

## Banco de Ensayos Experimental para la Validación de Técnicas de Detección y Diagnóstico de Fallas en las Máquinas Eléctricas Rotativas

Guillermo D. Yuchechechén<sup>a,\*</sup>, Lucas E. Ledee<sup>a</sup>, Gabriel C. Hermann<sup>a</sup>,  
Luis A. Barruffaldi<sup>b</sup>, Julio A. Potschka<sup>b</sup>, Manuel A. Mazzoletti<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Becario Proyecto de Investigación 16/1162 y 16/1152 - LIDEE, FI-UNaM

<sup>b</sup> LIDEE, FI-UNaM. Juan Manuel de Rosas 325 Oberá Misiones Argentina

e-mails: [guillermoyuchechechen@gmail.com](mailto:guillermoyuchechechen@gmail.com), [lucastledee@gmail.com](mailto:lucastledee@gmail.com), [cghermann95@gmail.com](mailto:cghermann95@gmail.com),  
[luisbarruffaldi@gmail.com](mailto:luisbarruffaldi@gmail.com), [ingjuliopotschka@yahoo.com.ar](mailto:ingjuliopotschka@yahoo.com.ar), [armando.mazzoletti@gmail.com](mailto:armando.mazzoletti@gmail.com)

---

### Resumen

Este trabajo describe las actividades desarrolladas para la construcción de un banco de ensayos experimental para máquinas eléctricas rotativas (MER) ubicado en el laboratorio del Departamento de Ingeniería Electromecánica. El banco está compuesto por un grupo motor/generador, un tablero general de protección, maniobra y control de accionamientos industriales (AC Drives). Con el fin de analizar el comportamiento de las MER ante diferentes averías, una máquina prototipo fue diseñada que presenta la particularidad de incorporar una falla de manera intensional en los bobinados del estátor. Esta modificación del bobinado cuenta con salidas adicionales en una de las fases para realizar cortocircuitos entre espiras de diversas severidades. La construcción del banco de ensayos permitirá realizar ensayos de laboratorios con instrumentación de precisión para la validación de las técnicas de detección y diagnóstico de falla propuestas por el grupo de investigación y, además, respaldar las actividades prácticas de las carreras de grado y de posgrado de la Facultad de Ingeniería.

**Palabras Clave** – Máquinas Eléctricas Rotativas, Banco de Ensayos, Averías en Bobinados.

### 1. Introducción

El banco de ensayos construido es el resultado de las actividades de investigación ejecutadas en el marco del proyecto denominado: “Diagnóstico de Avería en los Bobinados de Estátor de las Máquinas Eléctricas Rotativas Utilizando Señales Eléctricas”. Este proyecto consiste en el estudio, análisis e implementación de técnicas de detección y diagnóstico de fallas (DDF) en Máquinas Eléctricas Rotativas (MER) basado en la medición de señales eléctricas. Las técnicas propuestas en el marco del proyecto pueden consultarse en [1-4].

Para la validación de las técnicas de DDF en MER es fundamental contar con prototipos adecuados y con equipamiento de avanzada para la medición y el registro de las variables eléctricas, tensiones, corrientes, flujo magnético, entre otras. De esta manera se logra contrastar los resultados obtenidos mediante simulación numérica con los resultados experimentales medidos en bornes de una MER. Cabe mencionar que este tipo de bancos de ensayos pueden ser utilizados en otros centros de investigación, aunque, generalmente, estas instituciones se encuentran a grandes distancias de la Facultad de Ingeniería. Es por este motivo que surge la necesidad de contar con un banco de ensayo con la tecnología apropiada para la implementación de las técnicas de DDF.

El banco construido cuenta con diferentes tipos de máquinas eléctricas que pueden ser accionadas por equipos de usos industriales tales como variadores de velocidad y arrancadores suaves. Este trabajo expone las actividades realizadas en el procedimiento del armado del banco de ensayos, Finalmente se presentan algunos resultados experimentales obtenidos con equipos de medición de avanza tecnología.

## 2. Instalación del Banco de Ensayos

La construcción del banco se realizó en el laboratorio del Departamento de Electromecánica de la Facultad de Ingeniería. Como se observa en las Fig. 1 y Fig. 2, el banco de ensayos consiste en una bancada rígida montada en una plataforma de hormigón. El diseño fue realizado por el grupo de investigación y la fabricación se realizó en el taller de la facultad. Sobre la misma se montan dos MER de 2HP cada uno. Ambas máquinas se utilizan como prototipos para el estudio de diferentes tipos de fallas de origen eléctrico. Uno de ellos tiene la particularidad de incorporar averías en bobinados de manera intensional a través de salidas adicionales como se muestra en la Fig. 3. Estos terminales extras llegan a una bornera que posibilita realizar cortocircuitos entre espiras de distintas severidades en bobinados de una fase del motor (en la 3, 5, 10 y 20 espiras, además se puede acceder a la mitad de la bobina de una fase), como se muestra en la Fig. 4.



Fig. 1 – Armado del banco de ensayos



Fig. 2 – Montaje del banco de ensayos



Fig. 3 – Prototipo de MER desarrollada en el laboratorio



Fig. 4 – Bornera Externa para salidas adicionales

Para la protección y el control de las MER fueron construidos dos tableros eléctricos. El primero de ellos se muestra en la Fig. 5 para la protección y el accionamiento de las máquinas por medio de equipos eléctricos de uso industrial tales como los variadores de velocidad y los arrancadores suaves. El segundo, corresponde a un tablero seccional como se muestra en la Fig. 6 diseñado para cumplir dos propósitos: a) la medición y el registro de las variables eléctricas y, b) el control de los ensayos con las MER bajo estado de falla de manera segura.



**Fig. 5 – Tablero Eléctrico desarrollado para Accionamiento de las MER**



**Fig. 6 – Tablero Eléctrico de medición desarrollado**

### 3. Registros de señales empleando equipamientos de avanzada

Para el registro de las señales eléctricas fueron utilizados instrumentos de medición y registro de avanzada tecnología. Diversos softwares de entorno gráfico estudiados permitieron, por un lado, almacenar las señales eléctricas en tiempo real provenientes desde un adquisidor de señales digital y, por otro, visualizar en modo gráfico la evolución de las variables eléctricas medidas. Los primeros ensayos se realizaron utilizando un analizador de calidad de energía marca FLUKE 434 con 4 salidas de tensión y 4 de corriente mostrado en la Fig. 7. Además, el laboratorio cuenta con un osciloscopio digital de alta prestaciones de National Instruments NI USB-5133 [5], mostrado en la Fig. 8.



**Fig. 7 – Analizador de calidad de energía Fluke 434**



**Fig. 8 – Osciloscopio NI USB-5133**

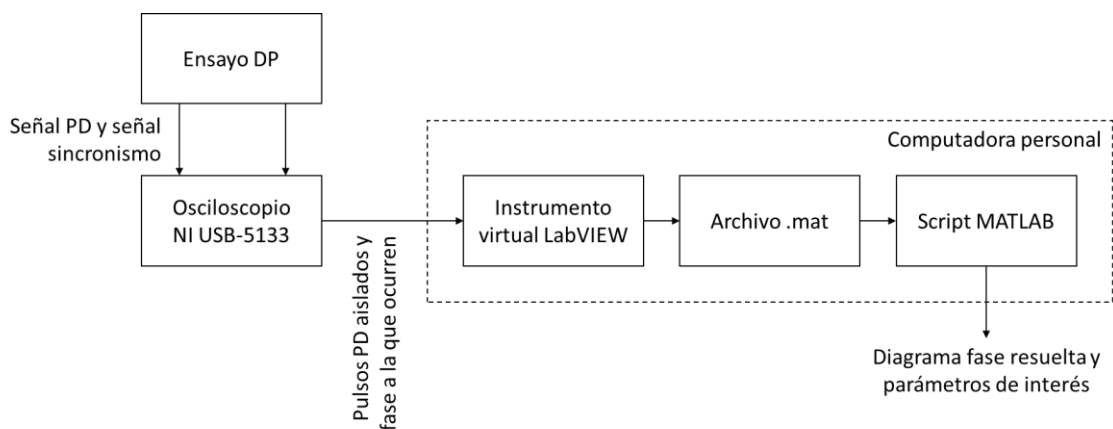


**Fig. 9 – Pinza amperométrica Fluke i400s**

El osciloscopio NI trae consigo puntas de prueba pasivas para medir tensión con atenuaciones  $\times 1$  y  $\times 10$  y ancho de banda equivalente al del osciloscopio. Se emplearon además para distintos ensayos pinzas amperométricas pasivas de marca Fluke modelo i400s, mostradas en la Fig. 9. Corresponde además la mención del uso de una computadora personal ejecutando diferentes herramientas de software aplicativos.

### 3.1. Desarrollo utilizando osciloscopio versátil empleando los entornos LabVIEW y MATLAB

El desarrollo se estructuró como una solución de dos partes, cada una ejecutándose sobre un entorno de desarrollo distinto. La primera parte consiste en un módulo que se ejecuta sobre LabVIEW, el cual realiza la configuración del osciloscopio, y la adquisición y almacenamiento de los datos pertinentes para su posterior procesamiento y análisis. La segunda parte consta de un script ejecutándose sobre el entorno MatLAB que procesa los datos adquiridos anteriormente y presenta gráficas e indicadores deseados. Puede apreciarse un diagrama esquemático del proceso desarrollado en la Fig. 10.

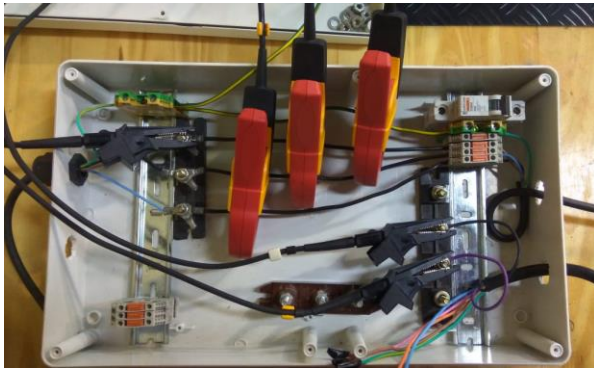


**Fig. 10 - Diagrama esquemático simplificado del proceso empleado en la segunda aproximación**

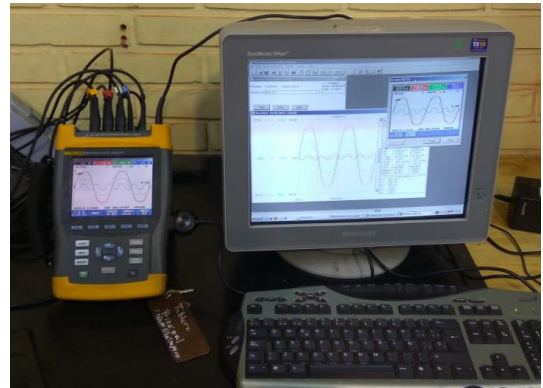
Un modo de disparo inmediato en el osciloscopio fue desarrollado, asegurándose de esta forma la continuidad de los puntos entre las mediciones. Además, se empleó una frecuencia de muestreo de 100 [kHz]. Por fuera de esto, los valores de rango vertical, impedancia de entrada y cantidad de puntos por adquisición se establecieron según los requisitos de la señal y las mediciones. El hecho de conseguir alta resolución en frecuencia permite analizar con gran precisión componentes armónicas que se originan por causa de diferentes averías en las máquinas eléctricas.

## 4. Resultados de ensayos experimentales

Se estudió la manera de adquirir las señales eléctricas mediante distintos instrumentos disponibles en el laboratorio. En primer lugar, se utilizó el analizador de calidad de energía FLUKE 434 para la adquisición de 3 tensiones de fase y 3 corrientes. En la Fig. 11 se muestra la disposición de los sensores de tensión y de corriente dentro del tablero seccional. En la Fig. 12 se muestra la visualización de las variables eléctricas medidas en una computadora personal.

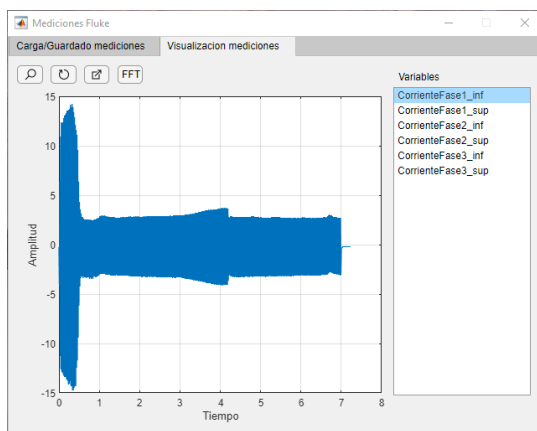


**Fig. 11 – Registro de señales eléctricas sobre bornes de la MER**

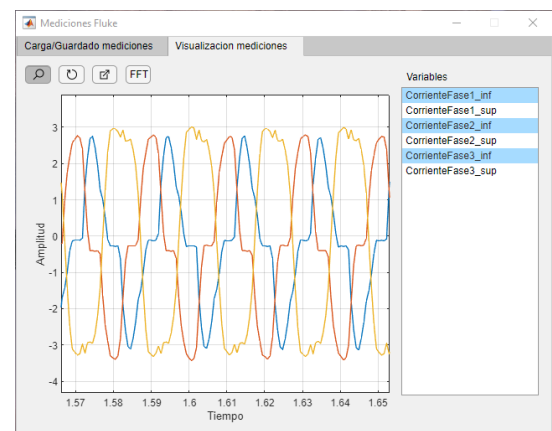


**Fig. 12 – Visualización de las señales medidas en la interface grafica**

Las mediciones realizadas con el analizador de calidad de energía presentan un inconveniente al momento de almacenarse en la computadora personal. El programa encargado de comunicarse con el instrumento de medición permite la exportación de los datos, de forma tal que puedan ser utilizados en otras aplicaciones peor de modo fragmentado. Para secuencias de archivos con varios fragmentos de datos, el trabajo manual de reensamblado se vuelve lento y tedioso. Por ello se desarrolló una herramienta de software, desarrollada bajo en entorno de MatLAB, que permita la automatización de este proceso, específicamente, empleando el entorno de desarrollo “App Designer”. Se depuró la herramienta de software empleando un número relativamente grande de conjuntos de datos con distintas mediciones y longitudes y con errores de formato introducidos de forma intencional. Finalmente, se logró el comportamiento deseado de la aplicación, pudiéndose detectar no solo la existencia de errores, sino también el archivo específico del conjunto que los presenta. En cuanto al ensamble de las mediciones, se puede mencionar un correcto funcionamiento del proceso, sin errores evidentes. Se presenta a modo de ejemplo un proceso de ensamblado y visualización, que consta de tres variables de corriente segmentadas en 36 archivos. En la Fig. 13 y la Fig. 14 se muestran distintas visualizaciones de los datos almacenados correspondientes a las corrientes de fase medidas.

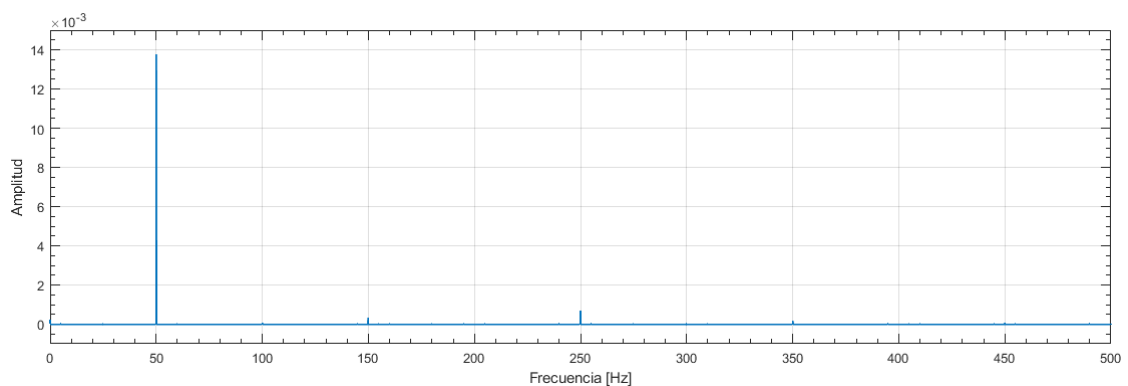


**Fig. 13 – Registro de señales eléctricas sobre bornes de la MER**



**Fig. 14 – Visualización de las señales medidas en la interface grafica**

Los resultados utilizando el osciloscopio NI se presentan en la Fig. 15. Durante el registro fueron adquiridos un total de 30 millones de puntos, no presentándose problemas en el proceso. Los datos fueron posteriormente procesados con un script en MatLAB para obtener, entre otros, el espectro en frecuencia de una corriente de estator mostrado en la figura. Dicha cantidad de puntos adquiridos posibilita la obtención de un espectro con elevada resolución en frecuencia, lo cual permite analizar con gran precisión de componentes armónicas que se originan por causa de diferentes averías en las máquinas eléctricas. Esta información es útil para el análisis de la firma de corriente (MCSA - *Motor Current Signature Analysis*). El sistema de monitoreo de corriente del estator en línea se ha utilizado para la detección de fallas del motor, para la cual se han propuesto varios enfoques buscando detectar diferentes tipos de fallas mecánicas internas como ser, barras rotas de los motores con rotor jaula de ardilla, fallas en los cojinetes, asimetría de entrehierro y desbalances en el rotor, entre otros [6].



**Fig. 15 - Espectro en frecuencia de corriente para una medición de 30M puntos**

La construcción del banco de ensayos permite respaldar las actividades prácticas de las carreras de grado y de posgrado de la Facultad de Ingeniería. Durante la ejecución del proyecto fueron implementados nuevos laboratorios experimentales en las asignaturas de Maquinas Eléctricas. En la Fig. 16 se muestra una clase práctica en donde se explica el procedimiento y la implementación de diferentes tipos de arranques de motores con drives de velocidad variable.



**Fig. 16 – Alumnos de la Facultad de Ingeniería realizando mediciones en el banco de ensayos**

## 5. Conclusiones

Este trabajo presentado muestra los avances de resultados obtenidos de las actividades realizadas en el laboratorio del Departamento de Ingeniería Electromecánica en el marco de un proyecto de investigación. Estas tareas consistieron en la construcción de un banco de ensayos para máquinas eléctricas rotativas (MER) que consiste en una bancada rígida montada en una plataforma de hormigón para el montaje de diferentes tecnologías de MER. Para la protección y el control de los ensayos experimentales fueron construidos dos tableros eléctricos, uno principal y un seccional. El primero de ellos, soporta dispositivos de protección y maniobra para los accionamientos de uso industrial instalados como los variadores de velocidad y los arrancadores suaves. El segundo, cumple la función de facilitar las mediciones y el registro de las variables eléctricas y, brindar seguridad durante los ensayos en donde las MER funcionan bajo estado de falla.

Dado que el proyecto investiga sobre las técnicas de detección y diagnóstico de fallas (DDF) en MER basado en la información contenida en señales eléctricas, se requieren instrumentos especiales para la adquisición y la visualización de las variables eléctricas medidas. Por lo tanto, fueron estudiadas dos soluciones factibles de aplicación mediante distintos instrumentos disponibles en el laboratorio. En primer lugar, se utilizó un analizador de calidad de energía FLUKE 434 que permite la adquisición de 8 señales eléctricas en paralelo a tasas de muestreo suficientes para los objetivos del proyecto. Con este equipamiento se logró registrar las formas de ondas de 3 tensiones y 3 corrientes durante 8s registradas sobre bornes de las MER. Como segunda opción, se utilizó un osciloscopio digital de alta prestaciones de la marca National Instruments NI USB-5133. En esta aplicación se logró tasas de muestreo de 100 [kHz]. Sobre el banco de pruebas se lograron adquirir y visualizar las variables eléctricas durante ensayos experimentales pilotos incorporando averías en los bobinados del estátor de una MER prototipo. La construcción del banco de ensayos permitió la implementación de nuevos laboratorios para las carreras de grado y posgrado en la Facultad de Ingeniería.

## Referencias

- [1] Manuel A. Mazzoletti, Luis A. Barruffaldi, Julio A. Potschka, Mario O. Oliveira, Guillermo R. Bossio; “Un Modelo de la Máquina de Inducción con Falla en los Bobinados de Estator considerando los armónicos de la red”; en *2018 IEEE Congress of Argentina (ARGENCON)*, Junio 2018, pp. 1–6.
- [2] G. D. Yuchechen; M. A. Mazzoletti, “Efectos de un Cortocircuito Entre Espiras en Bobinados de la Máquina de Inducción utilizando la Teoría de la Potencia Instantánea”; en *8va Jornada de Investigación, Desarrollo Tecnológico, Extensión y Vinculación (JIDETEV)*, Agosto 2018, FIO UNaM, Oberá, Misiones.
- [3] G. D. Yuchechen; M. A. Mazzoletti; and G. R. Bossio; “Effects of Stator Winding Interturn Short-Circuit Faults of the IM by Using Instantaneous Power Theory”; in *2018 Argentine Conference on Automatic Control (AADECA)*, Nov 2018, pp. 533-538.
- [4] M. A. Mazzoletti, G. D. Yuchechen, M. O. Oliveira, M. C. Pezzani, P. D. Donolo and G. R. Bossio, “Validación Experimental de un Modelo de la MI con Falla en los Bobinados de Estátor incluyendo los Armónicos de la Red,” in *2019 XVIII Workshop on Information Processing and Control (RPIC)*, En prensa.
- [5] National Instruments, «NI USB-5133 DEVICE SPECIFICATIONS,» 2015.