



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

UPV

# TRABAJO FINAL MÁSTER: MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DEL MANTENIMIENTO

Análisis de flujo magnético de dispersión  
para el diagnóstico de asimetrías en el  
devanado amortiguador en motores  
síncronos

Autor: Habib Castro Coronado.

Tutor: Jose Alfonso Antonino Daviu.

Curso académico: 2019-2020

Julio 2020

# TABLA DE CONTENIDO

<b>Antecedentes</b> .....	<b>iii</b>
<b>Objetivos</b> .....	<b>iv</b>
<b>Capítulo 1 Introducción</b> .....	<b>1</b>
1.1 Evolución de las estrategias del mantenimiento .....	1
<b>Capítulo 2 Marco Teórico</b> .....	<b>8</b>
2.1 Breve descripción de las máquinas síncrona .....	8
2.2 Características constructivas.....	9
2.2.1 Devanado amortiguador.....	11
2.3 Características de funcionamiento .....	13
2.4 Características de mantenimiento y averías comunes .....	14
2.4.1 Situación actual del diagnóstico por condición del devanado amortiguador .....	15
2.4.2 Mantenimiento de partes mecánicas .....	16
2.4.3 Comprobación por condición de los aislamientos.....	17
2.4.4 Inspección del sistema de anillos rozantes-escobillas.....	19
2.4.5 Comprobación del paquete magnético .....	20
2.4.6 Detección de asimetrías rotóricas .....	20
2.4.6.1 Roturas de barras .....	20
2.4.6.2 Excentricidades .....	21
2.4.6.3 Técnicas predictivas para la detección de asimetrías rotóricas .....	22
<b>Capítulo 3 Análisis de flujo magnético de dispersión</b> .....	<b>29</b>
3.1 Análisis de flujo de dispersión en régimen permanente .....	30
3.1.1 Armónicos por rotura de barra.....	30
3.1.2 Armónicos de excentricidad .....	33
3.2 Análisis de flujo de dispersión en régimen transitorio .....	34
3.2.1 Máquina sana.....	34
3.2.2 Armónicos por roturas de barra .....	35
3.2.3 Armónicos por excentricidad.....	35
<b>Capítulo 4 Instrumentación y metodología propuesta</b> .....	<b>37</b>
4.1 Instrumentación.....	38



4.1.1 Grupos polimórficos.....	38
4.1.1.1 Máquinas síncronas ensayadas .....	38
4.1.2 Pupitre de alimentación, medida y control .....	40
4.1.2.1 Línea de entrada .....	42
4.1.2.2 Embarrado general .....	42
4.1.2.3 Línea de salidas .....	43
4.1.3 Aparatos de medida.....	44
4.1.4 Sensor (tipo bobina).....	46
4.1.5 Sistema de adquisición de datos.....	47
4.2 Metodología propuesta .....	47
4.2.1 Metodología en los ensayos .....	49
4.2.2 Resultados obtenidos .....	53
4.2.3 Metodología de tratamiento de la base de datos .....	54
<b>Capítulo 5 Análisis de los resultados .....</b>	<b>56</b>
5.1 Análisis de resultados de la máquina síncrona 1 (MS 1).....	57
5.1.1 Análisis régimen permanente (modo asíncrono) .....	57
5.1.2 Análisis régimen permanente (modo síncrono) .....	64
5.1.3 Análisis régimen transitorio (durante el arranque) .....	71
5.2 Análisis de resultados de la máquina síncrona 2 (MS 2).....	73
5.2.1 Análisis régimen permanente (modo asíncrono) .....	73
5.2.2 Análisis régimen permanente (modo síncrono) .....	79
5.3 Análisis de resultados de la máquina síncrona 3 (MS 3).....	85
5.3.1 Análisis régimen permanente (modo asíncrono) .....	85
5.3.2 Análisis régimen permanente (modo síncrono) .....	92
5.3.3 Análisis régimen transitorio (durante el arranque) .....	99
<b>Capítulo 6 Conclusiones .....</b>	<b>102</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>104</b>
<b>ANEXO Justificación económica.....</b>	<b>106</b>

---

---

# ANTECEDENTES

Este trabajo final de máster constituye la culminación de los estudios del 'Máster Universitario en Ingeniería de Mantenimiento', que se ha realizado en el Departamento de Ingeniería Eléctrica y, más concretamente, en el Laboratorio de Máquinas y Tecnología Eléctrica, en el que se ha utilizado equipamiento y bancadas de ensayo para la recolección y el posterior análisis de los datos. En esta sección se expondrá el contexto en que se ha realizado la redacción de esta tesina.

Como bien sabemos, hoy en día las máquinas eléctricas son los activos físicos más utilizados tanto en los hogares como en la industria. Específicamente los motores eléctricos son responsables de consumir entre el 40-50% de la energía total del planeta. Gran parte de este consumo tiene lugar en aplicaciones industriales que generalmente constan de motores de gran potencia con elevados costes de reparación y mantenimiento y considerables penalizaciones económicas por indisponibilidad. Los motores eléctricos pueden ser clasificados de muchas maneras de acuerdo con su criticidad dentro de los procesos productivos. En los activos con mayor criticidad es importante conocer los costes por baja fiabilidad (costes por riesgo) -esto afecta el valor agregado de productos y servicios- para implementar la estrategia más adecuada. En muchos casos, se remiten a realizar inversiones para determinar la condición y diagnóstico de fallos en su estado más incipiente mediante técnicas predictivas para realizar la intervención correctiva en el momento más rentable y así minimizar las pérdidas por facturación.

En este contexto, este trabajo final de máster considera las investigaciones previas realizadas en máquinas eléctricas del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universitat Politècnica de Valencia. Estos estudios se han enfocado en la detección temprana de fallos en motores eléctricos desarrollando y evaluando la aplicabilidad a través del método tradicional de diagnóstico (análisis de las corrientes estáticas). Además, estas investigaciones no solo se remitían al análisis en estado estacionario sino también a un nuevo enfoque, el análisis en transitorio (corriente al arranque) el cual solucionaba algunos inconvenientes del método tradicional.

Teniendo en cuenta este contexto, la investigación actual se centra en la búsqueda constante de metodologías que proporcionen una mayor sensibilidad en la detección incipiente de fallos. Por tal razón, para este trabajo se ha elegido el análisis de flujo magnético de dispersión para evaluar y comprender si es una fuente de información valiosa para el diagnóstico temprano de fallos y así ser un factor de cambio positivo para mejorar la rentabilidad en la industria.

---

---

# OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo fin de máster es evaluar la aplicabilidad y viabilidad del método de análisis de flujo magnético de dispersión para el diagnóstico precoz de asimetrías en el devanado amortiguador en motores síncronos. Este trabajo combina la aplicación del análisis en estado permanente y el nuevo enfoque, el análisis en transitorio (corriente de arranque), cuyos resultados han sido de gran utilidad para detectar fallos. Además, sin la necesidad de contar con sensores muy especializados, esto es, simplemente empleando un sensor (tipo bobina) experimental confeccionado en laboratorio en una tesina previa con ayuda de una impresora 3D para realizar la captura del flujo magnético tanto axial como radial.

Al ponerse a evaluar la aplicabilidad y viabilidad del método de análisis de flujo magnético de dispersión, es importante la consulta de las aportaciones científicas bajo este contexto. Se puede mencionar que existen pocas aportaciones al diagnóstico de fallos usando la técnica de flujo de dispersión. Para precisar, existen trabajos con resultados muy satisfactorios aplicando esta técnica durante el arranque en motores de inducción con rotor tipo jaula de ardilla y rotor bobinado. Ambas publicaciones realizadas por el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universitat Politècnica de Valencia. Sin embargo, no existen referencias técnicas al diagnóstico de condición del devanado amortiguador en motores síncronos mediante el análisis de flujo de dispersión. Este hecho hace que los resultados del presente trabajo sea una contribución importante para la comunidad científica e industrial.

Lo anterior ha abierto una nueva línea de investigación el cual se ha enfocado en el análisis durante el arranque tanto en la corriente de alimentación como en el flujo magnético de los motores eléctricos. Por lo tanto, era de esperarse que el presente trabajo arrojará información útil para determinar la condición del devanado amortiguador en un motor síncrono. Los resultados obtenidos en laboratorio lo ratifican como una técnica complementaria -a las tradicionales- de gran interés para determinar la condición del mencionado elemento. Debido a su mayor sensibilidad y contenido armónico hace que esta técnica sea un indicador fiable para el diagnóstico de diferentes fallos los cuales no siempre son detectados eficazmente por otras técnicas.

Los resultados iniciales de las pruebas en laboratorio, plasmadas en esta tesina, han sido motivo de dos contribuciones seleccionadas para presentación en sendos congresos internacionales de relevancia en el ámbito de las máquinas eléctricas, a saber: *2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition* (Detroit, USA) e *International Conference on Electrical Machines* (ICEM 2020) (Goteborg, Suecia). Ambos han recibido comentarios muy positivos por parte de los revisores. En dichos artículos, se ratifica que el análisis de flujo magnético de dispersión durante el arranque proporciona elementos contundentes para el diagnóstico fiable del devanado amortiguador en los motores síncronos.

---

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 EVOLUCIÓN DE LAS ESTRATEGIAS DEL MANTENIMIENTO.

Las eras del mantenimiento están ligadas al desarrollo industrial y tecnológico de la humanidad. Con la primera revolución industrial se dio el comienzo de la automatización y la producción en serie, surgiendo la necesidad de realizar las primeras reparaciones. Pronto las fábricas empezaron a organizar al personal de mantenimiento para ejecutar las reparaciones, esto causado por el establecimiento de producciones mínimas debido a la situación social que se vivía en la época, el surgimiento de la 1era guerra mundial. Es así como surge lo que hoy día conocemos como **“mantenimiento correctivo”**. Hasta la década de 1930, las tareas de mantenimiento se limitaban a reparar aquello que se averiaba y sólo en algunos casos a realizar reengrases, lubricaciones y limpieza de piezas.

El mantenimiento correctivo (modo reactivo) es básicamente reparar o sustituir un elemento después del fallo. Sin embargo, esta estrategia conlleva algunas desventajas:

- Puede llegar a ser entre 3-5 veces más costoso que el mantenimiento preventivo-sistemático.
- Este tipo de tareas se ejecuta en situaciones de emergencia por lo que es imposible realizar un análisis causa-raíz, por lo que provee de soluciones paliativas.
- Puede provocar fallos y/o daños secundarios reduciendo la vida útil de los equipos.
- Impacto a la seguridad del personal y al medio ambiente.
- Sobredimensionamiento de los repuestos en almacén, afectando los índices financieros de la empresa.
- La imprevisión de la avería interfiere con la programación y planificación semanal de la planta.

Durante la 2da guerra mundial y la postguerra surgieron nuevos avances tecnológicos, se incrementó la demanda de muchos productos entre los más importantes la industria armamentística. Para 1950 la mecanización cada vez era mayor y los equipos más complejos. En consecuencia, la industria pasó a depender más de ellos.

Debido a lo anterior, los industriales tuvieron que redefinir sus objetivos. La productividad se convirtió en el foco de atención y se priorizó la reducción de tiempos de inactividad, de forma que los equipos duren lo máximo posible con los costes más bajos posibles. Se empieza escuchar el término de disponibilidad en los medios de producción. Existe la preocupación de no sólo de corregir los fallos, sino de también de evitarlos. Surge un enfoque de prevención de fallos en los equipos con la idea de que éstos podrían prevenirse mediante un mantenimiento adecuado en el momento adecuado, realizando reparaciones generales (overhaul) o reemplazos a intervalos sistemáticos. El pensamiento “reparar en caso de avería” ya no es adecuado para la industria.

En cuanto al plano organizacional los responsables del mantenimiento observaron que el tiempo empleado para diagnosticar los fallos era mayor que el tiempo empleado en la ejecución de la reparación. Como consecuencia, se organizan grupos de especialistas para crear una entidad llamada “Ingeniería de Mantenimiento” cuyas funciones son planificar y controlar el mantenimiento, iniciándose los primeros análisis causa y efecto de las averías (ver Figura 1)

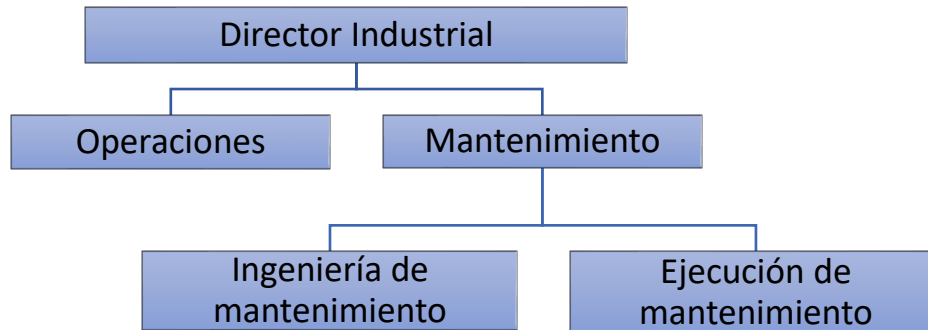


Figura 1. Organización del mantenimiento a partir de 1950. Fuente: [6]

Surge así el “**mantenimiento preventivo**”, el cual se refiere a una serie de acciones que son ejecutadas según un plan establecido. Este plan puede ser efectuado según un plazo marcado por unidades de tiempo (por ejemplo, cada mes, tres meses o semestral) o unidades de uso (ciclos, km, horas de trabajo). Su objetivo es minimizar la degradación del sistema o componente. Con ello se pretende prevenir el fallo antes de que ocurra y así extender la vida útil del equipo. Este enfoque de mantenimiento trajo consigo dos categorías:

1. *Preventivo-sistemático*. Es una estrategia basada en el reemplazo o restauración de componentes y/o piezas, independientemente de su condición, en un intervalo determinado (según calendario o uso).
2. *Mantenimiento de uso*. Incluyen actividades como limpieza, ajustes y lubricación, así como sustituciones de componentes menores. Su propósito es de minimizar fallos. Este tipo de acciones está relacionado con el *Total Productive Maintenance (TPM)*.

Las principales ventajas del mantenimiento preventivo-sistemático frente al correctivo son:

- Disminución de costes de tiempo de reparación; al ser una actividad planeada, todo debe estar programado y los repuestos en el sitio.
- Importante reducción de número de averías imprevistas.
- Al estar en un ambiente con menos presión, la calidad en los trabajos se incrementa.
- Al realizar observaciones con periodicidad, se pueden identificar los componentes con altos costes y así poder corregir las causas.

Entre 1950 y 1970 la industria aviónica va a pasos agigantados y con el paso de los años los viajes aéreos eran más accesibles y el número de pasajeros se incrementaba. Para finales de la década de los 50's la seguridad de los pasajeros pasa a ser la prioridad número uno. Con aeronaves comerciales con más capacidad de pasajeros requerían de nuevos permisos para poder operar. Estas nuevas licencias

establecían planes de mantenimiento demasiados extensos y costosos. Esto suponía que las aerolíneas no podrían operarlos de una manera rentable. Esencialmente esto llevó a redefinir y evaluar la estrategia de mantenimiento preventivo como se conocía, es decir, su enfoque tenía que evolucionar para cumplir con los requerimientos del momento.

Los resultados de esta reevaluación es lo que conocemos hoy día como mantenimiento centrado en la fiabilidad (RCM por sus siglas en ingles). Además de introducir nuevos conocimientos acerca de los modelos o distribuciones de averías/fallos de los equipos eléctricos y mecánicos también determinó una nueva clasificación y enfoque del mantenimiento preventivo, orientándolos a la preservación de las funciones de los equipos o sistemas. También se realizaron mejoras u optimizaciones a los conceptos de las estrategias ya existentes y utilizadas en ese momento (preventivo-sistemático y correctivo), expandiendo sus alcances y cambiando algunos paradigmas que se tenían en esa época. Es así como tenemos una nueva clasificación del mantenimiento preventivo:

### **Preventivo-sistemático.**

Como se expuso anteriormente, está orientado a la prevención de fallos y degradación, reemplazando componentes a intervalos determinados, lo cual no es siempre el camino correcto que seguir, ya que no es eficiente ni económicamente óptimo. Durante los años 50 el pensamiento dominante era que los componentes reemplazados periódicamente eran llevados a una condición “nueva” varias veces hasta que fuera necesario descartarlo por uno nuevo o mejorado. Es decir, se pensaba que los componentes tenían una vida específica y que después de alcanzar cierta “edad” podrían fallar, de forma que reemplazándolos antes de alcanzar esa “edad” se prevenía el fallo. Por lo tanto, las reparaciones generales (overhauls) eran la única manera de realizar mantenimiento preventivo. De lo anterior podemos mencionar algunas desventajas del mantenimiento preventivo-sistemático:

- Desaprovechamiento de la vida residual de los componentes.
- Dificultad para calcular la frecuencia óptima de reemplazo o inspección. Generalmente, o al menos en una primera etapa, los fabricantes recomiendan unos tiempos óptimos de intervención. Lo anterior nos puede poner en una situación en la que las tasas de fallos no son las adecuadas para un equipo que a medida que se va explotando cambia su sistemática de fallos.
- Es costoso, debido a las paradas de inspección y, por ende, supone una reducción en la disponibilidad.
- A ser una tarea intrusiva, presenta muchas oportunidades para que pueda ocurrir el error humano.
- No es adecuado para todos los sectores industriales. Está orientado más a equipos mecanizados sometidos a ciertas leyes de degradación, por lo que es importante conocer éstas.

La metodología RCM trajo nuevos descubrimientos, analizando enormes cantidades de datos de equipos mecánicos y eléctricos. Además, permitió obtener seis distribuciones de fallos, describiendo la relación entre la “edad” y el fallo. Con esto se concluye que la mayoría de los fallos ocurren aleatoriamente y no cuando alcanzan una cierta “edad”, como se pensaba en los años cincuenta.

Esto rompe con los paradigmas del mantenimiento preventivo que se tenían en ese momento, por lo que para proceder con una implementación sistemática son necesarias dos condiciones:



1. El coste total del reemplazo debe ser mayor después del fallo que antes del mismo. Esto puede ser causado por una mayor pérdida en la producción, ya que el reemplazo después del fallo no es una actividad planeada, o por que el fallo del componente conlleva a daños secundarios a otras piezas o equipos.
2. La tasa de fallo del componente debe ser creciente ( $\beta > 1$ ). Para esto es necesario conocer como los procesos y los materiales cambian a través del tiempo y esto a su vez nos lleve a conocer los modos de fallos. De ahí la importancia de conocer la distribución de fallos de los componentes/equipos a reemplazar mediante un análisis de Weibull y de esta manera saber la aplicabilidad del mantenimiento preventivo-sistemático. Componentes que sigan una distribución de Weibull  $\beta = 0$  o  $\beta < 1$  no son candidatos para implementar una estrategia sistemática.

Sin embargo, el mantenimiento sistemático tiene diversos orígenes y, dependiendo de éstos, la revisión y modificación podrá ser o no factible. Por ejemplo, los cambios de lubricantes pueden ser debidos a políticas internas de la empresa, porque la eficacia del cambio ya ha sido constatada o simplemente para salvaguardar la responsabilidad ante un percance; estos tipos de actividades sistémicas llegan a definirse como inamovibles. En otros casos las intervenciones son obligatorias, cumpliendo con legislaciones o reglamentos dictadas por un organismo gubernamental.

### **Mantenimiento basado en condición (CBM).**

También conocido como “*mantenimiento predictivo*”, consiste en evaluar la condición de una determinada variable del componente o equipo ejecutando monitorización periódica (discontinua) o continua, mediante la recolección de señales y/o datos que a través del tiempo sufran una modificación y así correlacionarla a un tipo de fallo y severidad. El principal objetivo del mantenimiento basado en condición es la de ejecutar la intervención en el momento más rentable y antes de que el componente falle durante el servicio.

Se ha comentado que la mayoría de los modos de fallos no son dependientes del tiempo. Sin embargo, la mayoría provee de una manifestación o advertencia producto de la relación entre un síntoma externo y los efectos del fallo. Por lo tanto, el mantenimiento basado en condición, como estrategia, se basa en la búsqueda de una evidencia física que indique que el fallo se está produciendo o comienza a ocurrir. Esto nos lleva a otro punto importante a considerar en aras de saber la aplicabilidad de esta estrategia, que es el conocimiento del umbral (cantidad) de tiempo entre el punto en el cual el fallo se hace identificable y el punto en el que se deteriora hacia un fallo funcional.

Ahondando en lo anterior, existen muchos autores que denotan este umbral de tiempo como el intervalo P-F (ver Figura 2). Básicamente, se trata de una curva que describe como un fallo comienza a manifestarse; el equipo se deteriora hasta un punto en el cual puede ser identificado llamado punto P. Si el fallo no es detectado y mitigado, éste continúa hasta que ocurre el fallo funcional (punto F) de ahí el nombre de intervalo P-F.

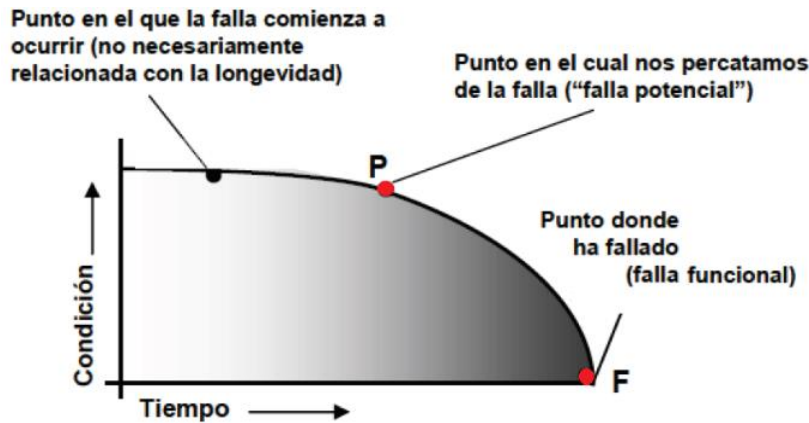


Figura 2. Curva P – F. Fuente: Norma de mantenimiento centrado en fiabilidad. SAE JA1012. 20024

El intervalo P-F nos brinda dos oportunidades. En primer lugar, determina la frecuencia de los intervalos de inspección (para el caso de monitorización discontinua); como regla general algunos autores indican que debe ser igual a la mitad o un tercio del intervalo P-F. En segundo lugar, es una ventana de oportunidad para planificar, programar y movilizar los recursos y repuestos necesarios para la reparación o reemplazo de una manera rentable y que tenga poco impacto en la disponibilidad de la planta.

Para cualquier tarea basada en condición es necesario satisfacer los siguientes criterios:

- Debe existir una manifestación física identificable, que indique que un fallo es inminente.
- Se debe conocer el tiempo de degradación del fallo, es decir, el intervalo P-F.
- Los modos de fallo deben tener un intervalo P-F considerable y útil para que la tarea basada en condición sea rentable, aplicable y efectiva. De lo contrario, una tarea basada en condición sobre umbrales demasiados cortos (segundos o días) o que muestren una gran variabilidad, no puede ser considerada como una estrategia efectiva.
- Su ejecución no debe alterar el funcionamiento normal del equipo.
- La detección de los fallos potenciales no debe ser costosa ni poco fiable.
- No se aplica a componentes o equipos para los que existe una legislación o reglamento que se estipule el tipo de mantenimiento a realizar.
- No se aplica a componentes o equipos en los que la sustitución se realice a bajo coste y de forma inmediata.
- Los técnicos de mantenimiento deben tener la formación adecuada con los conocimientos, habilidades y tiempo para ejecutar los trabajos basados en condición.

### **Mantenimiento correctivo (deliberado).**

La metodología RCM, además de cambiar la filosofía al mantenimiento sistemático, dio nuevos alcances al mantenimiento correctivo. Esta nueva forma de entender el mantenimiento busca la reducción de los costes de mantenimiento y, al mismo tiempo, mantener la fiabilidad inherente de los sistemas, mediante la preservación de las funciones y prestaciones.

Basándonos en los términos de reducción de costes, fiabilidad y conservación de funciones del párrafo anterior, se podrían analizar ciertas situaciones en las que la toma la decisión de no realizar acciones o esfuerzos para prevenir el fallo (no existe en lo absoluto ningún plan de mantenimiento para

ese específico elemento o equipo) puede llegar ser a veces lo más idóneo. El mantenimiento correctivo (deliberado) puede ser utilizado como una estrategia siempre y cuando se considere lo siguiente:

- Es necesario examinar todos los posibles modos de fallo, de cara a asegurar que la consecuencia del fallo deliberado no lleve a daños secundarios significativos. Por lo tanto, es recomendable que este tipo de estrategia sea seleccionada utilizando un análisis de riesgo/criticidad o una herramienta de fiabilidad como el RCM.
- En caso de que el equipo este bajo el periodo de garantía es importante considerar las condiciones de garantía y seguro.
- No debe presentar impacto a la seguridad del personal y medio ambiente.
- Debe tener una justificación económica; por ejemplo, el coste de la tarea correctiva debe ser menor que el coste de una preventiva y, además, los paros no deben afectar a la producción y no haber penalizaciones.
- Generalmente este tipo de estrategia se adopta en luminarias, bulbos o procesos de instrumentación. En caso de aplicar este planteamiento a equipos o elementos que no sean eléctricos o electrónicos, es necesario realizar un estudio estadístico para conocer el mecanismo o distribución de fallo. Componentes que siguen una distribución exponencial o un parámetro de forma  $\beta = 1$  (Weibull) son candidatos para implementar el mantenimiento correctivo (deliberado) siempre y cuando también se considere los puntos anteriormente descritos.

En resumen, la tecnología se mueve vertiginosamente, por lo que la industria tiene el reto de adaptarse a ella. Consecuentemente, las empresas deben mostrar flexibilidad para adaptarse a los requerimientos cambiantes de la industria. A lo largo de las décadas, han quedado constatada la evolución en las necesidades de la industria; esta evolución sugiere que el mantenimiento, como organización, sea responsable de la generación de inversiones para la empresa, fuente generadora de datos para la toma de decisión por la alta administración por consiguiente un elemento clave para alcanzar los objetivos de la empresa.

Ejemplificando lo anterior, hay sectores que han tenido un desarrollo más pronunciado, como es el caso de la automoción y la aviónica, en los cuales, conforme transcurrían los años, los sistemas eran equipados con más sensores. La explotación de los datos recopilados ha permitido determinar el tipo de estrategia de mantenimiento a implantar en sus componentes y así reducir los costes de mantenimiento, ampliar los periodos de garantía y, por ende, mantener la competitividad.

La evolución de los componentes modernos hace que la implementación del mantenimiento sistemático sea cada vez menos adecuada, ya que alrededor del 89% de los modos de fallos no son dependientes del tiempo. Por lo tanto, las tareas sistemáticas sólo deben constituir una pequeña parte del plan de mantenimiento general.

Otro aspecto clave visto a lo largo de los años, es que la evolución de las estrategias de mantenimiento ha ido desde reparar averías para que los equipos continúen funcionando hasta mantener las prestaciones y funciones y, al mismo tiempo, realizar las menores intervenciones posibles para minimizar errores humanos y paradas de producción. Continuando con este mismo enfoque, se evoluciona también con respecto a la vertiente económica, buscándose gastar mejor y más eficientemente.

Finalmente, el punto anterior nos lleva a que, si bien es cierto que la tecnología del mantenimiento predictivo puede conllevar un alto coste inicial y se debe contar con un personal cualificado, sus resultados a medio y largo plazo son muy positivos. Al monitorizar una variable o condición y asociarla a un modo de fallo y severidad es posible adecuar el mantenimiento de componentes específicos bajo su contexto de operación real y así conocer el momento óptimo para intervenir con una tarea preventiva. Con lo manifestado en este resumen se proporcionan los puntos clave para contestar a la pregunta: ¿Por qué el mantenimiento preventivo-sistemático debe evolucionar hacia al mantenimiento según condición o predictivo?

---

# CAPÍTULO 2.

## MARCO TEÓRICO

Durante este capítulo se proporcionará el fundamento teórico para comprender las principales características de la máquina síncrona. Para ello se realizará una breve descripción, considerando el modo de funcionamiento como motor y se mencionarán algunas aplicaciones en la industria. Se tratarán de igual manera los aspectos constructivos, el principio de funcionamiento y se ahondará en las características de mantenimiento. Se pondrá en contexto la situación actual el diagnóstico de fallos en el devanado amortiguador, a través del mantenimiento predictivo. Para finalizar, se dará un repaso de cada una de las principales técnicas predictivas de mantenimiento que se han implementado en las máquinas eléctricas rotativas (y que son de aplicación para el caso de motores síncronos), sus ventajas e inconvenientes, así como las averías más comunes.

### **2.1 BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS MÁQUINAS SÍNCRONAS.**

Una máquina síncrona gira a una velocidad constante en régimen permanente. A diferencia de las máquinas asíncronas, el campo giratorio creado por el devanado del estator y el rotor giran a la misma velocidad, llamada velocidad de sincronismo. La máquina síncrona puede ser utilizada como generador, encontrando su aplicación más típica en las grandes máquinas de generación de electricidad en estaciones hidroeléctricas, nucleares y termoeléctricas. Por otra parte, también puede ser utilizada como motor y su aplicabilidad es más amplia que el generador. El motor síncrono es especialmente adecuado en aplicaciones en las que se requiera una velocidad constante, independientemente de la carga que se esté arrastrando; siempre y cuando la carga sea menor a la capacidad del motor, éste mantendrá un régimen de velocidad constante. Ejemplos de aplicación son motores de gran potencia en plantas generadoras, conjunto motor-generador, compresores, bombas centrífugas, soplantes y trituradoras. También se pueden encontrar aplicaciones para bajas potencias o incluso en potencias fraccionales. Otra ventaja del motor síncrono es su alto rendimiento, así como la posibilidad de regular el factor de potencia, inyectando reactiva a la instalación. Esto se consigue variando la corriente de excitación de la máquina. Por otro lado, son más costosas que un motor de inducción.

Debido a lo anterior se podría pensar que la máquina síncrona utilizada como motor tiene una limitada aplicación dentro de la industria ya que la mayoría de sus procesos requieren velocidades variables y, por lo tanto, los motores síncronos no se usan tanto como los motores de inducción. Con el paso de los años y la evolución de la electrónica de potencia, el motor síncrono se ha visto beneficiado por esta tecnología. La velocidad de un motor síncrono puede ser controlado mediante un variador de frecuencia hasta alcanzar la velocidad deseada, aunque tiene como desventaja su alto coste. Sin embargo, existen otros métodos como los modernos controladores de estado sólido los cuales son menos costosos. Un ejemplo de lo anterior son los convertidores de autocontrol - donde básicamente la frecuencia es

automáticamente ajustada por la velocidad del motor - los cuales son simples y menos costosos y se han equipado en motores síncronos para competir con los motores de inducción en sistemas de velocidad variable.

Otro inconveniente que presentan estas máquinas es la necesidad de sistemas auxiliares que faciliten su arranque, ya que no pueden arrancar por sí mismas. Esto se mencionará posteriormente y contribuye a encarecer estas máquinas frente a otras alternativas.

A pesar de estos últimos inconvenientes, en el rango de muy altas potencias (>1MW), las ventajas de los motores síncronos (alta eficiencia, posibilidad de regular el factor de potencia) compensan con creces a sus inconvenientes, haciendo que sean una opción que se adopta con cierta frecuencia en la industria. En esas aplicaciones, son máquinas caras y de naturaleza habitualmente críticas, con lo que un buen mantenimiento es primordial para garantizar la continuidad del proceso productivo.

## 2.2 CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS.

A nivel constructivo y con respecto al motor de inducción jaula de ardilla (el más utilizado en la industria), la diferencia más significativa se encuentra en el rotor. En muchos motores síncronos (salvo los motores de imanes permanentes), el rotor tiene un devanado llamado devanado de campo o inductor, en el cual circula corriente continua. Este devanado es alimentado habitualmente desde el exterior, a través de un sistema de anillos rozantes y escobillas.

Las máquinas síncronas se pueden dividir en dos grupos según la forma constructiva del rotor:

### 1. Máquinas de alta velocidad con rotores cilíndricos o lisos.

Se denomina alta velocidad a velocidades iguales o mayores a 1.500 rpm, con uno y dos pares de polos. Estas máquinas se emplean en grandes generadores (turboalternadores) accionados por turbinas de vapor o de gas. El rotor cilíndrico o liso tiene un devanado de campo distribuido en varias ranuras creando así una distribución escalonada, manteniendo el entrehierro uniforme. El objetivo de esta forma constructiva es minimizar la amplitud de los armónicos de la onda de inducción y para que los conductores del rotor estén mejor sujetos.

En referencia a las características constructivas del rotor, éste es de gran longitud axial y de diámetro pequeño (ver Figura 3). El rotor cilíndrico se utiliza en grandes turboalternadores que operan a altas velocidades, por lo que deben soportar grandes fuerzas centrífugas. Debido a esto, el rotor se construye a partir de un cilindro de acero de alta resistencia, por lo que la máxima potencia de diseño está limitada por esta consideración.

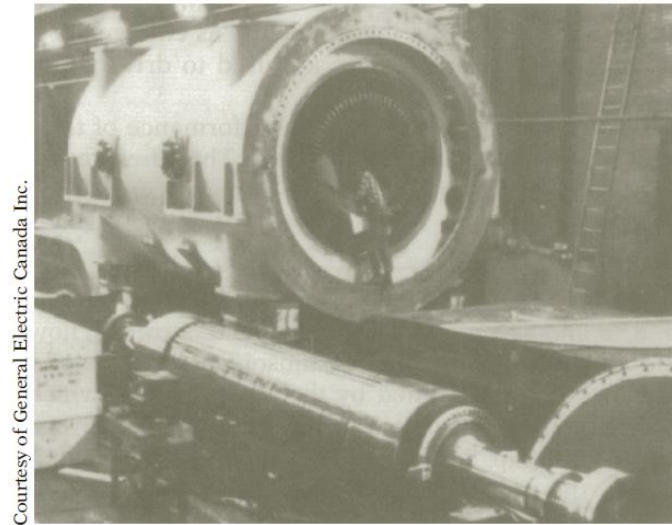


Figura 3. Generador síncrono de rotor cilíndrico o liso (alta velocidad). Fuente: [8]

Otra característica de diseño es el tamaño del entrehierro existente en estas máquinas, el cual tiende a ser grande. De esta manera se logra obtener una mejor regulación y estabilidad de la tensión, pero por otro lado implica que por el devanado de campo circule una mayor intensidad. Por tal razón, los conductores y cabezas de bobinas deben ser apropiadamente diseñados para soportar las solicitaciones requeridas.

## **2. Máquinas de baja velocidad con rotores de polos salientes.**

Se considera baja y media velocidad a velocidades inferiores a 1.000 rpm. Los generadores con rotores de polos salientes tienen usualmente una gran cantidad de polos y son accionados por turbinas lentas (hidráulicas o eólicas) o motores de combustión interna. El uso de estas máquinas de polos salientes operando como motor son cada vez más extendido que como generador. Se pueden observar en aplicaciones tales como mezcladoras de cemento o accionando bombas. El rotor de polos salientes tiene el devanado de campo concentrado en posiciones angulares específicas en los polos. Así, entre cada pareja de polos se instala una parte del devanado inductor. Para este tipo de rotor, el entrehierro no es constante.

En referencia a las características constructivas del rotor, cabe destacar que éste suele tener una longitud corta y un mayor diámetro (ver Figura 4) y se fabrica a base de hierro macizo. Por otro lado, para la construcción de los polos, la resistencia mecánica es una consideración importante, así como la fijación al cuerpo del rotor. Dependiendo de las velocidades periféricas los polos, pueden ser atornillados o fijados mediante colas de milano al cuerpo del rotor y se construyen apilando chapas magnéticas o incluso pueden ser macizos.

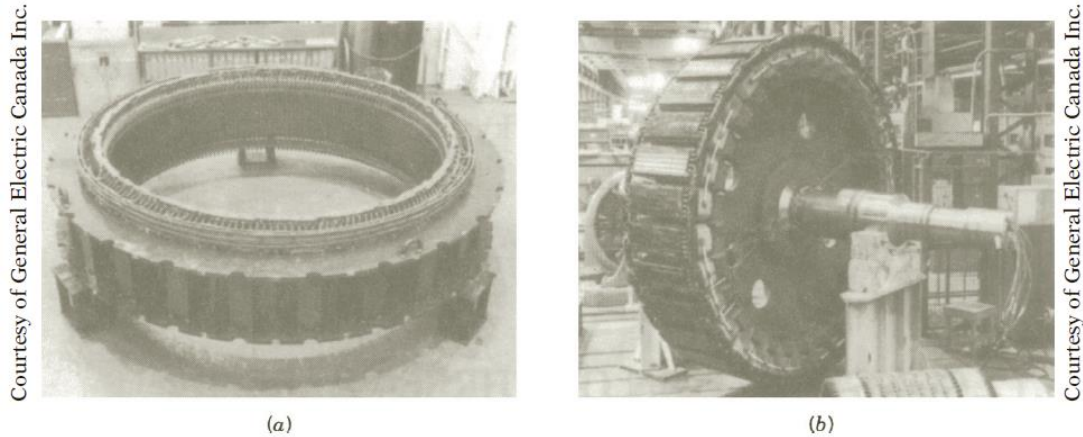


Figura 4. Generador síncrono de rotor de polos salientes (baja velocidad). (a) Estator. (b) Rotor. Fuente: [8]

Otra característica de diseño radica en la importancia de considerar la forma constructiva de las cabezas de los polos. Con esto se busca que la onda de inducción en el entrehierro sea lo más senoidal posible. Aunque en realidad obtener una inducción puramente senoidal no es posible, se pretende reducir al mínimo que la distribución de ondas de la fuerza magnetomotriz y de inducción magnética contenga armónicos impares.

### 2.2.1 Devanado amortiguador.

Muchos motores síncronos de gran potencia (así como algunos generadores) están dotados de un tercer devanado, denominado devanado amortiguador que entre varios efectos que conlleva su uso, permite el arranque de la máquina. Cabe comentar que, como se apuntó anteriormente, el arranque de la máquina síncrona constituye uno de los problemas inherentes a la misma, ya que estas máquinas no pueden arrancar por sí mismas, siendo necesario dotarlas de algún elemento que permita dicho arranque. Como se verá posteriormente, los motores síncronos son usualmente arrancados bien a través de variadores de frecuencia o bien a través de otras máquinas que los lleven a velocidad de sincronismo, alimentando entonces el devanado de campo para que continúen operando en modo síncrono. Otra alternativa para efectuar el proceso de arranque es, precisamente, mediante el uso del devanado amortiguador, opción más habitual en motores de gran potencia.

En las máquinas de polos salientes el devanado amortiguador está compuesto por barras de cobre instaladas axialmente en la zapata de cada polo, es decir, en la parte más ancha del polo y cerca del entrehierro y cortocircuitadas en sus extremos, formando una jaula de ardilla 'incompleta'. En caso de que los polos estén constituidos por chapas apiladas, el devanado amortiguador está construido por barras de cobre que se cortocircuitan en los extremos y se aloja en ranuras circulares semiabiertas.

En las máquinas de rotor cilíndrico, el rotor suele ser macizo y en él se inducen, durante el arranque, corrientes de Foucault por la diferencia de velocidad entre el campo y el rotor. Por tanto, la propia masa de hierro actúa como devanado amortiguador. Para reforzar lo anterior, se colocan en las ranuras del rotor -donde se aloja el bobinado inductor- tiras o barras conductoras que actúan como barras de una jaula de ardilla.



Por tanto, el devanado amortiguador está montado sobre el rotor (ver Figura 5). Al alimentar el devanado del estator, aparece un campo giratorio en el entrehierro que induce en el devanado amortiguador corrientes que permiten el arranque del motor en modo asíncrono (exactamente igual que ocurre en el arranque de un motor asíncrono de rotor de jaula), llevando al motor hasta una velocidad cercana a la de sincronismo. Una vez en este punto (en la práctica, cuando se alcanza una velocidad de aproximadamente un 95% de la nominal), se procede a alimentar el devanado de excitación, pasando la máquina a operar en modo síncrono (sincronización). Por tanto, el devanado amortiguador juega un papel clave en el arranque, permitiendo el arranque de la máquina en modo asíncrono.

Además, de ser utilizado para el arranque, el devanado amortiguador produce otros efectos:

- Produce un par que ayuda a restaurar la velocidad de sincronismo. Ejemplificando lo anterior, si el rotor gira a una velocidad diferente a la de sincronismo debido a cambios repentinos en la carga u otros transitorios, existirán corrientes inducidas en el devanado amortiguador, originando un par que tiende a anular la diferencia de velocidades, es decir, frena el rotor si la velocidad de éste es mayor y lo acelera si es inferior.
- Reduce el efecto de los campos armónicos que no giran a la velocidad de sincronismo.

Es importante mencionar que los generadores síncronos usualmente no requieren del devanado amortiguador para poder arrancar. Sin embargo, debido a los efectos anteriormente descritos, tanto como los generadores y motores síncronos - en aplicaciones de generación de energía eléctrica - utilizan este devanado para amortiguar las oscilaciones que aparecen durante el funcionamiento en paralelo con otros generadores o con la red.

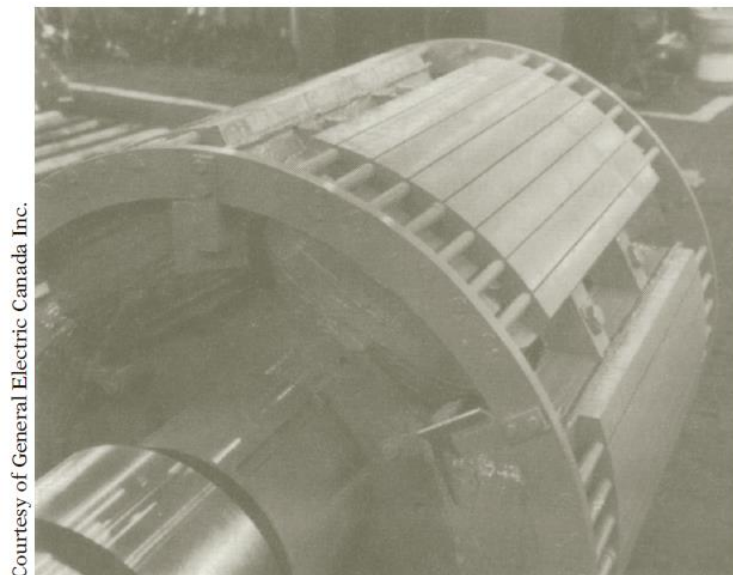


Figura 5. Devanado amortiguador (tipo jaula de ardilla) en una máquina síncrona. Fuente: [8]

## 2.3 CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMIENTO.

A continuación, se describirá con más detalle el funcionamiento de la máquina síncrona en modo motor. Cuando se alimenta con corriente continua al devanado de campo (excitación) aparecerá un campo magnético de eje fijo creado por la corriente circulante por el citado devanado, que puede asimilarse a un imán que permanece fijo en el espacio. Por otro lado, si se alimenta el devanado del estator con un sistema trifásico de tensiones, las corrientes del estator producirán un campo magnético giratorio que rotará a la velocidad de sincronismo en el entrehierro. Este efecto hace que el ángulo que se forma entre los campos magnéticos del rotor (excitación) y estátor, varíe continua y rápidamente. Podría, en principio pensarse que, en tales condiciones, el campo magnético del rotor tenderá a seguir al del estator, provocando el giro del rotor. Sin embargo, se puede comprobar que esto no es así, ya que el par medio ejercido por el motor en cada ciclo es nulo. En consecuencia, el motor no arrancará, sino que vibrará.

Lo anterior se puede explicar cómo sigue (ver Figura 6, a): al inicio ( $t=0$ ), el rotor experimentará un par a favor de las manecillas del reloj, haciéndolo girar en la misma dirección que los polos del estator, es decir, los polos positivos del rotor serán atraídos por los polos negativos del campo giratorio y empezarán a girar en la misma dirección. En ( $t=1$ ) los polos del estator se desplazan media revolución ( $\pi$ ) -el polo negativo del campo giratorio es sustituido por uno positivo- sin embargo, los polos del rotor apenas se han movido debido al alto momento de inercia (Figura 6, b) y su velocidad será muy pequeña. Por lo tanto, el rotor experimenta un par en contra de las manecillas del reloj, haciéndolo girar esta vez en la dirección opuesta hacia la nueva dirección de los polos del estator. Consecuentemente, el par neto en una revolución ( $2\pi$ ) es cero. El campo del estator gira demasiado rápido y los polos del rotor no pueden ser atraídos magnéticamente por el campo del estator, ya que este varía rápidamente y de forma continua entre 0 y  $2\pi$  [8]. Esto hace que el motor síncrono no pueda desarrollar par, por sí mismo, durante el arranque, lo cual representa una gran desventaja frente a al motor asíncrono.

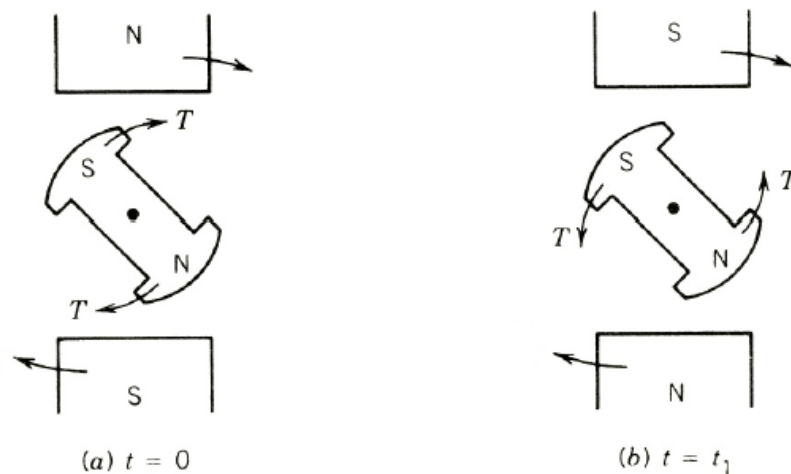


Figura 6. Par del rotor al inicio. Fuente: [8]

El gran desarrollo de la electrónica de potencia ha beneficiado a las máquinas eléctricas rotativas y al motor síncrono no ha sido la excepción. Actualmente en instalaciones nuevas, tracción ferroviaria o vehículos eléctricos, entre otras aplicaciones, se utilizan convertidores electrónicos de frecuencia variable

para arrancar los motores y variar su velocidad, por lo que este inconveniente es eliminado y el motor síncrono es capaz de competir con el asíncrono en la industria.

Básicamente, el método de arranque de un motor síncrono mediante un variador de frecuencia es el siguiente; el motor es alimentado con una tensión de frecuencia baja. Esto produce que el campo giratorio del estator rote lentamente para que los polos del rotor puedan seguir y ser atraídos a los polos del estator. Después, la frecuencia es aumentada progresivamente llevando al motor a la velocidad requerida.

No obstante, en grandes motores industriales y aplicaciones como centrales hidroeléctricas de bombeo, como se mencionó en el apartado anterior, es frecuente el método de arranque como motor asíncrono, a través del devanado amortiguador. Éste suele ser el sistema empleado cuando el motor no tiene que funcionar a diferentes velocidades.

Como se ha comentado previamente, el método de arranque como motor asíncrono se basa en el siguiente proceso: primero, el devanado de campo se mantiene des-energizado. Se alimentan los terminales del estator con una fuente trifásica de corriente alterna por lo que el motor arrancará como si fuera un motor de inducción, debido a que en el devanado amortiguador se inducen intensidades que producen par. Una vez se alcanza el régimen permanente, los polos del rotor estarán girando a una velocidad poco inferior a la de sincronismo. Por último, si las bobinas del rotor son excitadas por medio del devanado de campo con una fuente de DC, los polos opuestos del campo giratorio y del rotor se atraen y quedaran bloqueados magnéticamente produciendo un incremento de par que sincroniza el motor, haciendo que éste gire a la velocidad de sincronismo [8]. La velocidad relativa entre el devanado amortiguador y el campo magnético giratorio es nula. Esto se traduce en que las corrientes y las fuerzas electromotrices en el devanado amortiguador se hacen cero, de forma que éste ya no afecta el funcionamiento del motor síncrono. En la práctica, se suele alimentar el devanado de excitación, esto es sincronizar la máquina, cuando se alcanza una velocidad aproximada de un 95% de la velocidad de régimen, de forma que no se llega a alcanzar normalmente el régimen permanente en modo asíncrono. En este trabajo, no obstante, se considera la opción de llevar a la máquina al régimen permanente y hacerla operar en modo asíncrono durante un breve intervalo, de cara a analizar las ventajas que el análisis de flujo de dispersión en tal régimen puede suponer.

## 2.4 CARACTERÍSTICAS DE MANTENIMIENTO Y AVERÍAS COMUNES.

A nivel de mantenimiento, es importante realizar una diferenciación entre los grandes turbogeneradores (alta potencia) utilizadas en la generación de energía eléctrica y las demás máquinas síncronas. Los primeros cuentan con devanados muy complejos y características constructivas particulares por lo que hace necesario una alta monitorización y supervisión en sus sistemas, como consecuencia cuentan con planes de mantenimiento más complejos y requieren de altos índices de disponibilidad.

Algunos puntos de control y de monitorización de estas grandes máquinas son los siguientes:

- Monitorización de fallos entre espiras (bobinas exploradoras).
- Vigilancia de las tensiones inducidas en el eje.
- Monitorización vibro acústica.

- Detección de imperfecciones en los núcleos magnéticos mediante monitorización térmica.
- Monitorización del sistema de enfriamiento de hidrogeno.
  - Vigilancia de la hermeticidad del hidrogeno, evitar que se mezcle con el aire.
  - Sistemas de comprobación de la pureza del hidrogeno.
- Monitorización de los cojinetes antifricción para altas velocidades.
- Vigilancia del sistema de excitación y aceite de cierres.

Por otro lado, el mantenimiento de los motores síncronos tiene más similitudes con el del motor de inducción; es de destacar que estas últimas son las que menor mantenimiento requieren de todas las maquinas rotativas eléctricas y cuentan muchas averías comunes con las máquinas síncronas.

Por lo tanto, podemos aseverar que las averías más comunes de las maquinas síncronas son:

1. **Fallos mecánicos.**
2. **Degradación del aislamiento de los devanados.**
3. **Deterioro del sistema de anillos rozantes – escobillas.**
4. **Fallos en el paquete magnético.**
5. **Asimetrías rotóricas.**

#### **2.4.1 Situación actual del diagnóstico por condición del devanado amortiguador.**

Antes de comenzar a describir cada una de las averías más comunes es importante mencionar la situación actual del diagnóstico por condición del devanado amortiguador. Como se ha apuntado, este elemento juega un papel fundamental en muchos motores síncronos, ya que facilita el arranque de estos. Daños graves en este elemento pueden provocar que el motor no pueda arrancar, con las consecuencias que ello puede implicar para la empresa involucrada (paradas de producción, tiempos de espera de repuestos, etc...). En casos más graves, el desprendimiento de fragmentos de las barras del amortiguador o la protrusión de barras rotas pueden causar daños en el aislamiento del devanado estatórico, haciendo necesario un rebobinado del motor o, incluso, una sustitución completa del mismo. Por si esto fuera poco, los motores síncronos que emplean este elemento suelen ser máquinas de gran potencia, muy costosas y de naturaleza habitualmente crítica en aquellos procesos en las que operan. De aquí la importancia de la aplicación de técnicas predictivas que permitan controlar como va evolucionando la condición de tal elemento, anticipándose a un eventual fallo grave del mismo, mediante la adopción de acciones de mantenimiento oportunas.

Contrariamente a los que se pudiera suponer, la realidad en cuanto al mantenimiento de este elemento no concuerda con la importancia del mismo. El estudio de fallos en el devanado amortiguador ha sido escasamente abordado por los investigadores. Además, las escasas técnicas predictivas propuestas para el diagnóstico de la condición del devanador amortiguador son, en su mayoría, de naturaleza intrusiva o de escasa aplicabilidad práctica [12].

Algunas de estas aportaciones técnicas proponen el uso de métodos que pueden ser influenciados por las condiciones operativas del motor, ofreciendo resultados muy diferentes según parámetros como nivel de carga accionada. Otros métodos conllevan la instalación de sensores internos para monitorizar determinadas magnitudes (flujo en el entrehierro), dotándoles de una naturaleza invasiva que limita su viabilidad práctica. Otras investigaciones proponen el análisis de la corriente demandada durante el

arranque (transitorio) para detectar este tipo de fallos. Como se verá posteriormente, estas metodologías basadas en el análisis de la corriente de arranque requieren de una investigación más profunda con respecto al establecimiento de los valores límites permisibles de operación o tablas de severidad para conocer realmente la condición real del equipo.

Debido a estos factores, hoy en día, los métodos habitualmente utilizados por la industria para la detección por condición del devanado amortiguador se basan en inspecciones visuales del rotor “off-line”, introduciendo cámaras boroscópicas [12], existiendo la dificultad de calcular la frecuencia óptima de inspección. Además, este tipo de inspecciones son muy costosas debido a las paradas de inspección y por ende se podría experimentar una reducción en la disponibilidad operacional.

### 2.4.2 Mantenimiento de partes mecánicas.

Se entiende como tal, lo que involucra lo puramente mecánico – eje, rodamientos, equilibrado de los mismos, alineación, equilibrado del rotor, aflojamientos de sujeción del paquete magnético y condición del ventilador. La mayoría de las anomalías mecánicas pueden ser diagnosticadas mediante el análisis espectral de vibraciones.

Los rodamientos y el aislamiento son las partes en las que se concentran más cantidad de fallos en una máquina eléctrica rotativa. En el caso de los rodamientos, cabe destacar que en máquinas de hasta 4 kV suponen el 50% del total de fallos, según ciertos estudios. Debido a esto, el mantenimiento y el diagnóstico precoz de las partes mecánicas es fundamental para alcanzar altos índices de disponibilidad.

El desgaste de los rodamientos produce un movimiento descentrado en el rotor junto con el surgimiento de niveles altos de vibración, los cuales incrementan el riesgo de que un entrehierro de anchura no uniforme (excentricidad) que acabe produciendo rozamiento entre el estator y rotor y provoque una ruptura de las chapas magnéticas de estos. Otro problema frecuente en las partes mecánicas es la desalineación de los ejes o una incorrecta nivelación de la máquina, que también suponen esfuerzos desequilibrados que repercuten en la operación del motor. Predictivamente, para reducir y/o mitigar la desalineación de los ejes se utilizan desde relojes comparadores hasta el empleo de alineadores láser. El término de excentricidad se abordará con más profundidad en los siguientes párrafos.

Predictivamente, el análisis de vibraciones es la herramienta más utilizada y extendida y es la más adecuada para detectar fallos mecánicos en su etapa más incipiente. Se puede implementar un monitoreo periódico (discontinuo) del estado de vibración de la máquina. Normalmente existen dos formas de realizar análisis de vibraciones, por un lado, se valora el estado de vibración global (rms global) en forma periódica y rutinaria y por otro lado se basa en determinar en forma precisa y específica cada una de las componentes que integran la vibración global, es decir, se realiza una asociación a determinados fallos.

Sistemáticamente, la industria y los fabricantes han propuesto ciertas tareas a efectuar cuando el motor es parado para realizar mantenimiento preventivo-sistemático, algunas de las cuales están relacionadas con las partes mecánicas. Entre estas tareas se citan las siguientes:

- Limpieza de las partes internas del motor mediante aspirador o aire seco.
- Limpieza de las superficies exteriores las cuales incluyen las rejillas de ventilación.

- Comprobación de correcta nivelación y alineamiento con la carga acoplada al motor.
- Comprobación del estado del ventilador.
- Comprobación de holguras y ajustes.
- Comprobación de la caja de bornes, conexiones visibles y sujeción de las bobinas.
- Lubricación de elementos mecánicos.

### 2.4.3 Comprobación por condición de los aislamientos.

Es importante subrayar que, en motores de menor potencia, alrededor del 35% de los fallos de las máquinas eléctricas rotativas tienen su causa por la degradación o problemas de aislamiento [3]. En motores de gran potencia, este porcentaje puede ser mucho mayor. En general en los aislamientos de los devanados del estator pueden aparecer defectos de diferente índole que puede llevar hasta una perforación del aislamiento. Este tipo de fallo puede tener diferentes causas:

- Contaminación o humedad. La condensación de vapor de agua y aceite, sobre todo en motores con clases de servicio intermitente y de corta duración. Estas sustancias se condensan sobre el aislamiento y, junto con el polvo, crean una capa de suciedad que luego es absorbida hacia el interior del aislante disminuyendo sus propiedades mecánicas y eléctricas.
- Envejecimiento térmico. Se refiere a la degradación del aislamiento en zonas sometidas a mayores esfuerzos dieléctricos y mecánicos debido al efecto de la temperatura a lo largo del tiempo. Debido a esto, es importante considerar la temperatura límite del aislante según la clase de aislamiento. Un aumento permanente de 10°C sobre la temperatura de régimen nominal de una máquina eléctrica reduce la vida de un aislamiento clásico a la mitad [3].
- Variaciones de temperatura. La falta de compactación del muro aislante es debida a la diferente dilatación térmica entre el cobre y el material aislante, generalmente compuesto de micaepoxy. Esto produce falta de adherencia y deslizamiento entre las capas aislantes y por consiguiente bolsas de aire que llevan a puntos de producción de descargas parciales.
- Vibraciones. Esta es otra causa de la falta de compactación entre las capas aislantes. Debido a que en toda máquina las vibraciones están presentes, esto provoca roces de los devanados con otros elementos pudiendo provocar la pérdida de material aislante.
- Descargas parciales. Se mencionó anteriormente que la falta de adherencia entre las láminas del material aislante da oportunidad a que elementos como el agua absorbida, disolventes o resinas penetren y al evaporarse formen burbujas (vacíos) al interior del aislante. Esto repercute con el aumento del campo eléctrico al interior e inclusive puede llegar a superar el valor de rigidez dieléctrica. Es entonces donde se manifiestan descargas al interior los cuales producen degradación química dañando al aislamiento con perforaciones.
- Otras causas. Estas se remiten básicamente a una deficiencia durante la fabricación y/o montaje o si el motor no es correctamente utilizado o dimensionado.

Desde el punto de vista predictivo, el diagnóstico de la condición del aislamiento se basa en la medición de diversas magnitudes, aplicando tensiones entre el bobinado y masa. A continuación, se mencionan algunas pruebas para diagnosticar la condición del sistema aislante.

1. **Prueba de resistencia óhmica.** Esta prueba está más orientada a detectar problemas en el bobinado. Se basa en la medida precisa de la resistencia entre las bobinas por lo que es

importante contar con un equipo de precisión. La medida de diferentes valores de resistencia para cada fase indica la existencia de desequilibrios resistivos entre las fases. Para cuantificarlos, se utiliza el parámetro Delta R, el cual se define como:

$$\text{Delta R} = \frac{\text{Máxima desviación respecto al valor promedio}}{\text{Valor promedio}} * 100$$

Valores elevados de este parámetro (por general, superiores a 2%) denotan un alto grado de desequilibrio resistivo, lo cual puede ser informativo de problemas como:

- Diferente número de vueltas en las bobinas de cada fase.
- Diferentes diámetros o longitud de cobre (alambre).
- Altas resistencias en las conexiones (defecto de fabricación).
- Corto circuito entre espiras.
- Espiras quebradas.
- Conexiones sueltas en la caja de bornes.
- Bobinas parcialmente rotas.

2. **Resistencia de aislamiento a tierra (IEEE 43).** Junto con la prueba del índice de polarización, es la prueba más común para medir y comprobar el estado o condición del aislamiento de los conductores del estator. Muchos fabricantes de máquinas eléctricas rotativas recomiendan implantar estas dos mediciones al plan de mantenimiento del cliente. El equipo más utilizado es la prueba de Megger™ o Megóhmetro el cual mide la resistencia del aislamiento a tierra aplicando una tensión en continua (usualmente de 500 o 1000 V) al motor.

El mínimo valor de la resistencia de aislamiento a tierra es de 1 MΩ por kV de tensión nominal + 1 MΩ @40°C de temperatura ambiente. Por lo general son normales medidas de más de 50 MΩ. Una vez obtenidas las mediciones deben ser corregidas por tablas para ajustarlas a la temperatura de 40°C, aunque algunos equipos de medida realizan este ajuste automáticamente. De la misma manera que la anterior prueba mencionada, el éxito se basa en la experiencia y datos obtenidos a partir de inspecciones y ensayos periódicos para que puedan proporcionar indicaciones sobre las tendencias a largo plazo y las posibles movilizaciones de repuestos y/o reparaciones.

3. **Índice de polarización, IP (IEEE 43-2000).** Este índice consiste en dividir la resistencia de aislamiento@10 minutos entre la resistencia de aislamiento@1 minuto. Esto resulta indicativo a la hora de valorar el grado de sequedad del aislamiento y el grado de limpieza. El valor mínimo recomendado de IP depende de la clase térmica del aislamiento. En aislamientos con clases térmicas B, F o H, el valor mínimo recomendado de IP es 2; así, valores de IP superiores a 2 indican un aislamiento limpio, mientras que valores menores a 2 significan aislamientos sucios. En este caso, se recomienda secar el aislamiento introduciendo el motor a un horno hasta que la resistencia de aislamiento alcance, al menos, los 10 MΩ. Si no funciona, se puede incluso recurrir al rebarnizado de los aislamientos o en caso extremo, al rebobinado del motor.

Es importante destacar que la prueba de resistencia de aislamiento a tierra no indica fallos de aislamiento entre espiras o incluso entre bobinas. Para detectar estos fallos, es recomendable el

uso de ensayos de sobretensión (hi-pot) u ondas de choque (surge test) que requieren de equipamiento especial. Estos se explican muy brevemente en los siguientes párrafos.

4. **Ensayos de sobretensión (hi-pot) IEEE 95.** Básicamente, este tipo de ensayos se basan en aplicar al aislamiento, niveles de tensión superiores a la nominal de la máquina. Existen varias modalidades, siendo la de escalones de tensión (step voltage) bastante frecuente. Esta se basa en aplicar escalones de tensión crecientes entre fase y tierra, hasta llegar a un valor máximo especificado por la normativa. Este tipo de pruebas se aplican a máquinas de reciente fabricación o para su puesta en marcha en operación. Aunque también se pueden implementar a máquinas los cuales sus devanados han estado bajo mantenimiento y así asegurar que no han sufrido daños.
5. **Ensayos con ondas de choque (surge test) IEEE 52.** Consisten en aplicar un impulso brusco de corriente para evaluar el aislamiento entre espiras. Esta prueba intenta detectar cortos entre espiras de una misma bobina. Las medidas con ondas de choque proporcionan información adicional y diferente que no suministran las anteriores pruebas, por lo que estos ensayos pueden ser utilizados para complementar y/o evaluar la condición del aislante. Sin embargo, se requiere de gran experiencia para la interpretación de los resultados. Además, para realizar estas pruebas se requieren de equipos muy especiales que son habitualmente utilizados por los fabricantes.

#### 2.4.4 Inspección del sistema de anillos rozantes – escobillas.

A diferencia de las máquinas de inducción, la mayoría de las máquinas síncronas de rotor bobinado requieren de una alimentación desde una fuente externa de corriente continua al devanado de campo o excitación, generalmente mediante anillos rozantes que están montados sobre el propio eje de la máquina. Es importante mencionar que, a diferencia de los devanados rotóricos trifásicos como los que cuentan las máquinas de continua, los anillos colectores a utilizar para alimentar el devanado de excitación de las máquinas síncronas son únicamente dos a diferencia de los seis que utilizaría una máquina de continua. Otro punto importante es que las tensiones y la intensidad necesarias para la excitación son relativamente pequeñas lo que facilita el buen funcionamiento del contacto anillo-escobilla [9]. Por todo lo anterior, se minimiza la periodicidad de las verificaciones por nivel de desgaste dentro de un plan de mantenimiento.

Sistemáticamente, se han implantado operaciones de mantenimiento para el sistema de anillos rozantes – escobillas dentro de los planes de mantenimiento a continuación se mencionan algunas:

- Inspección de las escobillas por condición -> (Visual).
- Limpieza de las escobillas y anillos rozantes -> (Manual).
- Comprobar área de contacto de las escobillas -> (Visual).
- Comprobar el sistema de fijación de las escobillas -> (Visual).
- Inspección de nivel de desgaste en escobilla, realizar cambio si es necesario -> (Visual).
- Inspección y limpieza del compartimiento de anillos rozantes -> (Visual, Manual).



En la actualidad existen máquinas que utilizan sistemas de excitación sin escobillas ni anillos rozantes basados en diodos giratorios conocidos como “*Brushless*”. Además de eliminar la necesidad de disponer de anillos colectores y escobillas, estos sistemas brindan mayor eficacia aunado a la minimización de problemas y mantenimiento debido a transferencia de potencia al devanado de campo.

#### **2.4.5 Comprobación del paquete magnético.**

Los problemas con el paquete magnético son los menos comunes en las máquinas eléctricas rotativas. Consiste en la degradación del aislamiento que existe entre las chapas lo que origina la presencia de puntos en los que es posible la circulación de corrientes de Foucault y, por tanto, se produce un elevado calentamiento en el núcleo.

Predictivamente se utiliza la termografía infrarroja para detectar este tipo de avería, a través de ensayos offline efectuados con el rotor desmontado. Este ensayo se realiza en talleres de reparación de motores, no siendo tan común en industrias.

#### **2.4.6 Detección de asimetrías rotóricas.**

##### **2.4.6.1 Roturas de barras.**

El fenómeno de una asimetría rotórica (y, específicamente de la rotura de barras y anillos de cortocircuito como en los rotores de los motores de inducción) es algo que no aplicaría en el rotor de una máquina síncrona. Como se ha mencionado, las máquinas síncronas, tanto del tipo de rotor cilíndrico como de polos salientes, tienen la característica que los rotores son de material sólido, ya sea de acero de alta resistencia o de hierro macizo, y los devanados de campo están alojados en ranuras practicadas en la periferia o concentrados en posiciones angulares específicas en los polos para las máquinas de rotor cilíndrico y de polos salientes, respectivamente.

Sin embargo, en máquinas síncronas donde sus características constructivas conlleven el montaje del devanado amortiguador en el rotor, se podrá describir el fenómeno de asimetrías rotóricas (rotura de barras y anillos) como en el caso de las máquinas de inducción. Por consiguiente, cuando hablemos de asimetrías rotóricas en máquinas síncronas nos referiremos a daños que se generen en este tercer devanado (amortiguador). La rotura de barras y anillos es un fenómeno común en máquinas de tamaño considerable, debido a la dificultad de construir tanto el devanado amortiguador o jaula de ardilla en una sola pieza.

Las asimetrías rotóricas normalmente se relacionan con altos niveles de temperatura en el rotor y fuerzas centrífugas en barras y anillos. Algunas causas pueden ser problemas durante la fabricación, como puede ser una defectuosa fundición o una incorrecta soldadura de las barras. El fallo también puede ser debido a regímenes transitorios térmicos del motor, lo cual conlleva a la torsión y agrietamiento de los anillos.

El agrietamiento o fractura suele iniciarse en la zona donde la barra se une con el anillo de cortocircuito, debido a los gradientes térmicos y esfuerzos electrodinámicos a los que se ven sometidas las barras. En este punto de unión es donde se acumulan las mayores tensiones mecánicas de la estructura. Este tipo de fallo va muy de la mano del ciclo de trabajo. Así, el fallo es más posible si la máquina está sometida a repentinias y bruscas fluctuaciones de velocidad o a frecuentes arranques por el tipo de accionamiento (ciclo de trabajo intermitente o parada y encendido constante).

Una vez que una barra o anillo se ha agrietado, el proceso de degeneración es progresivo; la barra defectuosa se calienta en torno a la fisura hasta llegar a romperse. Esta rotura genera la aparición de arcos eléctricos entre las dos partes separadas, que habitualmente dañan al circuito magnético. Por consecuencia, las barras adyacentes soportan corrientes mayores y por ende mayores solicitaciones térmicas y mecánicas, con lo cual se inicia el proceso de aparición de nuevas grietas [7]. (Ver Figura 7).

El fallo en el devanado amortiguador, como se ha apuntado, puede tener consecuencias catastróficas. Si suficientes barras se rompen, la máquina puede llegar a no poder arrancar, ya que, al no existir barras operativas, no existe par de arranque suficiente para mover la carga accionada. En otros casos, las roturas de las barras del devanado amortiguador pueden dar lugar al desprendimiento de fragmentos de barras rotas o a protrusiones de barras que dañen el devanado y/o el núcleo estático, produciendo la parada intempestiva del motor e implicando reparaciones carísimas, que conllevan el rebobinado del motor. La Figura 7 ilustra un caso acontecido en un motor síncrono de 33MW y 11 kV, que operaba en una industria de Reino Unido. Debido a la rotura de un gran número de barras del devanado amortiguador (más del 40%), el motor no podía arrancar. La reparación fue costosísima y conllevó la parada de la planta durante 4 semanas, con pérdidas estimadas superiores a los 10 millones de euros.

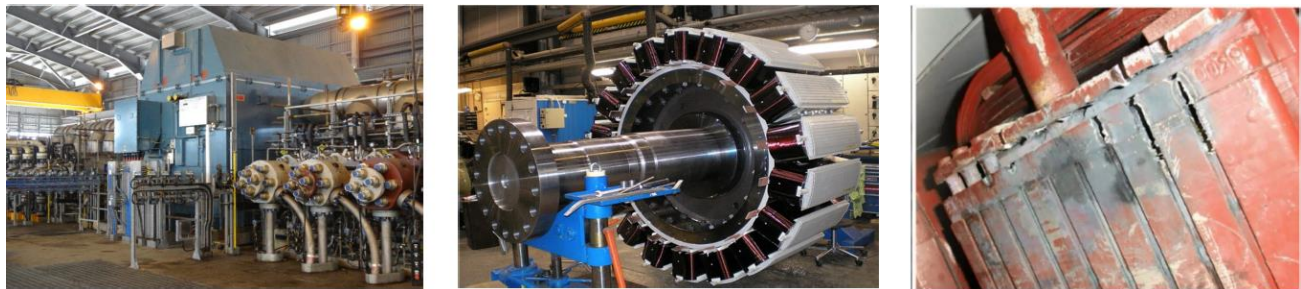


Figura 7. Máquina síncrona de polos salientes 11 kV, 33 MW, 26 polos (izquierda). Detalle del rotor durante su manufactura (centro). Roturas de barras en el devanado amortiguador (derecha). Fuente: [12]

#### 2.4.6.2 Excentricidades.

Hasta el momento solo hemos incluido al agrietamiento o rotura de barras y anillos rotóricos como averías por asimetrías rotóricas, sin embargo, las modificaciones en el tamaño del entrehierro, conocidas como excentricidades, también entran en este tipo de fallo.

La excentricidad se produce cuando el entrehierro no es uniforme. Puede venir ocasionada por múltiples factores. Niveles elevados de excentricidad conllevan esfuerzos asimétricos aplicados sobre diversas partes de la máquina, como los rodamientos, los cuales pueden acortar la vida útil de estos elementos. Si el nivel de excentricidad es excesivo, puede incluso tener lugar el rozamiento entre rotor y estator, con daños en el núcleo estático y/o rotórico que pueden implicar la parada intempestiva del motor, además de costosas reparaciones. Existen tres tipos principales de excentricidad (ver Figura 8):

- *Excentricidad estática.* Excentricidad en la que la posición de mínimo entrehierro permanece fija en el espacio. Puede deberse a que el eje de giro del rotor coincide con su eje geométrico y es paralelo al eje geométrico del estátor. Este tipo de excentricidad puede ser causada por razones como la ovalidad del estátor o el incorrecto posicionamiento del rotor en el hueco del estátor, consecuencia de una incorrecta fijación o el deterioro de los rodamientos, deformación de sus soportes en las tapas, tolerancias excesivas, etc.

- *Excentricidad dinámica.* Se produce cuando la posición de mínimo entrehierro no se mantiene fija en el espacio. Puede deberse a que el eje de rotación del rotor coincide con el eje geométrico del estátor, pero no coincide con el eje geométrico del rotor. La excentricidad dinámica puede ser causada por la deformación del eje del rotor, el desgaste de los rodamientos, el desalineamiento o resonancias mecánicas a la velocidad crítica.
- *Excentricidad mixta.* Combinación de excentricidad estática y dinámica. Excentricidad en la que el eje de rotación del rotor no coincide ni con su eje geométrico ni con el eje geométrico del estátor. Es el caso más común en una máquina eléctrica rotativa.

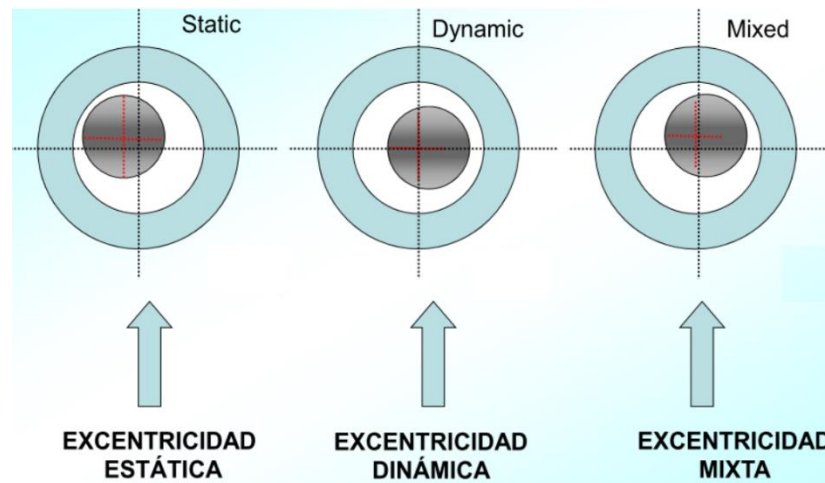


Figura 8. Clasificación de la excentricidad.

### 2.4.6.3 Técnicas predictivas para la detección de asimetrías rotóricas.

En general, cualquier asimetría rotórica produce alteraciones en el campo magnético de la máquina y éstas, a su vez, inducen fuerzas electromotrices al estator. En una máquina síncrona con devanado amortiguador trabajando en modo motor, el conjunto de armónicos inducidos en la corriente de alimentación o en el flujo magnético creado por la barra rota se observarán únicamente durante el funcionamiento en modo asíncrono, etapa en donde el devanado de excitación está des-energizado.

Predictivamente, el fallo rotórico puede ser detectado mediante el análisis espectral de corrientes de alimentación en funcionamiento en modo asíncrono. Este es el método tradicional de diagnóstico y más usado basado en la medida de corrientes (Motor Current Signature Analysis, MCSA). Consiste en capturar la corriente demandada por la máquina en régimen permanente para después aplicar el análisis mediante la transformada rápida de Fourier (FFT). La detección de “picos” de frecuencias característicos en el espectro de la FFT se asocia a la avería.

Algunas ventajas del análisis espectral de corrientes de alimentación son:

- No es necesario tener un acceso directo al motor.
- Basta con sólo medir una fase.
- Se mide en régimen permanente (forma de onda de la corriente).

- Simple de medir y analizar.
- La medida no interfiere con el proceso productivo.

Esta técnica utiliza la detección de familias de frecuencias (armónicos) de órdenes bajos y altos, asociándolos a la asimetría rotórica correspondiente (roturas de barras o excentricidad). Con respecto a las roturas de barra, lo más generalizado y difundido consiste en realizar el seguimiento de dos armónicos situados a ambos lados de la frecuencia fundamental (frecuencia de alimentación), y separados de ésta una distancia de  $2 \cdot s \cdot f$ , cuyas amplitudes están relacionadas con el grado de asimetría que presente el devanado rotórico. Estas frecuencias son conocidas como  $f_{Li}$  armónico lateral inferior y  $f_{Ls}$  armónico lateral superior:

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

Donde:

$f$  = frecuencia de alimentación del motor

$s$  = deslizamiento.

Además, existen otras familias de frecuencias que también estarán relacionadas con la asimetría del devanado del rotor y que se ven amplificadas cuando esta avería está presente:

	$f \cdot \left(\frac{i}{p} \cdot (1 - s) - s\right)$	$f \cdot \left(\frac{i}{p} \cdot (1 - s) + s\right)$
$i/p = 2$	$f(2 - 3s)$	$f(2 - s)$
$i/p = 3$	$f(3 - 4s)$	$f(3 - 2s)$
$i/p = 4$	$f(4 - 5s)$	$f(4 - 3s)$
$i/p = 5$	$f(5 - 6s)$	$f(5 - 4s)$
$i/p = 6$	$f(6 - 7s)$	$f(6 - 5s)$
$i/p = 7$	$f(7 - 8s)$	$f(7 - 6s)$

Tabla 1. Armónicos característicos de la asimetría rotórica.

Es importante recalcar que en las máquinas síncronas los armónicos laterales se podrán visualizar después de la fase de arranque (transitorio) y una vez operando en régimen permanente antes de alimentar el devanado de campo, esto es, en funcionamiento en modo asíncrono. El diagnóstico no sería aplicable cuando el motor trabaja a la velocidad de sincronismo o muy cercanas a ésta, ya que los armónicos laterales no se observarían dentro del espectro FFT, al girar la máquina a velocidad de sincronismo (deslizamiento nulo).

La presencia de cargas pulsantes como lo pueden ser compresores, engranajes reductores etc..., produce modulación en el espectro de corrientes. Esta modulación es debida al par pulsante generado por la máquina accionada y aparece en forma de bandas laterales alrededor de la componente fundamental de la corriente. Esto puede dificultar el diagnóstico del estado del rotor cuando se utiliza la

técnica clásica (MCSA), ya que resultar difícil distinguir los armónicos de asimetría rotórica y los causados por la influencia mecánica de la carga [7].

Otro hecho importante de la técnica tradicional es la dificultad de diagnosticar el fallo cuando no hay al menos una barra rota [7]. La experiencia ha demostrado que la aparición de los armónicos laterales se produce una vez que ya se ha roto al menos una barra [3]. Por lo que antes de que suceda una separación total de la barra, no se aprecia un incremento substancial en la amplitud de los armónicos laterales, por lo que la única manera de detectar la avería antes de que afecte por completo a una de las barras consiste en el análisis periódico continuado de la corriente del motor.

El uso de armónicos de orden más altos suplementado con otras técnicas predictivas basadas en el análisis de corriente en transitorio (Advanced Transient Current Signature Analysis, ATCSA) y el análisis de flujo magnético de dispersión (Stray Flux Analysis) pueden ser una solución para los problemas descritos anteriormente ya que presentan una sensibilidad ligeramente superior a la avería, además de poder evitar falsos diagnósticos. Estas dos últimas técnicas se abordarán más adelante.

En cuanto a la dificultad de detectar el fallo cuando no hay al menos una barra rota, es recomendable que el diagnóstico también se base en la detección de los armónicos cercanos al quinto y séptimo armónico (ver Tabla 1), ya que puede ayudar a clarificar el diagnóstico en casos dudosos. Por ejemplo, con referencia a los problemas derivados de la acción de la carga, estos no serán tan relevantes, si en vez de emplear para la detección los armónicos laterales se utilizan frecuencias más altas, ya que la modulación de la corriente no será tan influyente a dichas frecuencias. No obstante, es necesario saber que no todas las componentes de órdenes superiores serán visibles en un espectro FFT, debido a la influencia de los factores de devanado de motor. Aun así, el objetivo del uso de frecuencias de órdenes superiores es complementar y proporcionar información adicional al empleo de los armónicos laterales.

En relación a los fallos por excentricidades, la industria habitualmente se basa en encontrar en el espectro FFT de la corriente demandada las componentes de la expresión que se indica abajo. El nivel de excentricidad se determina en función de la amplitud de dichos armónicos. Aunque también el análisis de corriente en transitorio, el análisis de flujo e inclusive el análisis de vibraciones han probado ser una fuente de información valiosa para su diagnóstico como se verá más adelante. Por tanto, es muy recomendable el complementar las diferentes técnicas y métodos entre sí para realizar un mejor diagnóstico. Sin embargo, a diferencia del análisis de vibraciones, los análisis de corrientes y flujo de dispersión son técnicas muy versátiles en aplicaciones hostiles o de difícil acceso en donde la instrumentación para realizar la medida de vibraciones u otro aparato de diagnóstico no sea posible.

Para el caso más frecuente en el motor, excentricidad estática y dinámica simultáneamente, los armónicos de frecuencias inducidos en las corrientes del estator aparecen como sigue:

$$f_{ex} = f \pm k \cdot f_r \leftrightarrow f_{ecc} = f \left[ \left( 1 \pm m \left( \frac{1-s}{p} \right) \right) \right]$$

Donde:

$f_r$  = Velocidad de giro motor en Hz.

$k$  = constante.

$p$  = número de pares de polos.

$s$  = deslizamiento.

$m = 1, 2, 3...$

Teniendo en cuenta lo anterior, se deben realizar algunas consideraciones: primero, no todos los valores de “ $k$ ” darán lugar a nuevos armónicos ya que, dependiendo del número de polos del motor, algunos se anularán [7]. Segundo, en un espectro FFT (sea de corriente o de flujo) las componentes  $f_{ecc}$  serán visibles aun cuando el motor no esté sometido a excentricidad. Lo anterior es debido a que es imposible un montaje sin mantener un mínimo nivel de excentricidad residual; durante el proceso de alineación motor-carga resulta difícil llegar a una desalineación nula. Además, el desgaste normal y las características de asientos en los rodamientos influirán en la posición del rotor dentro del alojamiento del estator. Por lo tanto, la combinación de los fenómenos mencionados dará lugar a ciertos niveles de excentricidades aun en motores sanos. Y tercero, las componentes  $f_{ecc}$  se verán reflejadas tanto en los espectros en modo asíncrono (antes que el devanado de campo sea energizado) como en sincronismo (devanado de campo energizado). Lo anterior se debe a que la presencia de excentricidad mixta produce la aparición de armónicos espaciales de  $p \pm 1$ , los cuales no pulsan a la misma velocidad que la frecuencia fundamental.

El método clásico de análisis de corriente utilizando los armónicos laterales para detectar asimetrías del rotor tiene dificultades en ciertos casos, sin embargo, el uso de altas frecuencias de 5to o 7mo orden puede brindar soluciones para algunos de los problemas antes mencionados sin llegar a ser decisivo para detectar el fallo cuando la barra aún no está rota. Aun con lo anterior el método MCSA tiene ciertos problemas:

1. *Falsos positivos*. Consisten en diagnosticar una máquina como averiada cuando, en realidad, está sana. Aparecen componentes (armónicos) que parecen ser causados por averías y, en realidad, son debidos a otras causas, estando el motor sano. Algunas situaciones en donde la máquina pudiera experimentar falsos positivos son:
  - Existencia de conductos axiales de refrigeración en el rotor. Si el número de polos y el número de conductos axiales de refrigeración son iguales o múltiplos enteros, pueden aparecer componentes similares al fallo.
  - Anisotropía magnética provocada por el proceso de fabricación del rotor.
  - Oscilaciones de carga. Como se explicó anteriormente, la presencia de oscilaciones en la carga arrastrada puede introducir componentes que se confundan con las de avería. En este caso, se pueden emplear los armónicos de alta frecuencia para clarificar si existe o no fallo.

Entre las consecuencias de los falsos positivos podemos encontrar:

- Parada y desmontajes innecesarios.
- Costes de transporte e inspección.
- Coste de puesta fuera de servicio.
- Daños en la credibilidad e imagen el equipo de mantenimiento.

2. *Falsos negativos*. Consisten en diagnosticar una máquina como sana cuando, en realidad, está averiada. Algunas situaciones que pueden dar lugar a falsos negativos cuando se emplea MCSA son:

- Máquinas operando en vacío o en condiciones de carga reducida. Esto conlleva a componentes de fallo que, aunque existan, no son visibles en el espectro (al superponerse con la componente fundamental).
- Roturas de jaula externa en rotores de doble jaula. Disminución de sensibilidad del método MCSA, ya que en permanente la corriente por la jaula externa es muy reducida
- Roturas de barra no adyacentes. Para determinadas posiciones relativas entre las barras rotas, los efectos pueden compensarse.

Entre las consecuencias de los falsos negativos podemos encontrar:

- Paradas de producción no planificadas.
- Peligros para la seguridad de usuarios.
- Daños en la credibilidad e imagen del equipo de mantenimiento.

Para proporcionar soluciones a los problemas e inconvenientes del método tradicional, existe un nuevo enfoque el cual consiste en analizar la corriente demandada de la máquina durante regímenes transitorios, por ejemplo, la corriente de arranque. La idea general de esta técnica se explica a continuación:

Esta técnica se basa en observar la evolución de las componentes mencionadas anteriormente, así como de otras componentes, durante el arranque de la máquina y rastrearlas con herramientas tiempo – frecuencia. Con respecto a los armónicos laterales, en régimen permanente, el deslizamiento ( $s$ ) tendrá un valor más o menos fijo, por lo tanto, la frecuencia del lateral inferior también:

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

Sin embargo, durante el arranque, a medida que el deslizamiento ( $s$ ) varía, y por tanto la frecuencia lo hará de un modo muy característico:

$s = 1 \rightarrow f_{LS} = f = 50 \text{ Hz}$
$s = 0,5 \rightarrow f_{LS} = 0 \text{ Hz}$
$s = 0 \rightarrow f_{LS} \approx f \approx 50 \text{ Hz}$

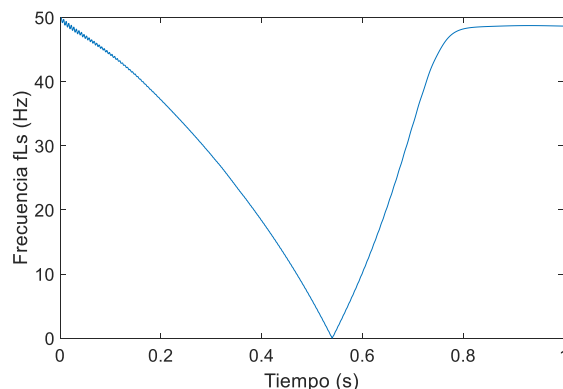


Figura 9. Evolución teórica durante el arranque del armónico lateral inferior considerando un arranque simulado.

Como se observa la frecuencia del armónico lateral inferior, en valor absoluto,  $|f_{L5}|$  primero disminuirá desde 50 Hz (cuando se conecta la máquina,  $s=1$ ) hasta 0 Hz ( $s=0.5$ ) y después se incrementará de nuevo hasta un valor cercano a  $f$  en régimen permanente, siguiendo un patrón característico en forma de “V”. El objetivo de la técnica de análisis transitorio (ATCSA) es rastrear la evolución tiempo-frecuencia de las componentes de fallo, de forma que:

- Si se detecta una componente con una evolución tan característica en el plano tiempo-frecuencia, hay avería.
- Si no, se puede descartar la presencia de avería.

El gráfico anterior (Figura 9) muestra la evolución característica teórica durante el arranque (transitorio) del armónico lateral inferior, relacionado con daños en la jaula del rotor. Otras componentes asociadas a esta avería (como el armónico lateral superior  $f \cdot (1 + 2s)$  o los armónicos cercanos al quinto armónico), presentarán otras evoluciones características que también se pueden rastrear. Por tanto, en el caso de fallos en el devanado amortiguador en máquinas síncronas todas estas componentes serán también observables y su detección permitirá detectar la presencia del citado fallo.

Por otro lado, las componentes de excentricidad/desalineamiento evolucionarán de forma característica durante el arranque de acuerdo a su respectiva expresión. Por consiguiente, su detección puede utilizarse para el diagnóstico de estos fallos.

Este nuevo enfoque, basado en el análisis transitorio, implica la necesidad de herramientas que permitan efectuar una descomposición tiempo – frecuencia de la señal, por lo que se deben utilizar herramientas de procesamiento de señales especiales. A éstas se les denomina transformadas tiempo – frecuencia. La transformada rápida de Fourier no es aplicable para detectar este tipo de evoluciones ya que su aplicación implica la pérdida de información temporal.

Las principales ventajas del enfoque basado en el análisis de la corriente al arranque son las siguientes:

- Es mucho más fiable, ya que se basa en patrones en vez de en la detección de componentes frecuenciales -como hace el método clásico de análisis de corrientes de alimentación – por lo que lo hace ser un método más eficaz a la hora de detectar fallos en su etapa más incipiente (como en el caso de las barras rotas).
- Se ha demostrado en máquinas de inducción que la influencia de fenómenos causados por conductos axiales de refrigeración o la anisotropía magnética en los rotores, entre otros, los cuales pueden dificultar el diagnóstico basado en régimen permanente, pueden ser evitados mediante el análisis del arranque. Esto se debe a la limitada penetración de flujo en el núcleo magnético durante el arranque [11].
- El hecho que en la industria los motores rara vez operan en régimen estrictamente permanente hace que esta técnica tenga una gran aplicabilidad en muchos procesos industriales.

Las principales limitaciones del análisis de la corriente al arranque son las siguientes:

- El requerimiento de parar la máquina aunado al sofisticado método de cálculo.
- Además, en trabajos previos se ha demostrado que cuando daños de barras en el rotor y excentricidad coexisten, el análisis de corriente de arranque (utilizando herramientas tiempo – frecuencia) tiene problemas en detectar la excentricidad/desalineación debido a que el efecto de



fallo por barras rotas es usualmente más grande, lo que enmascara las componentes de la excentricidad [11].

- Esta nueva metodología requiere de más investigación con respecto al establecimiento de los valores límites de severidad que permita conocer la condición de la máquina. Existe menos experiencia en el uso de esta técnica, especialmente en el área de motores síncronos.

Finalmente, procede describir brevemente la técnica de diagnóstico de asimetrías rotóricas basada en el análisis de flujo magnético de dispersión. Ésta básicamente consiste en la medida y posterior análisis de la fuerza electromotriz inducida en sensores de flujo (normalmente tipo bobina) fijados a la carcasa de la máquina. En estado sano, dicha fuerza electromotriz (fem) tendrá ciertas componentes armónicas. Sin embargo, si un determinado fallo está presente, armónicos adicionales se amplificarán en las citadas señales, de forma que la amplitud de estos armónicos será indicativa de la presencia del fallo, así como de su severidad. Esta filosofía puede ser aplicada del mismo modo que el análisis de corrientes, esto es, habrá un enfoque estacionario (analizar mediante la transformada de Fourier la fem capturada en régimen permanente) y uno transitorio (analizar la fem capturada durante el arranque mediante herramientas tiempo-frecuencia). Este último enfoque es muy reciente, en relación con el análisis de flujo de dispersión, pero se ha mostrado muy adecuado para detectar fallos en motores de inducción.

Se pueden considerar diferentes posiciones del sensor a la hora de aplicar la técnica. Dependiendo de la posición de éste, se capturará mayor cantidad de flujo axial o radial. Esto tiene incidencia sobre el diagnóstico, ya que se ha comprobado que determinadas componentes de fallo tienen naturaleza axial (están, pues, más presentes en el flujo axial) y otras radial (siendo más observables en los análisis del flujo radial).

En cualquier caso, se trata de una técnica que está concitando gran atención durante los últimos años debido a la evolución espectacular de los sensores de flujo, además de su simplicidad, bajo coste y naturaleza no invasiva.

Más concretamente, algunas ventajas del análisis de flujo magnético de dispersión son:

- Naturaleza no intrusiva y simplicidad.
- Según [7] tiene una mayor fiabilidad y sensibilidad para el diagnóstico de averías por asimetrías rotóricas.
- No perturba el funcionamiento normal de la máquina.
- La posibilidad de evitar falsas indicaciones de otras técnicas.

Como cualquier otra técnica, también tiene sus inconvenientes:

- La dificultad de introducción de indicadores de severidad de fallos.
- La influencia de la posición del sensor sobre los resultados. En algunas situaciones se podría dificultar el posicionamiento del sensor debido al limitado espacio en la instalación.

---

# CAPITULO 3

## ANÁLISIS DEL FLUJO MAGNÉTICO DE DISPERSIÓN

En el capítulo introductorio se mencionó que el mantenimiento predictivo se basa en la búsqueda de una evidencia en donde el fallo aún está en su etapa inicial para así coordinar la intervención en el momento más rentable. Esto hace que se busquen variables que indiquen la condición de los componentes de las máquinas eléctricas rotativas. Hablando sobre las asimetrías rotóricas en una máquina síncrona con devanado amortiguador, una de estas variables es la fuerza electromotriz inducida en sensores externos al motor. Lo anterior nos lleva a considerar el umbral (cantidad) de tiempo entre el punto en el cual el fallo se hace identificable y el punto en el que se deteriora hacia un fallo funcional. La experiencia de muchos autores indica que existe un amplio periodo que transcurre desde que falla una barra hasta que la máquina experimenta un fallo funcional [13]. Esto lo hace especialmente susceptible a ser tratada mediante mantenimiento predictivo y es por ello por lo que existen varios estudios enfocados en su detección temprana.

La técnica de diagnóstico basada en el flujo de dispersión consiste en el monitorizado de la fuerza electromotriz inducida en un sensor externo (tipo bobina) montado sobre la carcasa de la propia máquina. Dependiendo de la posición de la bobina, en mayor o menor medida se capturará flujo axial o radial. Por tanto, las correspondientes componentes (axial y/o radial) se amplificarán en la señal de la fem cuando el fallo esté presente. La simplicidad de la técnica y su no invasividad a la operación normal del motor la hace de gran interés.

La presencia de fallos en el motor modifica el flujo magnético y más concretamente sus componentes de frecuencia. Esto se debe a que el flujo neto contiene una componente debida a corrientes del estator y otra debida a las del rotor y su contenido armónico está directamente relacionado con el contenido en armónico de las mencionadas corrientes, razón por el cual el flujo experimentará cambios. Lo anterior abre la ventana para que con el adecuado análisis de esta variable y herramientas sea posible identificar posibles evidencias de asimetrías rotóricas.

Como se indicó en el capítulo previo un hecho importante del análisis espectral de corrientes de alimentación es la dificultad de diagnosticar el fallo cuando no hay al menos una barra rota. En este aspecto el análisis del flujo magnético puede complementar información para la realización de un correcto diagnóstico. Además de lo anterior, otro hecho importante es la inmunidad que puede proporcionar la técnica de flujo ante determinados factores que puede ocasionar falsos diagnósticos con análisis de corrientes (conductos axiales de refrigeración).

### 3.1 Análisis de flujo de dispersión en régimen permanente.

El análisis de flujo magnético de dispersión en régimen permanente se basa en determinar, de forma precisa y específica, cada una de las componentes que integra el espectro del flujo, ya sea axial o radial. En otras palabras, se realiza una asociación entre las componentes del espectro y los distintos fallos. Y de igual manera se puede implementar un monitorizado periódico (discontinuo) de la condición del flujo magnético de la máquina.

Para efectuar un diagnóstico basado en espectros en frecuencia del flujo de dispersión en régimen permanente, se han de tener en cuenta algunas consideraciones:

- La posición de los armónicos de fallo en el espectro del flujo varía con el deslizamiento, es decir, con la velocidad de giro de la máquina.
- Las frecuencias que varían en el espectro de flujo al introducir asimetrías rotóricas corresponden a armónicos ya presentes en el flujo magnético de la máquina, es decir, no se produce la aparición de nuevas frecuencias, sino el aumento de las amplitudes de ellos.
- Una rotura de barra en un devanado amortiguador en una máquina síncrona tiene efectos muy similares a una de jaula de ardilla en una máquina de inducción.
- Las frecuencias de fallo características del flujo guardan similitud a las de las corrientes de alimentación (para ser más preciso, el contenido en armónicos es todavía más rico que en los espectros de corrientes).

A continuación, se hará una breve descripción de las frecuencias o armónicos de fallo a encontrar en los espectros de flujo magnético de dispersión, que resultan de interés para este trabajo.

#### 3.1.1 Armónicos por rotura de barra.

Como se ha comentado, las frecuencias de fallo características en las ondas de flujo de dispersión guardan similitudes con las presentes en las de las corrientes de alimentación. A este respecto, se puede utilizar el fundamento teórico de las frecuencias inducidas en las corrientes estáticas por la rotura de una barra de un motor de inducción de jaula de ardilla, basándose en el método tradicional modelizado por W. Deleroi [10], considerando que un fallo en el devanado amortiguador de un motor síncrono de rotor cilíndrico sería similar al de la jaula de ardilla en un motor de inducción.

Antes de empezar, es importante mencionar que los devanados de una máquina sana no son ideales y siempre existirán pequeñas asimetrías debido a sus características constructivas en los circuitos eléctricos y magnéticos. Además, existirán armónicos debidos a características no ideales de la tensión de alimentación. Por tanto, los armónicos a describir a continuación coexistirán con los armónicos ya existentes en el motor, provocados por estas causas.

Como se menciona en [7], cuando se produce una rotura total de una barra, la máxima cantidad de líneas de campo se agrupa entorno a la barra rota. Lo cual demuestra que la máxima distorsión en el campo se localiza en la zona de la rotura, decreciendo de forma simétrica a ambos lados de ésta con la distancia. El campo magnético que se genera siempre tiene dos polos situados a ambos lados de la barra rota siendo de naturaleza escalonada debido al número limitado de barras, es de eje fijo sobre la barra rota y pulsa a la velocidad del deslizamiento.

Este campo se podrá descomponer mediante un desarrollo de Fourier en una suma de campos senoidales de eje fijo que pulsarán en el tiempo a frecuencia de deslizamiento. Si a cada uno de esos campos senoidales se le aplica el teorema de Leblanc, se obtendrá una pareja de campos giratorios, uno de sentido directo y el otro de sentido inverso que giran respecto al rotor a la velocidad de deslizamiento.

Como se indica en [10], el efecto de la rotura de una barra es la aparición de dos series infinitas de armónicos espaciales: la primera gira con sentido de giro directo y la segunda con sentido inverso.

Antes de proceder con el desarrollo matemático, es importante mencionar que el método tradicional de modelización no considera los factores de devanado del estator, sino que considera analizar las frecuencias inducidas por un armónico genérico, considerando de esta manera todos los casos posibles. Una vez descrito el fundamento matemático, se procederá a buscar los armónicos calculados en los espectros de flujo magnético obtenidos en laboratorio para conocer su efectividad.

Si se considera el armónico fundamental de la serie, su velocidad geométrica de giro respecto al rotor será igual a:

$$N_s - N \quad (ec. 01)$$

Donde  $N_s = \frac{f}{P}$  es la velocidad de sincronismo en r.p.m y N es la velocidad de giro del rotor.

Entonces la velocidad eléctrica respecto del rotor del armónico fundamental de sentido directo de la serie es:

$$P \cdot (N_s - N) \quad (ec. 02)$$

Siendo P es el número de pares de polos de la máquina.

Para calcular la velocidad geométrica del armónico anterior respecto del rotor bastará con dividir la velocidad eléctrica de la ec. 02 por el orden del armónico i, puesto que el número de polos del armónico coincidirá con su orden, ya que el campo creado por la rotura de barras es de dos polos.

$$\frac{P \cdot (N_s - N)}{i} \quad (ec. 03)$$

Para referir esta velocidad al estátor, basta con sumar la velocidad de giro rotórica:

$$\frac{P \cdot (N_s - N)}{i} + N = \frac{P \cdot N_s}{i} + N \cdot \left(1 - \frac{P}{i}\right) = P \cdot N_s + N \cdot (i - P) \quad (ec. 04)$$

Las frecuencias inducidas en el estator por este armónico serán:

$$f + N \cdot (i - P) = f + N_s \cdot (1 - s) \cdot (i - P) \quad (ec. 05)$$

Siendo s el deslizamiento y f la frecuencia del armónico fundamental de la corriente.

Si en vez de considerar el armónico de sentido directo, se hubiera considerado el armónico inverso, se obtendría una ecuación equivalente a ec. 05. Reordenando se tiene la expresión analítica de las componentes que se encuentran presentes en el flujo del entrehierro.

$$f \cdot \left[ \frac{i}{P} \cdot (1 - s) \pm s \right] \quad (ec. 06)$$

Donde  $\frac{i}{p} = 1, 2, 3..$

Los signos +/- hacen referencia a que el armónico con signo (+) gira en la misma dirección que el rotor y el (-) gira en dirección opuesta. De esta manera, se ha encontrado las frecuencias que aparecerán en el espectro de flujo de dispersión.

Anteriormente se mencionó que lo más generalizado y difundido consiste realizar el seguimiento de dos armónicos situados a ambos lados de la frecuencia de la red y separados de el  $-2sf$  y  $+2sf$ , cuyas amplitudes están relacionadas con el grado de asimetría que presente el devanado rotórico.

Por lo que toca comprobar que dichos armónicos sean coherentes con la expresión obtenida en la ec. 06. Para el caso de  $i = P$  y signo (-) se obtiene el siguiente valor:

$$f_{Li} = f(1 - 2s) \quad (ec. 07)$$

Esta frecuencia corresponde a lo que mencionamos como armónico lateral inferior, el cual es ligeramente inferior a la frecuencia de la red. Este armónico modula la componente fundamental e induce una pulsación en el par a dos veces la frecuencia de deslizamiento,  $2sf$ , y consecuentemente provoca una oscilación en la velocidad de giro. Tal efecto provoca una nueva componente de valor:

$$f_{Ls} = f(1 + 2s) \quad (ec. 08)$$

Esta última componente representa el armónico lateral superior, el cual está situado ligeramente por encima de la frecuencia de la red. Las anteriores componentes  $f \pm 2 \cdot s \cdot f$  que aparecerán a ambos lados de la componente fundamental en un espectro FFT estarán principalmente presentes en el flujo magnético radial. Esto será relevante ya que, dependiendo de la posición del sensor de flujo, los armónicos predominantes en la fuerza electromotriz inducida pueden ser de naturaleza axial o radial.

Cabe observar que, a partir de la ec. 06 y utilizando diferentes valores de índice  $i$  y número de polos  $P$ , se podrán obtener otras familias de frecuencias, tal como se muestra en la Tabla 1. El uso de estas familias de frecuencia sobre todo del orden del 5to y 7mo armónico complementará y proporcionará información adicional al método habitual basado en la detección de los armónicos lateral inferior y superior.

Además de lo anterior, en investigaciones previas se ha demostrado detectar varios tipos de fallos en máquinas de inducción utilizando componentes distintas a los armónicos laterales. Concerniente a fallos en rotores, se ha demostrado que las componentes a  $s \cdot f$  y  $3 \cdot s \cdot f$ , las cuales tienen una naturaleza axial, son igualmente sensibles a daños en el rotor. Investigaciones previas han demostrado que la presencia de excentricidad/desalineación afectan a dichas componentes amplificándolas. La componente a  $3 \cdot s \cdot f$  es debida a la variación de la velocidad angular a  $2 \cdot s \cdot f$  causada por las barras rotas. Por tanto, la monitorización de las amplitudes de las mencionadas componentes en un espectro de flujo magnético FFT (especialmente en la dirección axial) y sus interrelaciones con otros fenómenos es también otra opción para detectar daños en el rotor. Sin embargo, los bajos valores en frecuencia de las componentes ( $s \cdot f$  y  $3 \cdot s \cdot f$ ) hace necesario que el tiempo de adquisición de datos sea más largo para que el análisis FFT sea capaz de distinguirlos.

### 3.1.2 Armónicos de excentricidad.

En condiciones operacionales reales, la excentricidad (esto es, entrehierro con anchura no uniforme) suele aparecer frecuentemente y coexistir con otros fallos. La excentricidad estática provoca un empuje magnético desequilibrado (*unbalanced magnetic pull*) no constante en la zona de menor entrehierro que tiende a doblar el eje, provocando su deformación, a la vez que el desgaste de los rodamientos, lo que da lugar a una excentricidad dinámica. Este proceso es degenerativo y va agravando el estado de la máquina hasta su eventual fallo. Además de lo anterior, los procesos térmicos pueden provocar alternaciones o deformaciones en el rotor y, por tanto, una variación del entrehierro en el tiempo y frecuencia.

El fenómeno de excentricidad ocasiona alteraciones tanto a nivel mecánico como eléctrico. Eléctricamente, provoca la aparición de un entrehierro variable el cual causa valores de reluctancia también variables y, por ende, la aparición de nuevos armónicos.

Una vez más partiendo de la base que las frecuencias de fallo presentes en el espectro de corrientes van a estar también presentes en el de flujo de dispersión, se puede mencionar que la presencia de desalineación incrementa las amplitudes de las componentes  $f \pm f_r$  donde  $f_r$  = frecuencia rotacional del rotor en un espectro de corriente estáticas. Por tanto, las amplitudes de estas mismas componentes podrán ser amplificadas por la presencia de excentricidad mixta. Otras aportaciones científicas mencionan que la existencia de excentricidad mixta en un motor también amplifica las componentes  $f \pm f_r$  en un espectro de flujo de dispersión. Las anteriores frecuencias pueden ser expresadas de la siguiente manera:

$$f_{ecc} = f \left[ \left( 1 \pm m \left( \frac{1-s}{p} \right) \right) \right] \quad (ec. 09)$$

Donde:

$p$  = número de pares de polos.

$s$  = deslizamiento.

$m = 1, 2, 3...$

Según trabajos previos las amplitudes de la expresión mostrada en la ec.09 son incrementadas cuando la rotura de barras está presente. En cualquier caso, las componentes de excentricidad van a estar presentes en los espectros de flujo magnético tanto en modo asíncrono y en sincronismo. Lo anterior se debe a que la excentricidad mixta produce la aparición de armónicos espaciales de  $p \pm 1$  pares de polos, los cuales no pulsan a la misma velocidad que la frecuencia fundamental. La presencia de dichos campos inducirá armónicos cuya frecuencia será la velocidad de giro respecto al estator de los campos que los crean, es decir:  $f \pm f_r$

## 3.2 Análisis de flujo de dispersión en régimen transitorio.

El análisis en régimen transitorio se basa en identificar la evolución de la fem en las componentes descritas anteriormente durante el arranque mediante el uso de distribuciones de tiempo y frecuencia. El objetivo de estas herramientas es describir la densidad de energía de una señal simultáneamente en tiempo y en frecuencia y así establecer la fracción de energía que se encuentra presente en un determinado intervalo de tiempo y un determinado intervalo de frecuencias [13.] Esto lo hace de gran interés debido a la particular variación del deslizamiento ( $s$ ) al arranque, lo que conlleva que los componentes relacionados con las averías evolucionen en un patrón característico cuando el deslizamiento ( $s$ ) varía entre 1 y cerca de 0 durante el arranque.

Este modelado característico debido a la presencia de los fallos considerados puede proporcionar información de gran valía para realizar un diagnóstico fiable e incluso el fallo puede ser más visible o claro si se compara con el análisis en régimen permanente. En este trabajo, se aplicará una técnica de análisis continuo de tiempo-frecuencia para detectar la presencia de los fallos considerados. Específicamente estaremos utilizando la Transformada de Tiempo Reducido de Fourier (Shor-Time Fourier Transform).

A continuación, se hará una breve descripción de la evolución característica de los componentes examinados y que observaremos en los espectrogramas STFT que resultan de interés para este trabajo.

### 3.2.1 Máquina sana.

En condiciones saludables la expectativa es que solo la componente fundamental aparezca en el intervalo de baja frecuencias. En un mapa (espectrograma) tiempo-frecuencia aparecerá como una línea horizontal (ver Figura 10) el cual puede ser más grueso dependiendo de la resolución de la herramienta tiempo-frecuencia empleada [11].

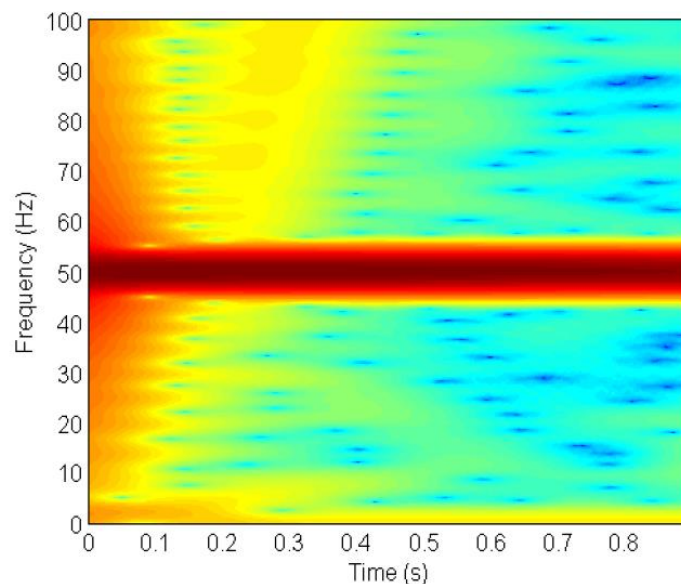


Figura 10. Espectrograma STFT para una máquina sana. Fuente: [14]

### 3.2.2 Armónicos por rotura de barra.

Como se ha venido mencionando existen dos grupos de componentes: axial y radial. El componente axial  $s \cdot f$  disminuirá desde 50 Hz cuando la máquina esté conectada ( $s = 1$ ) hasta cerca de 0 Hz en estado permanente ( $s \approx 0$ ). Mientras que la componente axial  $3 \cdot s \cdot f$  seguirá una evolución análoga empezando en 150 Hz y disminuyendo hasta cerca de 0 Hz. Por último, la componente radial  $f(1 - 2s)$  primero decaerá hasta 0 Hz y después se incrementará hasta alcanzar un valor cercano a  $f$  en estado estacionario acosando un patrón característico en forma de “V” [11]. Dentro de la categoría del grupo radial se identifican también los componentes cercanos al 5to armónico  $f(5 - 4s)$  y  $f(5 - 6s)$ . Estos armónicos siguen un patrón característico a medida que el deslizamiento ( $s$ ) varia durante el arranque en modo asíncrono. Como se observará en el siguiente capítulo, la identificación de estos armónicos contribuye para proveer una evidencia fiable de daños en el devanado amortiguador. Ver Figura 11.

### 3.2.3 Armónicos por excentricidad.

Con respecto a la excentricidad o desalineación y considerando para este caso  $p = 2$  y  $m = 1$  en la ec.09, los dos armónicos empezarían en la frecuencia de red (50 Hz) y finalizarían cerca de 25 Hz para  $f_{ecc}^{(-)}$  y 75 Hz para  $f_{ecc}^{(+)}$  durante el arranque. Ver Figura 11.

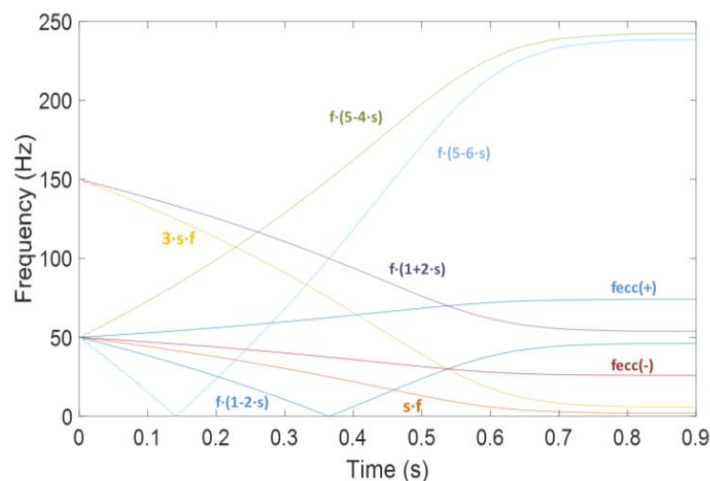


Figura 11. Evolución característica de los componentes considerados. Fuente: [12]

En el apartado anterior se mencionó que la presencia de ciertos fallos o fenómenos incrementan las amplitudes de ciertos armónicos en un espectro de Fourier, por lo que es recomendable su consideración y realizar el análisis. A pesar de esto, el análisis en régimen permanente tiene varios inconvenientes, por ejemplo; su baja aplicabilidad en procesos donde involucra velocidades variables debido a la dependencia del deslizamiento ( $s$ ) en la mayoría de los armónicos considerados. También en situaciones donde las características constructivas o condiciones de operación propenden a falsos diagnósticos. Debido a lo anterior, el nuevo enfoque (análisis en transitorio) ha sido utilizado en los últimos años por algunos investigadores y ha demostrado ser una técnica fiable y eficaz para detectar la presencia de fallos en su etapa más incipiente, al mismo tiempo evitando los falsos diagnósticos causados por el análisis en régimen permanente.



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

<b>Componente (armónico)</b>	<b>Dirección de flujo</b>	<b>Asimetría asociada</b>	<b>Interrelación con otros fenómenos</b>
$s \cdot f$	Axial.	Barras rotas.	Incrementan debido a excentricidades.
$3 \cdot s \cdot f$	Axial.	Barras rotas.	Incrementan debido a excentricidades.
$f \pm 2 \cdot s \cdot f$	Radial.	Barras rotas.	Influenciado debido a corrientes interlaminares.
$f \left[ \left( 1 \pm m \left( \frac{1-s}{p} \right) \right) \right]$	Desalineación.	Excentricidad.	Incrementan en presencia de barras rotas.

Tabla 2. Componentes de asimetría rotórica en el análisis en régimen permanente y transitorio.

---

# CAPÍTULO 4

## INSTRUMENTACIÓN Y METODOLOGÍA

### PROPUESTA

En el presente capítulo se presentará la instrumentación y la metodología que se utilizaron durante los ensayos en laboratorio para crear la base de datos con la que se trabajó. En primer lugar, brevemente se explica la composición de las bancadas experimentales empleadas (grupos polimórficos), enfocándose en las características principales de las máquinas síncronas ensayadas, para después pasar a describir los componentes que integran el pupitre de alimentación, los aparatos de medida y el control. El conocimiento del modo de funcionamiento de estos equipos, así como las normas de seguridad es de vital importancia para evitar lesiones al personal y posibles averías a la instrumentación por mal uso de ellos. También se mencionan las características del sistema de adquisición de datos, el cual consiste básicamente de un sensor sencillo (tipo bobina) y un osciloscopio, los cuales nos ayudarán a crear dicha base de datos.

La descripción de las metodologías con las que se trabajó durante la elaboración de esta tesis será otro punto dentro de este capítulo. La primera de ellas abordará el procedimiento llevado a cabo durante los ensayos en laboratorio. Se dará a conocer con detalle el armado eléctrico entre los grupos polimórfico y los pupitres, las variables obtenidas, los ajustes al sistema de adquisición de datos y las consideraciones tomadas en cuenta. Tras lo anterior, la segunda metodología explorará la manera en la cual se ajustó o se trató la base de datos obtenida, con el objetivo analizar la porción que nos llevará a realizar un adecuado análisis de resultados y, por ende, las conclusiones.

## 4.1 Instrumentación.

### 4.1.1 Grupos polimórficos.

Cada grupo polimórfico se compone de tres máquinas eléctricas rotativas; una máquina de corriente continua, una máquina síncrona y una máquina asíncrona. Las tres máquinas están montadas sobre una misma bancada y están acopladas en el eje por medio de acoplamientos elásticos fácilmente desmontables. La Figura 12 muestra uno de los grupos polimórficos con las tres máquinas que lo componen. Cada grupo cuenta con un pupitre de alimentación, medida y control, así como con reóstatos trifásicos que pueden utilizarse como carga o como reóstatos de arranque.



Figura 12. Grupo polimórfico.

#### 4.1.1.1 Máquinas síncronas ensayadas.

Las máquinas síncronas de cada grupo polimórfico utilizadas para las pruebas experimentales son alternadores trifásicos, tetrapolares, con excitación en el rotor (rotor liso) los cuales podrán ser operados como motores. Los extremos de los devanados de las tres fases del inducido (estator) son accesibles. Las terminales (U, V, W) son el principio de las tres fases y las terminales (Z, X, Y) son el final. La máquina puede ser conectada bien en configuración triángulo ( $\Delta$ ) o bien en estrella (Y). Los terminales J y K constituyen en principio y final del devanado de excitación. La Figura 13 muestra la máquina síncrona con las distintas bornas citadas.

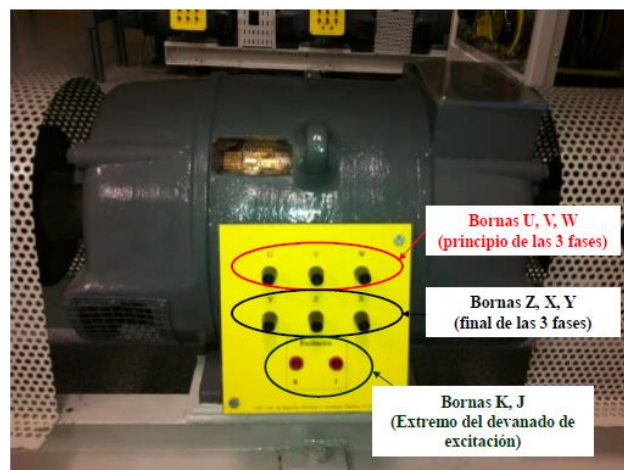


Figura 13. Máquina síncrona del grupo polimórfico.

En la siguiente tabla se muestran los datos de placa y las características constructivas de las máquinas síncronas:

Magnitud	Valor
Potencia Nominal ( $S_n$ )	5kVA
Tensión nominal ( $U_n$ )	440/220 V (Y/ $\Delta$ )
Corriente nominal (corriente estatórica máxima) ( $I_n$ )	7.5/13 A (Y/ $\Delta$ )
Número de fases (m)	3
Factor de potencia ( $\cos \phi$ )	0,80
Velocidad nominal ( $n_n$ )	1500 rpm
Número de pares de polos (p)	2
Frecuencia nominal (f)	50 Hz
Clase aislamiento	B
Tensión de excitación máxima ( $U_{exc, max}$ )	50 V
Corriente de excitación máxima ( $I_{exc, max}$ )	8 A
Circuito magnético: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Diámetro externo del estator</li> <li>○ Diámetro interno del estator</li> <li>○ Diámetro interno del rotor</li> <li>○ Longitud del núcleo</li> <li>○ Entrehierro</li> </ul>	281 mm 205 mm 95 mm 80 mm 0.75mm
Circuitos eléctricos: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Circuito eléctrico del estator:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Número de ranuras (distribución uniforme).</li> <li>○ Número de conductores por ranura.</li> <li>○ Sección de los conductores.</li> </ul> </li> <li>• Circuito eléctrico de excitación:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Número de ranuras.</li> <li>○ Número de conductores por ranura.</li> <li>○ Sección de los conductores.</li> </ul> </li> <li>• Devanado amortiguador:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Número de barras de cobre.</li> <li>○ Diámetro de las barras de cobre.</li> </ul> </li> </ul>	48 40 2·7.5/10 mm <sup>2</sup> 24 70 14/10 mm <sup>2</sup> 36 4 mm

Tabla 3. Datos de placa y características constructivas de las máquinas síncronas.

En la Figura 14 se muestra la caja de bornas de la máquina síncrona, con los modos posibles de conexión:

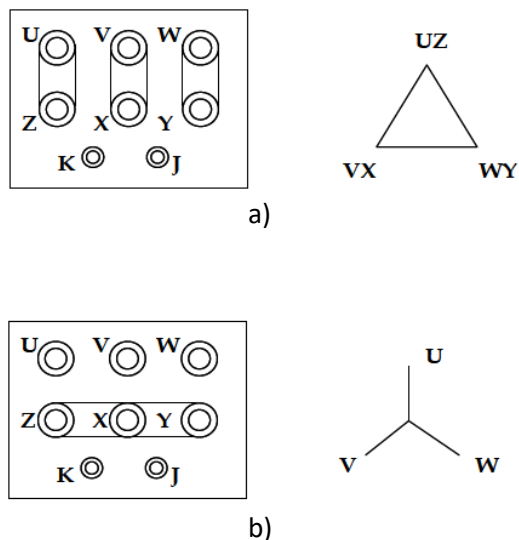


Figura 14. Modos posibles de conexión en la caja de bornas. a) Conexión triángulo ( $\Delta$ ), b) Conexión estrella (Y)

#### 4.1.2 Pupitre de alimentación, medida y control.

Estos pupitres permiten la puesta en marcha y el control simultáneo de las tres máquinas que componen el grupo polimórfico. Además, están equipados con una serie de aparatos y tomas de alimentación. Para las pruebas realizadas solamente se utilizará la máquina síncrona y una de las líneas de salida.

En la Figura 15 se muestra el esquema eléctrico detallado de los pupitres. La localización de las líneas de salida (A, B, C, D, E), bornas de conexión de aparatos y aparatos de medida en el esquema corresponden con la localización real en el pupitre. Mientras que en la Figura 16 se muestra la localización de los mandos del reóstato, autotransformadores y los enchufes tetrapolares de las salidas para conectar el grupo polimórfico.

El pupitre se conecta a la red a través de la línea de entrada, que aparece a la izquierda del esquema eléctrico (Figura 15). Las líneas A, B, C, D y E (azul, rojo, verde, amarilla y naranja respectivamente) son salidas que se utilizan para alimentar las máquinas del grupo polimórfico. En los distintos puntos del circuito existen bornas que facilitan la conexión de los aparatos de medida. Estas bornas son de dos tipos:

- Bornas voltimétricas; son una serie de bornas de color negro que sirven para conectar aparatos de medida que deban funcionar en paralelo con el circuito (por ejemplo, voltímetros, osciloscopios, frecuencímetros, bobinas voltimétricas de vatímetros...).
- Bornas amperimétricas; son una serie de bornas que se utilizan para intercalar aparatos que deben conectarse en serie con el circuito (por ejemplo, amperímetros o bobinas amperimétricas de vatímetros). Estas bornas son de color rojo. Las parejas de bornas amperimétricas deben

permanecer puenteadas mediante pletinas siempre que no se intercale ningún aparato entre ellas.

A continuación, se procede a describir de forma detallada el circuito eléctrico del pupitre:

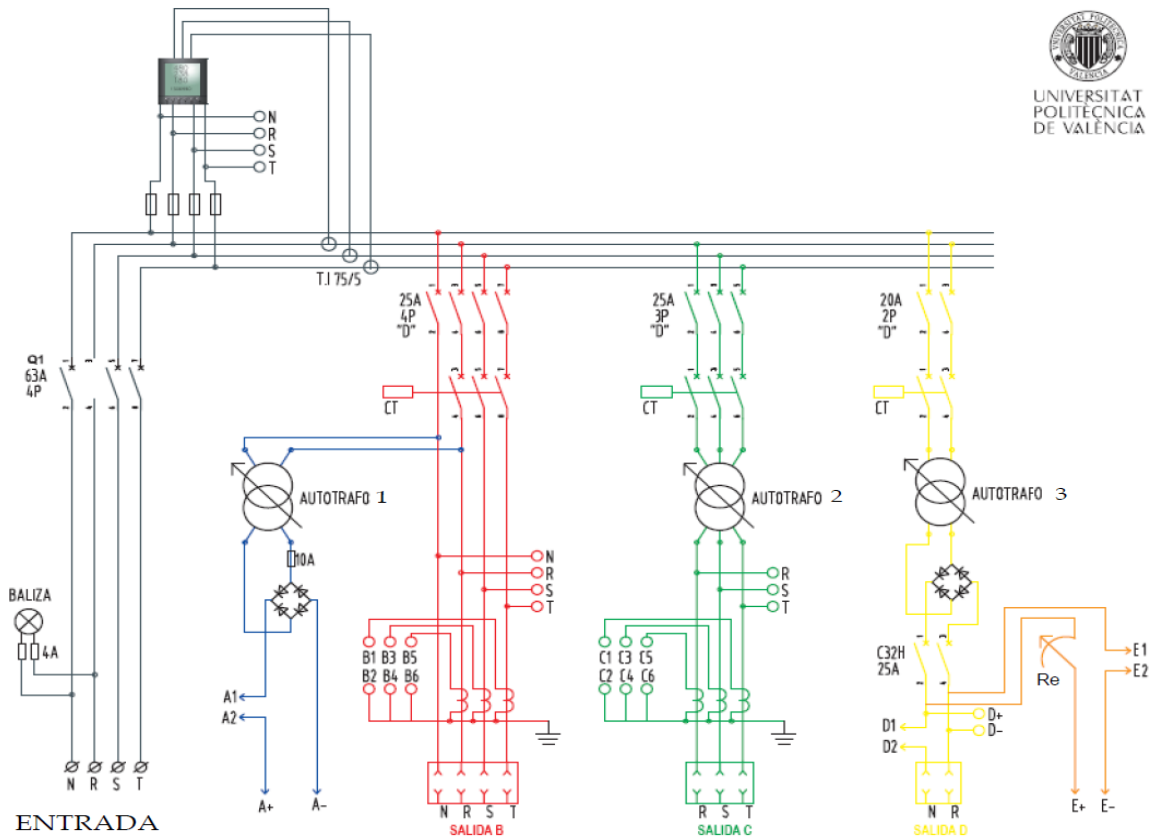


Figura 15. Esquema eléctrico del pupitre de alimentación, medida y control.

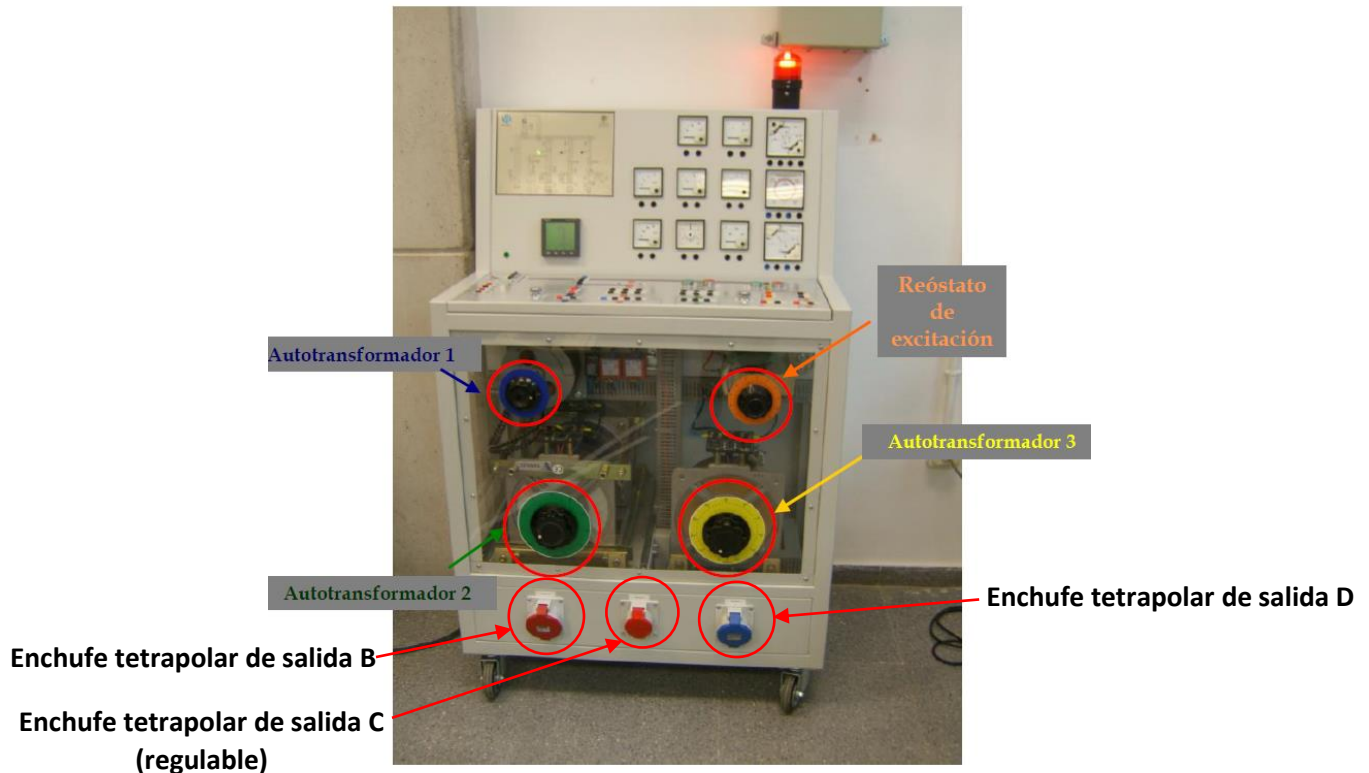


Figura 16. Localización de los mandos del reóstato, los autotransformadores y enchufes tetrapolar de salidas (B, C y D)

#### 4.1.2.1 Línea de entrada.

Esta línea (trifásica con hilo neutro) sirve para conectar el embarrado general del pupitre con la red; la alimentación es trifásica, a 400 V de tensión compuesta. Sobre la línea de entrada se sitúan los siguientes elementos:

- Una base en enchufe tetrapolar que facilita la conexión del pupitre con la red.
- Una baliza luminosa de señalización de tensión en el pupitre.
- Un interruptor automático tetrapolar (Q1) de 63 A de Intensidad nominal.

#### 4.1.2.2 Embarrado general.

Está constituido por tres fases y conductor neutro. Cuenta, adicionalmente, con una rama en derivación con los siguientes elementos:

- 4 fusibles unipolares.
- 4 bornas voltimétricas (R, S, T, N).
- Una pantalla de visualización de las magnitudes de red.
- Un transformador de intensidad de relación 75/5.

Desde este embarrado parten las líneas de salida B, C, D y las derivaciones E y A.

### 4.1.2.3 Líneas de salidas.

#### Línea B.

Esta línea de salida, formada por las tres fases y el neutro, proporciona una alimentación trifásica de tensión constante a 400 V. Esta línea se utilizará para alimentar el devanado del estator de la máquina síncrona. La línea B cuenta con los siguientes elementos:

- Un interruptor tetrapolar magnetotérmico, tipo 'D', de 25 A de intensidad nominal.
- Un contactor tripolar CT. Tras dicho contactor, entre la fase R y el neutro se deriva la línea A que se describirá más adelante.
- Cuatro bornas voltimétricas (R, S, T, N)
- Tres transformadores de intensidad de relación 40/5 A, 15 VA, cl. 1. Estos transformadores van montados sobre las fases y conectados en estrella.
- Tres pares de bornas amperimétricas (B1-B2, B3-B4, B5-B6) equipadas con puentes desmontables. Las parejas de bornas amperimétricas están montadas sobre los circuitos secundarios de los transformadores de intensidad. Conviene advertir que es necesario puentear las parejas de bornas amperimétricas siempre que no se intercale ningún aparato entre ellas puesto que, de no hacerlo, los transformadores de intensidad pueden averiarse.
- Una base de enchufe tetrapolar (salida B).

#### Línea C.

Se trata de una línea de salida trifásica que proporciona una alimentación de tensión variable comprendida entre 0 y 400 V y 20 A. Sobre la línea C se encuentran los siguientes elementos:

- Un interruptor magnetotérmico tripolar, tipo 'D', de 25 A de intensidad nominal.
- Un contactor tripolar CT
- Un variador de tensión rotativo (autotrafo 2) de tensión 0-440 V, intensidad nominal 20 A.
- Tres bornas voltimétricas (R, S, T).
- Tres transformadores de intensidad de relación 40/5 A, 15 VA, cl. 1. Estos transformadores van montados sobre las fases y conectados en estrella.
- Tres pares de bornas amperimétricas (C1-C2, C3-C4, C5-C6) equipadas con puentes desmontables, como en la línea B.
- Una base de enchufe tripolar (salida C).

#### Línea D.

Se trata de una línea bipolar que proporciona una alimentación de tensión continua variable entre 0 y 220 V, con una intensidad máxima de 25 A. Normalmente, la línea D se utiliza para alimentar el inducido de la máquina de continua del grupo polimórfico. Las características de los elementos que componen esta línea son las siguientes:

- Un interruptor bipolar magnetotérmico, tipo 'D', de 20 A de intensidad nominal.
- Un contactor bipolar CT.
- Un variador de tensión rotativo (autotrafo 3) de tensión 0-250 V, intensidad nominal 25 A.



- Un puente rectificador de onda completa, formado por 4 diodos de 600 V, 23 A y 34.5 A en pico.
- Un interruptor magnetotérmico bipolar (C32H) de 25 A de intensidad nominal. Inmediatamente después del interruptor C32H parte la línea E, en derivación con la línea D. Esta línea será descrita más adelante.
- Dos bornas voltimétricas (D+, D-).
- Una pareja de bornas amperimétricas (D1, D2) con puente desmontable. Hay que destacar que, cuando no se intercale ningún aparato entre D1 y D2, el puente debe permanecer montado ya que, de no estarlo, la línea B quedaría seccionada.
- Una base de enchufe bipolar (salida D).

#### **Línea E.**

La línea E se deriva de la línea D después del interruptor C32H, entre una fase y el neutro. Esta línea proporciona una alimentación en continua de tensión variable comprendida entre 0-220V, con una intensidad máxima de 4A. La línea E suele utilizarse para alimentar la excitación de la máquina de continua del grupo polimórfico. Sobre esta línea se encuentran los siguientes elementos:

- Un reóstato de excitación de 150 $\Omega$ , 4A.
- Una pareja de bornas amperimétricas (E1, E2) con puente desmontable, localizadas sobre el panel frontal.
- Dos bornas voltimétricas (E+, E-) situadas sobre el panel frontal.
- Dos bornas de salida (E+, E-) situadas en la parte izquierda del panel horizontal.

#### **Línea A.**

La línea A se trata de una línea bipolar que se deriva de la fase R y del neutro de la línea B y proporciona una alimentación en corriente continua, cuya tensión se puede variar entre 0 y 220 V, con una corriente máxima de 8 A. Esta línea se utilizará para alimentar el devanado de excitación de la máquina síncrona a través de un interruptor trifásico auxiliar. Esta línea cuenta con los siguientes elementos:

- Un variador rotativo de tensión (autotrafo 1), entre 0 y 220 V e intensidad máxima 8A.
- Un puente rectificador de onda completa, formado por 4 diodos de 600 V, 23A y 34.5A en pico.
- Un par de bornas amperimétricas (A1, A2) con puente desmontable, localizadas sobre el panel frontal.
- Dos bornas voltimétricas (A+, A-) situadas sobre el panel frontal.
- Dos bornas de salida (A+, A-) situadas en la parte izquierda del panel horizontal.

### **4.1.3 Aparatos de medida.**

Estos aparatos no tienen ninguna conexión interna con el circuito eléctrico del pupitre; para utilizarlos es necesario efectuar las conexiones externamente, conectando las bornas de seguridad correspondientes al aparato que se quiera utilizar con las bornas (amperimétricas o voltimétricas) apropiadas del circuito eléctrico del pupitre, descritas anteriormente.

Las letras y números que aparecen junto a las bornas adyacentes de los aparatos (ver Figura 17) sirven de orientación para efectuar las conexiones en los modos de utilización más usuales, que serán descritos más adelante.

Los aparatos están agrupados en tres bloques:

- Bloque izquierdo: formado por aparatos de medida en corriente alterna.
- Bloque central: formado por aparatos de medida en corriente continua.
- Bloque derecho: formado por un brazo de sincronización.

Los aparatos de medida están localizados en el panel frontal del pupitre tal como se muestra en la Figura 17.

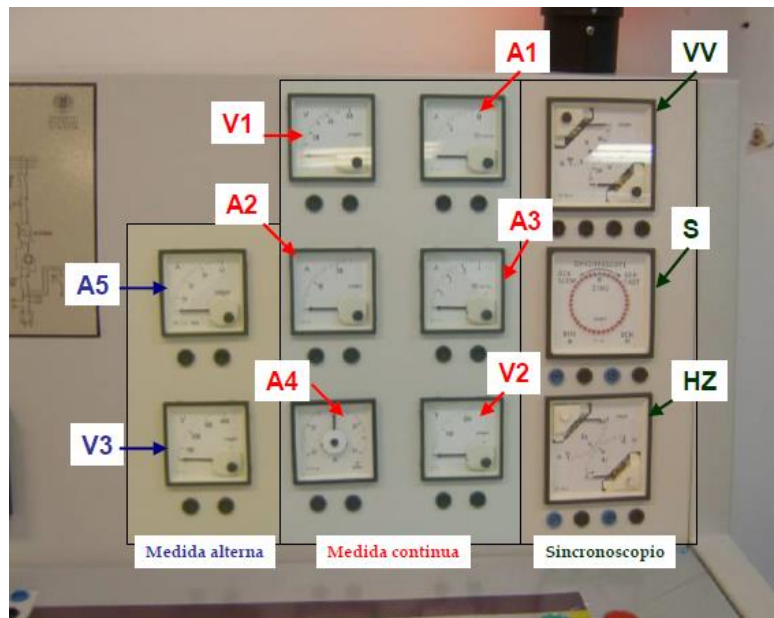


Figura 17. Localización de los aparatos de medida del pupitre.

A continuación, se especifica la lista de los aparatos disponibles, así como sus características:

Bloque izquierdo (medida alterna).

- A5: Amperímetro de hierro móvil para medida de corriente alterna, clase 1'5, tensión de prueba 2kV, conexión a través de transformador de intensidad de relación 40/5. Escala 0-40 A.
- V3: Voltímetro de hierro móvil, para medidas de alterna, clase 1'5, tensión de prueba 2 kV. Escala 0-400 V.

Bloque central (medida continua).

- V1: Voltímetro para medidas en continua, clase 1'5, tensión de prueba 2 kV. Escala 0-60 V.
- V2: Voltímetro de las mismas características que el anterior, pero con escala 0-250 V.
- A1: Amperímetro para medidas en continua, clase 1'5, tensión de prueba 2 kV. Escala 0-10 A.
- A2: Amperímetro de las mismas características que A1, pero con escala 0-25 A.
- A3: Amperímetro de las mismas características que A1, pero con escala 0-4 A.

- A4: Amperímetro de las mismas características que A1, pero con escala con cero central de -40:0:40 A.

Bloque derecho (sincronoscopio).

- VV: Voltímetro doble electromagnético para medias de alterna, clase 1'5, tensión de prueba 2 kV, escala 0-600 V
- S: Sincronoscopio electrodinámico (conexión a 220 V), tensión de prueba 2 kV, 50 Hz.
- HZ: Frecuencímetro doble de lengüetas, clase de precisión 0'5, tensión de prueba 2 kV, conexión directa hasta tensiones de 400 V, escala 45-50-55 Hz.

#### 4.1.4 Sensor (tipo bobina).

Para realizar la captura del flujo magnético tanto axial como radial se utilizó un sensor experimental confeccionado en laboratorio en una tesina previa con ayuda de una impresora 3D. Dicha sonda consiste en una bobina con un número de espiras de 1000 y una geometría plana lo que facilita su fijación sobre la carcasa de la máquina síncrona. Se considerará tres diferentes posiciones de sensor las cuales se ilustrarán con más a detalle en el siguiente apartado.

A continuación, se muestran las características y el esquema constructivo del sensor utilizado (ver Figura 18):

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

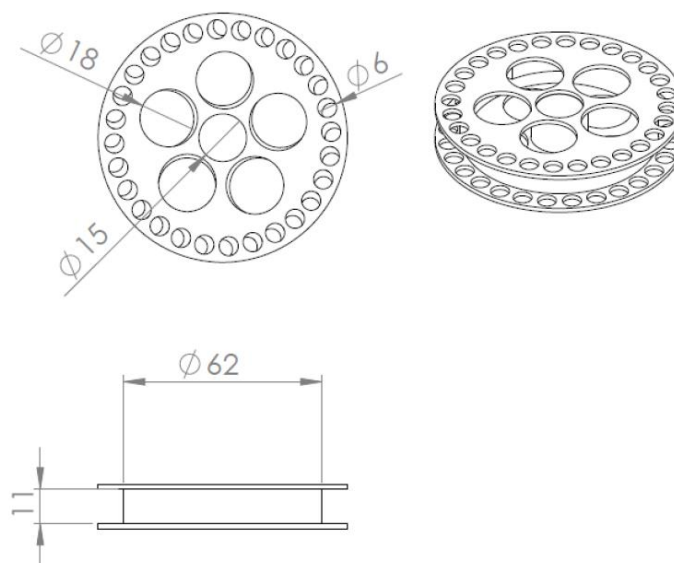


Figura 18. Sensor (bobina) utilizado durante las pruebas en laboratorio. Dimensiones en [mm].

#### 4.1.5 Sistema de adquisición de datos.

El equipo de adquisición de datos consiste en un osciloscopio marca Yokogawa modelo DL850 (ver Figura 19), que se encargará de registrar y capturar la señal captada por el sensor en forma de onda de flujo magnético para su posterior análisis con el software Matlab™.

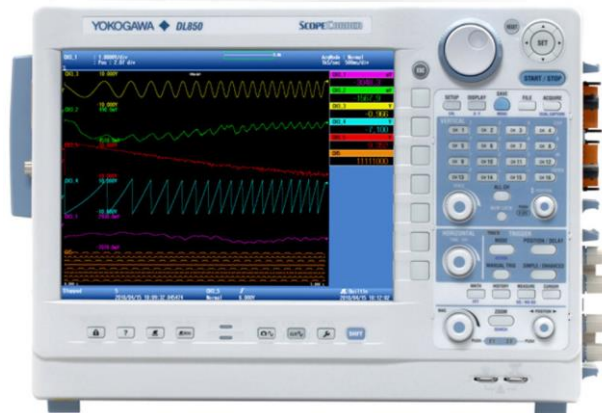


Figura 19. Osciloscopio utilizado durante las pruebas de laboratorio.

Algunas especificaciones técnicas generales del osciloscopio se mencionan a continuación:

- Frecuencia de muestreo máxima: 100MS/s (depende de los módulos de entrada).
- Ancho de banda: 20MHz (depende de los módulos de entrada).
- Número máximo de canales de entrada: 8
- Resolución A/D: 12 o 16 bits (depende de los módulos de entrada).
- Rango de ajuste de tiempo: 100 ns/div to 3 days/div.
- Max. longitud de grabación: 250 Mpts (estándar).
- Almacenamiento: Tarjeta de memoria SD (estándar).
- Interfaz de comunicación:
  - USB 2.0 (estándar)
  - 1000Base-T Ethernet (estándar)
- Dimensiones: 355mm x 259mm x 180mm.
- Peso: Aproximadamente entre 6.5 a 9.0 kg.

#### 4.2 Metodología propuesta.

Los ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Máquinas y Tecnología Eléctrica del Departamento de Ingeniería Eléctrica. Durante la sesión se realizaron ensayos a tres máquinas síncronas que serán nombradas como MS1, MS2 y MS3, cada una ubicada en diferente grupo polimórfico. Las características principales de estas máquinas son; potencia nominal = 5kVA; número de pares de polos = 2; tensión nominal = 400 V; intensidad nominal = 7.5 A y tensión de excitación máxima = 50V@8A.

En cuanto a las condiciones internas, todas las máquinas síncronas son de rotor cilíndrico o liso y otro punto importante, estas máquinas han estado sujetas a pruebas destructivas en el devanado

amortiguador para investigaciones previas. Por lo que hace pensar que encontraremos un cierto nivel de daño o de asimetrías en el devanado amortiguador. Específicamente, las máquinas MS2 y MS3 cuentan con cierto nivel de magnetización remanente lo que provoca que alcancen el modo síncrono sin la necesidad de alimentar el devanado de campo. Debido a este fenómeno, se ha observado un arranque más rápido, es decir, su transitorio fue más corto.

Primero que nada, se procederá a exponer a grandes rasgos la metodología/procedimiento de los ensayos en laboratorio para después explicar a detalle cada paso de éste. Se consideró el montaje del sensor (bobina de 1000 espiras) en tres diferentes posiciones representadas en la Figura 20. En la posición A, el flujo que captura el sensor es principalmente axial. En la posición B, se captura flujo radial, pero también una porción de flujo axial. Por último, en la posición C, se captura principalmente flujo radial. Por tanto, dependiendo de la posición del sensor componentes axiales o radiales se visualizarán mejor en los análisis que se efectúan sobre las señales de fuerza electromotriz (fem) registradas.

Se realizaron dos medidas o pruebas (a las que nombraremos ‘Arranque + Permanente’ y ‘Sólo Permanente’) a cada máquina síncrona y para cada una de las tres posiciones de sensor explicadas anteriormente. La primera medida consistió en arrancar la máquina como motor asíncrono o de inducción mediante el devanado amortiguador integrado. La forma de onda de fem obtenida cuenta con un transitorio debido al arranque de la máquina y otra parte en régimen permanente, una vez que la velocidad de giro del rotor se ha estabilizado (esta velocidad será menor que la velocidad de sincronismo). En régimen permanente y con una velocidad estable se procedió a realizar la segunda medida de onda (sin parar el motor); se energizó el devanado de campo con corriente continua mediante un interruptor trifásico auxiliar permitiendo que el motor gire a la velocidad de sincronismo. Ambas medidas tuvieron un tiempo de adquisición de datos de 100 segundos y fueron registradas con una frecuencia de muestreo de 5 kHz.

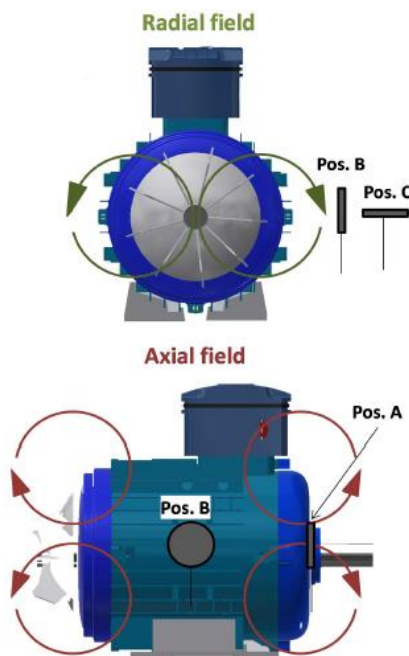


Figura 20. Posiciones de sensor consideradas y naturaleza de flujo capturado para cada posición.

Conviene recalcar que las máquinas síncronas (MS2 y MS3) tuvieron un comportamiento no esperado y diferente al MS1 durante la primera medida (Arranque + Permanente), debido a la magnetización remanente que provocó que se alcanzara el modo síncrono automáticamente, es decir, sin necesidad de energizar el devanado de campo para que el motor llegara a la velocidad síncrona. Aun así, las dos medidas fueron realizadas conforme se estipuló en los párrafos anteriores y como se detalla a continuación.

#### 4.2.1 Metodología en los ensayos.

Se establece la siguiente metodología en los ensayos:

1. Realización de las conexiones eléctricas para el arranque de la máquina síncrona (modo motor).
  - a. Conexión de la manguera al enchufe tetrapolar de salida B del pupitre. Esta salida tiene un valor de tensión de salida de 400V (ver Figura 21, izquierda)
  - b. Conexión del otro extremo de la manguera a las bornas U, V, W de la caja de bornas de la máquina síncrona (ver Figura 21, derecha)
  - c. Realizar la conexión en estrella (Y), puentando entre si las bornas X, Y, Z. Ver también Figura 14.

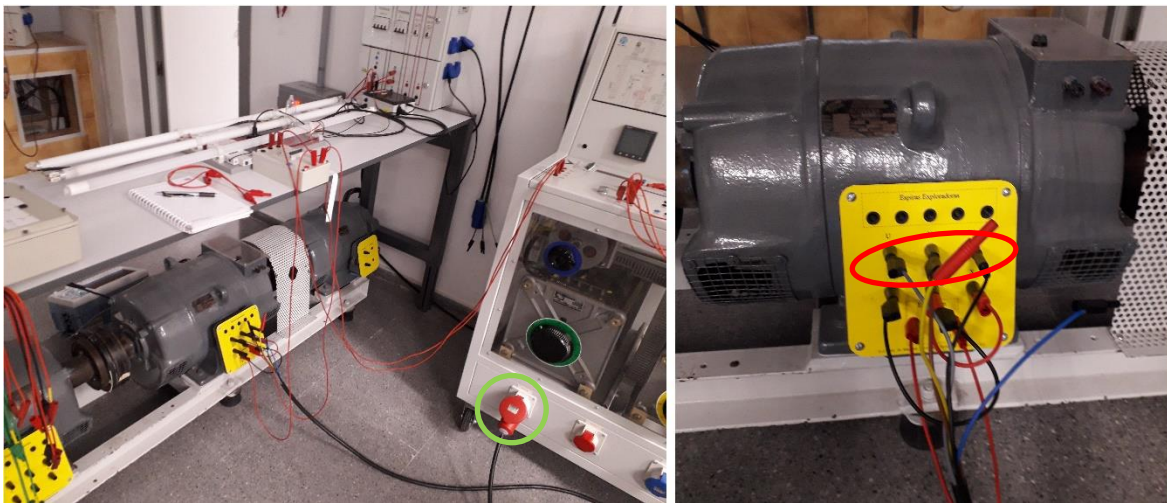


Figura 21. Conexión de manguera al enchufe tetrapolar de salida B (izquierda). Conexión de bornas U, V, W y conexión estrella (Y), puenteo de bornas X, Y, Z entre sí.

2. Realización de la conexión eléctrica para energizar el devanado de campo (ver Figura 22).
  - a. Conectar dos cables de la salida A+ y A- del pupitre (salida duplicada, se tomaron las bornas más cercanas al grupo) a dos de las bornas de entrada del interruptor trifásico auxiliar.
  - b. Conectar cables de dos de las bornas de salida de interruptor con las bornas K y J del devanado de excitación de la máquina.



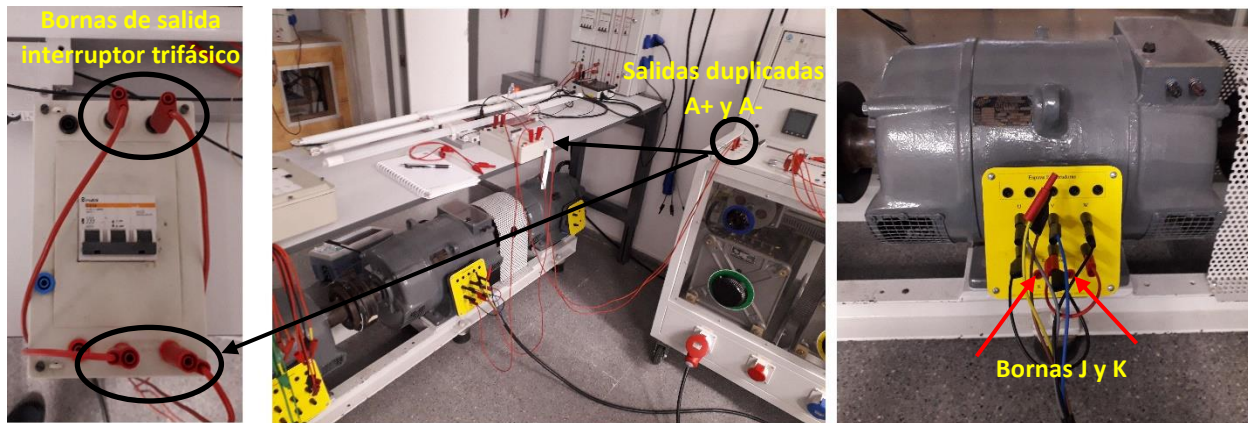


Figura 22. Conexión eléctrica de la salida duplicada (A+ y A-) a las bornas de entrada del interruptor trifásico auxiliar (Centro e izquierda). Localización de bornas K y J en el panel de bornas de la máquina (derecha).

3. Realización de conexiones eléctricas de los aparatos de medida (ver Figura 23):
  - a. Se intercaló el amperímetro de continua (A1) entre las bornas amperimétricas del pupitre (A1, A2) para monitorizar y controlar la corriente de excitación.
  - b. Se realizó el puenteo entre las bornas B1-B2, B3-B4 y B5-B6, para proteger el transformador de intensidad ante algún fallo y evitar su avería.
  - c. Del mismo modo, a las bornas voltimétricas del pupitre (A+ y A-) se conectó el voltímetro de continua (V1) para monitorizar y controlar la tensión de alimentación del devanado de excitación.

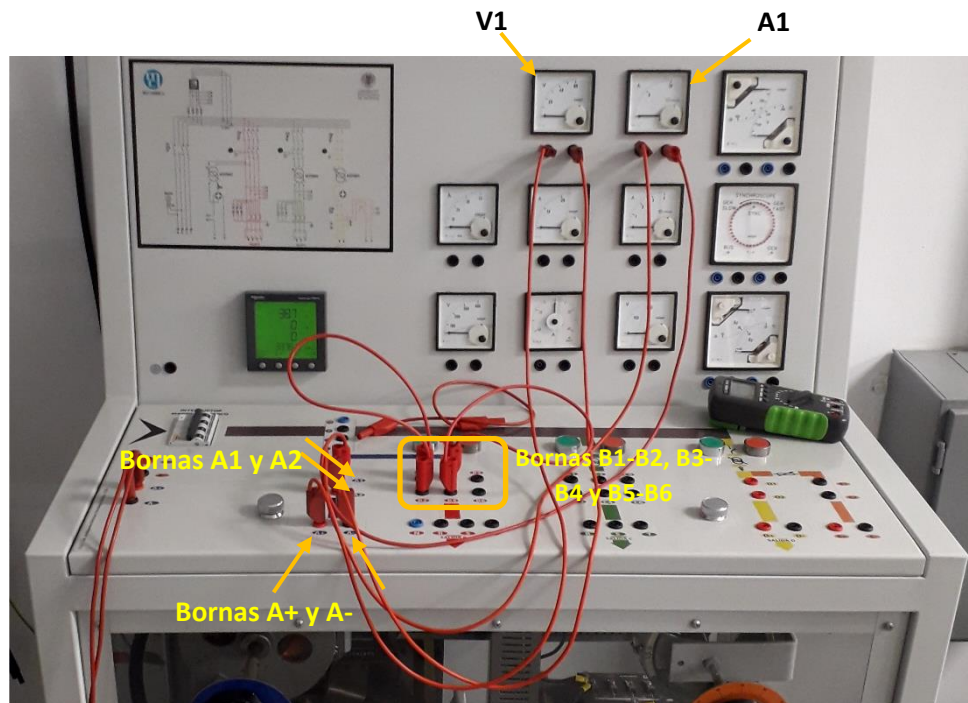


Figura 23. Ubicación de las bornas en el pupitre y aparatos de medida utilizados durante los ensayos.

El esquema completo de conexión de la máquina queda, por tanto, como se indica en la Figura 24.

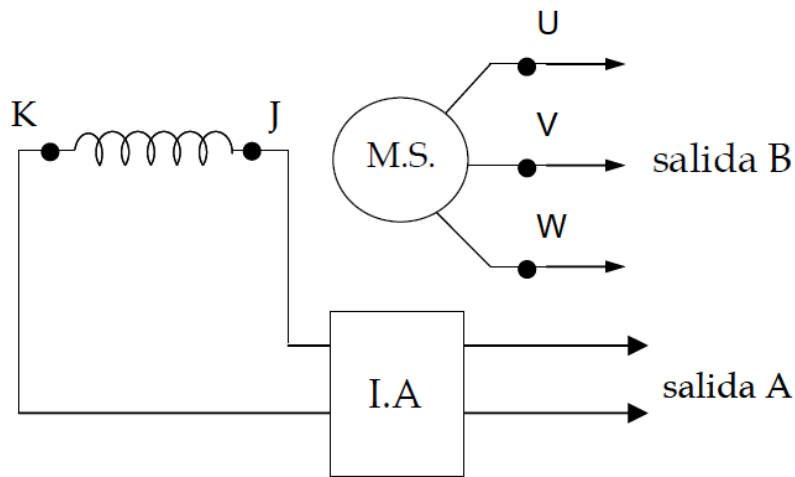


Figura 24. Conexiones para el arranque del motor.

4. Fijación del sensor (bobina) en la posición B sobre la máquina síncrona 1 (MS1) como se muestra en la Figura 25 y conectarlo a uno de los canales de entrada del osciloscopio mediante conexión BNC.



Figura 25. Montaje del sensor en la posición B sobre la carcasa de la máquina síncrona 1 (MS1).

5. Se ajustó la frecuencia de muestreo del osciloscopio a 5kHz y resolución a 100mV/div. Como se observará después, la resolución se reajusta para la posición C.
6. Realización del primer ensayo (Arranque + Permanente) el cual consistió en medir el transitorio de arranque, así como el régimen permanente en modo asíncrono.



- a. Una vez revisadas las conexiones efectuadas, se procede a cerrar el interruptor principal ubicado en una de las esquinas del pupitre.
- b. Se pone en marcha el equipo de medida (osciloscopio) para que comience a registrar e inmediatamente se procede a presionar el pulsador (verde) de puesta en marcha de la salida B. El osciloscopio mide la señal captada durante 100 segundos.
- c. Una vez la máquina está operando en régimen permanente en modo asíncrono, se mide con un tacómetro la velocidad de giro en rpm. De esta manera se obtiene la forma de fem (ver Figura 26) y la velocidad de giro de la máquina en modo asíncrono.

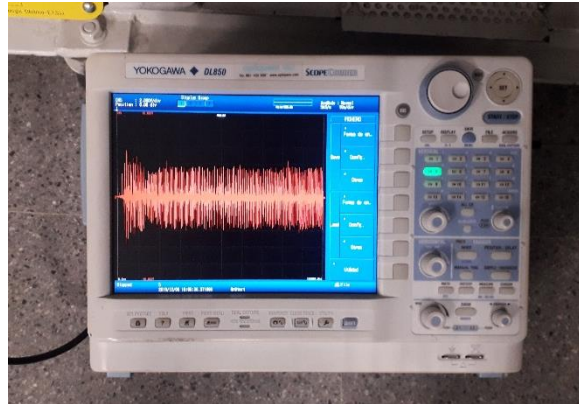


Figura 26. Forma de onda de flujo magnético obtenida durante los ensayos en laboratorio.

- d. Una vez finalizada el tiempo de adquisición de 100s, se guarda la forma de onda de fem y se deja preparado el osciloscopio para la siguiente prueba.
7. Realización del segundo ensayo ('Sólo Permanente'), el cual consistió en medir en régimen permanente con la máquina en modo síncrono (sin haber parado el motor).
    - a. Se fija la tensión excitación al valor nominal (50 V) utilizando el autotransformador 1 (ver Figura 16, autotrafo azul).
    - b. Se pone en marcha el equipo de medida (osciloscopio) para que comience a registrar e inmediatamente se procede a cerrar el interruptor trifásico auxiliar intercalado en el devanado de excitación; de este modo la máquina pasa a operar en modo síncrono. El osciloscopio mide la señal captada durante 100 segundos.
    - c. Se mide con un tacómetro la velocidad de giro en rpm. De igual manera, se obtiene la forma de onda y la velocidad de giro de la máquina en sincronismo.
    - d. Una vez finalizado el tiempo de adquisición de 100s, se guarda la forma de onda y se deja preparado el osciloscopio para la siguiente prueba.
  8. Se realiza la parada de la máquina síncrona 1 presionando el pulsador (rojo) de paro de la salida B.
  9. Se realizó el montaje del sensor (bobina) en las posiciones A y C.

10. Se repiten los ensayos 1 y 2 (pasos 6 y 7) para cada posición de sensor restantes (6 medidas por máquina síncrona)
11. Se desmontan las conexiones eléctricas del grupo polimórfico y se realizan los pasos 1-3 para los siguientes dos grupos polimórficos restantes.
12. Se repite la secuencia de ensayos (18 medidas en total).

#### 4.2.2 Resultados obtenidos.

Los ensayos realizados de acuerdo con la metodología previa dieron lugar a la base de datos con la que se trabajó y cuyos resultados serán mostrados en el siguiente capítulo. Sin embargo, es importante realizar un resumen general de los parámetros ajustados y de los resultados obtenidos:

Modo de operación	Posición sensor	Magnitud Obtenida	Resolución	Resolución eje X	Frecuencia muestreo
Asíncrono y Síncrono	A	Forma de onda de fem	100mV/div	10s/div	5 ks/s
Asíncrono y Síncrono	B	Forma de onda de fem	100mV/div	10s/div	5 ks/s
Asíncrono y Síncrono	C	Forma de onda de fem	500mV/div	10s/div	5 ks/s

Tabla 4. Ajustes en el osciloscopio para los ensayos en laboratorio.

	Posición sensor	%Carga	Tensión de excitación [Vcc]	Corriente de excitación [Icc]	Vel. Giro rotor [rpm] (Modo asíncrono)	Vel. Giro rotor [rpm] (Modo síncrono)
<b>Maquina Síncrona 1 (MS1)</b>	A	Nominal	40	7.5	1412	1500
	B	Nominal	40	7.5	1414	1500
	C	Nominal	40	7.5	1416	1500
<b>Maquina Síncrona 2 (MS2)</b>	A	Nominal	40	7.5	1501	1500
	B	Nominal	40	7.5	1500	1500
	C	Nominal	40	7.5	1500	1500
<b>Maquina Síncrona 3 (MS3)</b>	A	Nominal	40	7.5	1501	1500
	B	Nominal	40	7.5	1500	1500
	C	Nominal	40	7.5	1500	1500

Tabla 5. Ajustes en la carga y velocidades de giro obtenidas para los modos de operación ensayadas.

Según [7], siempre que sea posible, se deberá realizar el diagnóstico con el motor trabajando lo más cerca de su carga nominal. De esta forma, la corriente por el rotor será máxima y con ello el efecto de la avería más apreciable. Por tanto, bajo estas condiciones los resultados serán fiables.

### 4.2.3 Metodología de tratamiento de la base de datos.

El procedimiento seleccionado para el tratamiento de las señales obtenidas con el osciloscopio fue el siguiente:

1. **Obtención de la señal en régimen permanente.** Como se mencionó anteriormente, las medidas realizadas implican un transitorio debido al arranque de la máquina cuando opera en modo asíncrono, mientras que, en modo síncrono, el transitorio se puede dar cuando se realiza el cierre del interruptor trifásico auxiliar para alimentar el devanado de campo. Para discernir los transitorios generados durante las pruebas y el estacionario es necesario “recortar” la onda y así obtener una nueva de forma de onda “recortada” a la cual se podrá aplicar la transformada rápida de Fourier (FFT). Esto se realizó mediante el programa Matlab™.
2. **Aplicación de la Transformada Rápida de Fourier (FFT).** Esta técnica se aplicó mediante el programa Matlab™. Esta herramienta informática permite obtener el contenido en frecuencia de la señal periódica, también llamado espectro. Conceptualmente, el algoritmo consiste en una convolución de la señal captada con sinusoides de frecuencia variable. En su forma compleja vendría dada por:

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

La integral de la anterior expresión no se anulará en aquellas frecuencias en las que la senoide  $e^{-j2\pi ft}$  generada coincida con alguna componente de la señal  $x(t)$ . El valor  $X(f)$  indica pues la contribución relativa en la señal original de dicha componente, caracterizada por su frecuencia  $f$  [13].

3. **Aplicación de la Transformada Corta de Fourier (STFT).** Esta técnica se aplicó mediante el programa Matlab™. A diferencia de Transformada de Fourier donde se asume que la señal es periódica y tiene una duración infinita, por tanto, no evoluciona temporalmente. La Transformada Corta de Fourier consiste en dividir la misma en segmentos y realizar su estudio independientemente mediante la transformada de Fourier. Para efectuar la segmentación, la función objeto de estudio es multiplicada por una función ventana, que adquiere valores distintos de cero sólo por un corto periodo de tiempo. La transformada de Fourier de la señal resultante es obtenida, mientras la ventana es desplazada a lo largo del eje de tiempo, resultando en una representación bidimensional de la misma [13].

$$X_t(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) h(\tau - t) e^{-j\omega\tau} d\tau$$

Se obtiene una distribución en tiempo-frecuencia de la señal, también conocido como espectrograma.

4. **Análisis de los espectros / espectrogramas generados.** Una vez representadas las señales en el dominio en frecuencia y en distribuciones tiempo-frecuencia, el análisis se basará en encontrar y observar la evolución de las componentes tanto en los espectros FFT y espectrogramas STFT de la señal de fem inducida las componentes asociadas a asimetrías rotóricas (mostradas en la Tabla 2) y las interrelaciones entre los tipos de asimetrías. El análisis de los resultados se abordará en el siguiente capítulo.

---

# CAPÍTULO 5

## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se reportará el análisis de los resultados obtenidos. El análisis de flujo de dispersión se realizará en régimen permanente en modos asíncrono y síncrono y el análisis en transitorio en modo asíncrono, bajo las condiciones de carga explicada anteriormente, mostrando los espectros y espectrogramas de las tres distintas posiciones de sensor y relacionándolos con la asimetría. A lo largo de este capítulo se presentan tablas comparativas donde se podrán ver las amplitudes (dB) y el valor medio para cada máquina síncrona y posición de sensor asociándolos con las asimetrías rotóricas. De igual manera se presentan los espectrogramas donde se observará la evolución de las componentes asociadas a asimetrías rotóricas.

Como se ha mencionado, este trabajo considera la opción de llevar a la máquina al régimen permanente y hacerla operar en modo asíncrono durante un breve intervalo, con el fin de analizar las ventajas que el análisis de flujo de dispersión en dicho régimen puede suponer.

Por otro lado, mencionar que los resultados obtenidos (espectrogramas STFT) de las máquinas síncronas 2 y 3 en régimen transitorio fueron muy similares, por lo que la discusión del análisis se realiza para la máquina síncrona 2, presentada en el apartado 5.3.3.

## 5.1 Análisis de resultados de la máquina síncrona 1 (MS1).

### 5.1.1 Análisis régimen permanente (modo asíncrono). Máquina síncrona 1 (MS1).

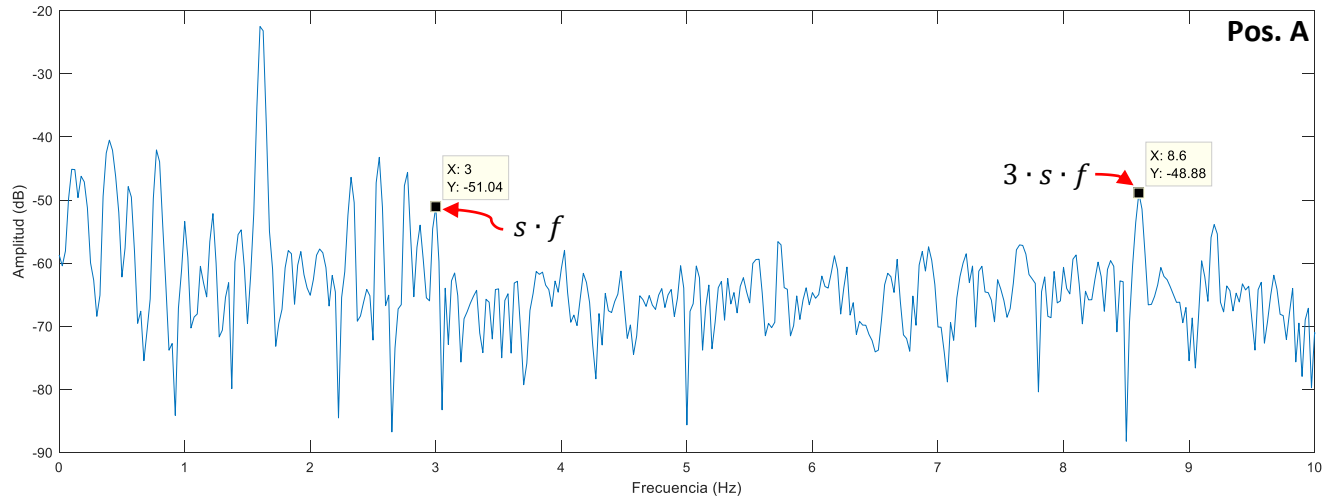


Figura 27. Análisis FFT posición sensor A: componentes  $sf$ ,  $3sf$  (modo asíncrono).

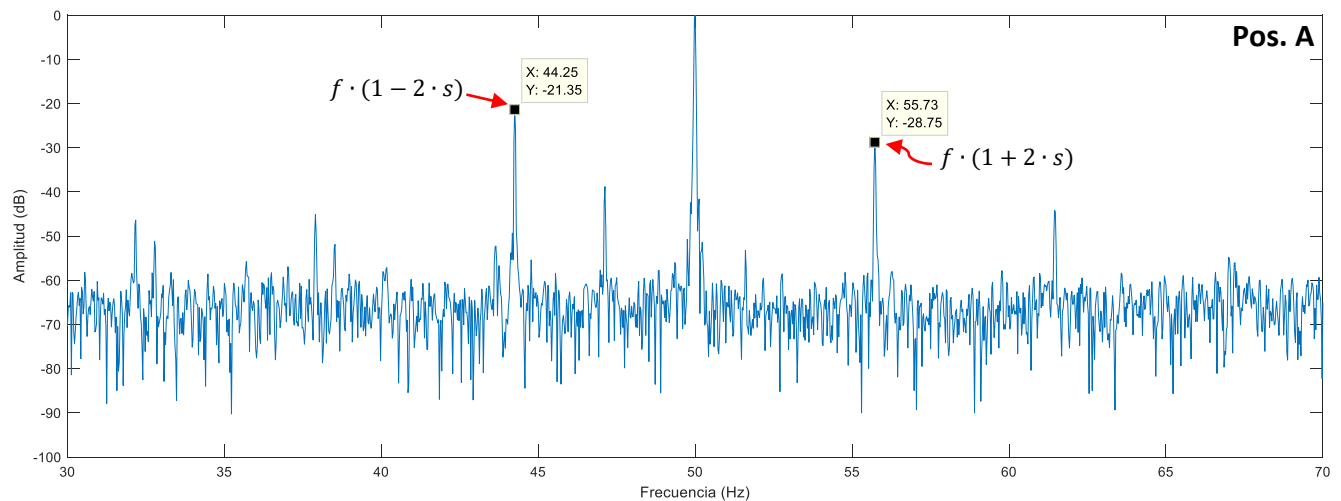


Figura 28. Análisis FFT posición sensor A: armónicos laterales (modo asíncrono).

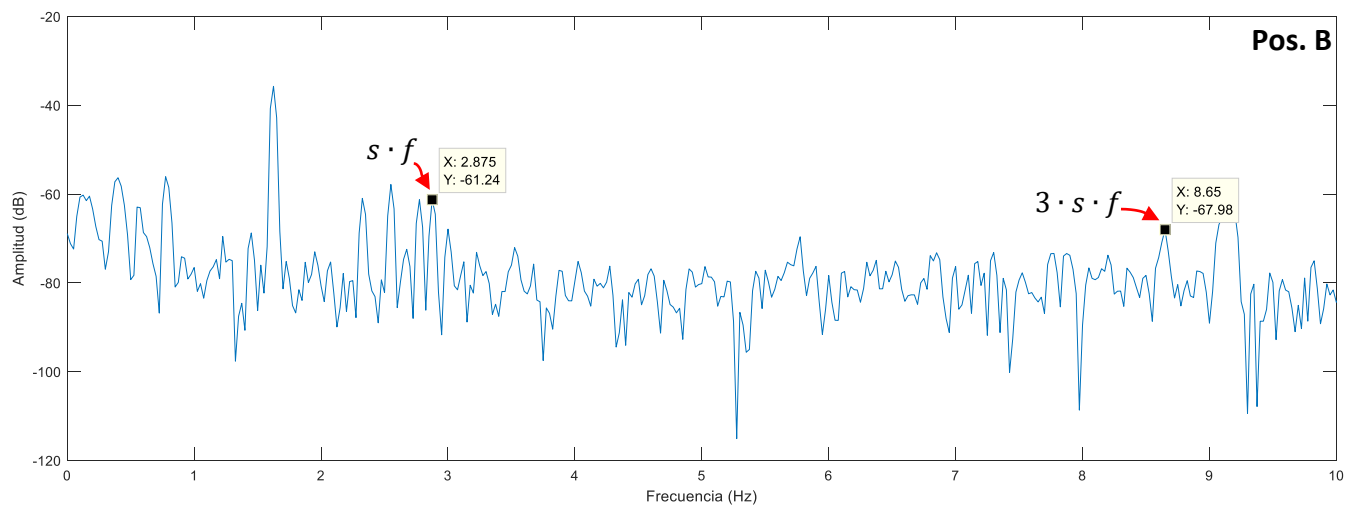


Figura 29. Análisis FFT posición sensor B: componentes  $sf$ ,  $3sf$  (modo asíncrono).

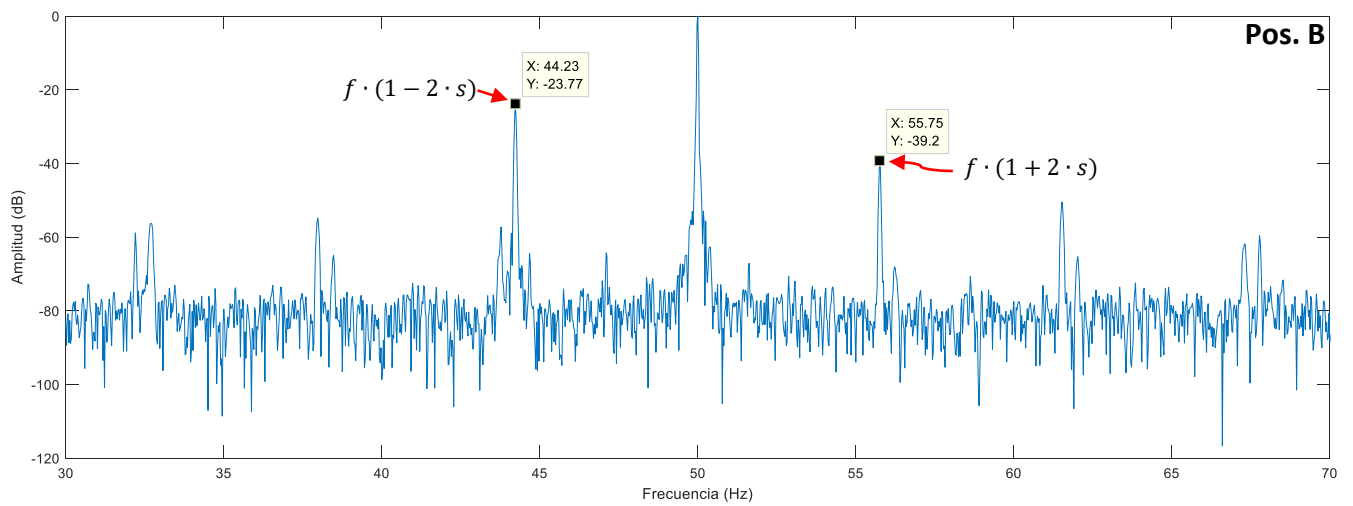


Figura 30. Análisis FFT posición sensor B: armónicos laterales (modo asíncrono).

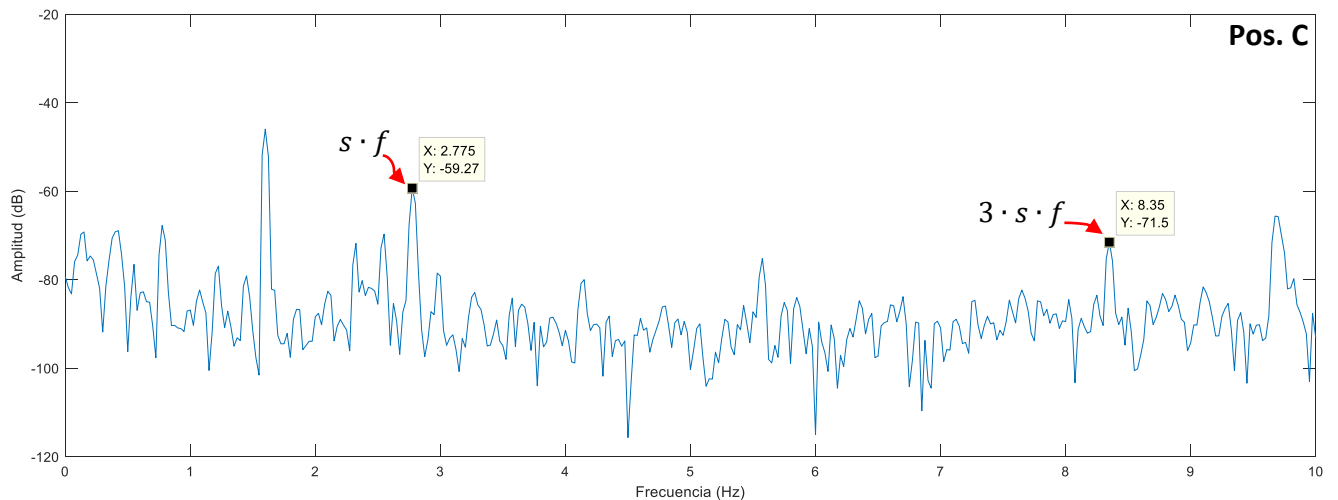


Figura 31. Análisis FFT posición sensor C: componentes  $sf$ ,  $3sf$  (modo asíncrono).

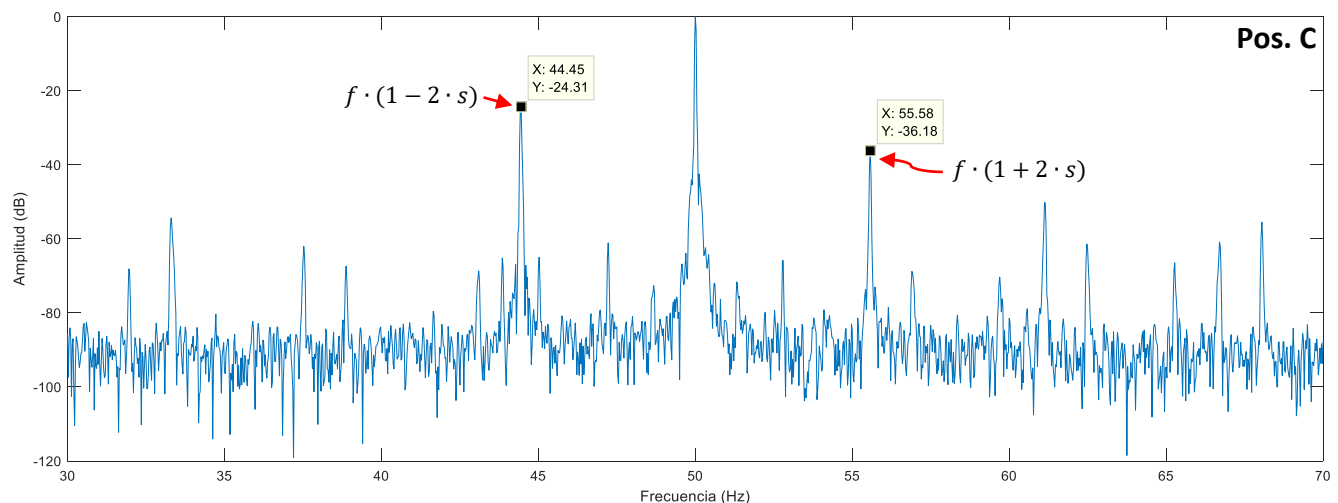


Figura 32. Análisis FFT posición sensor C: armónicos laterales (modo asíncrono).

Las Figura 27- Figura 32 muestran los espectros FFT obtenidos durante los ensayos en régimen permanente durante la operación en modo asíncrono (antes de la alimentación del devanado de campo). Se observa que los armónicos laterales  $f \cdot (1 \pm 2 \cdot s)$ , los cuales tienen una naturaleza radial, se visualizan para todas las posiciones del sensor. Las mayores amplitudes de estos armónicos se encuentran en la posición A, aunque no existe mucha diferencia con respecto a las posiciones B y C.

Con respecto a las componentes  $s \cdot f$  y  $3 \cdot s \cdot f$ , como se había mencionado en el capítulo 3, son igualmente sensibles a daños en el rotor (barras rotas) y tienen una naturaleza axial. Como se esperaba, estas componentes son más visibles en las posiciones de sensor que capturan flujo axial, es decir, en las posiciones A y B. De hecho, en la posición A, en la cual se captura principalmente flujo axial, podemos observar las mayores amplitudes. Por el contrario, en la posición C se observan las menores al capturar flujo predominantemente radial. Esto es un indicativo importante si se tuviese que elegir una determinada posición de sensor para realizar la captura de la fem.



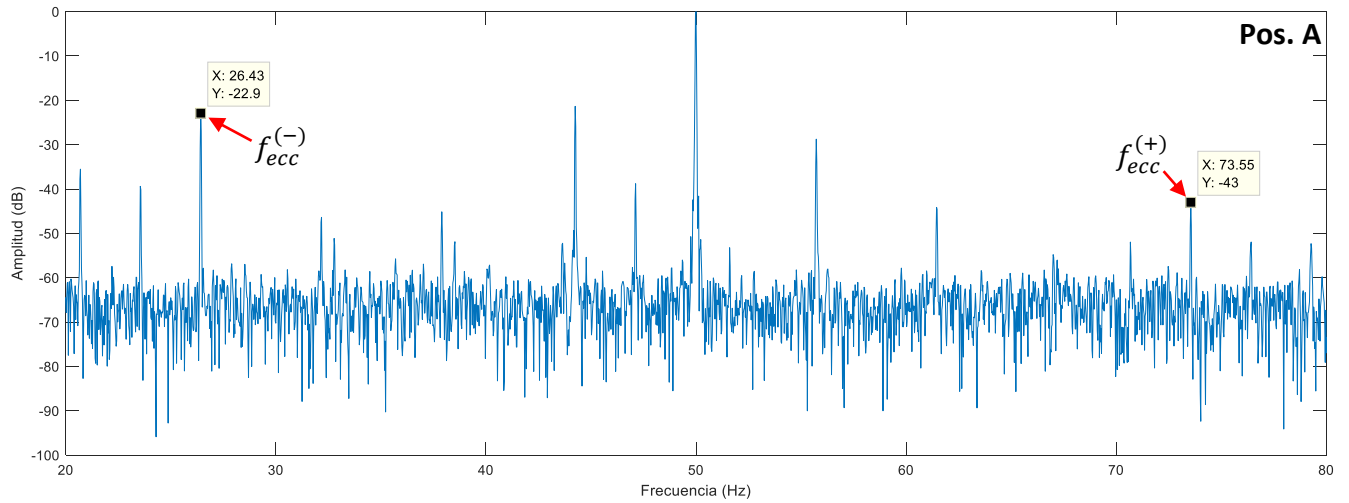


Figura 33. Análisis FFT posición sensor A: componentes por excentricidades (modo asíncrono).

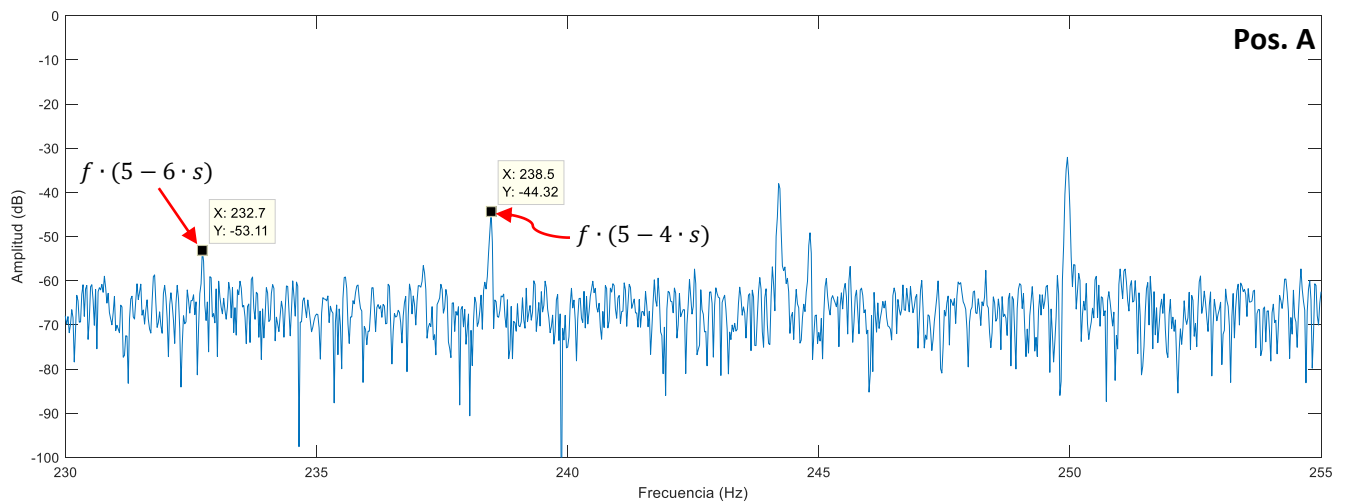


Figura 34. Análisis FFT posición sensor A: componentes cercanos al 5to armónico (modo asíncrono).

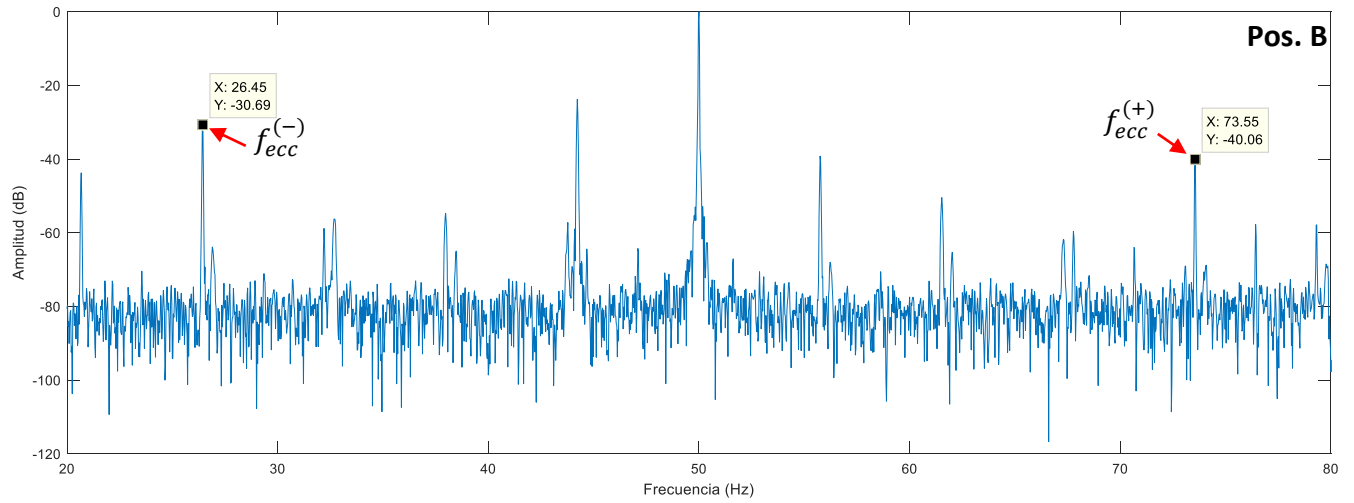


Figura 35. Análisis FFT posición sensor B: componentes por excentricidades (modo asíncrono).

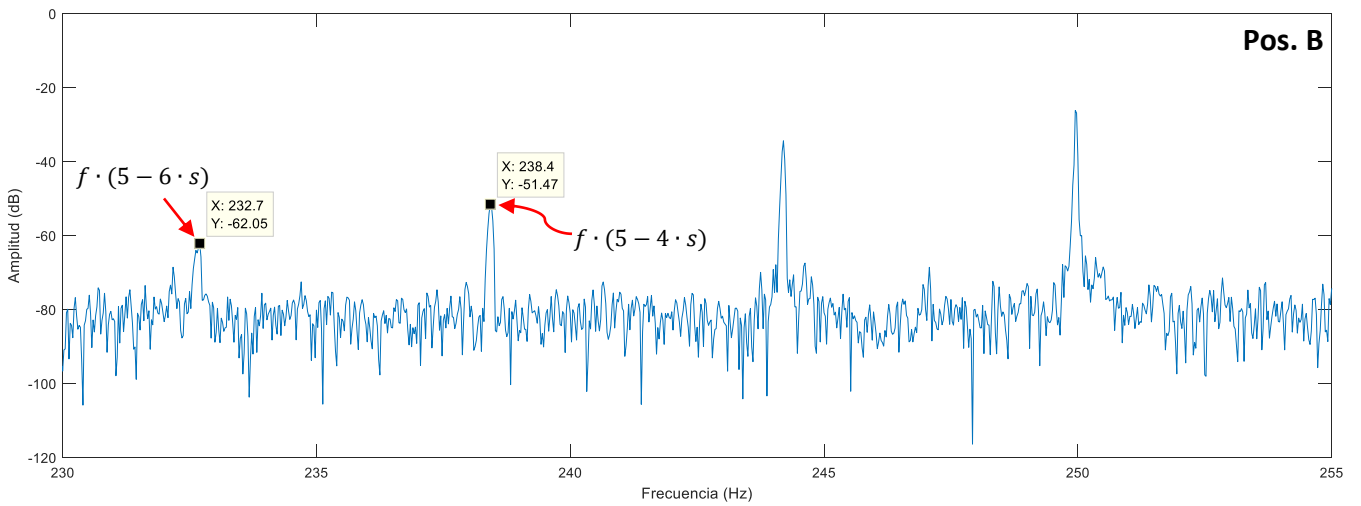


Figura 36. Análisis FFT posición sensor B: componentes cercanos al 5to armónico (modo asíncrono).

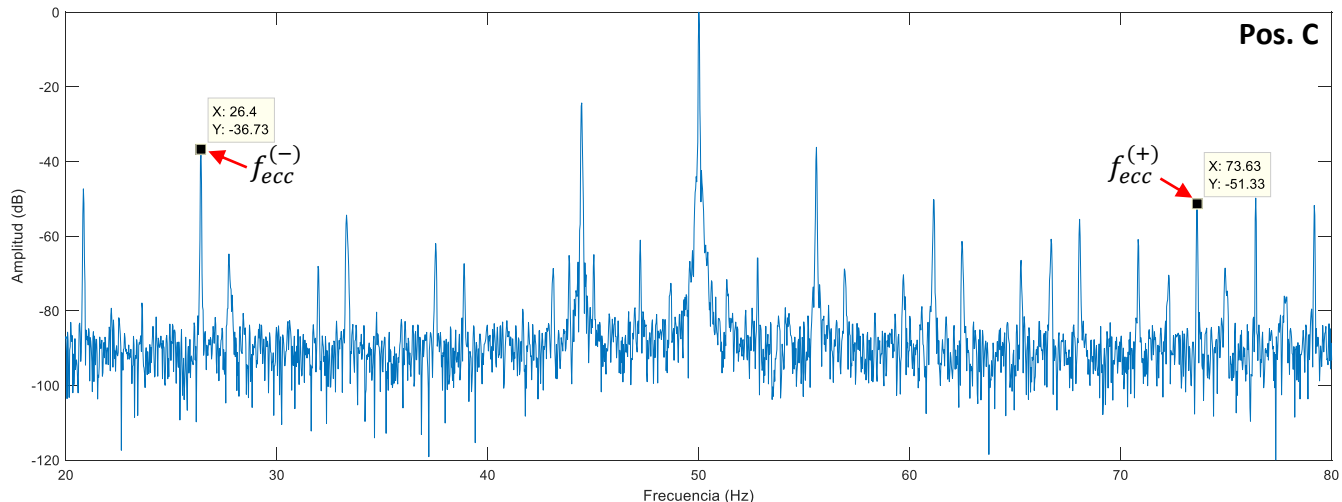


Figura 37. Análisis FFT posición sensor C: componentes por excentricidades (modo asíncrono).

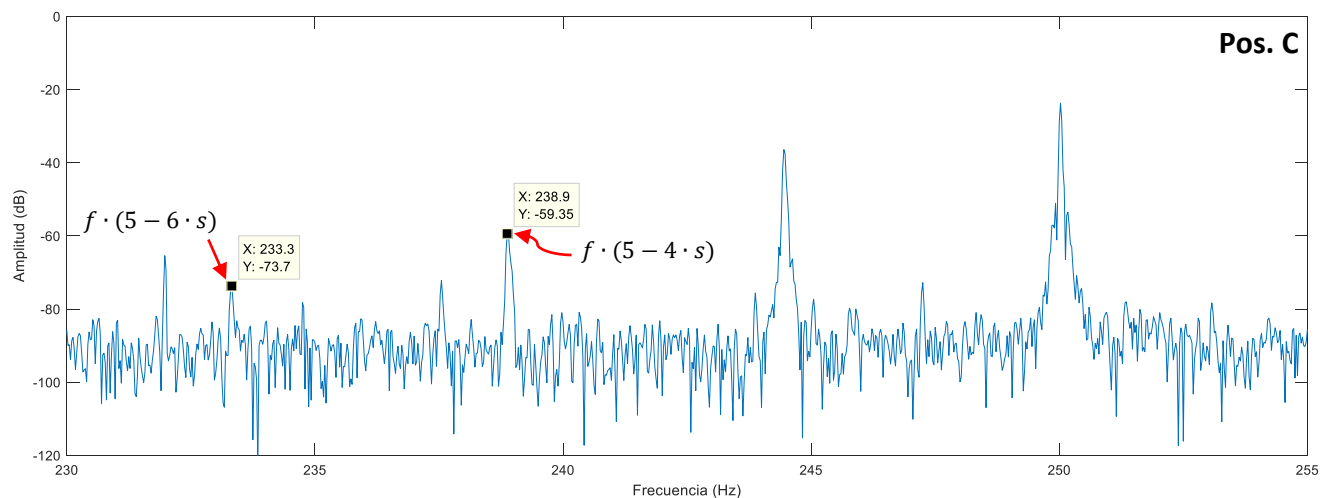


Figura 38. Análisis FFT posición sensor C: componentes cercanos al 5to armónico (modo asíncrono).

Las Figura 33 - Figura 38 muestran el mismo análisis en régimen permanente en modo asíncrono enfocado a los componentes de excentricidad/desalineación y a las componentes de fallo cercanas al 5to armónico. Se observa que el componente  $f_{ecc}^{(-)}$  tiene una mejor visibilidad en la posición A, en la cual la amplitud es la mayor, mientras que en la posición C se encuentra la amplitud más pequeña. En lo que respecta a  $f_{ecc}^{(+)}$ , en la posición B es en donde se observa la mayor amplitud, aunque no existe mucha diferencia con respecto a la pos. A. Por su parte, la de menor amplitud se encuentra en la pos. C.

Como habíamos mencionado, las amplitudes de los armónicos de fallo de alta frecuencia dependen de los factores de devanado. Para este caso, los armónicos de 5to orden  $f(5 - 6s)$  y  $f(5 - 4s)$  son identificables dentro del espectro FFT, lo cual brinda información adicional y hace pensar que esta máquina tiene un cierto nivel de asimetría. Esto, a su vez, tiene coherencia con lo mencionado en el capítulo 4, a saber, que las máquinas ensayadas estuvieron sujetas a pruebas destructivas en el devanado

amortiguador para investigaciones previas. Conviene destacar que sus amplitudes tuvieron el mismo valor para todas las posiciones de sensor. A modo de resumen, en la Tabla 6 se muestran las amplitudes en [dB] de todas las componentes de análisis en régimen permanente:

	<b>Máquina Síncrona 1 (MS1)</b>							
<b>Posición del sensor</b>	$s \cdot f$	$3 \cdot s \cdot f$	$f(1 - 2s)$	$f(1 + 2s)$	$f_{ecc}^{(-)}$	$f_{ecc}^{(+)}$	$f(5 - 6s)$	$f(5 - 4s)$
A (axial)	51.04	48.88	21.35	28.75	22.9	43	232.7	238.5
B (axial y radial)	61.24	67.98	23.77	39.2	30.69	40.06	232.7	238.4
C (radial)	59.27	71.5	24.31	36.18	36.73	51.33	233.3	238.9
<b>Valor medio</b>	<b>57.18</b>	<b>62.79</b>	<b>23.14</b>	<b>34.71</b>	<b>30.11</b>	<b>44.80</b>	<b>232.90</b>	<b>238.60</b>

Tabla 6. Amplitudes en [dB] de las componentes de análisis en régimen permanente.

### 5.1.2 Análisis régimen permanente (modo síncrono). Máquina Síncrona 1 (MS1).

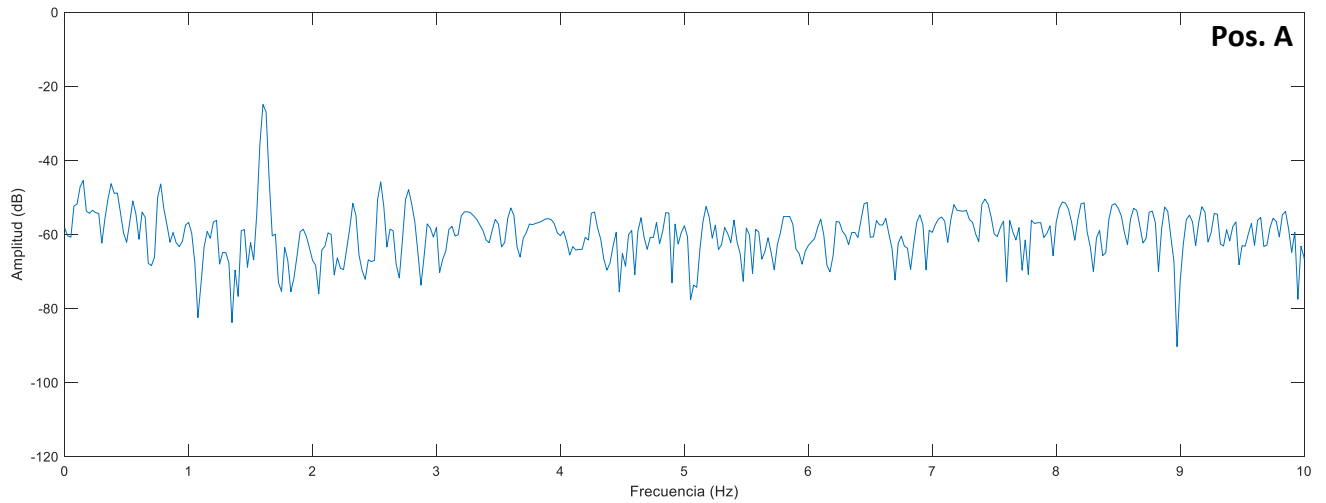


Figura 39. Análisis FFT posición sensor A: componentes  $sf$ ,  $3sf$  (modo síncrono).

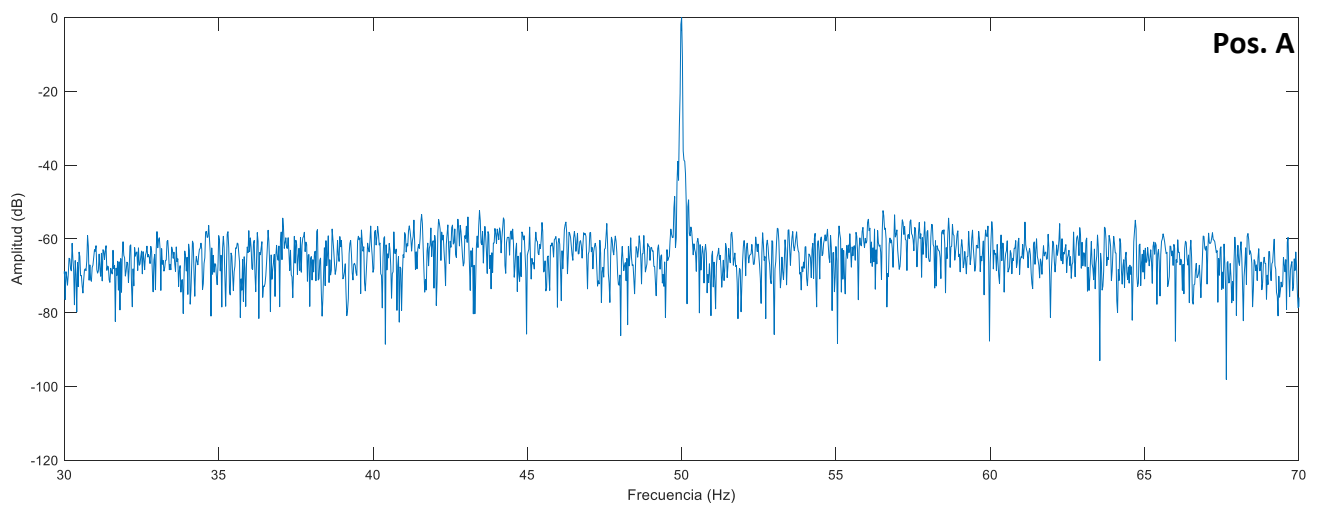


Figura 40. Análisis FFT posición sensor A: armónicos laterales (modo síncrono).

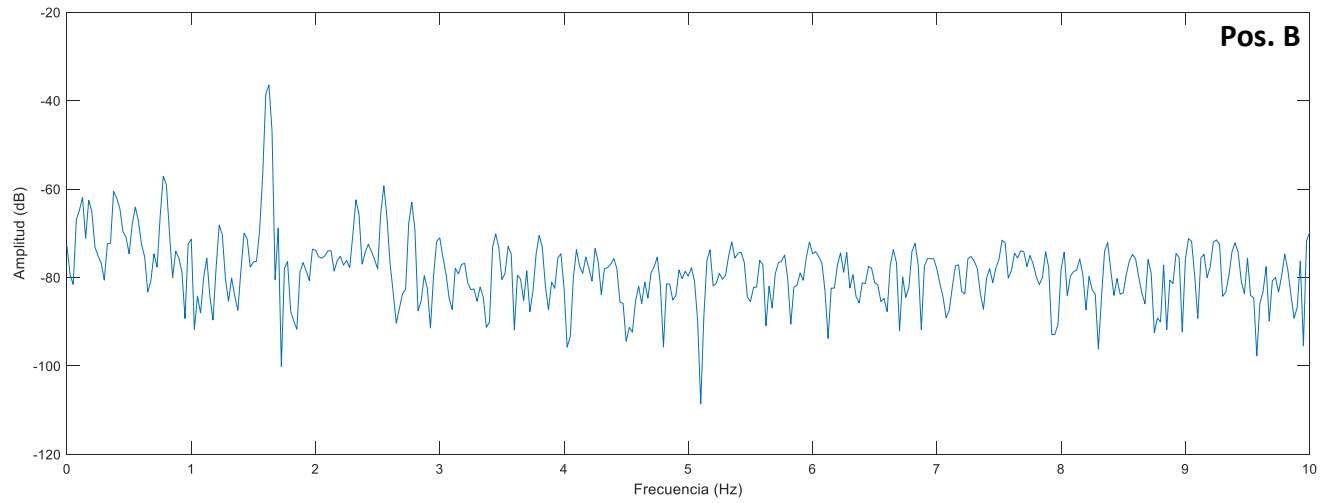


Figura 41. Análisis FFT posición sensor B: componentes  $sf$ ,  $3sf$  (modo síncrono).

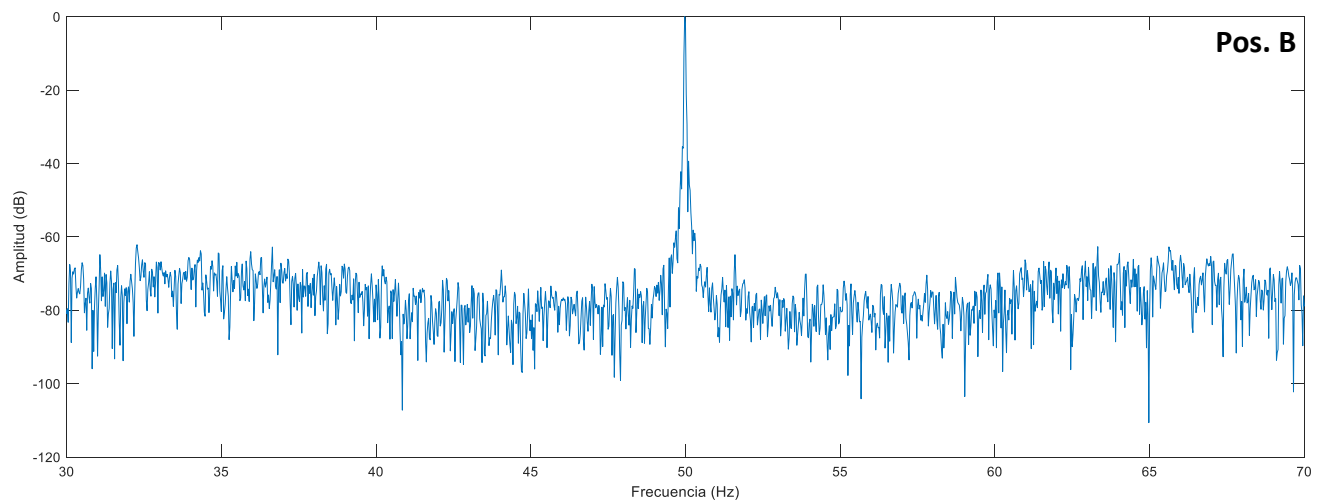


Figura 42. Análisis FFT posición sensor B: armónicos laterales (modo síncrono).

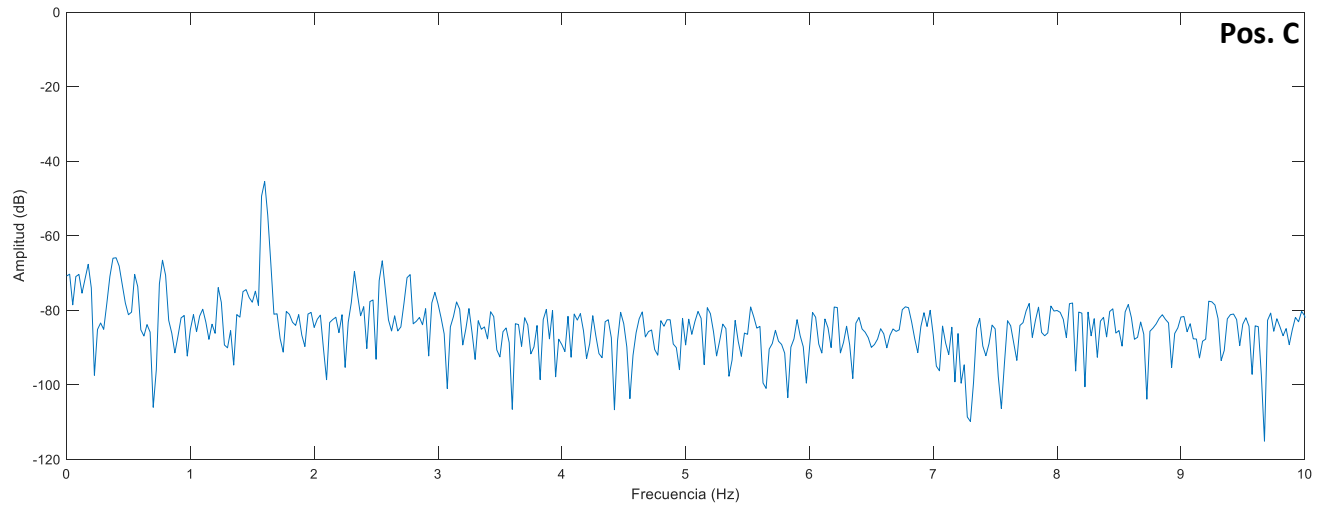


Figura 43. Análisis FFT posición sensor C: componentes  $sf$ ,  $3sf$  (modo síncrono).

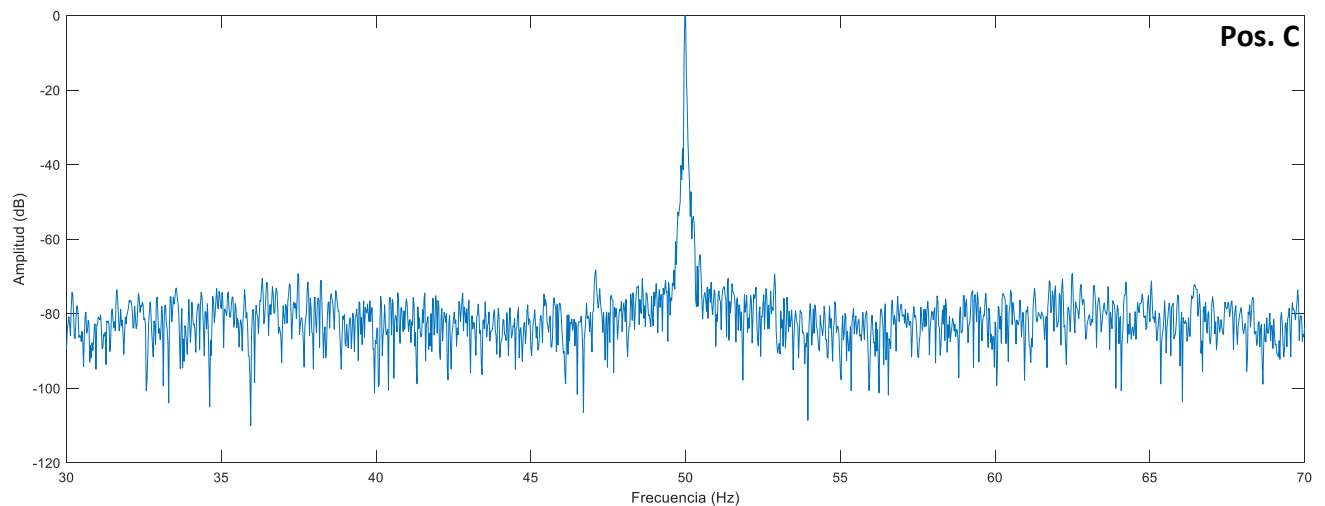


Figura 44. Análisis FFT posición sensor C: armónicos laterales (modo síncrono).

Las Figura 39 - Figura 44 muestran los espectros FFT obtenidos correspondientes a los ensayos en régimen permanente durante la operación en modo síncrono. Se observa que, bajo esta condición de operación, las componentes axiales y radiales  $s \cdot f$ ,  $3 \cdot s \cdot f$  y  $f \cdot (1 \pm 2 \cdot s)$  no están presentes en el espectro de flujo FFT debido a que cuando la máquina gira a velocidad de sincronismo no se inducen intensidades en el devanado amortiguador. Por lo tanto, asimetrías relacionadas con las roturas de barras solamente se podrán visualizar durante el instante en que la máquina opera en modo asíncrono en régimen permanente.

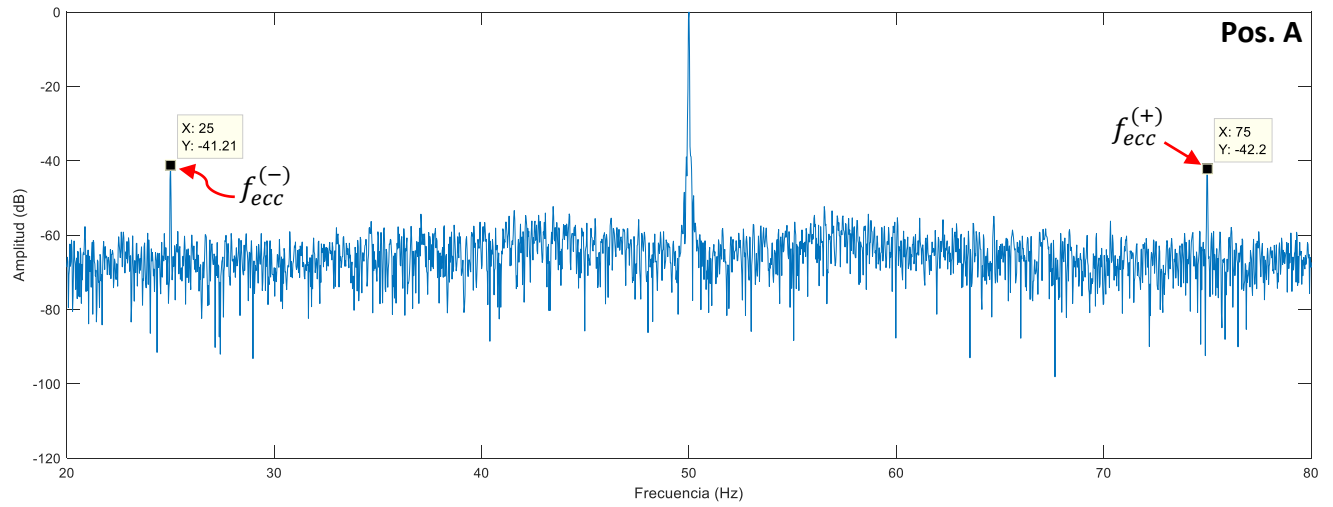


Figura 45. Análisis FFT posición sensor A: componentes por excentricidades (modo síncrono).

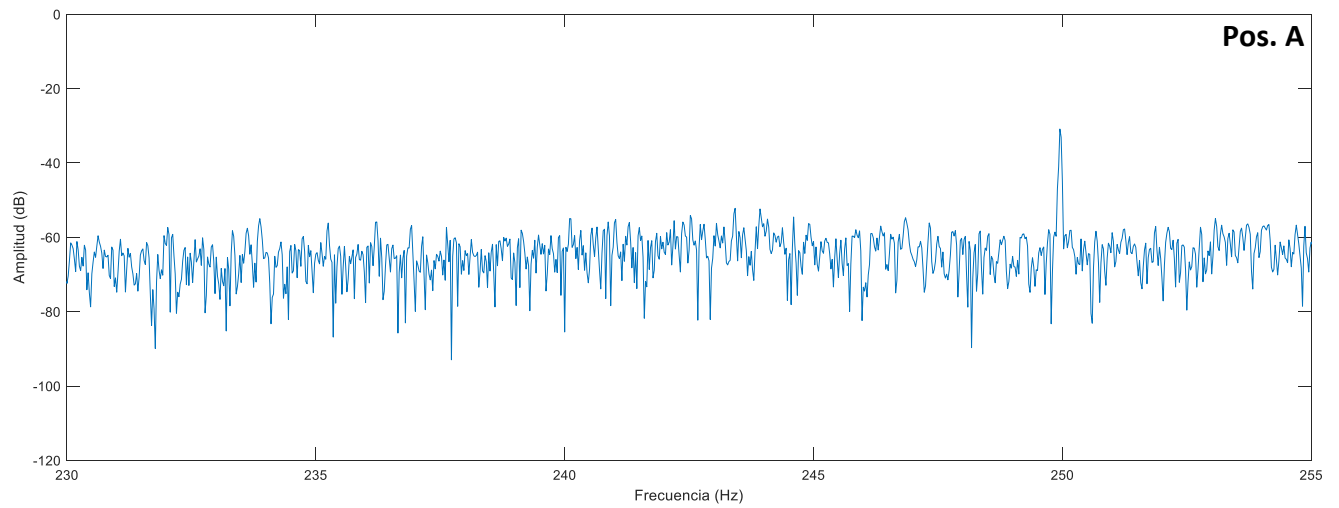


Figura 46. Análisis FFT posición sensor A: componentes cercanos al 5to armónico (modo síncrono).



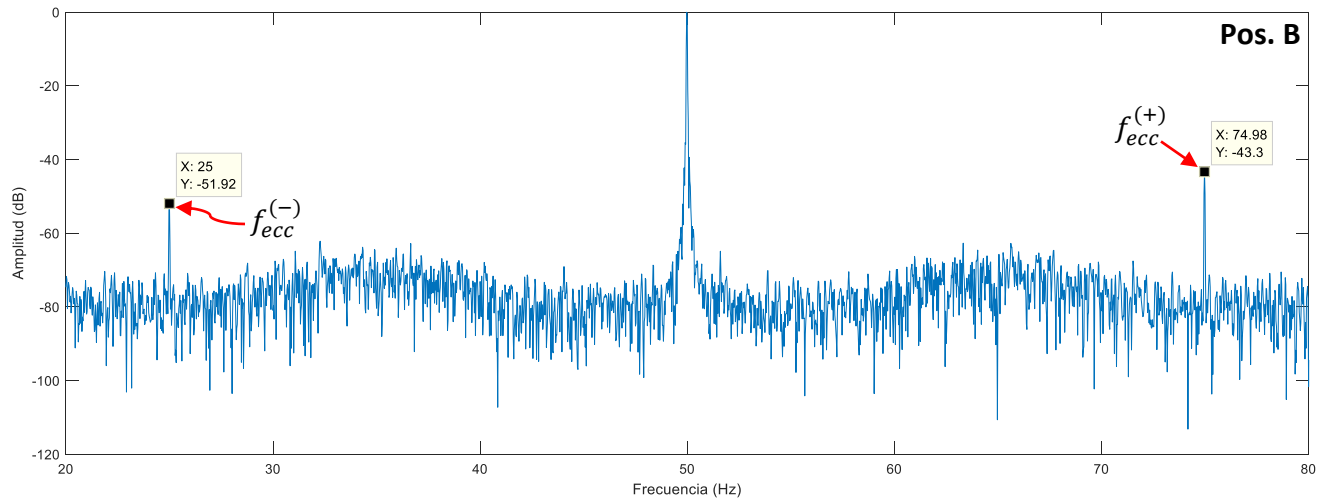


Figura 47. Análisis FFT posición sensor B: componentes por excentricidades (modo síncrono).

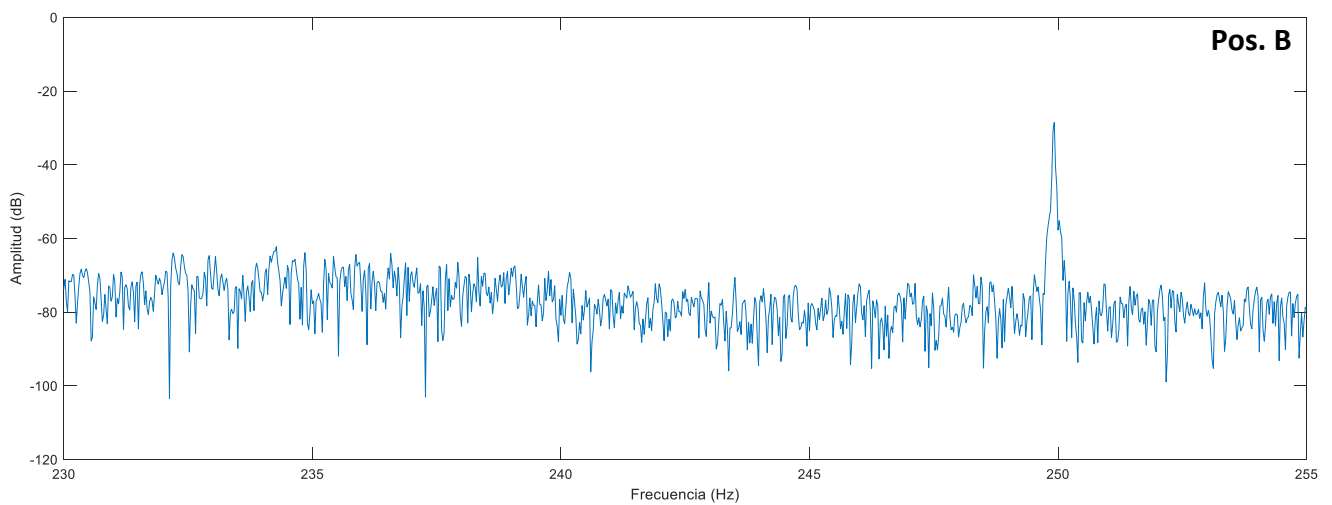


Figura 48. Análisis FFT posición sensor B: componentes cercanos al 5to armónico (modo síncrono).

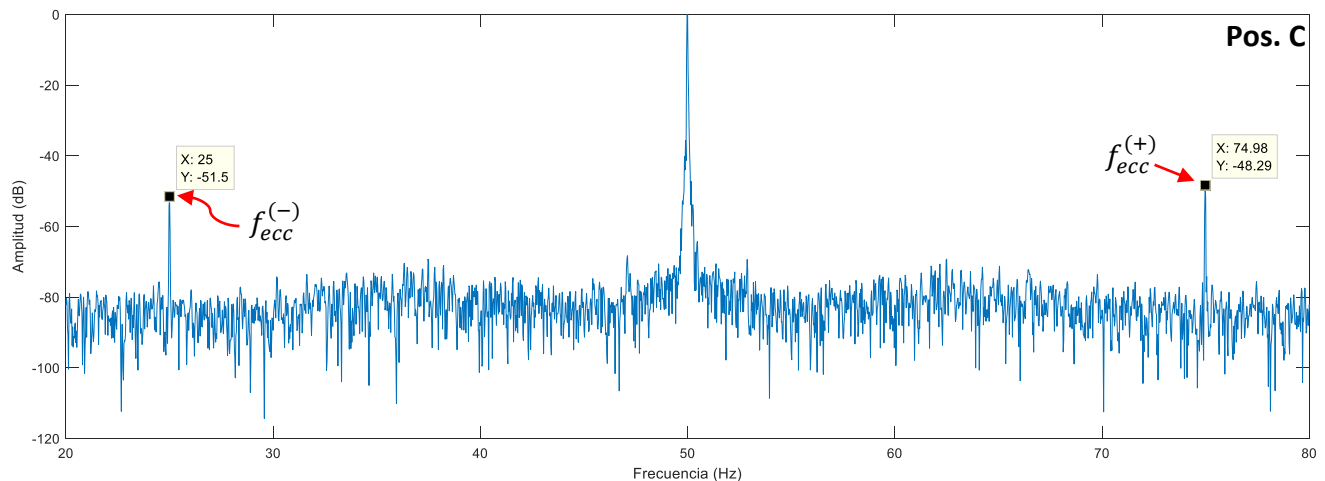


Figura 49. Análisis FFT posición sensor C: componentes por excentricidades (modo síncrono).

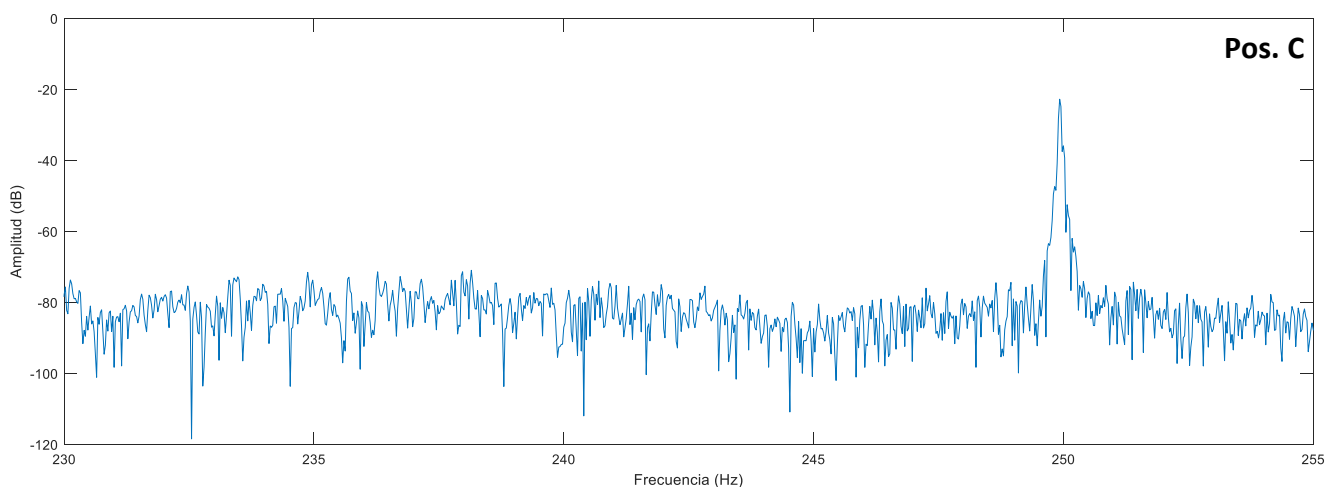


Figura 50. Análisis FFT posición sensor C: componentes cercanos al 5to armónico (modo síncrono).

Las Figura 45 - Figura 50 muestran el mismo análisis en régimen permanente en modo síncrono enfocado a los componentes de excentricidad/desalineación y a los armónicos de fallo cercanos al 5to armónico. Se puede observar que estos últimos armónicos no aparecen dentro del espectro FFT (no se observa armónico alguno cerca del quinto armónico). Esto es debido, una vez más, a que no se inducen corrientes en el devanado amortiguador y, por tanto, las componentes de fallo en el rotor no están presentes. Sin embargo, las componentes por excentricidad todavía son visibles en las tres posiciones del sensor y están localizadas exactamente a 25Hz ( $f_{ecc}^{(-)}$ ) y 75Hz ( $f_{ecc}^{(+)}$ ). Se observa que la posición A tiene la mayor sensibilidad y visibilidad, ya que las amplitudes en esta posición son las mayores. Por el contrario, la posición C muestra las menores amplitudes. Cabe destacar que existe una diferencia significativa entre los valores de amplitudes entre la pos. A y C. Lo anterior, es otro indicativo importante si se tuviese que elegir una determinada posición de sensor para realizar la captura de la fem.

En el apartado 3.1.2 se mencionó que las amplitudes de los componentes a la frecuencia rotacional  $f \cdot [1 \pm (1 - s)/p]$  son incrementadas en presencia de daños en barras. Por lo que la monitorización de esta interrelación puede proporcionar información de gran interés para la detección de daños en el rotor. En la Tabla 7 se muestran los valores de las amplitudes [dB] de los componentes por excentricidad en los modos síncrono y asíncrono. Se observa que el valor medio de amplitudes del armónico  $f_{ecc}^{(-)}$  en modo asíncrono es significativamente mayor que el valor medio en sincronismo. Las amplitudes por excentricidad decrecen en el instante de pasar a modo síncrono. Conviene destacar que para la posición A este decremento es de 55%. Por su parte, los valores medio de amplitudes de  $f_{ecc}^{(+)}$  se mantienen sin variación. Esto hace pensar que esta máquina tiene un cierto nivel de asimetría. Como sabemos, durante sincronismo no se inducen corrientes en el devanado amortiguador, por tanto, en esta condición el efecto por fallo de barras rotas no tiene influencia en los componentes por excentricidades. Por lo que la monitorización y análisis de estos dos modos de operación y sus interrelaciones podría brindar información valiosa para el diagnóstico.

	MODO SÍNCRONO		MODO ASÍNCRONO	
	MS1		MS1	
Posición del sensor	$f_{ecc}^{(-)}$	$f_{ecc}^{(+)}$	$f_{ecc}^{(-)}$	$f_{ecc}^{(+)}$
A (axial)	41.21	42.2	22.9	43
B (axial y radial)	51.92	43.3	30.69	40.06
C (radial)	51.5	48.29	36.73	51.33
<b>Valor medio</b>	<b>48.21</b>	<b>44.60</b>	<b>30.11</b>	<b>44.80</b>

Tabla 7. Tabla comparativa de amplitudes [dB] de excentricidad (modo síncrono vs modo asíncrono).

### 5.1.3 Análisis régimen transitorio (durante el arranque). Máquina Síncrona 1 (MS1).

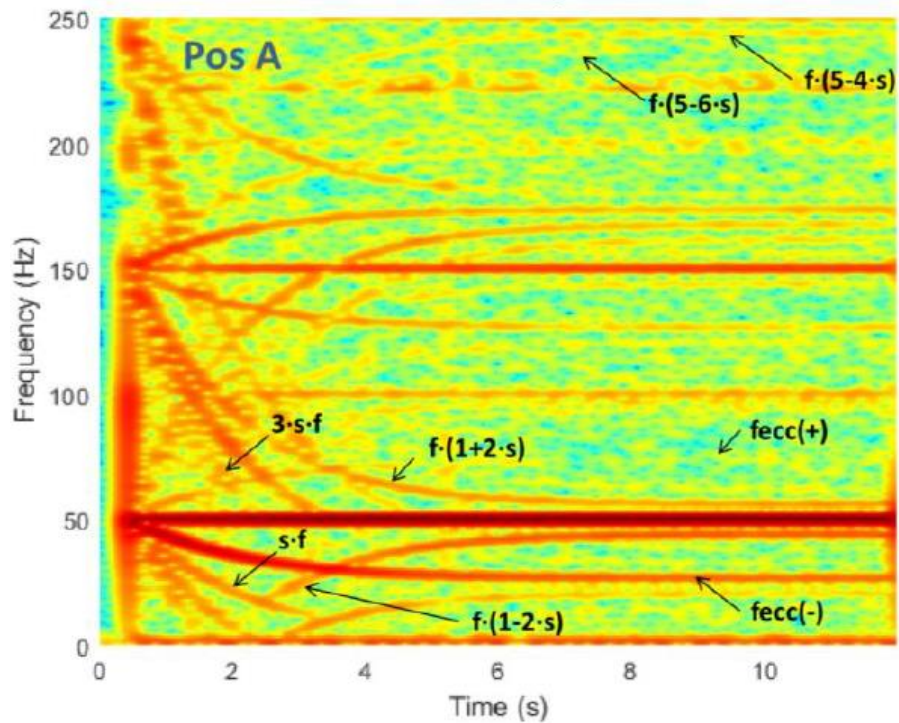


Figura 51. Análisis STFT de la señal fem durante el arranque para el sensor localizado en la posición A.

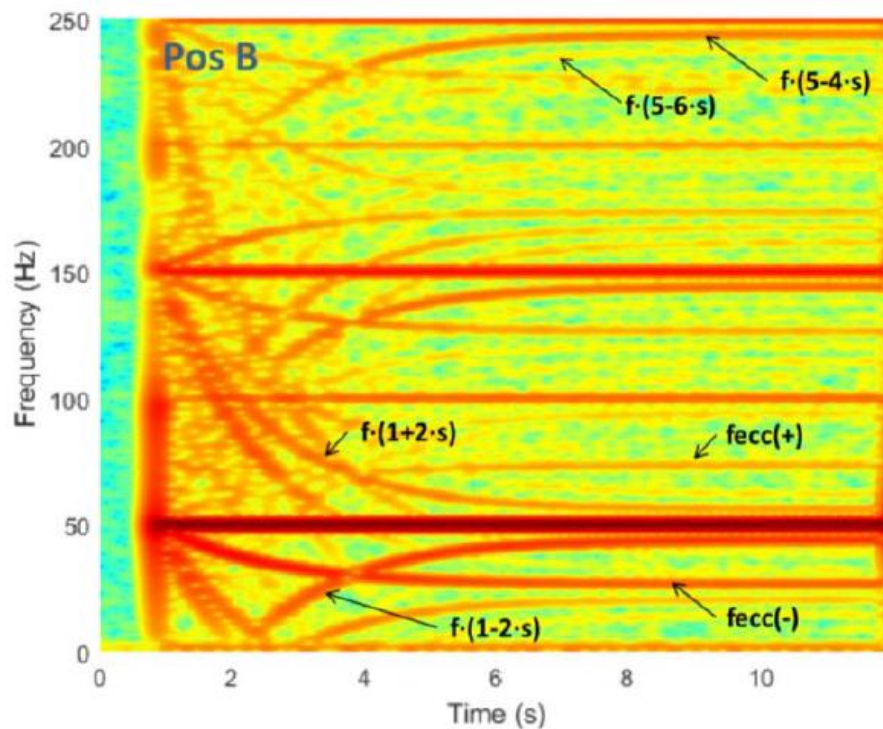


Figura 52. Análisis STFT de la señal fem durante el arranque para el sensor localizado en la posición B.

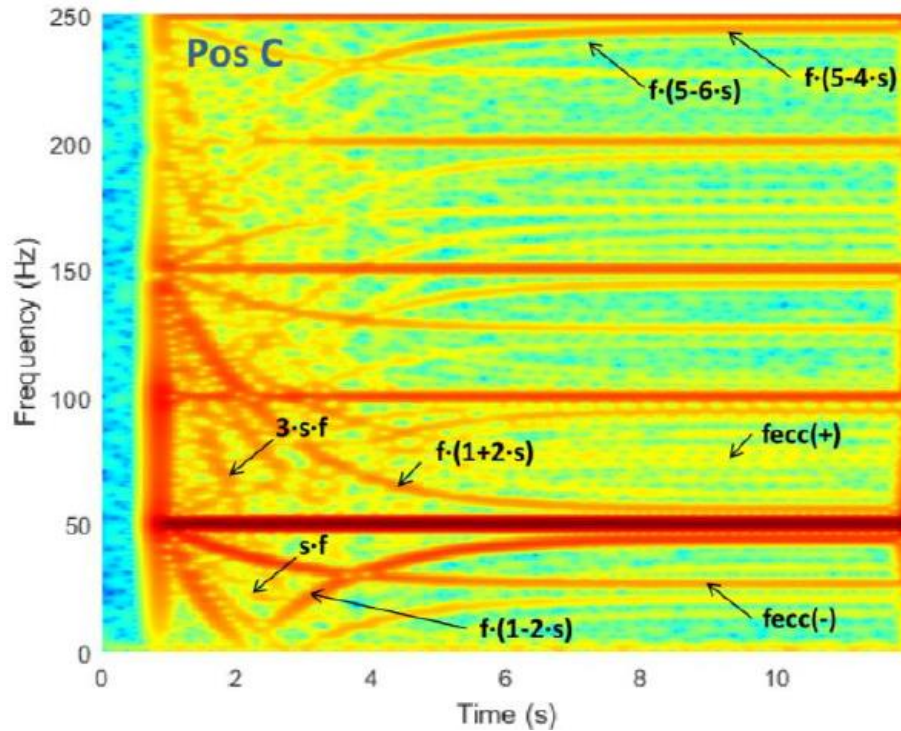


Figura 53. Análisis STFT de la señal fem durante el arranque para el sensor localizado en la posición C.

Las Figura 51 - Figura 53 muestran los espectrogramas STFT de la señal fem inducida al sensor (tipo bobina) obtenida durante el arranque del motor síncrono 1. En líneas generales los espectrogramas muestran un mayor contenido armónico lo que proporciona información adicional para el diagnóstico de los componentes de fallos.

Precisando en lo anterior, en el espectrograma posición de sensor A (Figura 51) se puede identificar las evoluciones características de las componentes mostradas teóricamente en la Figura 11. Cabe destacar que las componentes axiales son claramente identificadas durante el arranque; sin embargo, es la componente  $s \cdot f$  que destaca por su mayor visibilidad en comparación con las posiciones B y C. Como se ha venido mencionando, esto es debido a que la posición A captura principalmente flujo axial. Con referencia a las componentes radiales  $f \cdot (1 \pm 2 \cdot s)$  si bien son identificables dentro del espectrograma STFT posición sensor A, no tienen la misma claridad como se muestran en las posiciones B y C (Figura 52 y Figura 53 respectivamente). Esto es debido a que estas componentes son de naturaleza radial. Con referente a los componentes  $f_{ecc}^{(-)}$  y  $f_{ecc}^{(+)}$  también son visibles, aunque el componente  $f_{ecc}^{(-)}$  se detecta con mayor facilidad que su componente opuesta. De igual manera podemos observar que los armónicos de fallos cercanos al 5to armónico  $f(5 - 6s)$  y  $f(5 - 4s)$  son también visibles en la posición A; sin embargo, se nota una mayor claridad en las posiciones B y C. En cualquier caso, las evoluciones de estas componentes pueden ser detectadas para vincularlas con la condición del devanado amortiguador. Por tanto, brinda información adicional y hace pensar que esta máquina tiene un cierto nivel de asimetría.

En el espectrograma posición de sensor B (Figura 52) aporta información destacada el cual es la mayor y clara evidencia de las componentes radiales  $f \cdot (1 \pm 2 \cdot s)$ ,  $f(5 - 6s)$  y  $f(5 - 4s)$  con respecto

a las demás posiciones de sensores. Por otro lado, las componentes axiales no se observan dentro de la distribución tiempo-frecuencia.

Los resultados del espectrograma posición de sensor C (Figura 53) muestran la peculiaridad que los dos componentes axiales, especialmente  $3 \cdot s \cdot f$ , tienen la mejor visibilidad en comparación a las dos anteriores posiciones de sensores.

## 5.2 Análisis de resultados de la máquina síncrona 2 (MS2).

### 5.2.1 Análisis régimen permanente (modo asíncrono). Máquina Síncrona 2 (MS2).

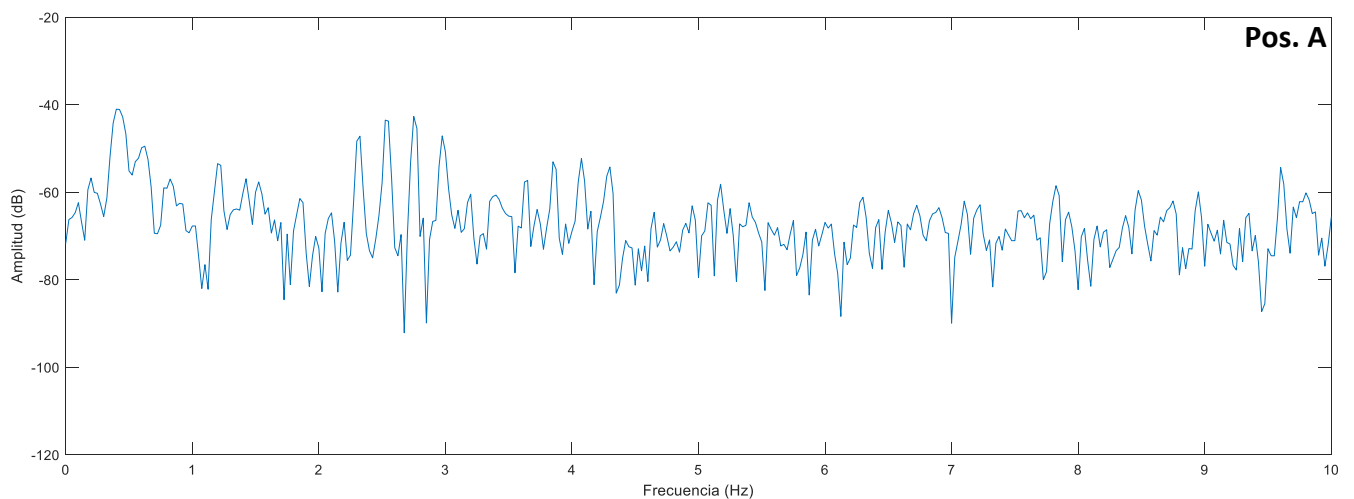


Figura 54. Análisis FFT posición sensor A: componentes  $sf$ ,  $3sf$  (modo asíncrono).

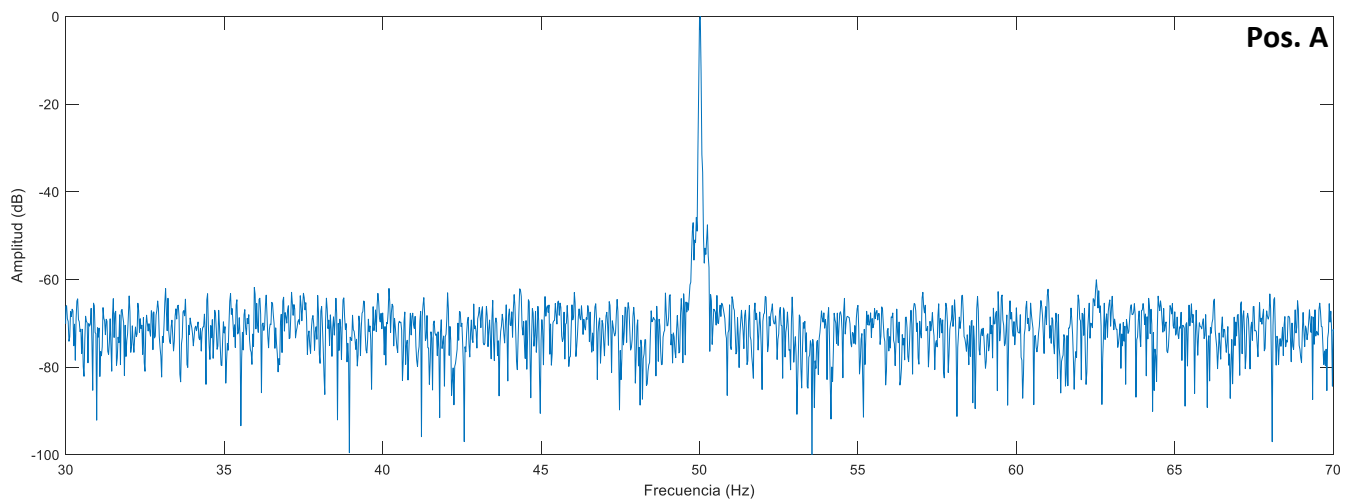


Figura 55. Análisis FFT posición sensor A: armónicos laterales (modo asíncrono).



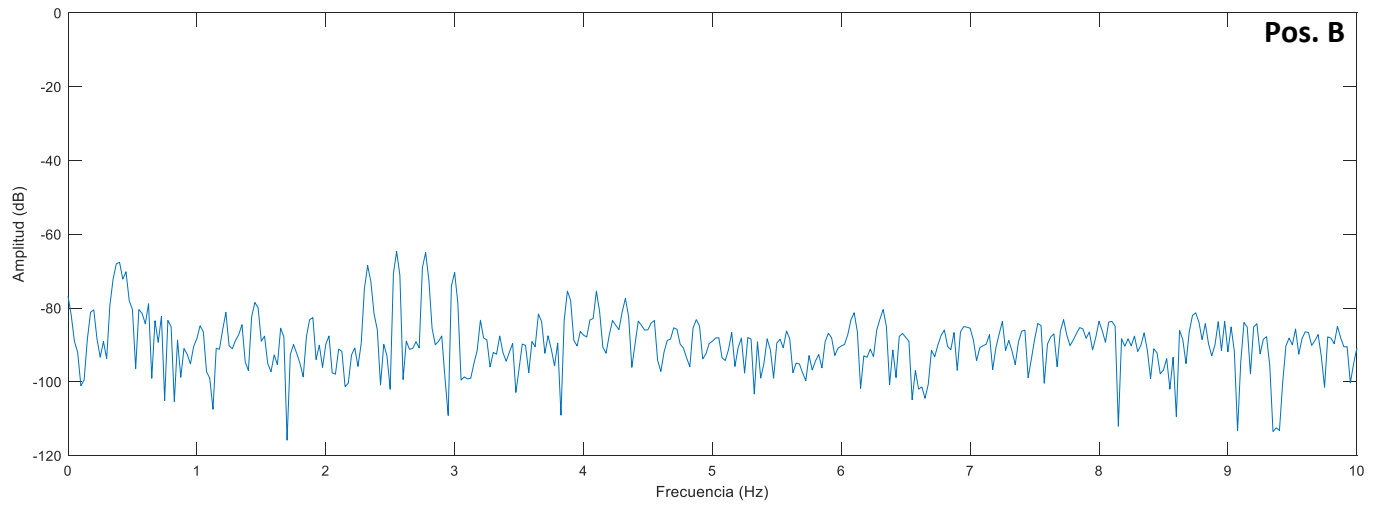


Figura 56. Análisis FFT posición sensor B: componentes  $sf$ ,  $3sf$  (modo asíncrono).

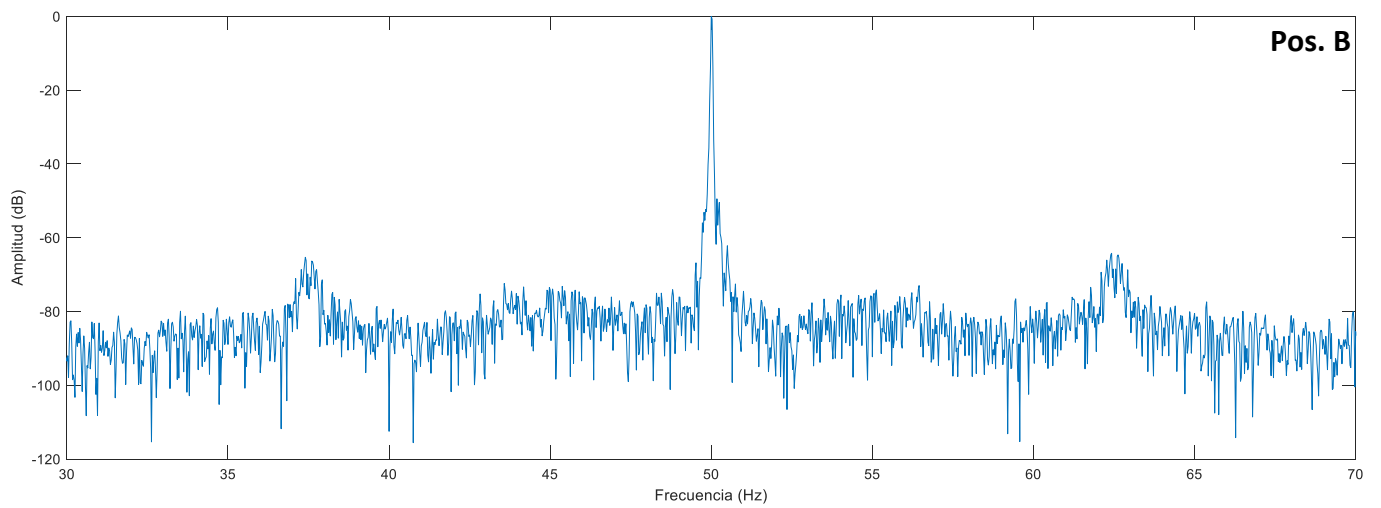


Figura 57. Análisis FFT posición sensor B: armónicos laterales (modo asíncrono).

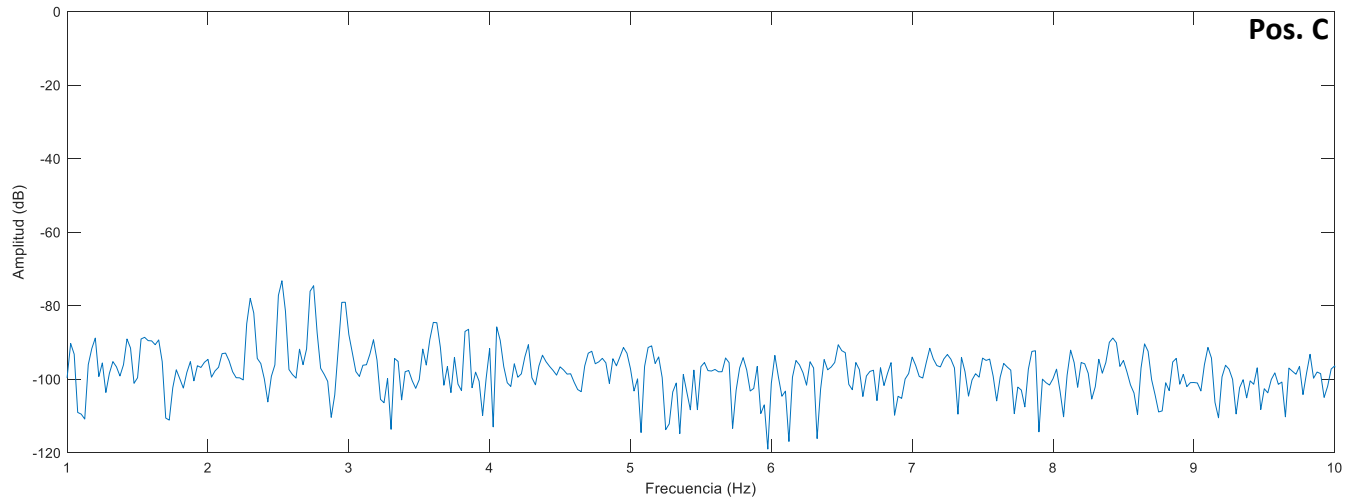


Figura 58. Análisis FFT posición sensor C: componentes sf, 3sf (modo asíncrono).

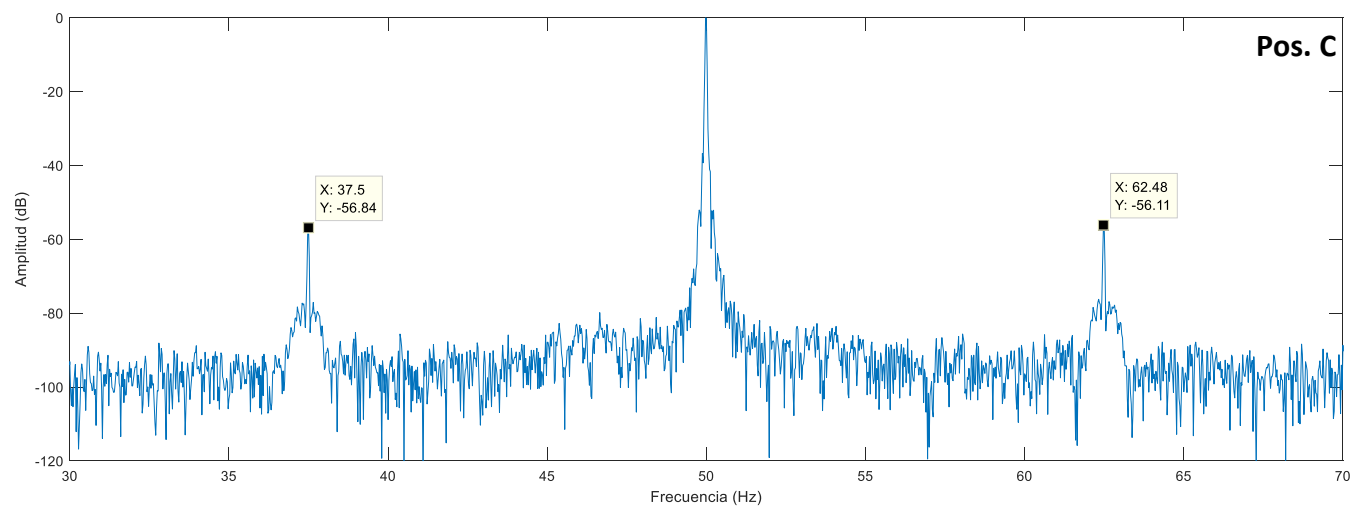


Figura 59. Análisis FFT posición sensor C: armónicos laterales (modo asíncrono).

Se ha mencionado que dos de las tres máquinas ensayadas cuentan con cierto nivel de magnetización remanente. Este fenómeno dificulta el análisis de flujo magnético en régimen permanente en modo asíncrono, por lo que los espectros FFT obtenidos no arrojan información de interés para el diagnóstico. Ello es debido a que la máquina se auto sincroniza sin necesidad de alimentar el devanado de excitación, con lo que no existe prácticamente régimen permanente en modo asíncrono. Por tanto, el método empleado de búsqueda de las componentes axiales y radiales no será posible en presencia de este fenómeno. Las Figura 54 - Figura 59 muestran los espectros FFT obtenidos de la MS2 con magnetización remanente en modo asíncrono (máquina ya auto sincronizada). Se observa que las componentes axiales y radiales no aparecen dentro del espectro. Además, en la posición C se aprecian levemente bandas laterales en ambos lados de la fundamental. Sin embargo, este indicativo puede ser producto de la asimetría magnética de la máquina, por lo que es imposible considerarlos como los armónicos laterales inferior y superior.



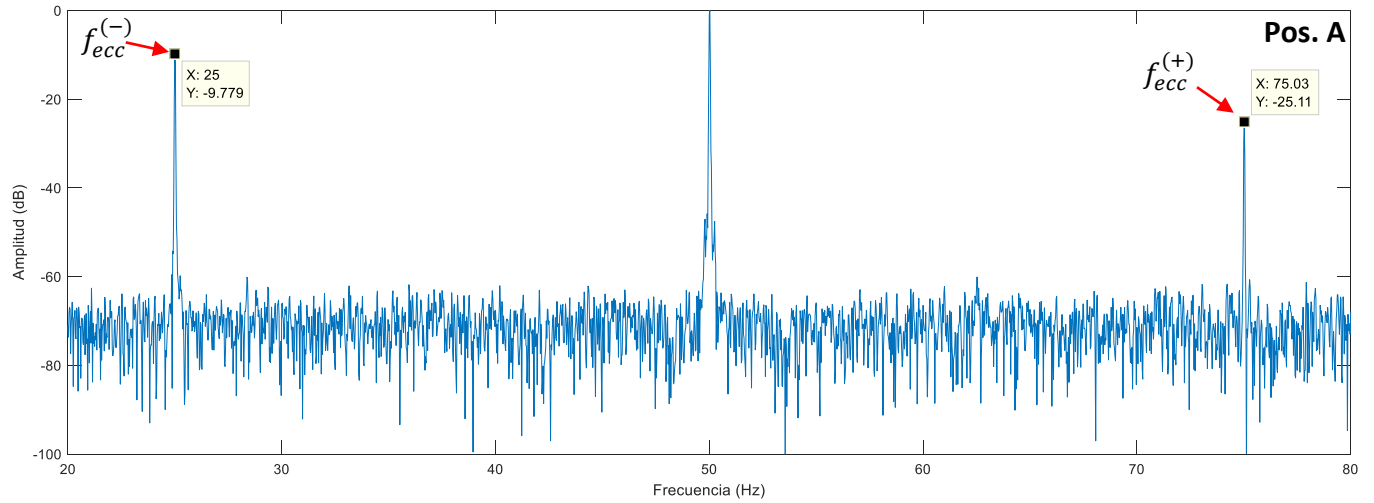


Figura 60. Análisis FFT posición sensor A: componentes por excentricidades (modo asíncrono).

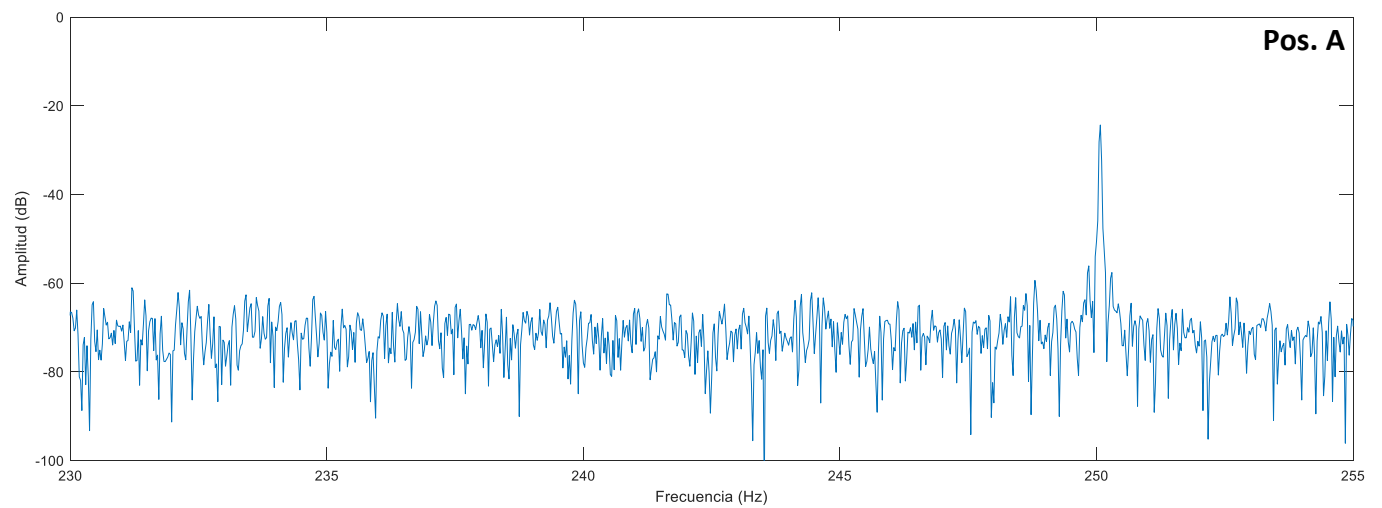


Figura 61. Análisis FFT posición sensor A: componentes cercanos al 5to armónico (modo asíncrono).

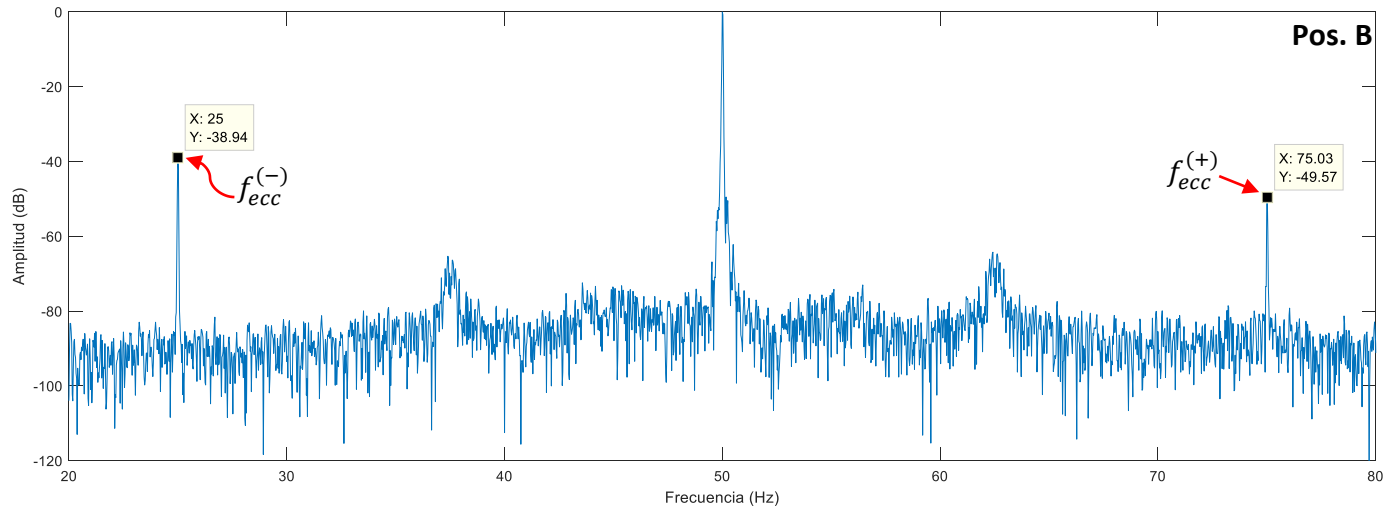


Figura 62. Análisis FFT posición sensor B: componentes por excentricidades (modo asíncrono).

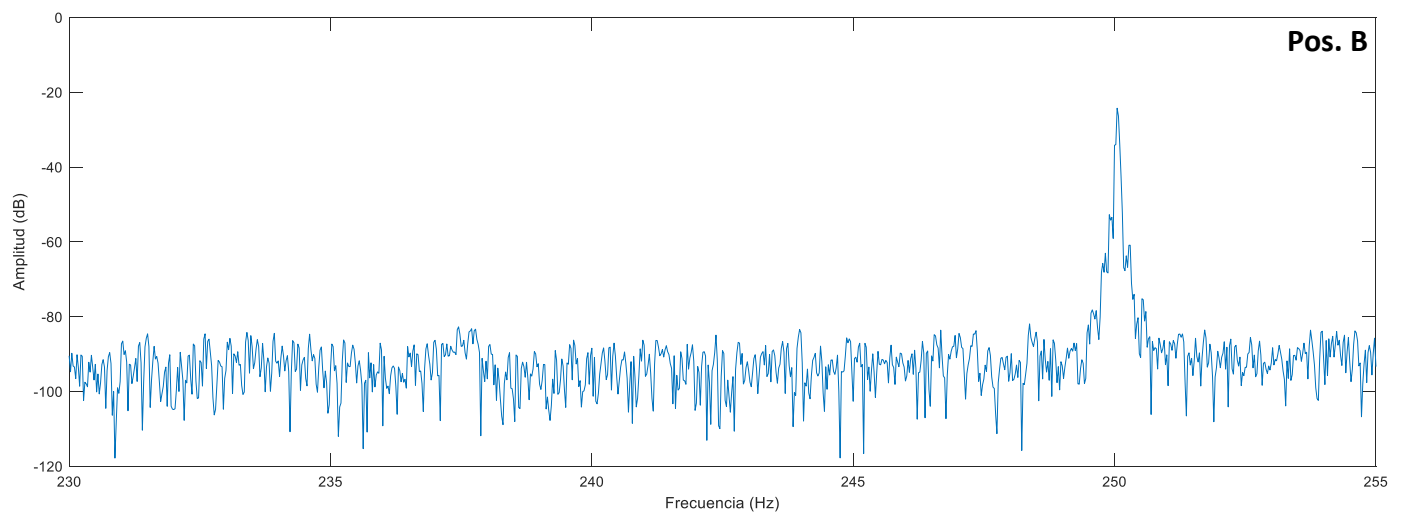


Figura 63. Análisis FFT posición sensor B: componentes cercanos al 5to armónico (modo asíncrono).

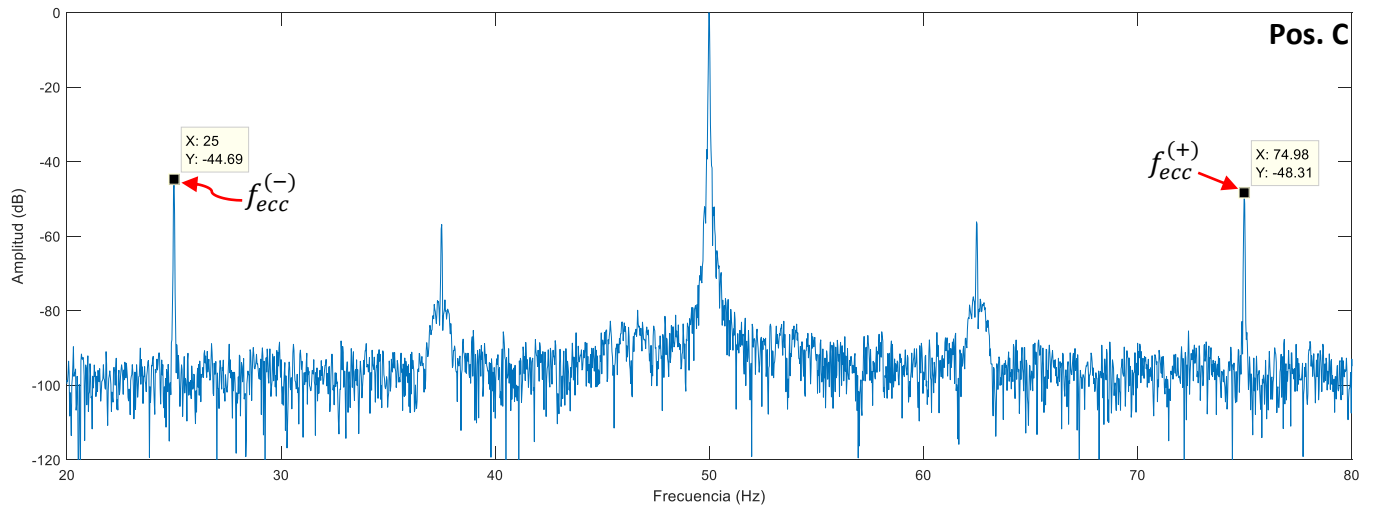


Figura 64. Análisis FFT posición sensor C: componentes por excentricidades (modo asíncrono).

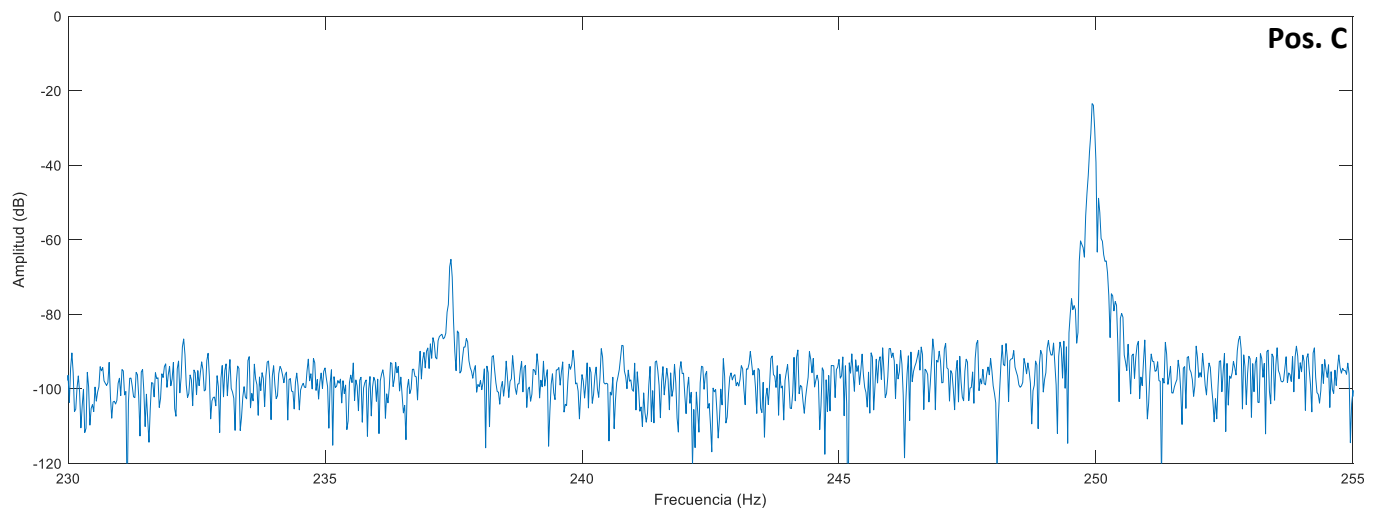


Figura 65. Análisis FFT posición sensor C: componentes cercanos al 5to armónico (modo asíncrono).

Las Figura 60 - Figura 65 muestran los espectros FFT obtenidos para la MS2 con magnetización remanente en modo asíncrono (máquina ya auto sincronizada), enfocado a los componentes de excentricidad/desalineación y componentes de fallos cercanos al 5to armónico. De igual manera, estos últimos no aparecen dentro del espectro FFT, debido a lo explicado anteriormente. Sin embargo, las componentes por excentricidad todavía son visibles en las tres posiciones del sensor y están localizadas exactamente a 25Hz ( $f_{ecc}^{(-)}$ ) y 75Hz ( $f_{ecc}^{(+)}$ ). Se observa que la posición A tiene la mayor sensibilidad y visibilidad, ya que las amplitudes son las mayores. Por el contrario, la posición C muestra las menores amplitudes. Cabe de nuevo destacar que existe una diferencia significativa entre los valores de amplitudes entre la pos. A y C. Con referencia a la componente  $f_{ecc}^{(+)}$ , la posición A es en donde se observa la mayor amplitud, mientras que las menores amplitudes se encuentran en la pos. B y C. Una vez más se observa una diferencia considerable entre las amplitudes pos. A con respecto a B y C.

### 5.2.2 Análisis régimen permanente (modo síncrono). Máquina Síncrona 2 (MS2).

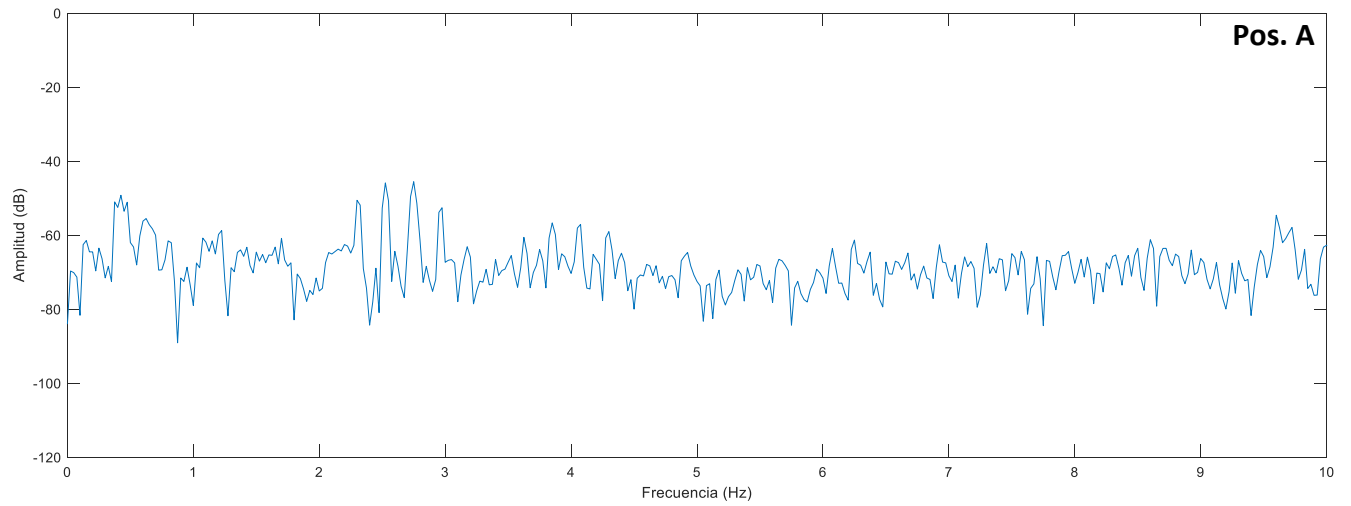


Figura 66. Análisis FFT posición sensor A: componentes  $sf$ ,  $3sf$  (modo síncrono).

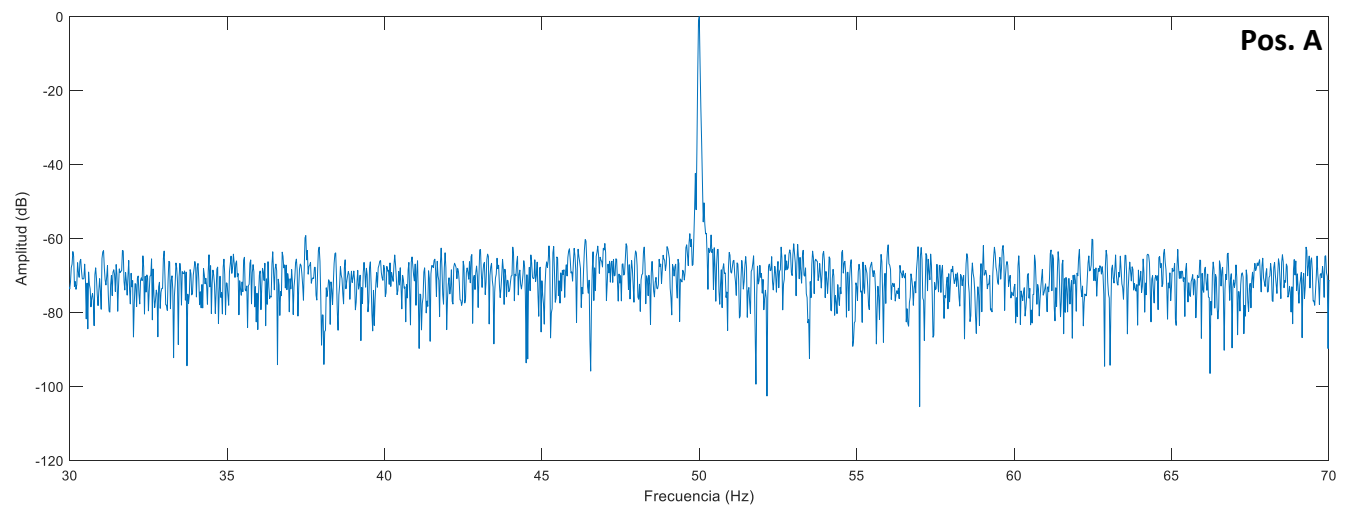


Figura 67. Análisis FFT posición sensor A: armónicos laterales (modo síncrono).

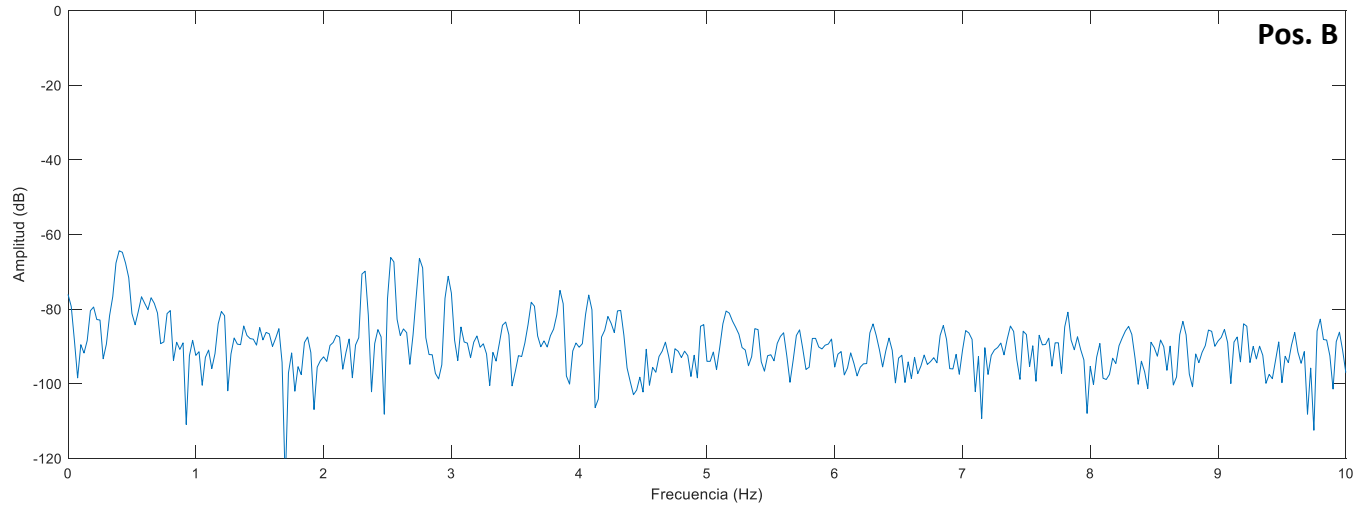


Figura 68. Análisis FFT posición sensor B: componentes  $sf$ ,  $3sf$  (modo síncrono).

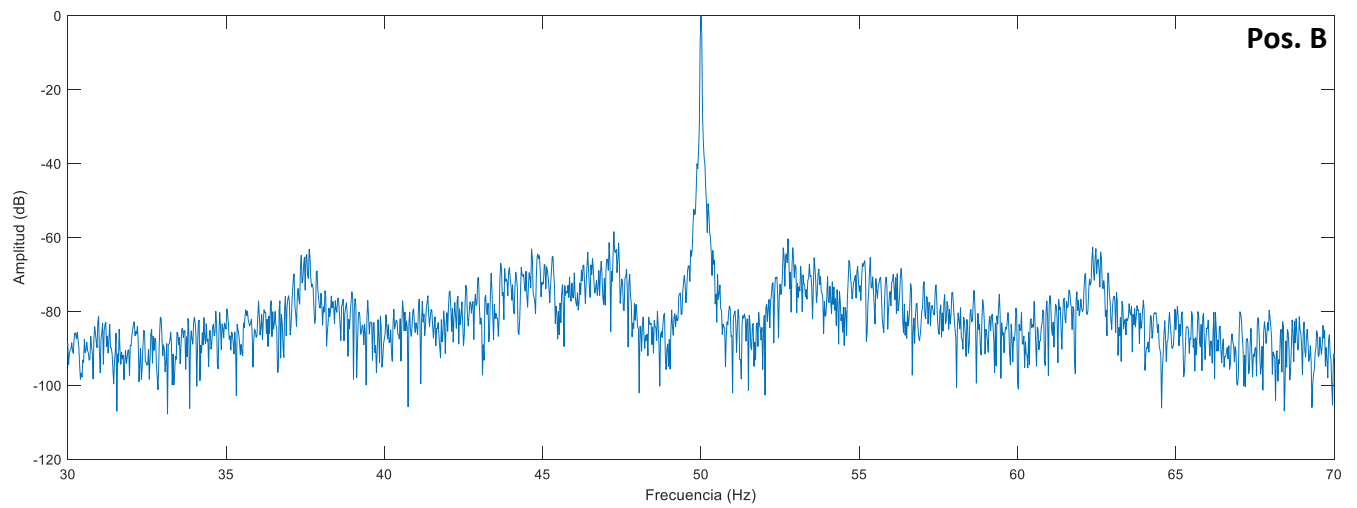


Figura 69. Análisis FFT posición sensor B: armónicos laterales (modo síncrono).

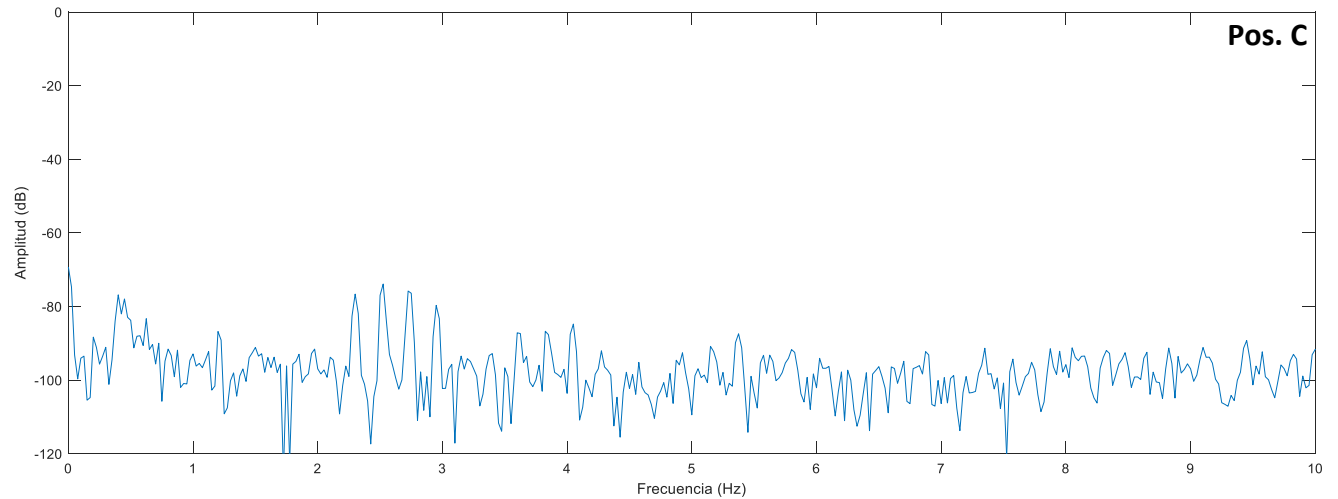


Figura 70. Análisis FFT posición sensor C: componentes sf, 3sf (modo síncrono).

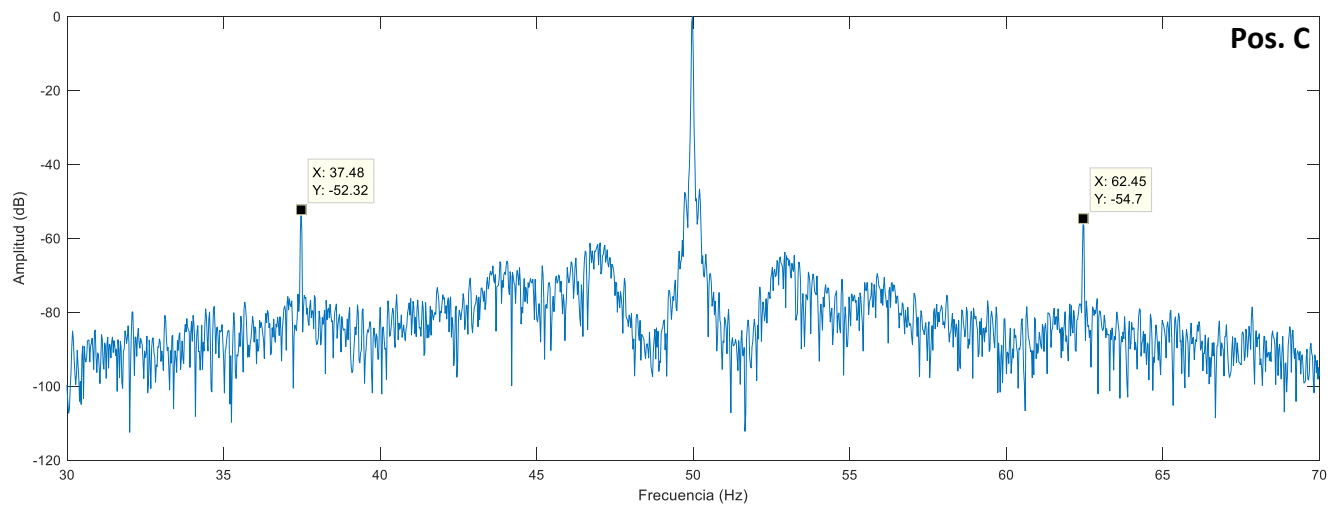


Figura 71. Análisis FFT posición sensor C: armónicos laterales (modo síncrono).

Los únicos espectros que proporcionarán alguna información útil serán en modo síncrono en régimen permanente. Las Figura 66 - Figura 71 muestran los espectros FFT obtenidos de la MS2 con magnetización bajo esta condición. Como era de esperar, tanto los armónicos laterales y como las componentes axiales no aparecen en ninguna de las tres posiciones del sensor. En la posición C se siguen visualizando las dos frecuencias a ambos lados de la fundamental, sin embargo, esto puede ser por la asimetría magnética de la máquina.

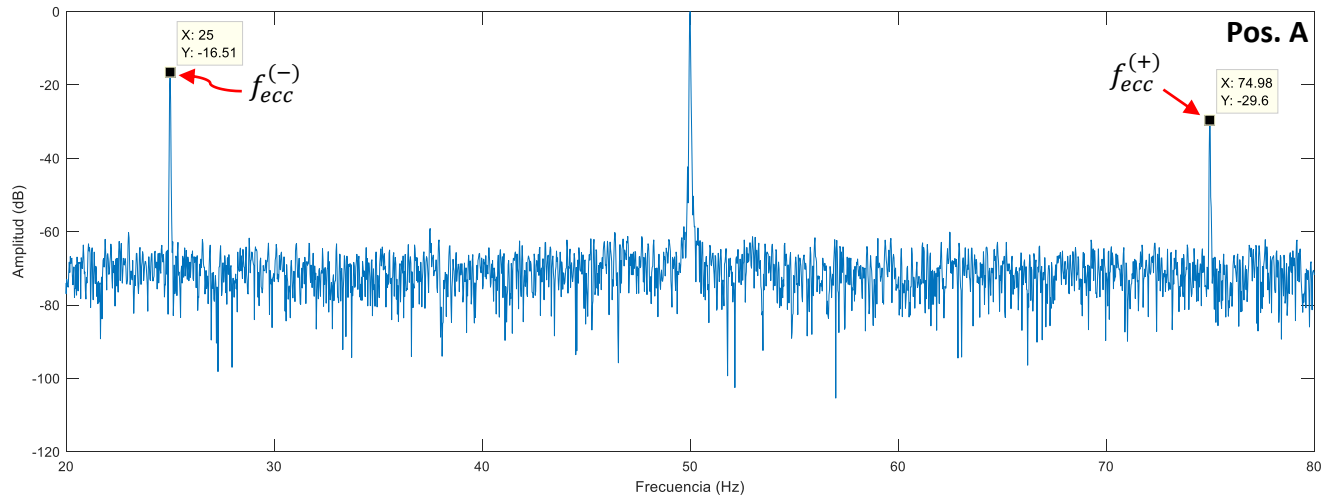


Figura 72. Análisis FFT posición sensor A: componentes por excentricidades (modo síncrono).

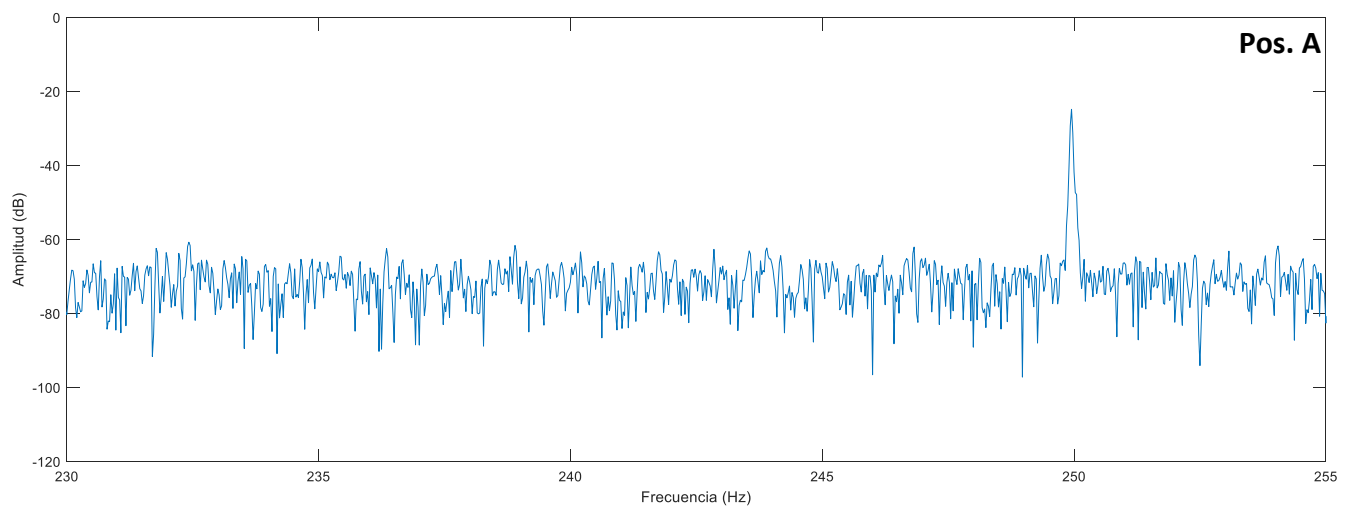


Figura 73. Análisis FFT posición sensor A: componentes cercanos al 5to armónico (modo síncrono).

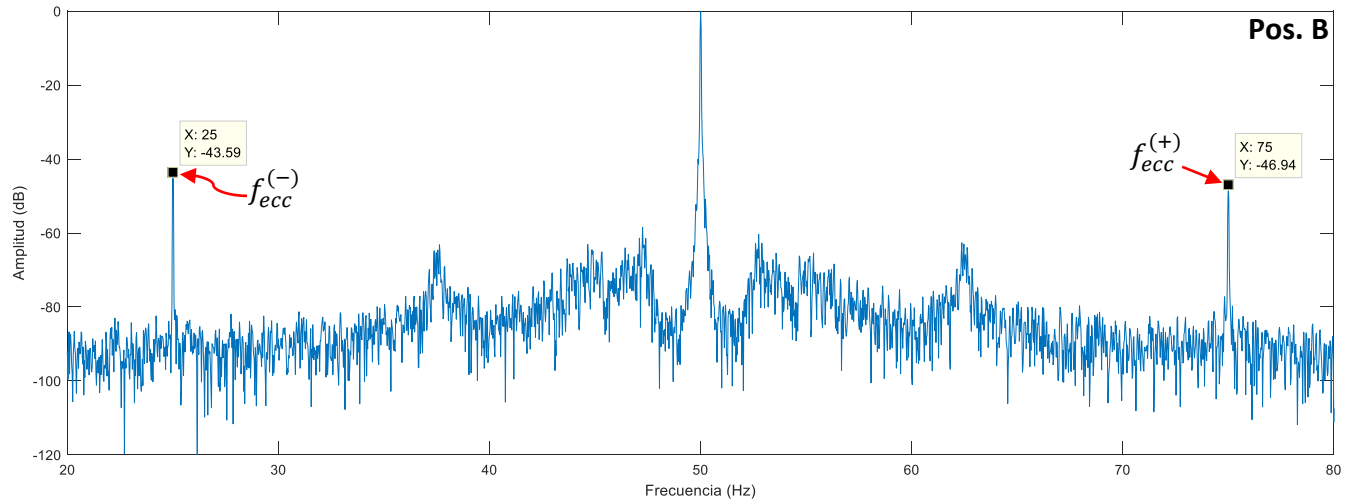


Figura 74. Análisis FFT posición sensor B: componentes por excentricidades (modo síncrono).

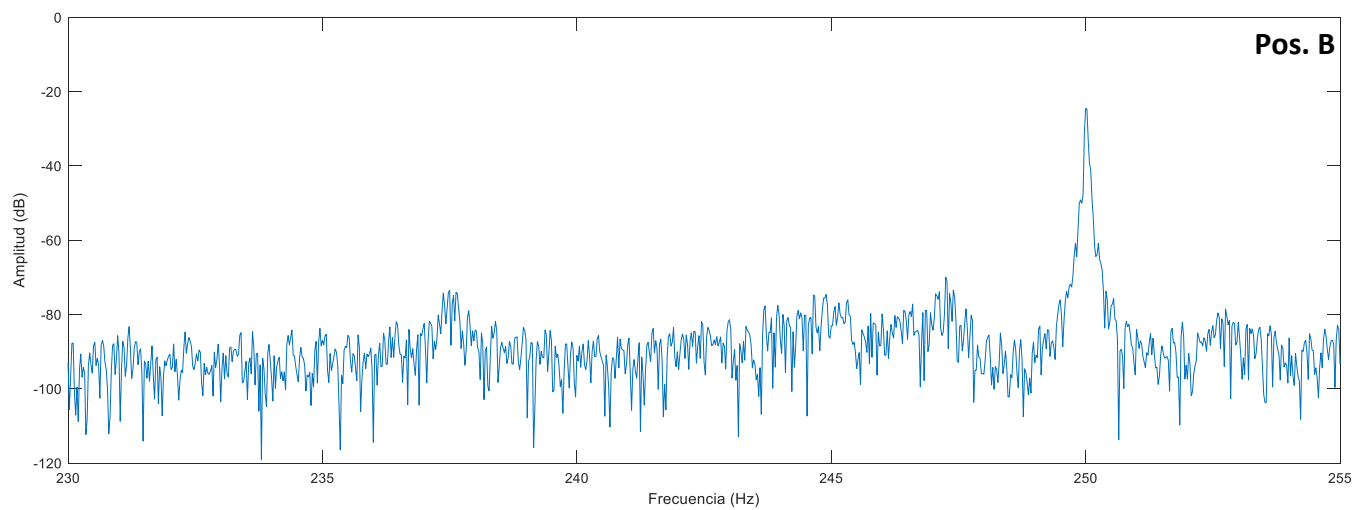


Figura 75. Análisis FFT posición sensor B: componentes cercanos al 5to armónico (modo síncrono).



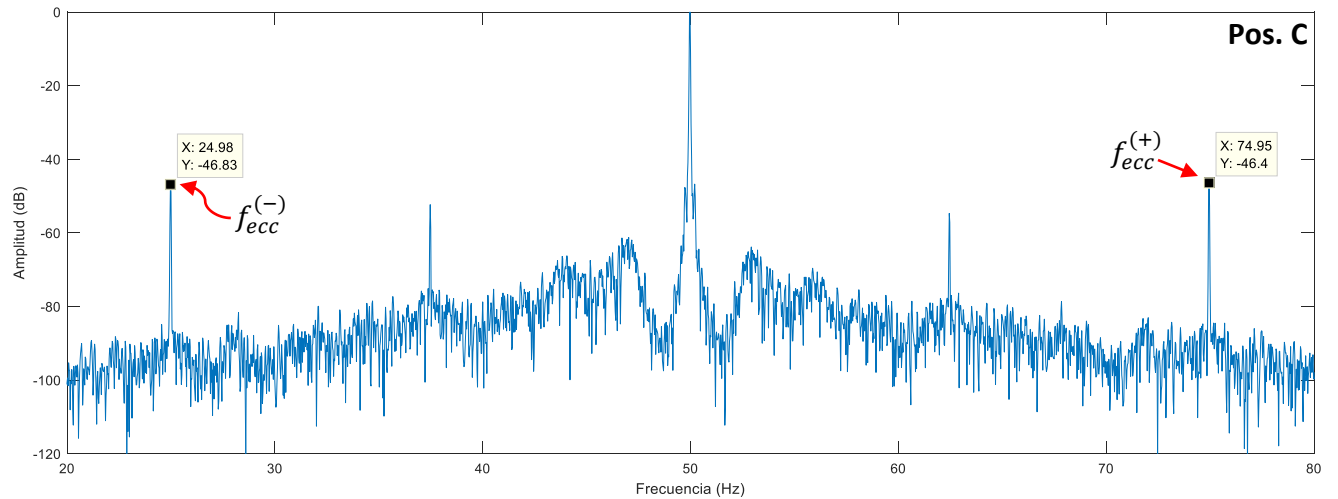


Figura 76. Análisis FFT posición sensor C: componentes por excentricidades (modo síncrono).

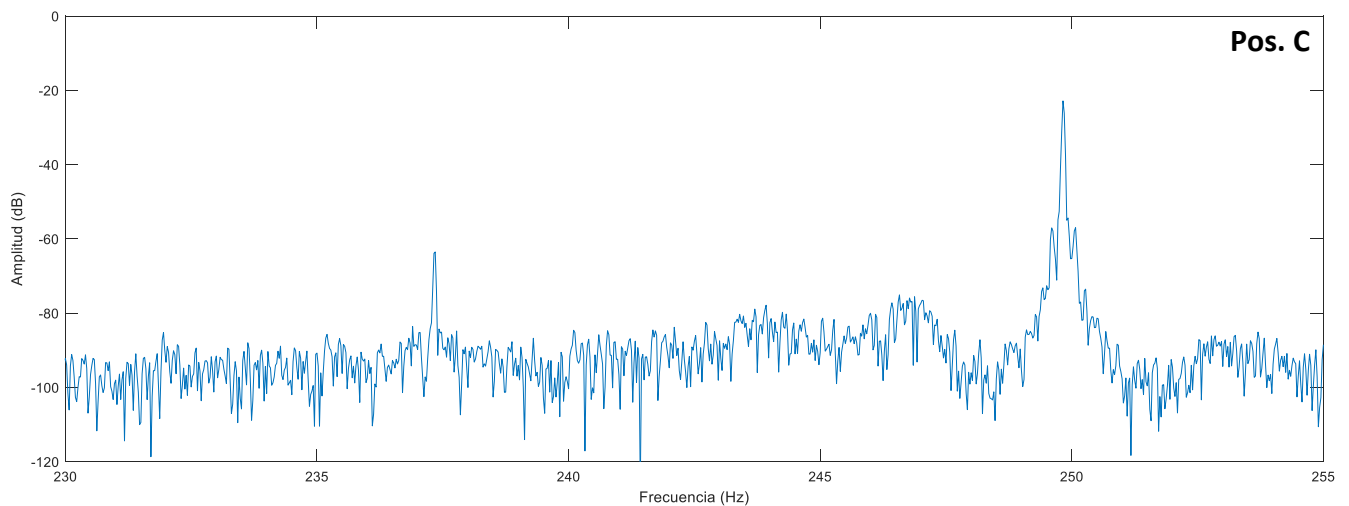


Figura 77. Análisis FFT posición sensor C: componentes cercanos al 5to armónico (modo síncrono).

Las Figura 72 - Figura 77 muestran el mismo análisis en régimen permanente de la MS2 con magnetización remanente en modo síncrono enfocado a los componentes de excentricidad/desalineación y cercanos al 5to armónico. Como ocurría antes, los armónicos cercanos al 5to orden no aparecen dentro del espectro FFT, debido a lo explicado anteriormente. Con referencia a la excentricidad, se observa que la posición A tiene la mayor sensibilidad y visibilidad, ya que las amplitudes son las mayores. Por su parte, la posición C muestra las menores amplitudes. Cabe destacar que existe una diferencia significativa entre los valores de amplitudes entre la pos. A y C.

Al no poder visualizar las componentes axiales y radiales, se ha realizado el análisis de correlacionar las amplitudes de excentricidad en modo asíncrono vs síncrono para observar las diferencias entre éstas ante un posible daño en barras, tal como se realizó en el apartado 5.1.2. La Tabla 8 muestra que el valor medio de amplitudes del armónico  $f_{ecc}^{(-)}$  en modo asíncrono es mayor que el valor medio en

sincronismo. Específicamente, en la posición A este decremento es aún más notorio. Mientras que los valores medio de amplitudes de  $f_{ecc}^{(+)}$  se mantienen prácticamente igual.

	MODO SÍNCRONO		MODO ASÍNCRONO	
	MS2		MS2	
Posición del sensor	$f_{ecc}^{(-)}$	$f_{ecc}^{(+)}$	$f_{ecc}^{(-)}$	$f_{ecc}^{(+)}$
A (axial)	16.51	29.6	9.779	25.11
B (axial y radial)	43.59	46.94	38.94	49.57
C (radial)	46.83	46.4	44.69	48.31
<b>Valor medio</b>	<b>35.64</b>	<b>40.98</b>	<b>31.14</b>	<b>41</b>

Tabla 8. Tabla comparativa de amplitudes [dB] de excentricidad (modo síncrono vs modo asíncrono).

### 5.3 Análisis de resultados de la máquina síncrona 3. Máquina Síncrona 3 (MS3).

#### 5.3.1 Análisis régimen permanente (modo Asíncrono). Máquina Síncrona 3 (MS3).

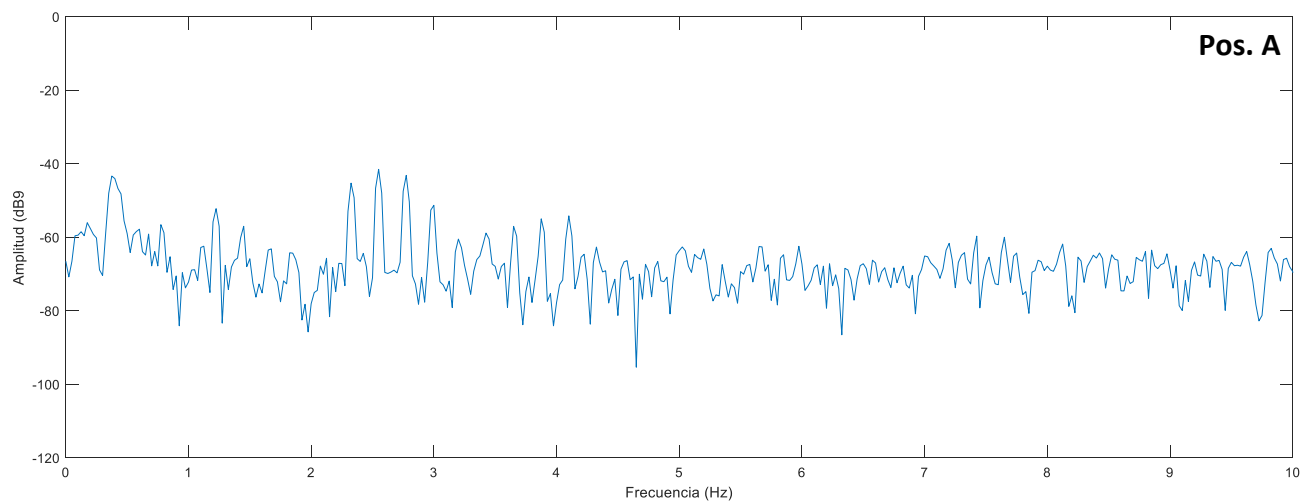


Figura 78. Análisis FFT posición sensor A: componentes  $sf$ ,  $3sf$  (modo asíncrono).

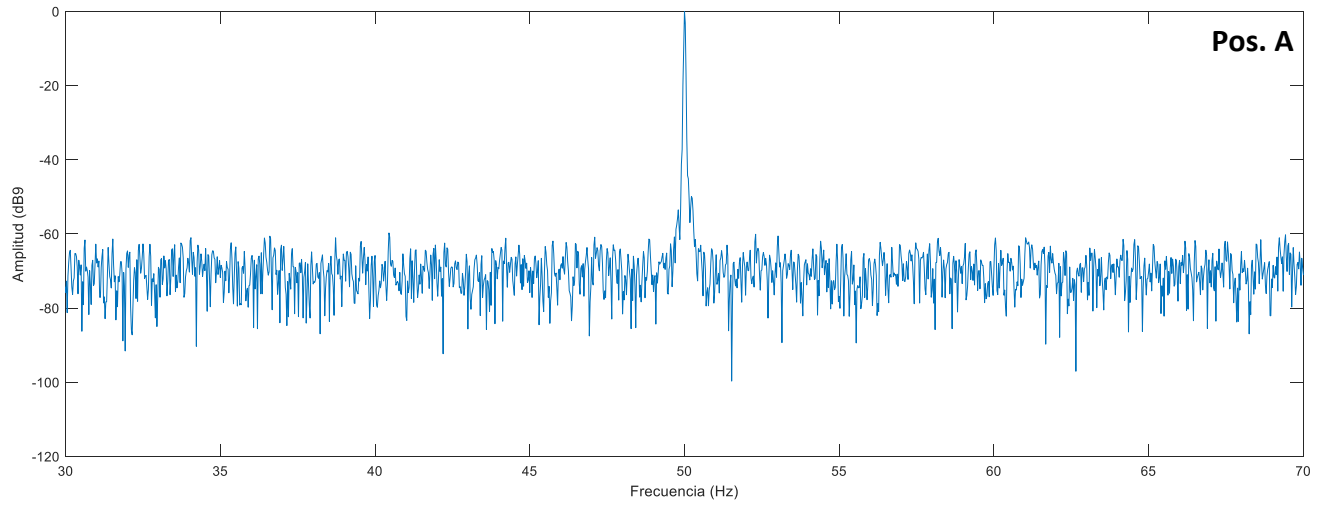


Figura 79. Análisis FFT posición sensor A: armónicos laterales (modo asíncrono).

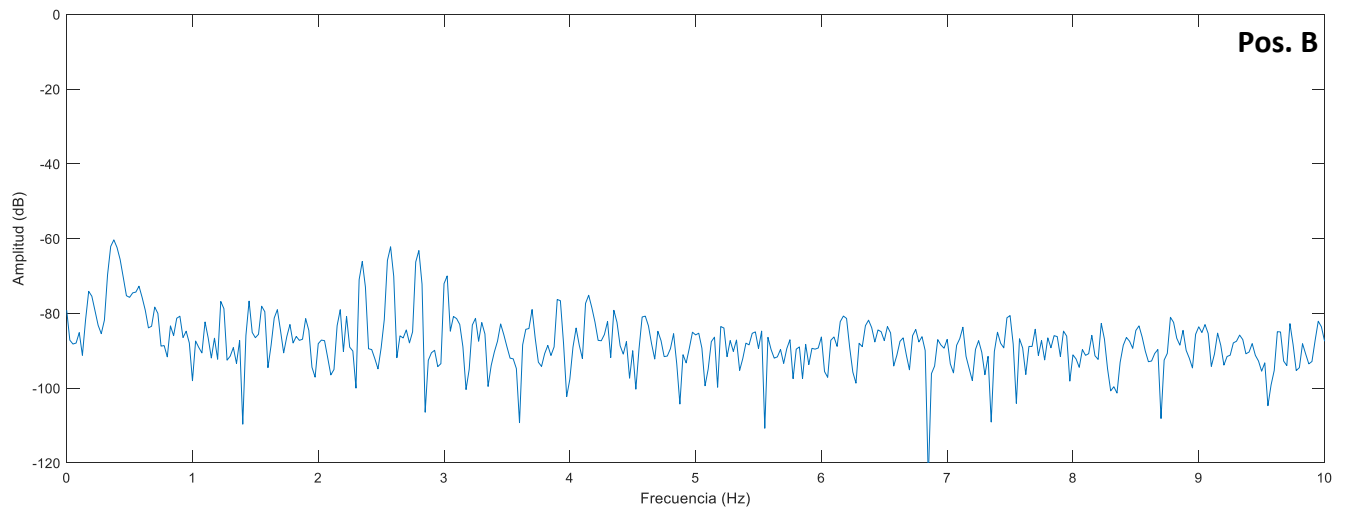


Figura 80. Análisis FFT posición sensor B: componentes  $sf$ ,  $3sf$  (modo asíncrono).

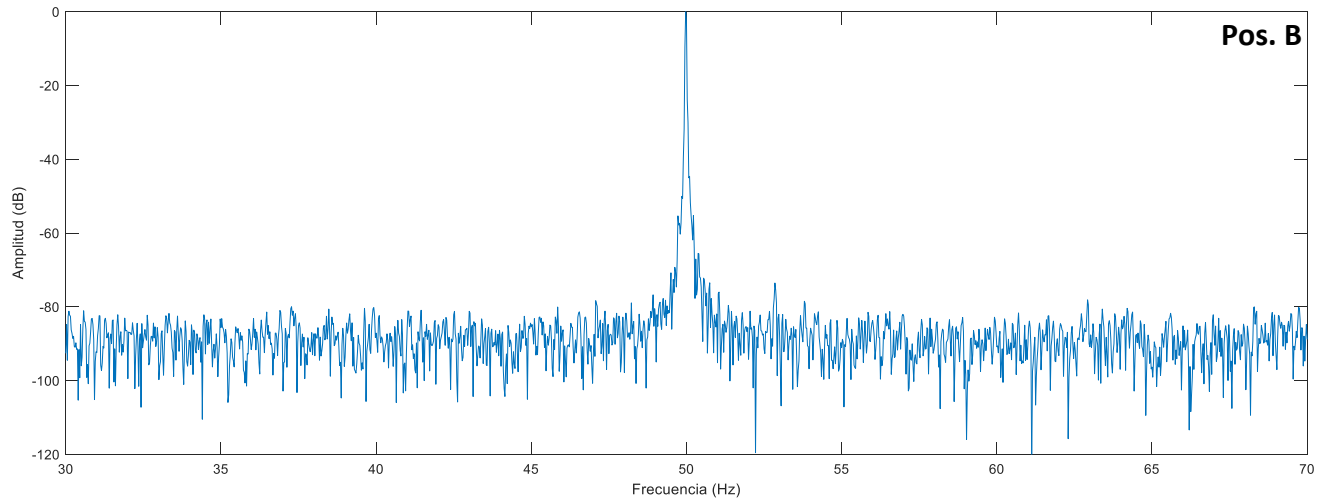


Figura 81. Análisis FFT posición sensor B: armónicos laterales (modo asíncrono).

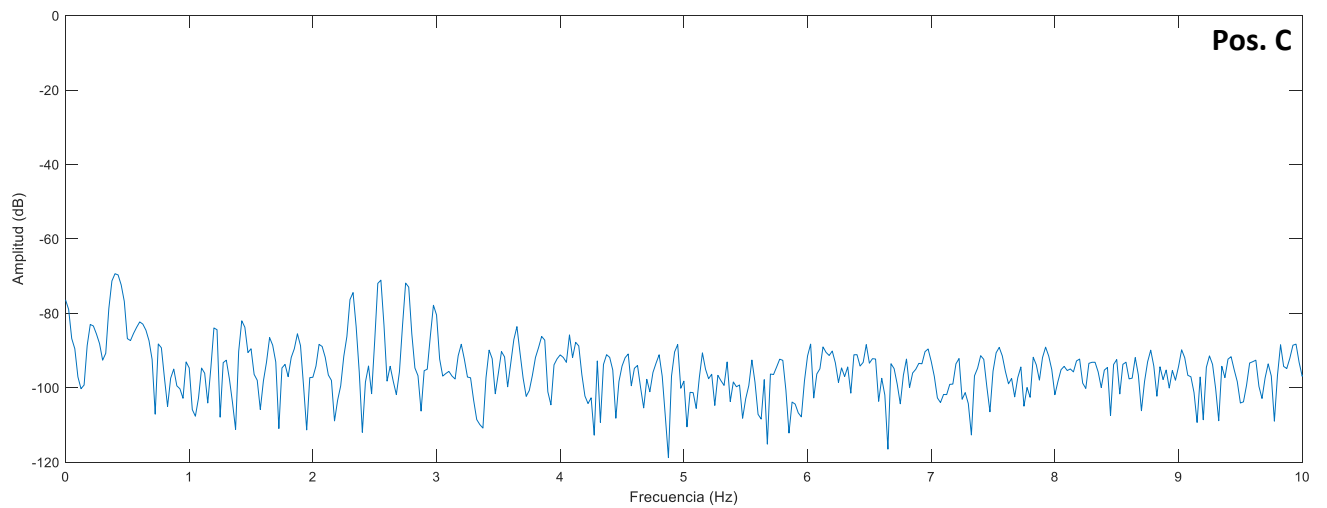


Figura 82. Análisis FFT posición sensor C: componentes  $sf$ ,  $3sf$  (modo asíncrono).

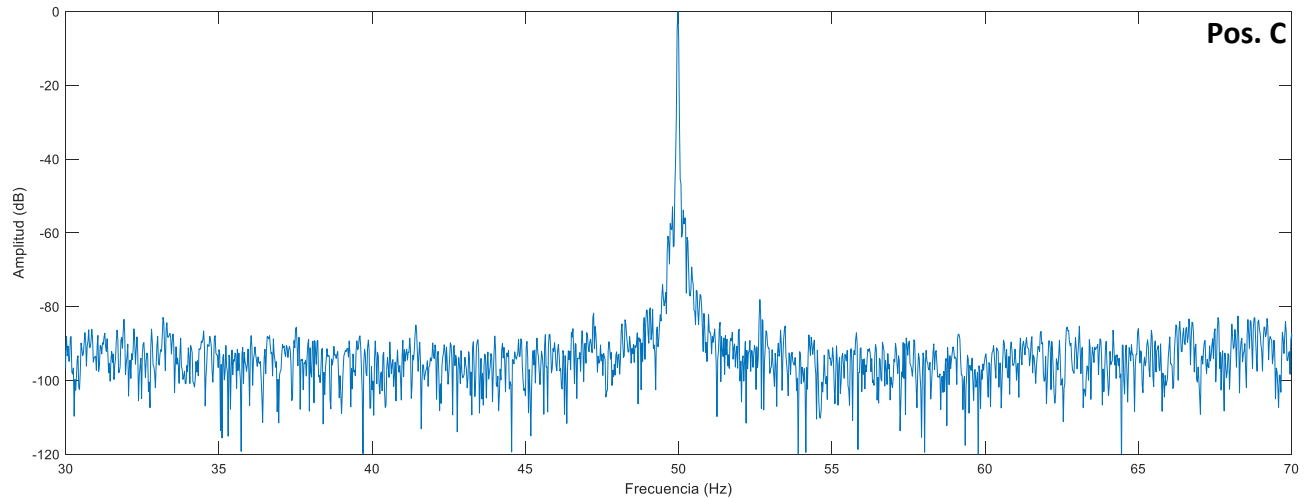


Figura 83. Análisis FFT posición sensor C: armónicos laterales (modo asíncrono).

Esta máquina también cuenta con el fenómeno de magnetización remanente. Las Figura 78 - Figura 83 muestran los espectros FFT obtenidos de la MS3 en modo asíncrono (máquina ya auto sincronizada). Se observa que las componentes axiales y radiales no aparecen dentro del espectro. Como se mencionó, este fenómeno dificulta obtener los espectros FFT en régimen estable en modo asíncrono, por lo que sólo los espectros en modo síncrono podrán proporcionar alguna información adicional.

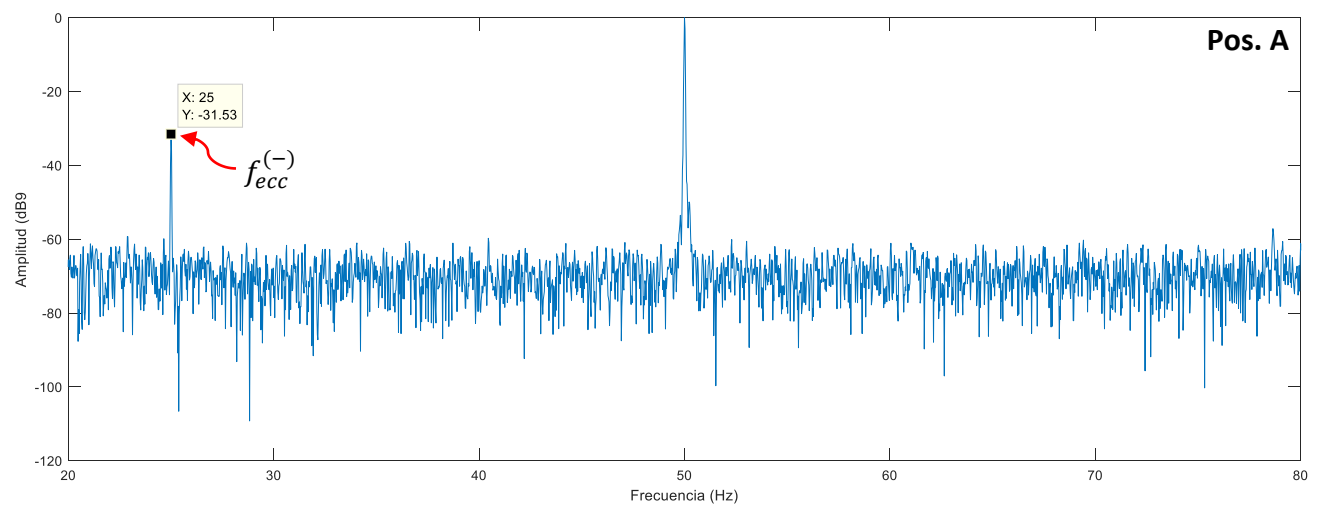


Figura 84. Análisis FFT posición sensor A: componentes por excentricidades (modo asíncrono).

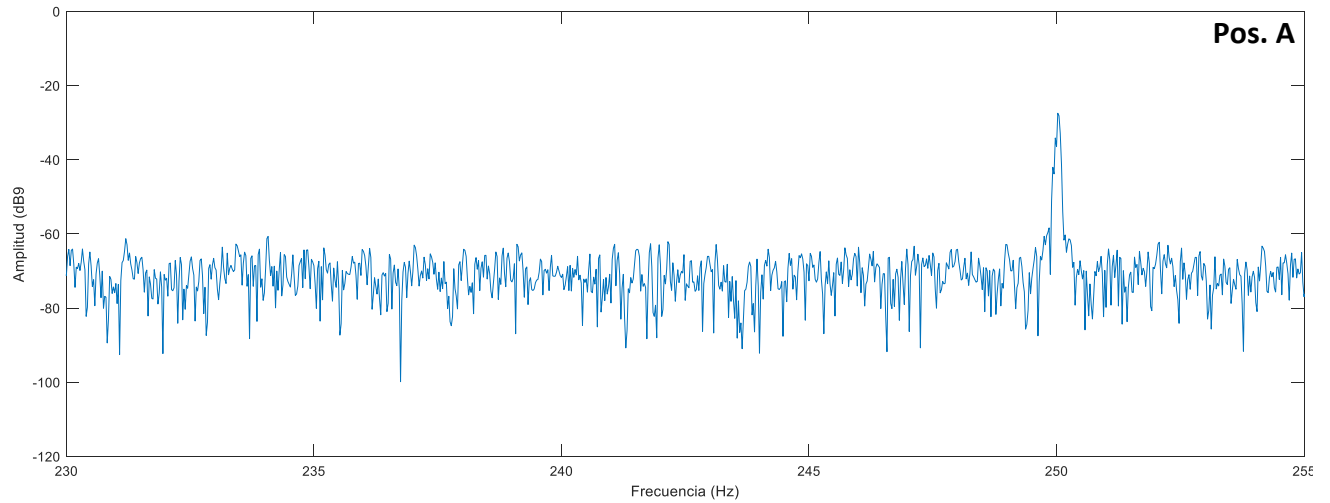


Figura 85. Análisis FFT posición sensor A: componentes cercanos al 5to armónico (modo asíncrono).

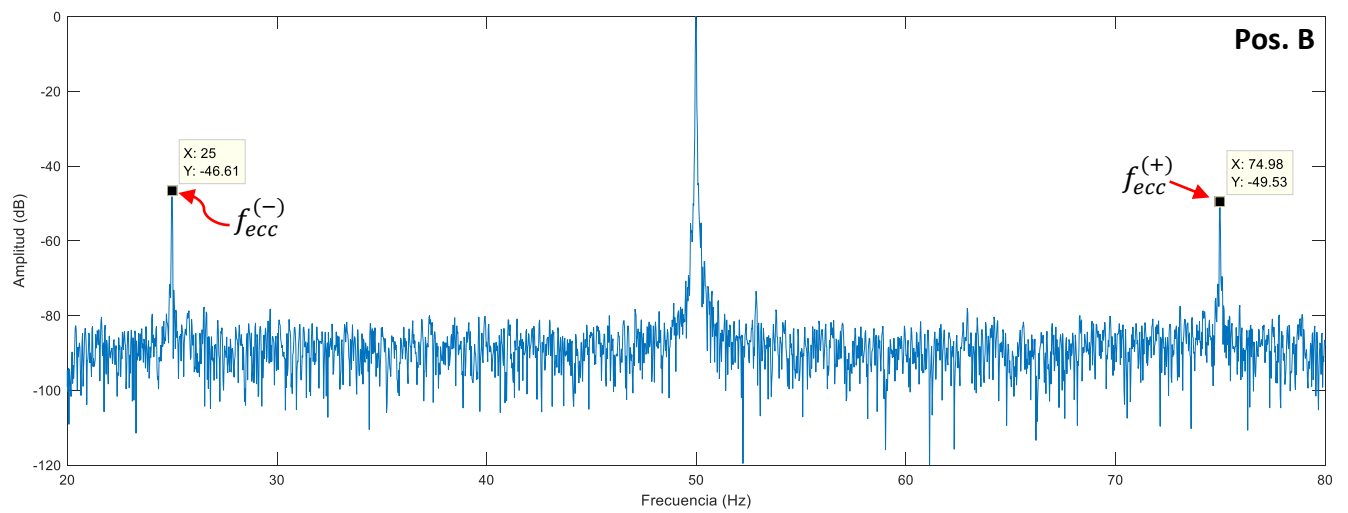


Figura 86. Análisis FFT posición sensor B: componentes por excentricidades (modo asíncrono).

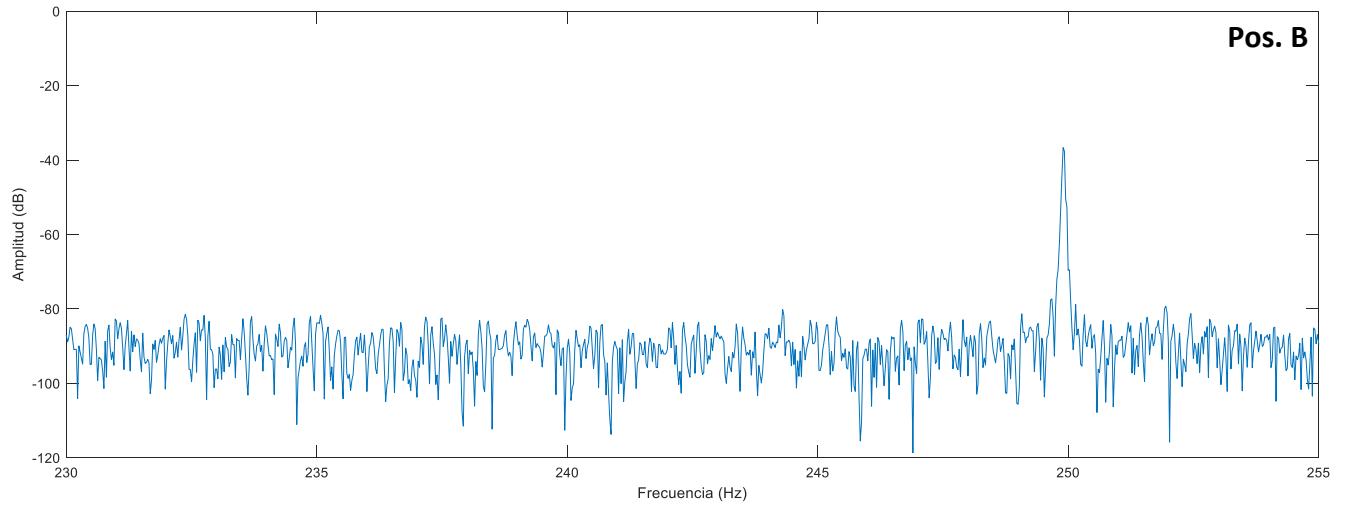


Figura 87. Análisis FFT posición sensor B: componentes cercanos al 5to armónico (modo asíncrono).

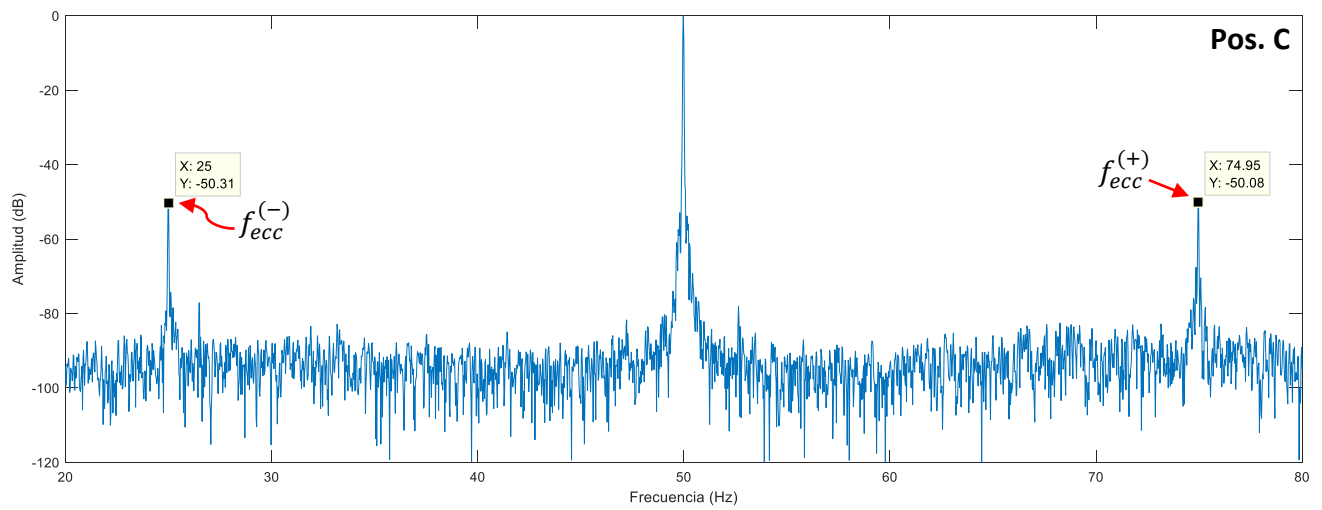


Figura 88. Análisis FFT posición sensor C: componentes por excentricidades (modo asíncrono).

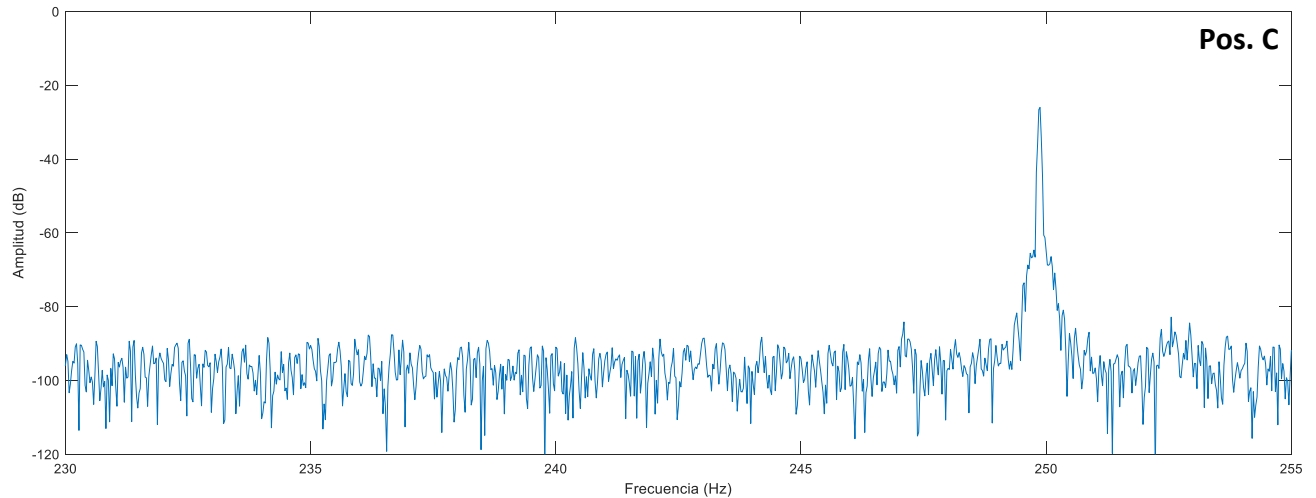


Figura 89. Análisis FFT posición sensor C: componentes cercanos al 5to armónico (modo asíncrono).

Las Figura 84 - Figura 89 muestran los espectros FFT obtenidos de la MS3 con magnetización remanente en modo asíncrono (máquina ya auto sincronizada), enfocado a los componentes de excentricidad/desalineación y componentes cercanos al 5to armónico. Como ocurría anteriormente, los armónicos cercanos al 5to orden no aparecen dentro del espectro FFT. En lo que respecta a la componente  $f_{ecc}^{(-)}$ , se observa que en la posición A se tiene la mayor amplitud, mientras que la posición C muestra la menor amplitud. Cabe de nuevo destacar que existe una diferencia significativa entre los valores de amplitudes entre la pos. A y C. Algo interesante ocurre con  $f_{ecc}^{(+)}$ , la cual se ubica a 75Hz como en todos los espectros mostrados hasta ahora. Sin embargo, en la pos. A no se visualiza esta componente, esta situación puede ser influida por la magnetización remanente. Simplemente conviene mencionar que las amplitudes para las pos. B y C son prácticamente iguales.



### 5.3.2 Análisis régimen permanente (modo Síncrono). Máquina Síncrona 3 (MS3).

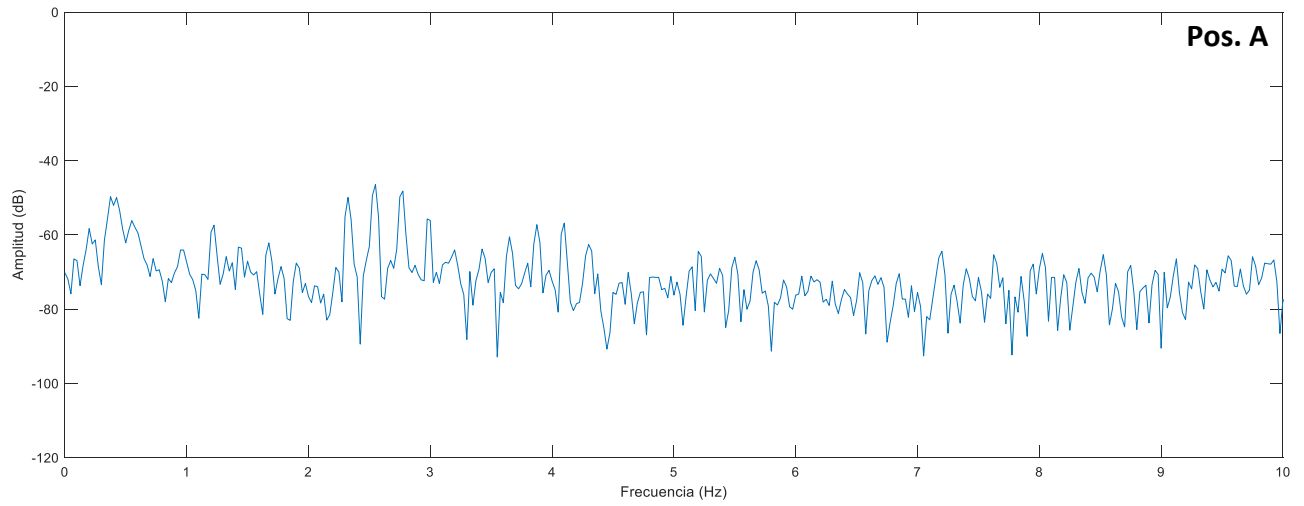


Figura 90. Análisis FFT posición sensor A: componentes  $sf$ ,  $3sf$  (modo síncrono).

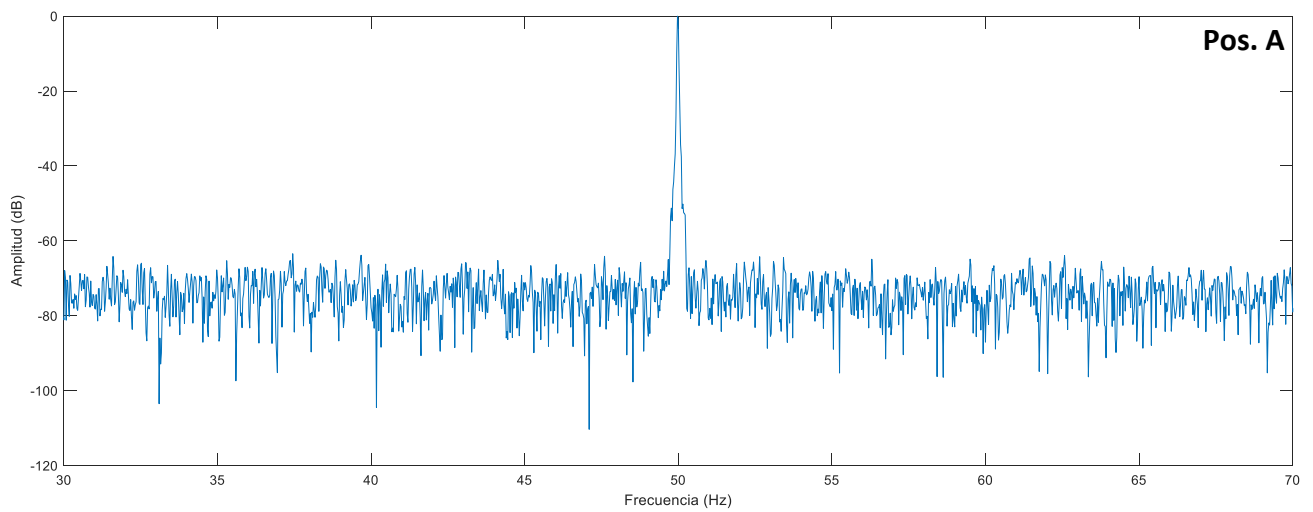


Figura 91. Análisis FFT posición sensor A: armónicos laterales (modo síncrono).

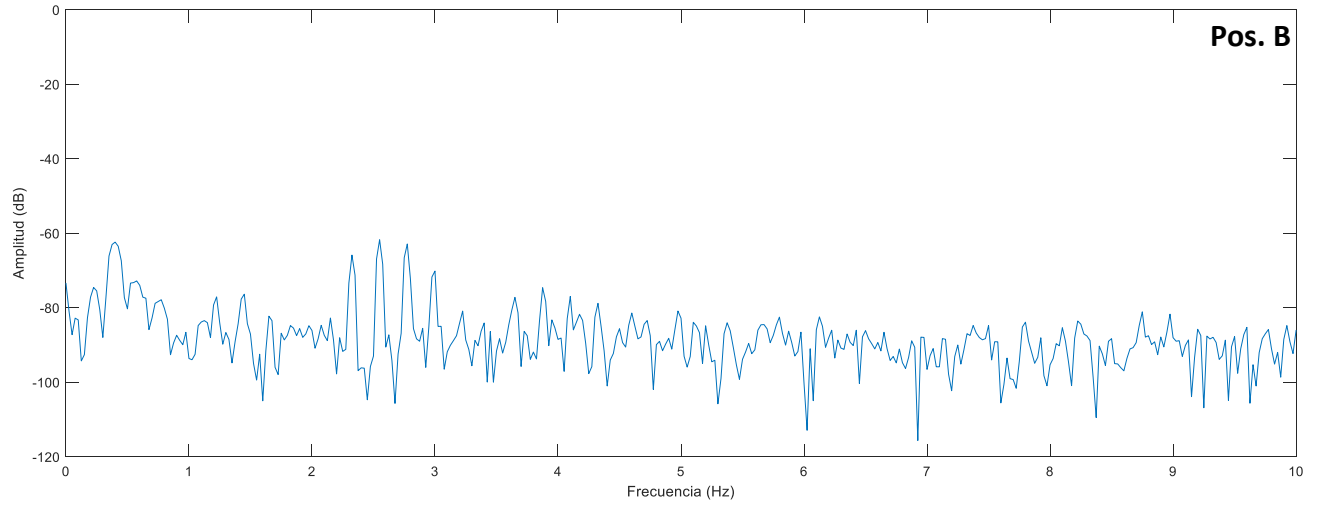


Figura 92. Análisis FFT posición sensor B: componentes  $sf$ ,  $3sf$  (modo síncrono).

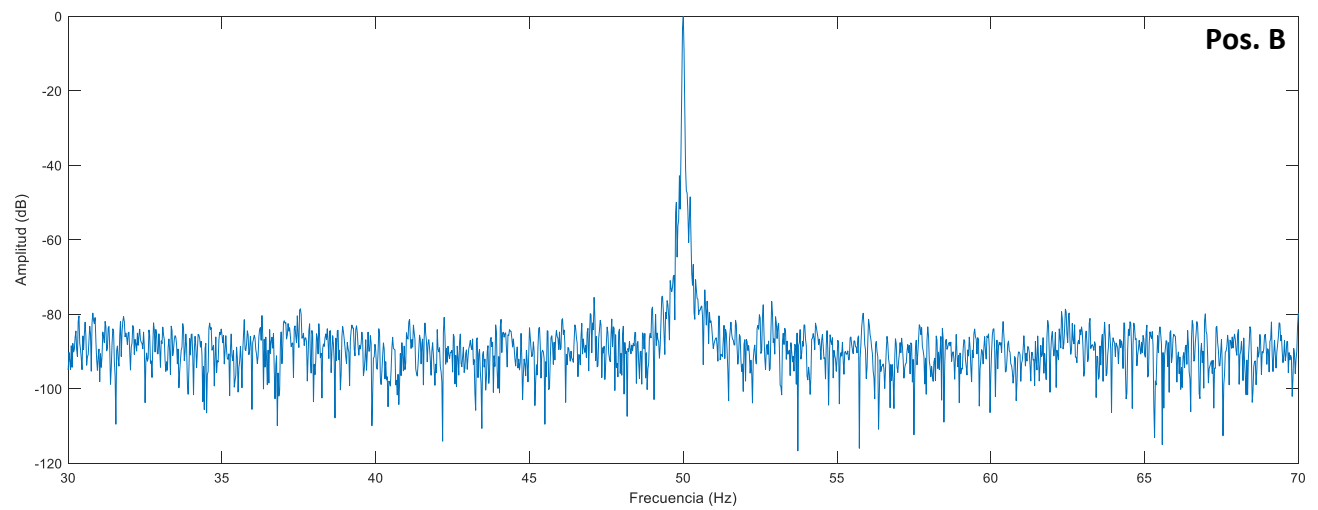


Figura 93. Análisis FFT posición sensor B: armónicos laterales (modo síncrono).

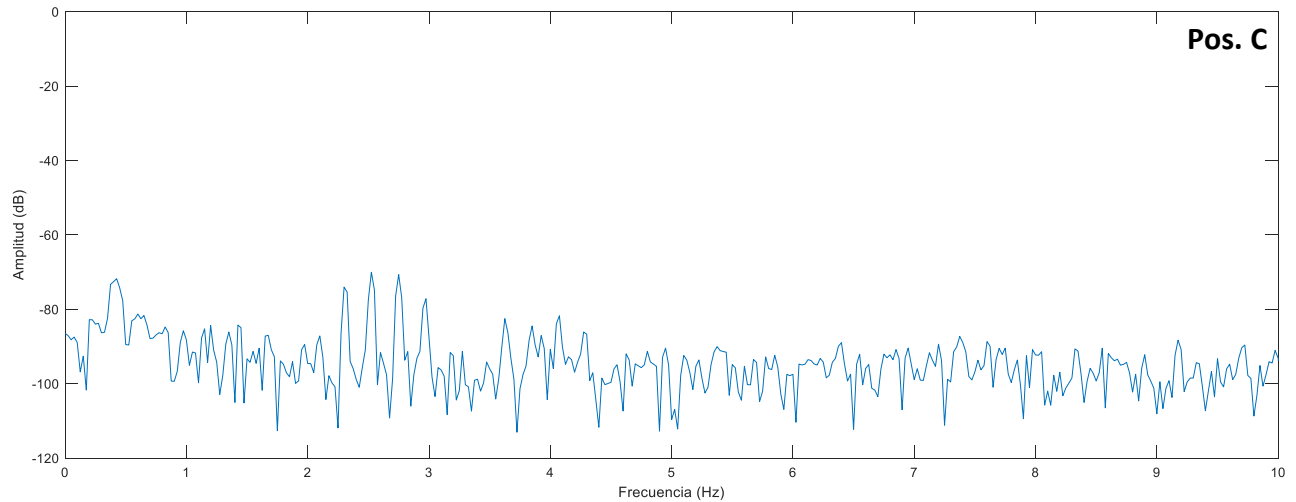


Figura 94. Análisis FFT posición sensor C: componentes  $sf$ ,  $3sf$  (modo síncrono).

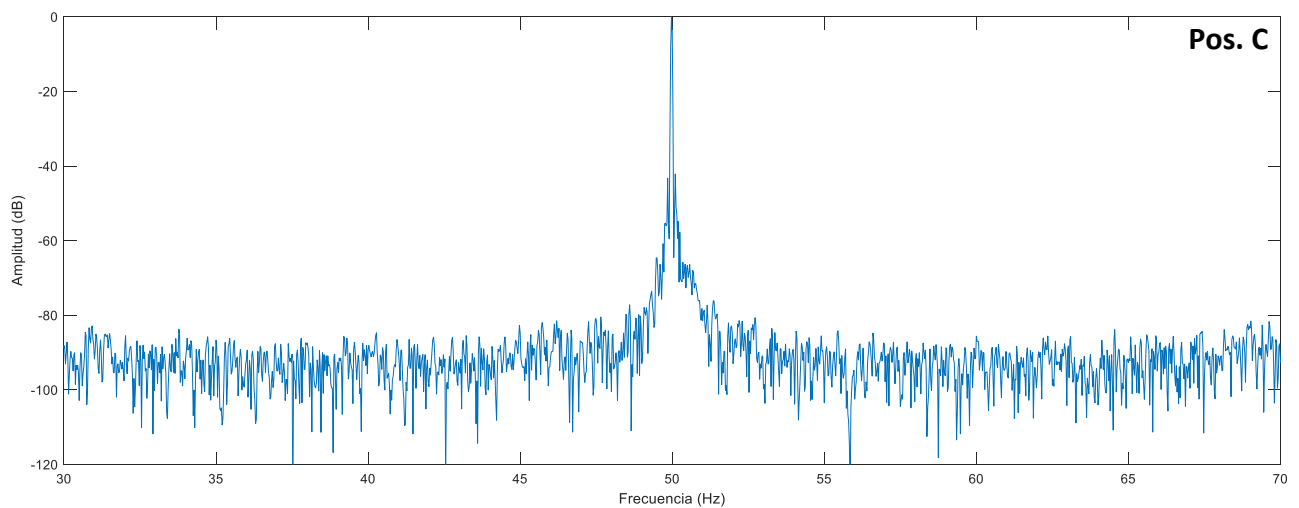


Figura 95. Análisis FFT posición sensor C: armónicos laterales (modo síncrono).

Las Figura 90 - Figura 95 muestran los espectros FFT obtenidos de la MS3 con operación en modo síncrono. Como la anterior máquina y mismo modo de operación, era de esperarse que tanto los armónicos laterales y los componentes axiales no aparecieran en ninguna de las tres posiciones del sensor.

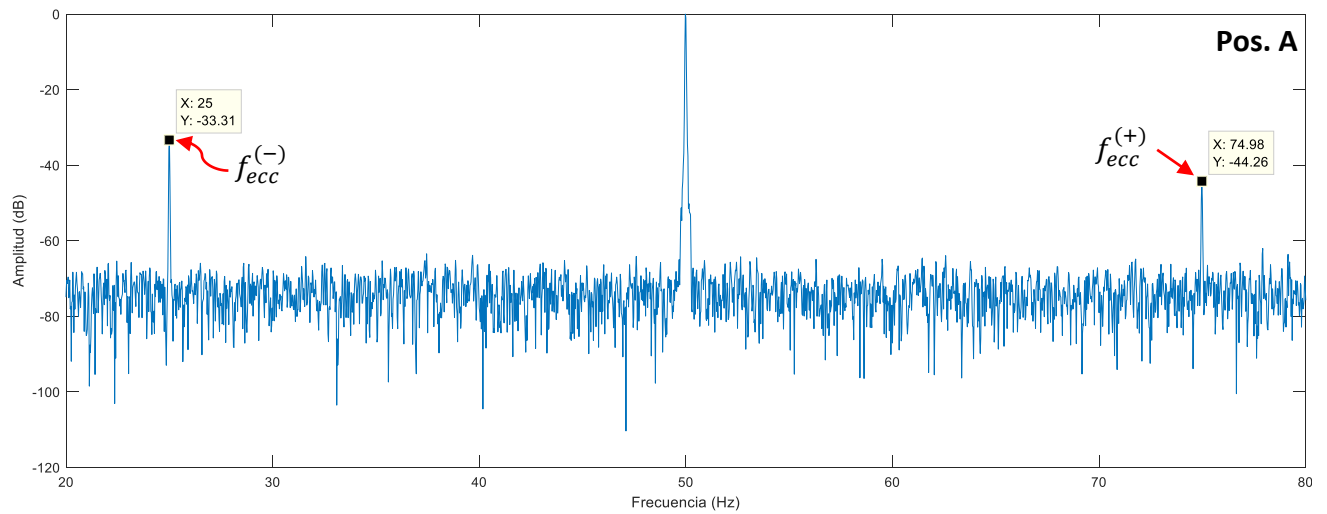


Figura 96. Análisis FFT posición sensor A: componentes por excentricidades (modo síncrono).

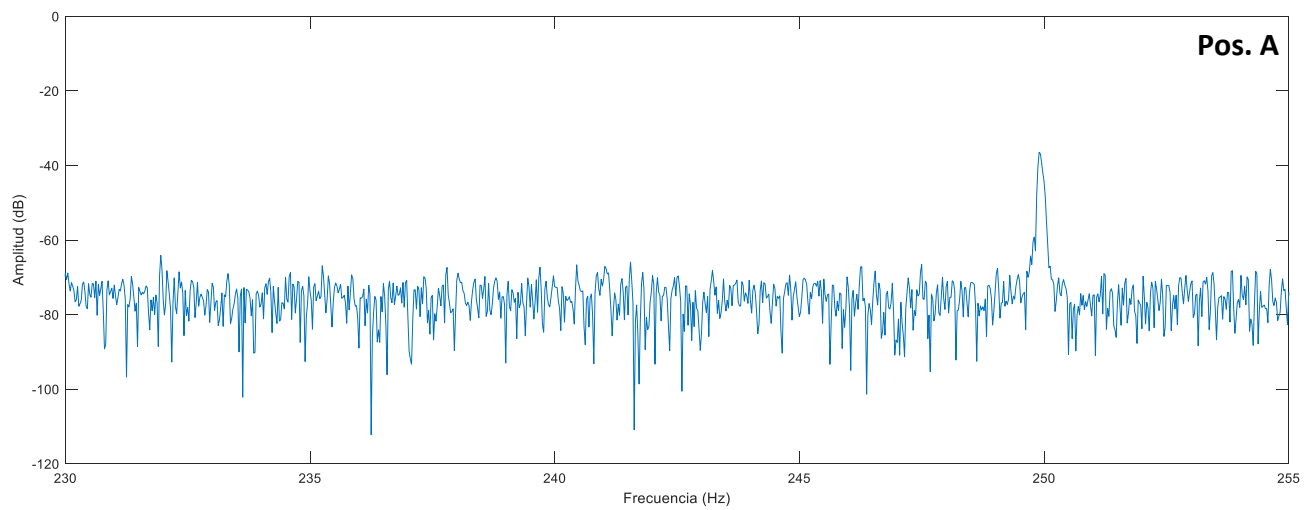


Figura 97. Análisis FFT posición sensor A: componentes cercanos al 5to armónico (modo síncrono).

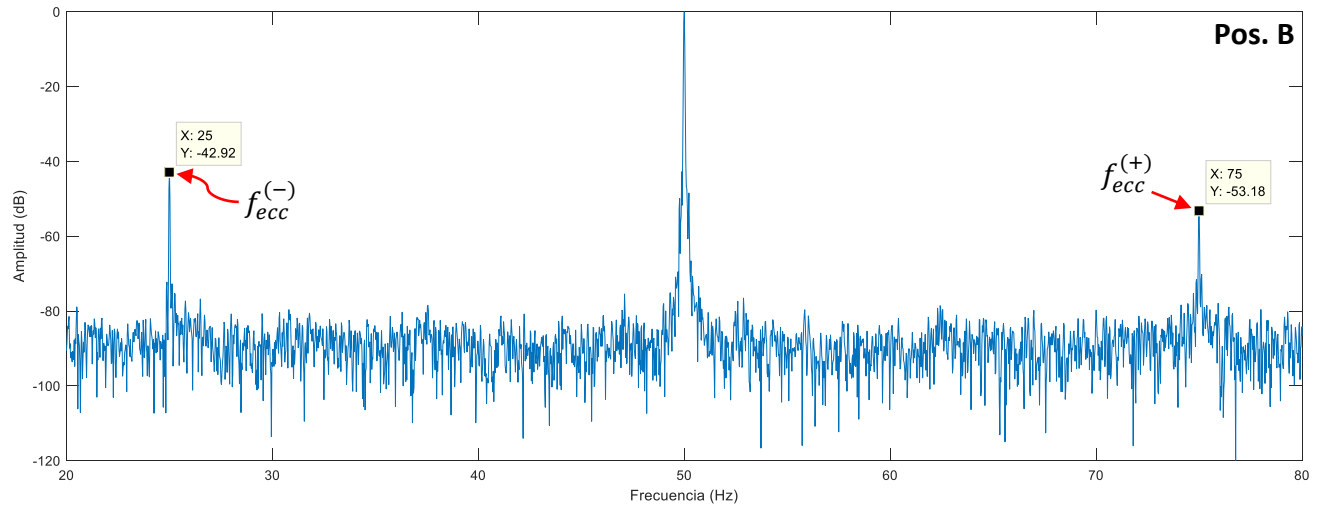


Figura 98. Análisis FFT posición sensor B: componentes por excentricidades (modo síncrono).

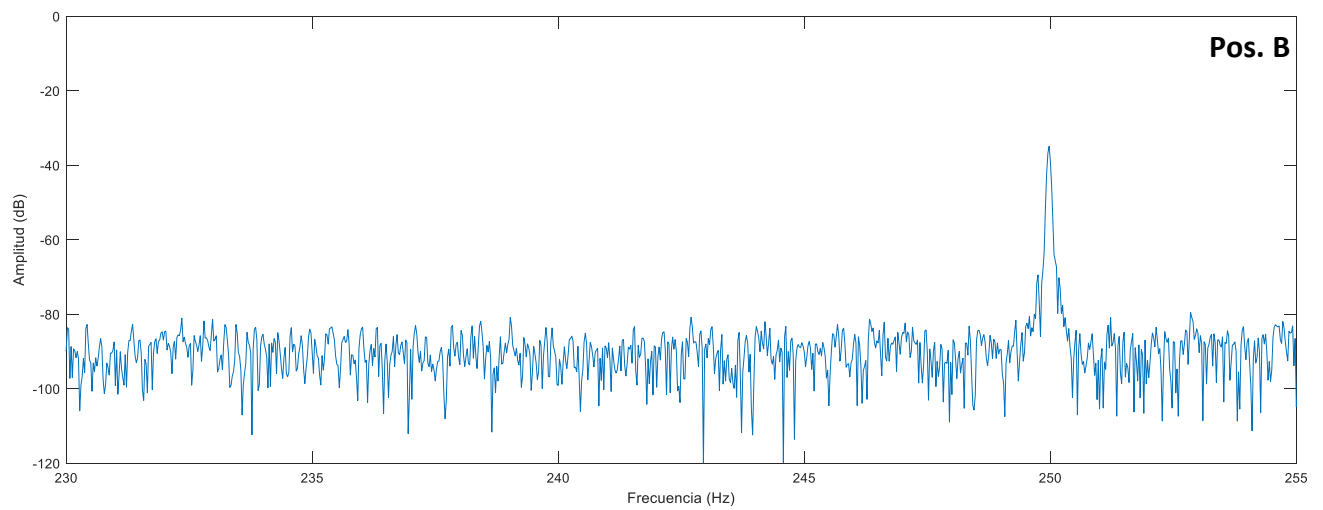


Figura 99. Análisis FFT posición sensor B: componentes cercanos al 5to armónico (modo síncrono).

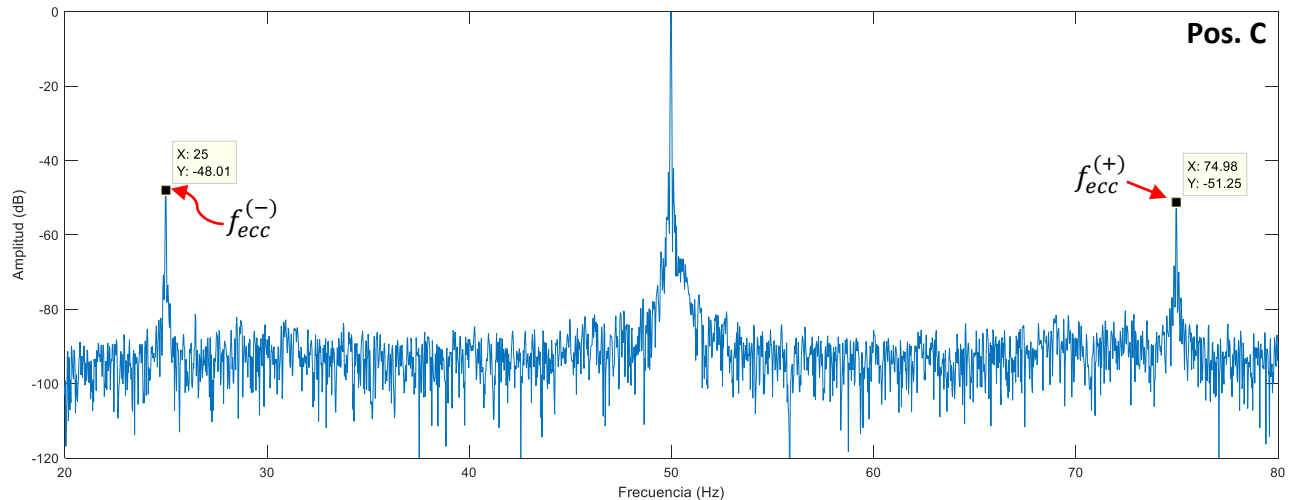


Figura 100. Análisis FFT posición sensor C: componentes por excentricidades (modo síncrono).

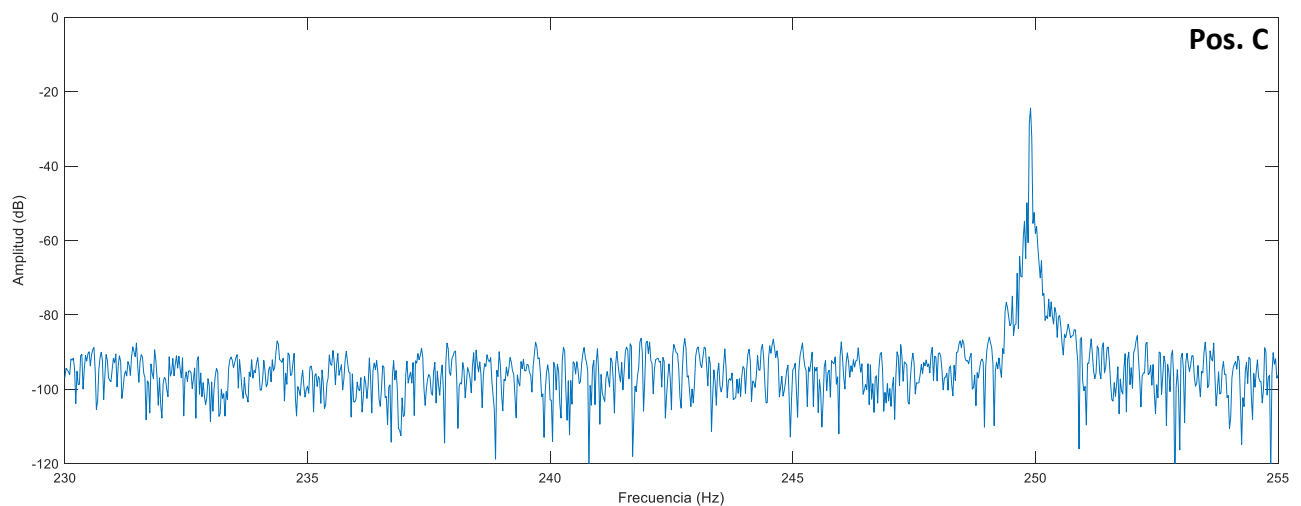


Figura 101. Análisis FFT posición sensor C: componentes cercanos al 5to armónico (modo síncrono).

Las Figura 96 - Figura 101 muestran el mismo análisis en régimen permanente de la MS3 con magnetización remanente en modo síncrono, enfocado a los componentes de excentricidad/desalineación y componentes cercanos al 5to armónico. Los armónicos cercanos al 5to orden no aparecen dentro del espectro FFT. Con respecto a la excentricidad se observa que la posición A tiene la mejor sensibilidad y visibilidad, cuyas amplitudes son las mayores. Por su parte, la posición C muestra las menores amplitudes. Una vez más destacar que existe una diferencia significativa entre los valores de amplitudes entre la pos. A y C.

Realizando el mismo análisis de interrelacionar los valores de amplitudes de excentricidad en los modos asíncrono vs síncrono, podemos observar para  $f_{ecc}^{(-)}$  no existe una diferencia significativa de amplitud entre los dos modos de operación o no al menos al mismo nivel que la MS1 y MS2, donde se observó un decremento de amplitud notorio. Para este caso, ambos valores son muy aproximados. De la

misma forma para  $f_{ecc}^{(+)}$  y considerando los valores medio de las pos. B y C (52.21 y 49.80 modo síncrono y asíncrono respectivamente) se observa que tampoco existe un decremento significativo. En base a lo comentado y analizado se podría decir que, de las tres máquinas, esta es la presentaría menos problemas por asimetrías rotóricas.

	MODO SÍNCRONO		MODO ASÍNCRONO	
	MS3		MS3	
Posición del sensor	$f_{ecc}^{(-)}$	$f_{ecc}^{(+)}$	$f_{ecc}^{(-)}$	$f_{ecc}^{(+)}$
A (axial)	33.31	44.26	31.53	-
B (axial y radial)	42.92	53.18	46.61	49.53
C (radial)	48.01	51.25	50.31	50.08
<b>Valor medio</b>	<b>41.41</b>	<b>49.56</b>	<b>42.82</b>	<b>49.80</b>

Tabla 9. Tabla comparativa de amplitudes [dB] de excentricidad (modo síncrono vs modo asíncrono).

A modo de resumen en la Tabla 10 se han recogido las amplitudes por excentricidad de las tres máquinas ensayadas. Considerando la  $f_{ecc}^{(-)}$ , se ha observado que es el componente que más sensibilidad al cambio de amplitud cuando se realiza la transición entre los modos de operación (asíncrono-síncrono). Con color amarillo y una flecha apuntando hacia abajo se denota el decremento de la amplitud. Por el contrario, el color rojo y una flecha apuntando hacia arriba indica que la amplitud se ha incrementado cuando se cambia de modo de operación.

Posición del sensor	MODO ASÍNCRONO						MODO SÍNCRONO					
	MS1		MS2		MS3		MS1		MS2		MS3	
	$f_{ecc}^{(-)}$	$f_{ecc}^{(+)}$	$f_{ecc}^{(-)}$	$f_{ecc}^{(+)}$	$f_{ecc}^{(-)}$	$f_{ecc}^{(+)}$	$f_{ecc}^{(-)}$	$f_{ecc}^{(+)}$	$f_{ecc}^{(-)}$	$f_{ecc}^{(+)}$	$f_{ecc}^{(-)}$	$f_{ecc}^{(+)}$
A (axial)	22.9	43	9.779	25.11	31.53	-	↓41.21	42.2	↓16.51	29.6	↓33.31	44.26
B (axial y radial)	30.69	40.06	38.94	49.57	46.61	49.53	↓51.92	43.3	↓43.59	46.94	↑42.92	53.18
C (radial)	36.73	51.33	44.69	48.31	50.31	50.08	↓51.5	48.29	↓46.83	46.4	↑48.01	51.25
<b>Valor medio</b>	<b>30.11</b>	<b>44.80</b>	<b>31.14</b>	<b>41</b>	<b>42.82</b>	<b>49.80</b>	<b>↓48.21</b>	<b>44.60</b>	<b>↓35.64</b>	<b>40.98</b>	<b>↑41.41</b>	<b>49.56</b>

Tabla 10. Tabla general de amplitudes [dB] de excentricidad (modo asíncrono vs modo síncrono) de las 3 máquinas síncronas.

### 5.3.3 Análisis régimen transitorio (durante el arranque). Máquina Síncrona 2 y 3 (MS2 y MS3).

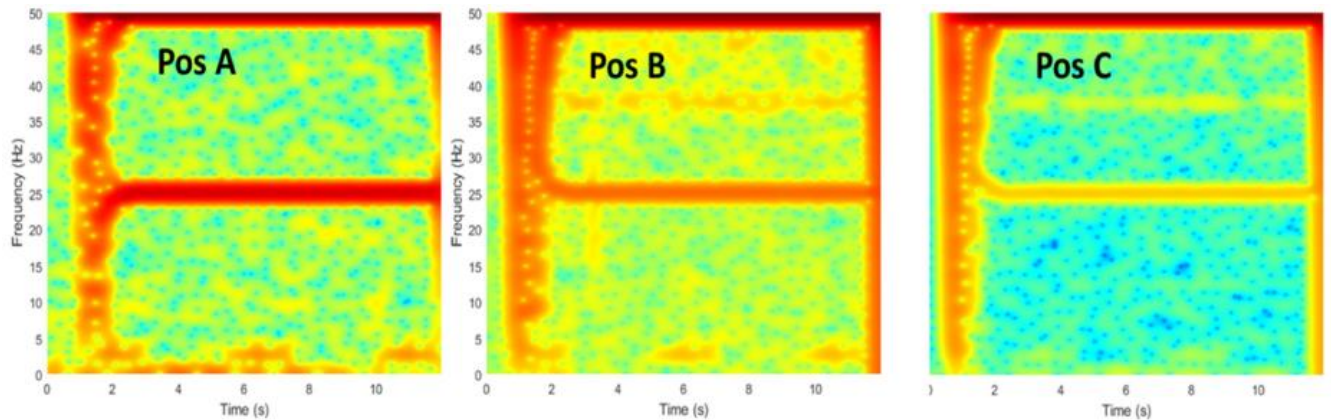


Figura 102. Análisis STFT para máquinas síncronas 2 y 3 (MS2 y MS3) con magnetización remanente.

La Figura 102 muestra el espectrograma STFT para los motores síncronos 2 y 3 los cuales presentan magnetización remanente en el rotor. Esta condición depende del contexto operacional en las cuales han estado sujetos lo largo de su ciclo de vida. Este fenómeno provoca un arranque más rápido, es decir, su transitorio es más corto, dificultando la identificación de las evoluciones características de las componentes mostradas teóricamente en la Figura 11. Una solución para mitigar el efecto de esta asimetría magnética es realizar un arranque a voltaje reducido permitiendo tener un transitorio más largo (prolongamiento del arranque del motor) y así poder identificar las evoluciones características de la señal fem en transitorio. El análisis en régimen transitorio con voltaje reducido al arranque para los motores síncronos 2 y 3 es mostrado a continuación.



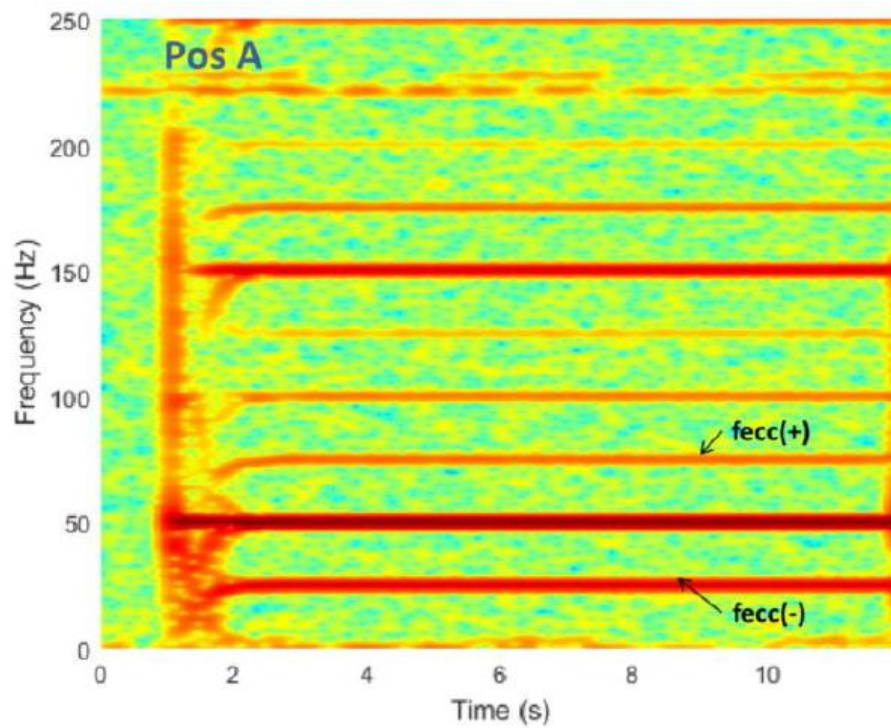


Figura 103. Análisis STFT de la señal fem durante el arranque (voltaje reducido) para el sensor localizado en la posición A.

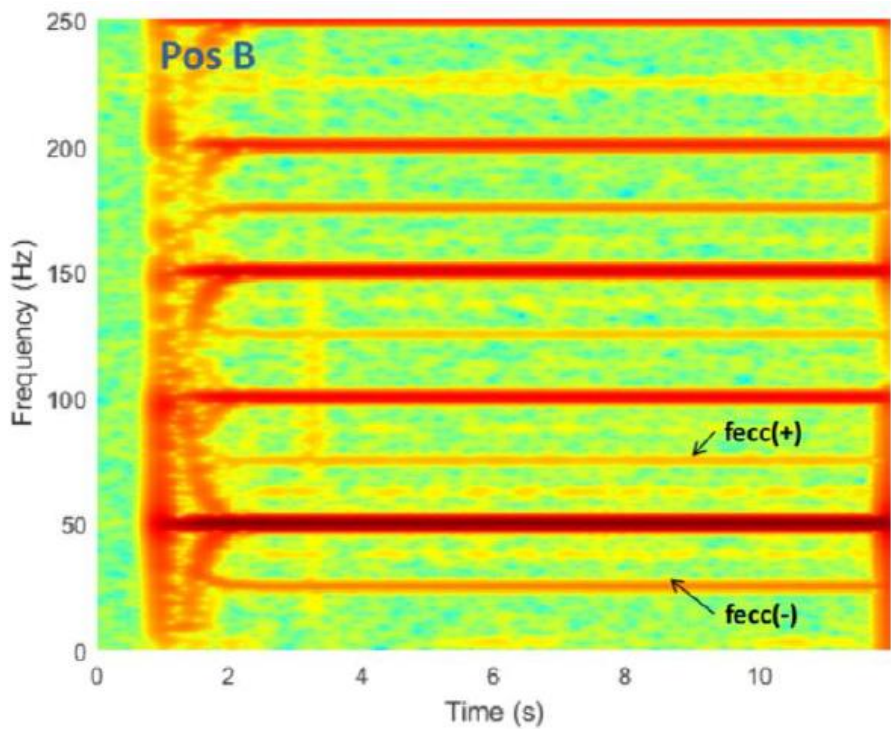


Figura 104. Análisis STFT de la señal fem durante el arranque (voltaje reducido) para el sensor localizado en la posición B.

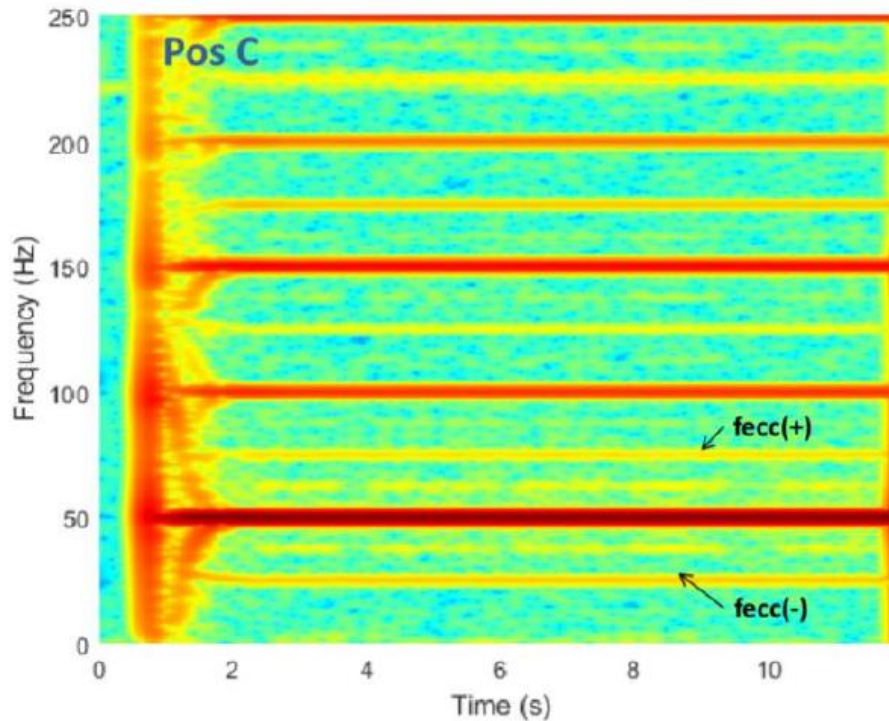


Figura 105. Análisis STFT de la señal fem durante el arranque (voltaje reducido) para el sensor localizado en la posición C.

Las Figura 103 a Figura 105 muestran los espectrogramas STFT de la señal fem al arranque del motor síncrono 2. Cabe resaltar que los motores 2 y 3 tienen cierto nivel de magnetización remanente en el rotor por lo que sus distribuciones tiempo-frecuencia fueron muy similares utilizando voltaje reducido para el arranque. Aun utilizando el mecanismo de arranque anteriormente descrito, el efecto de la magnetización remanente dificulta la identificación de las evoluciones características de las componentes especialmente para las componentes axiales  $s \cdot f$ ,  $3 \cdot s \cdot f$  y los armónicos laterales  $f \cdot (1 \pm 2 \cdot s)$ . Sin embargo, las componentes  $f_{ecc}^{(-)}$  y  $f_{ecc}^{(+)}$  aún son visibles para las tres posiciones del sensor. Esta misma característica apareció en el análisis en régimen permanente donde las componentes axiales y radiales no se observaron en el espectro FFT, pero los armónicos de excentricidad aún eran visibles.

# CAPÍTULO 6

## CONCLUSIONES

Este proyecto final de máster se ha centrado en estudiar la aplicabilidad del análisis de flujo de dispersión en régimen permanente y transitorio para detectar fallos (roturas de barras) en el devanado amortiguador, así como problemas de excentricidad/desalineación en una máquina síncrona. Se ha empleado las transformadas rápida y de tiempo reducido de Fourier para procesar los datos obtenidos durante las pruebas en laboratorio y así realizar el análisis de las fem capturadas. A raíz del análisis de los resultados, se han obtenido las siguientes conclusiones:

- 1) Tanto las componentes de excentricidad/desalineación como las componentes axiales  $s \cdot f$ ,  $3 \cdot s \cdot f$ , los armónicos laterales inferior y superior e incluso otras familias de armónicos como las cercanas al 5to orden asociadas a daños en el amortiguador, pueden ser fácilmente observables dentro del espectro FFT y espectrograma STFT de flujo -aun si estos coexisten- por lo que esta técnica puede ser implementada para una monitorización discontinua (periódica) o continua (tiempo real), además de constituir un buen complemento del diagnóstico de otras técnicas (por ejemplo; el análisis espectral de corrientes).
- 2) Se demuestra la factibilidad de realizar el análisis espectral FFT de flujo magnético a un motor síncrono operando en modo asíncrono en régimen permanente, ya que en este modo de operación se proporciona información de gran utilidad para el diagnóstico de los fallos considerados.
- 3) El análisis en régimen transitorio del flujo magnético ha demostrado ser una técnica de gran interés ya que los espectrogramas muestran un mayor contenido armónico lo que proporciona información adicional para el diagnóstico de fallos en el devanado amortiguador en motores síncronos.
- 4) En régimen permanente, el sensor de flujo en la posición A ha demostrado ser la de mejor sensibilidad y visibilidad de amplitudes para las componentes axiales y excentricidades. Por el contrario, las componentes radiales se visualizan de igual manera y muestran similares amplitudes para las tres posiciones de sensor. Por otro lado, en régimen transitorio, se observa la influencia de la posición del sensor sobre los resultados. Como se ha comentado, dependiendo de la posición del sensor ciertas componentes tienen una mejor visibilidad; sin embargo, otras no aparecen para cierta posición de sensor. Por tanto, para realizar un buen análisis en transitorio es necesario contar con la información de las tres posiciones de sensor para llevar a cabo un diagnóstico fiable de la condición del devanado amortiguador.
- 5) La magnetización remanente dificulta el diagnóstico de los fallos considerados; los espectros FFT (modo asíncrono) y espectrogramas STFT obtenidos bajo esta condición proporcionan poca información con respecto a los componentes axiales, armónicos laterales y familias de diferente orden. Por tanto, sólo el análisis FFT (modo síncrono) es de interés bajo tales condiciones.
- 6) Las amplitudes de las componentes a la frecuencia rotacional  $f \cdot [1 \pm (1 - s)/p]$  disminuyen al operar a velocidad de sincronismo. Particularmente  $f_{ecc}^{(-)}$  muestra una mayor sensibilidad al cambio de amplitud cuando se hace la transición asíncrono-síncrono. Esto indica cierta

dependencia entre la amplitud de esta componente y el nivel de daño en barras, el cual es observable al comparar los dos modos de operación. Por lo que el análisis de esta interrelación puede otorgar información muy valiosa para el diagnóstico.

- 7) Con lo estipulado anteriormente, se concluye que la máquina síncrona 1 cuenta con un cierto nivel de asimetrías (daños de barras), mientras que las máquinas 2 y 3 el diagnóstico se complica debido a la asimetría magnética inherente a estas.

Finalmente, los resultados y análisis de este proyecto final muestran la aplicabilidad y viabilidad de la técnica de flujo de dispersión; su naturaleza no invasiva, bajo coste y simplicidad la hace de gran interés. Esto queda ratificado por el hecho de que los fabricantes, ayudados por los avances en la electrónica de potencia e informática, están desarrollando nuevos sensores que integrados a la máquina misma podrán realizar un monitorizado en tiempo real, permitiendo así un desarrollo y aplicación de las técnicas de mantenimiento predictivo a las máquinas eléctricas rotativas.

---

---

# BIBLIOGRAFÍA

- [1] Smith M. Anthony and Hinchcliffe R. Glenn. “RCM – Gateway to World Class Maintenance”. Elsevier Butterworth–Heinemann, 2003.
- [2] Gulati, Ramesh. “Maintenance and Reliability Best Practices”. Industrial Press INC, 2009.
- [3] González Fernández Francisco Javier. Mantenimiento Industrial Avanzado. FC Editorial, 5ta edición, 2015.
- [3] Jardine Andrew K.S and Tsang Albert H.C. “Maintenance, Replacement and Reliability Theory and Applications”. CRC Press, 2da edición, 2013.
- [4] “Revista Predictiva 21”. Edición#27, septiembre 2019.
- [5] Tavares, Lourival. “Administración Moderna de Mantenimiento”. Novo Polo publicaciones. Publicación en español en 2000.
- [6] Macián Martínez Vicente, Tormos Martínez Bernardo y Olmeda González Pablo. “Fundamentos de Ingeniería del Mantenimiento”. Editorial Universitat Politècnica de Valencia, 1999.
- [7] Fernández Cabanas M., García Melero M., Alonso Orcajo G., Cano Rodríguez J. M., Solares Sariago J. “Técnicas para el Mantenimiento y Diagnóstico de máquinas Eléctricas Rotativas”. Barcelona: Marcombo Boixareu Editores; 1998.
- [8] Sen C. Paresh. “Principles of Electric Machines and Power Electronics”. John Wiley & Sons, 2da edición, 1996.
- [9] Blázquez Francisco, Rodríguez Jaime, Alonso M. Ángel, Veganzones Carlos. “Máquinas Síncronas y Máquinas de Corriente Continua”. Publicaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Universidad Politécnica de Madrid.
- [10] Deleroi, W. “Squirrel cage motor with broken bar in rotor, - physical phenomena and their experimental assessment”. International Conference on Electrical Machines, Budapest, 1982, pp. 767 – 771.
- [11] Ramírez- Nunez Juan A, Antonino-Daviu José A, Climente-Alarcón Vicente, Quijano-López Alfredo, Razik Hubert, Osornio-Rios Roque A, Romero-Troncoso Rene de J. “Evaluation of the Detectability of Electromechanical Faults in Induction Motors Via Transient Analysis of the Stray Flux”. IEEE Trans. Ind. Appl., vol.54, no.5. Sep/Oct 2018.
- [12] Antonino-Daviu José, Quijano-López Alfredo, Fuster-Roig Vicente and Llovera-Segovia Pedro. “Evaluation of the detectability of damper cage damages in synchronous motors through the advanced analysis of the stray flux”. January 2020.
- [13] Climente-Alarcón Vicente. “Aportación al Mantenimiento Predictivo de Motores de Inducción Mediante Modernas Técnicas de Análisis de la Señal”. Tesis doctoral, mayo 2012.

[14] Antonino-Daviu José, Popaleny Peter. “Detection of Induction Motor Coupling Unbalance and Misalignment via Advanced Transient Current Signature Analysis”. September 2018.

[15] Práctica 1. Descripción y arranque de los grupos polimórficos. Asignatura mantenimiento de máquinas e instalaciones eléctricas, curso académico 2017-2018. Universitat Politècnica de Valencia.

-

---

---

# ANEXO I

# JUSTIFICACIÓN

# ECONÓMICA

---

---

Toda implementación de un programa de mantenimiento predictivo debe ser económicamente viable. Normalmente las técnicas predictivas son implantadas en activos críticos o vitales en el proceso productivo donde una parada no-programada repercute en altos costes por indisponibilidad o pérdidas de facturación. Por tanto, el conocer el coste de implementación de la técnica predictiva es de suma importancia para estimar el retorno sobre la inversión.

Considerando el caso acontecido en el motor síncrono de 33MW y 11 kV, que operaba en una industria de Reino Unido mencionado en el apartado 2.4.6.1. Debido a la rotura de un gran número de barras del devanado amortiguador (más del 40%), el motor no podía arrancar. La planta estuvo parada durante 4 semanas lo que conllevó a pérdidas estimadas superiores a los 10 millones de euros. La inversión de esta técnica predictiva queda más que justificada, sabiendo que hoy en día, los métodos habitualmente utilizados por la industria para la detección por condición del devanado amortiguador se basan en inspecciones visuales del rotor “off-line”, introduciendo cámaras boroscópicas.

<b>Presupuesto de inversión</b>			
<i>Concepto</i>	<i>Unidades</i>	<i>Precio unitario (€)</i>	<i>Importe (€)</i>
Sonda de medición de flujo.	1 ud	30,00	30,00
Osciloscopio digital.	1 ud	6.300,00	6.300,00
Horas de medición en planta anual. Se considera frecuencia de inspección mensual.	12 hrs	25,00	300,00
Horas de análisis de las señales obtenidas anual. Incluye informe del estado de la máquina.	24 hrs	25,00	600,00
Curso de formación de personal en técnicas avanzadas en mantenimiento predictivo en motores eléctricos.	1 ud	750,00	750,00
Licencia Matlab (educacional)	1 ud	2.000,00	2.000,00
		<b>Inversión total (€)</b>	<b>9.980,00</b>

Tabla 11. Presupuesto de inversión de la técnica predictiva de flujo de dispersión.

Es por esto la importancia de conocer los costes por indisponibilidad y/o penalizaciones de aquellos activos cuya pérdida de la función conlleven a grandes costes de reparaciones y pérdidas de facturación. Mientras más grandes sean los costes mencionados, el monitorizado por condición se convierte imprescindible y por tanto la justificación económica se realiza más fácilmente.