embargo, en ambos casos la ganancia está o por encima del umbral de riesgo de rotura o ligeramente por debajo por lo que se puede decir que **este motor no corre peligro inminente de rotura de barras.**

Una vez se ha completado el análisis de las corrientes en los motores que fueron escogidos se pueden extraer diferentes conclusiones tanto del estado de los motores como de las condiciones para las que este análisis funciona mejor y en qué momentos es recomendable aplicarlo para, posteriormente, diseñar un plan de mantenimiento efectivo.

7.10. Conclusiones del análisis de corriente.

Número de Motor	Medición	Excentricidades	Rotura de Barras
Motor 1	0000.FLD	No.	No hay peligro.
	0001.FLD	No.	No hay peligro.
Motor 2	0002.FLD	Sí.	No hay peligro.
	0003.FLD	Sí.	Ligero desgaste de barras.
Motor 3	0004.FLD	Sí.	Hay desgaste de barras.
	0005.FLD	Sí.	Hay desgaste de barras.
Motor 4	0006.FLD	No concluyente.	No concluyente.
	0007.FLD	No concluyente.	No concluyente.
Motor 5	0008.FLD	No concluyente.	No concluyente.
	0009.FLD	No concluyente.	No concluyente.
Motor 6	0010.FLD	No.	Ligero desgaste de barras.
	0011.FLD	Sí.	Ligero desgaste de barras.
Motor 7	0012.FLD	No.	No hay peligro.
	0013.FLD	No.	No hay peligro.
Motor 8	0014.FLD	No.	No hay peligro.
	0015.FLD	No.	No hay peligro.

A continuación, se va a proceder a explicar las principales conclusiones del análisis de cada motor y hacer un resumen de las recomendaciones para el mantenimiento de cada uno así como una breve explicación de las conclusiones extraídas de la aplicación de la técnica de análisis de corrientes.

Motor 1.

Después de haber realizado el análisis completo de las mediciones en régimen permanente de este motor se puede concluir que se trata de un motor completamente sano y en el que no se da la presencia de excentricidades en el entrehierro ni de peligro de rotura de barras.

Para este motor bastaría con efectuar un mantenimiento preventivo habitual y de forma anual se le podría aplicar alguna técnica de mantenimiento predictivo, como ésta de análisis de corrientes, para mantener al día la información sobre su estado.

Motor 2.

Como se puede concluir fácilmente al observar los resultados este motor presenta ciertas excentricidades en el entrehierro del rotor lo cual es del todo habitual en los motores eléctricos con bastante tiempo de funcionamiento y no llega a ser algo preocupante a menos que estas sean muy grandes y demasiado extendidas por todo el entrehierro.

A la hora de buscar el estado de las barras del motor y tratar de ver si existe o no peligro de rotura se puede ver que los resultados de ambas mediciones llevan a conclusiones algo diferentes. Sin embargo, en la que se indica que están en peor estado este no es excesivamente alto pues los picos de ganancia llegan tan solo hasta -54.9 dB y hasta -52.4 dB lo cual tan solo indica cierto desgaste en las barras. Mientras que en la otra medición, la 0002.FLD, se da llega a la conclusión de que no hay peligro.

Es por esto que se puede concluir que en este motor tan solo se da cierto desgaste de las barras como es habitual en motores con bastante tiempo en uso.

Para este motor también bastaría con aplicar un plan de mantenimiento preventivo habitual y mantener cierto control del estado del motor mediante la aplicación de, por ejemplo, esta técnica del análisis de corrientes estatoricas.

Motor 3.

En el caso de este motor en ambas mediciones se llega a la conclusión de que existen excentricidades en el entrehierro lo cual, como ya se ha mencionado antes, es totalmente normal que aparezca en motores en uso desde cierto tiempo.

También se da la presencia de peligro de rotura de barras en ambas mediciones. En la primera medición los resultados están en -42 dB y -44.8 dB, según esto existe bastante desgaste de barra en este motor y podría llegar a tener una barra rota lo cual podría ser peligroso. En la segunda medición los resultados de la ganancia están en -47.7 dB y - 46.7 dB lo cual es algo más optimista que los resultados de la primera medición pero siguen indicando un alto desgaste de las barras del motor e incluso que podría existir alguna rota. Sería recomendable realizar un análisis del arranque del motor para evaluar mejor el peligro de rotura de barras.

En el caso de este motor se debería efectuar una revisión del motor para ver como de alto es ese desgaste y actuar en consecuencia en caso de que exista alguna barra rota.

Motor 4.

Como ya se ha indicado en las páginas correspondientes al análisis de este motor este es un caso especial debido al variador de frecuencia que controla el motor. En este caso la técnica de análisis de corrientes demuestra no ser efectivo y para conocer el estado del motor se le debería de aplicar alguna técnica de mantenimiento predictivo

de mayor complejidad como el análisis de la corriente de arranque para tratar de extraer conclusiones exactas del estado del motor.

Por el momento no se puede dar ninguna recomendación para el plan de mantenimiento que se le debería de aplicar a este motor puesto que no se ha podido extraer ninguna conclusión del análisis.

Motor 5.

El caso de este motor también es un caso en el que la técnica de análisis de corrientes no puede ser aplicada de forma efectiva pues el tipo de onda de corriente extraída de la medición, altamente inestable debido a grandes picos de corriente causados por las necesidades de funcionamiento concretas de esa máquina, no son aptos para ser transformados al dominio de la frecuencia.

Como se puede ver del análisis efectuado a modo de ejemplo para observar como las conclusiones carecían de sentido, pues indicaban el total fallo de este motor.

Por el momento no se puede dar ninguna recomendación para el plan de mantenimiento que se le debería de aplicar a este motor puesto que los resultados no parecen para nada correctos.

Motor 6.

En el caso de este motor el análisis en busca de excentricidades cambia ligeramente en cada medición, lo cual no es extraño, da en una el que no existen excentricidades y en la otra que si se da la presencia de excentricidades en el entrehierro del rotor. Se puede concluir que este motor presentaría, como es habitual en casi todos los motores que no son absolutamente nuevos, que se da la presencia de ligeras excentricidades en el entrehierro.

En cuanto al peligro de rotura de barras, en ambas mediciones se llega a la conclusión de que existe un ligero desgaste en las barras del motor el cual no es excesivamente peligroso para la integridad del motor y es probablemente debido al uso. En este caso es recomendable realizar también un análisis de la arrancada del motor para obtener conclusiones más exactas del estado de las barras.

Para este motor número 6 se recomienda también un plan habitual de mantenimiento preventivo y mantener cierto seguimiento del estado de las barras del motor para prevenir fallos repentinos.

Motor 7.

Este es el caso de un motor totalmente sano pues ambas mediciones indican tanto la ausencia de peligro de rotura de barras como la ausencia de excentricidades en el rotor.

Se recomendaría seguir también un plan de mantenimiento preventivo para tratar de disminuir los riesgos que producirían desgaste en el motor y de llevar a cabo un seguimiento periódico para asegurarse de que no cambia su buen estado. Sin embargo, se puede concluir que este motor, el cual está en tan buen estado, no dará ningún fallo por el momento y se puede estar bastante seguro de que seguirá dando un buen funcionamiento.

Motor 8.

En el caso de este motor se llega también a la conclusión de que se encuentra en un buen estado pues ambas mediciones indican la ausencia de excentricidades en el entrehierro y de peligro de rotura de barras.

Debido a estos resultados las recomendaciones para el mantenimiento serán las mismas que para el motor número 7. Estos son casos de motores que no han sufrido demasiado desgaste debido principalmente al tiempo que llevan en funcionamiento y a que este es, probablemente, más estable que el de los demás o que trabajan durante menor tiempo a plena carga.

8. Termografía infrarroja.

Como técnica complementaria a la aplicación de la técnica de análisis de corrientes estatoricas, se realizaron una serie de fotografías térmicas en algunos de los motores para comprobar el estado de los elementos más susceptibles a daños debidos a posibles sobrecalentamientos causados por sobrecargas o por el propio funcionamiento del motor.

Como ya se ha mencionado esta medida es de carácter complementario pues aunque puede resultar bastante útil para detectar fallos por sobrecalentamiento, su aplicación rigurosa requeriría disponer de un histórico de medidas que permitiera detectar variaciones frente a medidas anteriores.

Todas las imágenes muestran la temperatura en el punto central de la imagen en grados Fahrenheit.

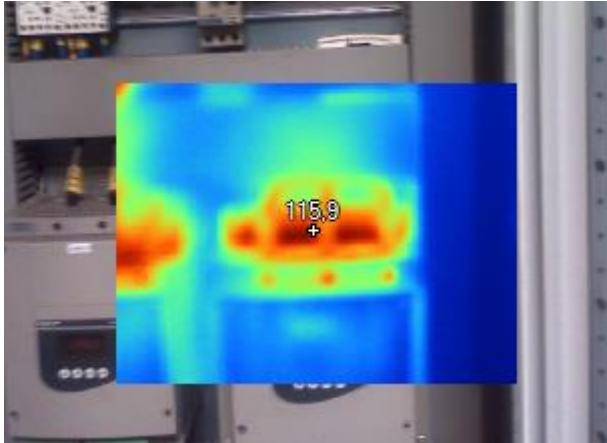


Fig. 85: Termografía de las conexiones del motor en el cuadro Eléctrico.

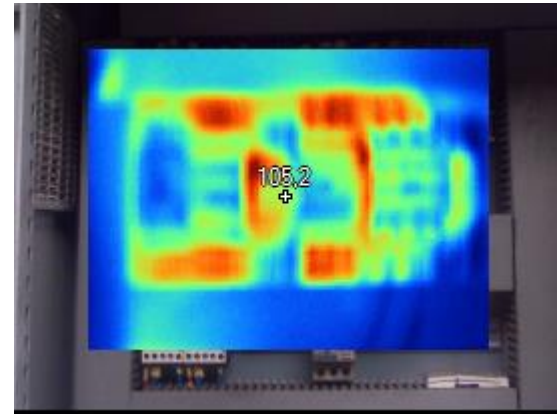


Fig.86: Termografía de las conexiones del motor en el cuadro eléctrico.

Para empezar, se buscaron sobrecalentamientos en los cuadros de conexiones en caso de que hubiera alguna conexión defectuosa que fuera fácil de detectar. Se pueden observar los puntos calientes de las conexiones, pero ninguno de éstos presenta un excesivo sobrecalentamiento.

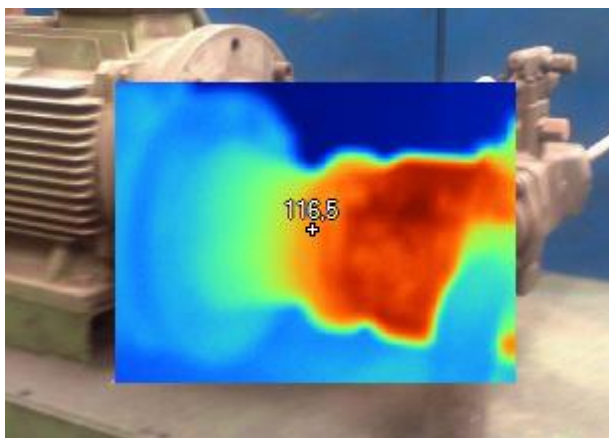


Fig.87: Termografía entrada de alimentación del motor.

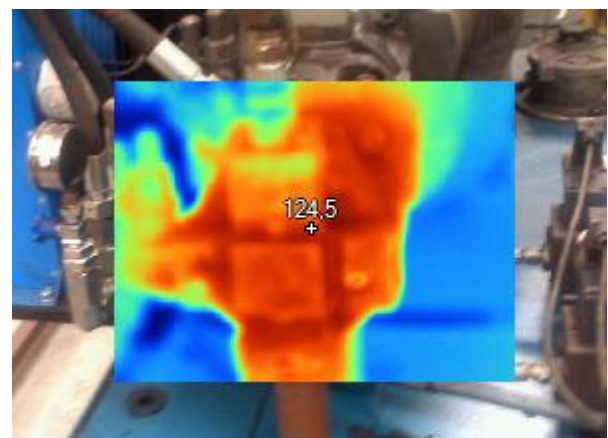


Fig.88: Termografía entrada conexiones motor.

Como se puede observar en las imágenes superiores algunos de los mayores sobrecalentamientos se dan sobre todo en los acoplamientos entre el motor y la carga. Sin embargo para llegar a conclusiones reales sobre la peligrosidad de estos sobrecalentamientos habría que aplicar la técnica de termografía infrarroja de forma periódica para poder definir unos umbrales de fallo reales y particulares a cada motor.

Cabe mencionar que en el ejemplo de la figura 88 se observa un fuerte sobrecalentamiento que debería de ser analizado más detenidamente y sería recomendable hacer un seguimiento de este motor en caso de que estos sobrecalentamientos pudieran ir a más.

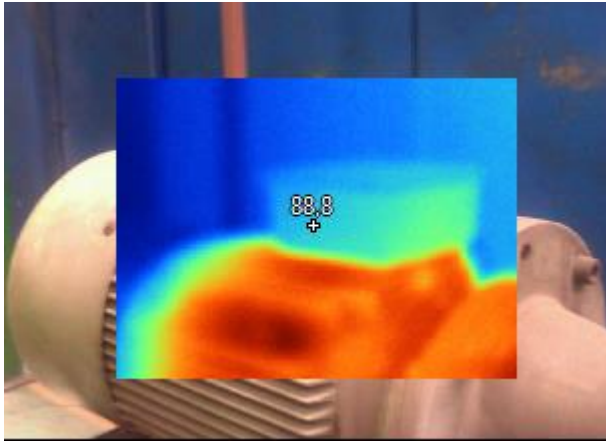


Fig.89: Termografía motor.

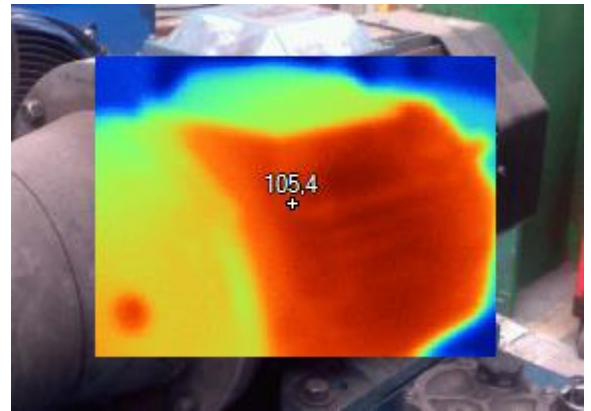


Fig.90: Termografía motor

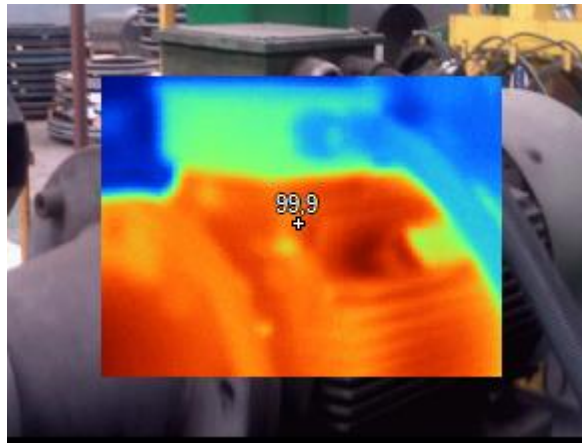


Fig.91: Termografía motor.

Como último elemento a mencionar para el análisis de las temperaturas del motor queda la zona de la carcasa, donde se encuentra el estator del motor.

Esta zona puede presentar sobrecalentamiento en caso de un funcionamiento a plena potencia durante un tiempo demasiado elevado. Esto podría llevar a severos problemas en motor y se debe vigilar periódicamente que no aparezcan puntos calientes demasiado elevados.

Para un buen plan de mantenimiento en una fábrica que sea totalmente efectivo sería recomendable el aplicar la termografía infrarroja en los motores con mayor carga de trabajo para prevenir fallos inesperados. Esta técnica de mantenimiento predictivo es altamente sencilla de aplicar si se cuenta con los equipos adecuados y es fácilmente visible donde se dan los puntos de riesgo para el motor, si bien requiere una cierta experiencia, principalmente para establecer umbrales de alarma y detectar patrones de fallo en las imágenes.

9. Conclusiones.

Las técnicas y procedimientos de mantenimiento predictivo suponen una gran ventaja para la industria que las aplica, pues esta obtendrá una mayor fiabilidad en la calidad de su producción así como una disminución de los tiempos de parada imprevistos por fallo de una máquina o componente de ésta.

Como se puede deducir del análisis de los resultados de este trabajo, la aplicación del análisis de corrientes estatoricas a los motores de alterna es una medida realmente útil, pues permite obtener claras conclusiones sobre el estado de diferentes componentes o partes de la máquina que no son fácilmente diagnosticables mediante el análisis de otras magnitudes

Sin embargo, como también se observa en los resultados, se dan algunos casos concretos en los que este análisis no es efectivo y su aplicación es por tanto no recomendable, ya que llevará a conclusiones erróneas y alejadas de la realidad. En este trabajo estas excepciones se dan en motores con variador de frecuencia y motores que funcionan de forma inestable, lo que provoca picos de corriente que impiden una buena aplicación de la transformada de Fourier.

Es por tanto recomendable el seguir desarrollando la efectividad de esta técnica y de otras de mayor complejidad para asegurarse de que se obtiene información verídica del estado de los motores.

En cuanto a la técnica de la termografía infrarroja, esta es de utilidad por su sencillez a la hora de interpretar las imágenes térmicas pero debe de ser aplicada de forma periódica para obtener conclusiones realistas sobre las probabilidades de fallo.

En conclusión, la aplicación de técnicas de mantenimiento predictivo resulta más que recomendable para cualquier industria que desee mantener alta su productividad en incrementar la fiabilidad de su producción.

10. Bibliografía.

Fernández Cabanas M., García Melero M., Alonso Orcajo G., Cano Rodríguez J. M., Solares Sariego J. "Técnicas para el Mantenimiento y Diagnóstico de máquinas Eléctricas Rotativas". Barcelona: Marcombo Boixareu Editores; 1998. [Fuente 1]

O. Duque Pérez, M. Pérez Alonso, "Motores de inducción: técnicas de mantenimiento predictivo", Ed. Badajoz-Abecedario, 2005.

O. S. Lobosco, J.L.P.C. Dias, "Selección y Aplicación de Motores Eléctricos", Ed. Marcombo 1989

Jose A Antonino-Daviu, "Mantenimiento Predictivo de Motores Eléctricos Industriales Mediante Análisis de la Corriente", actas del 6º Congreso Español de Mantenimiento, AEM, Tarragona 28-30 marzo, 2017.

W.T. Thomson, M. Fenger, "Current signature analysis to detect induction motor faults" IEEE Industry Applications Magazine, July/August 2001, pp. 26-34.

M.J. Picazo-Ródenas, R. Royo, J. Antonino-Daviu, J. Roger-Folch, "Use of the infrared data for heating curve computation in induction motors: Application to fault diagnosis," Engineering Failure Analysis, Volume 35, 15 December 2013, Pages 178-192

C. Yang, T-J. Kang, D. Hyun, S. Lee, J. Antonino-Daviu, J. Pons-Llinares, "Reliable Detection of Induction Motor Rotor Faults Under the Rotor Axial Air Duct Influence," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 50, no. 4, pp. 2493-2502, Jul.-Aug. 2014

http://www.ieec.uned.es/investigacion/eventos_ieee/archivos/AnalisisMotoresEl%C3%A9ctricos.pdf

<http://ingenieriadelmantenimiento.com/index.php/26-articulos-destacados/19-mantenimiento-predictivo>

<http://www.ticgalicia.com/2016/06/el-motor-de-jaula-de-ardilla-la-base-de.html>

https://es.wikipedia.org/wiki/Jaula_de_ardilla

www.skf.com

11. Presupuesto.

Se procede a determinar en este epígrafe el coste que supondría efectuar los análisis presentados en este proyecto por parte de un ingeniero. Este presupuesto incluye la realización de medidas en fábrica en las máquinas analizadas. El presupuesto ha sido realizado desde el punto de vista de un becario en la empresa.

Estudio Previo de las técnicas a emplear y características de fábrica: estudio sobre la aplicación de la técnica de análisis de corriente y termografía infrarroja, tanto toma de mediciones como análisis de los datos obtenidos = 5 €/hora x 90 horas = 450 €

Alquiler Cámara Termográfica: alquiler de cámara termografica para la aplicación de termografía infrarroja = 45 €/día x 7 días = 315 €

Alquiler Osciloscopio: alquiler de osciloscopio para realizar las mediciones de corriente de los diferentes motores = 55 €/día x 12 días = 660 €

Visita a Fábrica: visita a la fábrica para realizar las mediciones en los motores uno por uno y dos mediciones por motor = 20 €/hora x 95 horas = 1900 €

Análisis de Señales: procesado de las señales en Matlab y realización de los cálculos del análisis = 20 €/hora x 45 horas = 900 €

Redacción Informe de Resultados: redacción de un informe detallado sobre el estado de cada motor y recomendaciones para su plan de mantenimiento en particular así como de si es necesario o recomendable aplicar técnicas más complejas para obtener conclusiones más detalladas = 10 €/hora x 60 horas = 600 €

TOTAL = 4825 €

Gastos Generales: incluye gastos de desplazamiento así como licencias de software = +12%.....579 €

Beneficio Industrial +6%=.....289.5 €

Presupuesto en Bruto.....5693.5 €

21 % de IVA.....1195.64 €

Presupuesto Líquido = 6889.14 €

Suma el presente presupuesto la cantidad de:
SEIS MIL OCHOCIENTOS OCHENTA Y NUEVE EUROS CON CATORCE CENTIMOS.

En Valencia, a 16 de Agosto de 2017.

Firma del Cliente.

Anexo: Ficha técnica de los equipos utilizados.

Osciloscopio YOKOGAWA DL-850:

Features:

- High speed isolated measurement: DL850 is capable of 1 kV high voltage isolation measurements while achieving high-speed data acquisition of 100MS/s, A/D resolution of 12 bits, analog bandwidth of 20 MHz.
- High speed waveform display: DL850 can quickly display up to 2 G points data in the memory and two zoomed waveforms.
- Excellent noise rejection performance.
- Multi-channel measurement.
- CAN bus monitoring.

Specifications:

- Max. Sampling rate: 100 MS/s
- Frequency bandwidth: 20 MHz
- Number of input channels: max. 128 (8 slots)
- Logic inputs: max. 128(720230 model)
- A/D resolution: 16 or 12 bits
- Time axis setting range: 100 ns/div to 3 days/div
- Max. Recording length: standard 250 Mpts / M1 option: 1 Gpts / M2 option: 2 Gpts
- Number of waveforms for between-channel math. : Max.8
- Number of waveforms for real time math. : Max.16 (option)
- Built-in media drive: SD memory card slot (standard)
160 GB HDD (option)
External HDD I/F(option)
- Other options IRIG interface
User defined calculation
Probe power output
- Display 10.4-inch color TFT LCD display
- Dimensions; 355 mm(W) x 259 mm(H) x 180 mm(D)
- Weight: Approx. 6.5 to 9.0 kg (dependo n the kind and number of modules to be equipped)

Cámara termografica Fluke Ti25:

ESPECIFICACIONES FLUKE Ti25	
Prestaciones de la termografía	
Campo de visión (FOV)	23º horizontal x 17º vertical
Campo de visión instantáneo (IFOV)	2,5 mrad
Distancia focal mínima	15 cm
Sensibilidad térmica (NETD)	≤0,1 °C a 30 °C
Escala mínima (Auto/Manual)	5 °C / 2,5 °C
Enfoque	Manual
Tipo de detector	Matriz de plano focal de 160 x 120 basada en microbolómetro no refrigerado
Prestaciones de las imágenes visibles	
Distancia focal mínima	46 cm
Modos de funcionamiento en pantalla	Imagen en imagen y pantalla completa de infrarrojos con fundido
Cámara de luz visible	640 x 480 píxeles a todo color
Medidas de la temperatura	
Rango de temperatura	-20 °C a 350 °C
Precisión	± 2 °C o 2 %
Modos de medida	Punto central y marcadores de frío y de calor
Corrección de emisividad en pantalla	Sí
Presentación de la imagen	
Pantalla digital	Pantalla LCD (640x480) VGA panorámica en color de 9,1 cm (3,6 pulg.)
Retroiluminación de pantalla	Seleccionable brillo o auto
Paletas de color	Hierro (ironbow), azul-rojo, alto contraste, ambar, metal caliente, gris
Almacenamiento de imágenes y datos	
Soporte de almacenamiento	Tarjeta SD de 2 GB (3000 imágenes termográficas .bmp/1200 imágenes IR-Fusión .IS2
Formatos de archivo compatibles	JPEG, BMP, GIF, PNG, TIFF, WMP EXIF y EMF
Grabador de notas de voz	Sí+C30:E32B30:E32C30:E31
Controles y ajustes	
Controles de configuración	Fecha/hora, °C / °F, idioma, emisividad, puntos fríos y calientes en pantalla
Selección de idioma	Ing, ale, fra, esp, por, ita, sue, fin, rus, che, pol, tur
Controles de imagen	Suave escala automática y manual
Indicadores en pantalla	Estado de la batería, reloj en tiempo real y temperatura en el punto central, Indicación de rango y escala, y niveles de alarma de temperaturas alta y baja