

“Desarrollo de un equipo para realización de mantenimiento predictivo en motores asíncronos de gran porte”

Castelli, Marcelo - Universidad de Montevideo. – IEEE Member
Andrade, Marcos – ALFEX S.A. – IEEE Senior Member
Portillo, Álvaro – ALFEX S.A. – IEEE Senior Member
Daoudian, Nicolás – ALFEX S.A. – IEEE Student Member
Farinella, Diego - Universidad de Montevideo – IEEE Student Member
Casas, Natalia – ALFEX S.A.

Resumen

En este artículo se presenta el proyecto de desarrollo de un nuevo equipo para la realización de mantenimiento predictivo en motores rotativos asíncronos de gran porte. Se describen las motivaciones que han planteado el desarrollo que se está llevando adelante, así como los estudios analíticos y la metodología de trabajo empleada para la detección de distintos fallos en los motores. Finalmente se muestran ensayos preliminares que se han realizado en motores industriales con el fin de validar la propuesta presentada.

Introducción

Los motores eléctricos de inducción representan más del 95% de los motores utilizados a nivel industrial, por lo cual una breve interrupción en el correcto funcionamiento de un proceso industrial, causada por el fallo de un motor asíncrono, conlleva una pérdida tanto en la producción como en los ingresos.

La industria moderna requiere que los motores trabajen el mayor tiempo posible sin fallas, por lo que muchas compañías necesitan emplear técnicas de mantenimiento predictivo en sus máquinas rotativas. Sin embargo, al día de hoy, para realizar diagnósticos predictivos es necesario detener el motor y tomar mediciones.

En el ámbito nacional, el parque de motores trifásicos de inducción de gran porte se encuentra en continuo crecimiento. Debido a los altos costos de estos motores, no es económicamente viable poseer un equipo extra para reemplazo en caso de falla del motor principal; por lo cual el desarrollo de un equipo que permita monitorizar y determinar el estado del motor sin necesidad de realizar una parada en el proceso industrial permite brindar un servicio de suma utilidad para la empresa.

Si bien internacionalmente existen dispositivos que permiten determinar ciertos fallos en motores asíncronos durante el funcionamiento de los mismos, estos equipos son muy costosos, lo cual hace inviable su implementación en el mercado local y las funciones que poseen son acotadas para realizar un análisis exhaustivo de las posibles causas de fallo. En este sentido, la innovación propuesta pretende aumentar el standard de calidad de servicio con respecto a los equipos existentes en el mercado.

Dentro de los fallos más comunes para puntualizar se encuentran los siguientes: roturas de barras del rotor, cortocircuito de las bobinas del estator, excentricidades en el entrehierro de la máquina, desgaste de rodamientos, etc.

Un punto crucial en el análisis de señal de corriente en motores eléctricos (MCSA) se debe a que esta señal es producida por el campo magnético variable del rotor. Por lo que dicha señal conlleva toda la información necesaria para el diagnóstico del estado del motor [1].

La empresa ALFEX S.A., en conjunto con el CITEM de la Universidad de Montevideo, ha presentado un proyecto al Programa de Desarrollo Tecnológico de Uruguay (PDT), el cual se encuentra en la fase final de evaluación, que tiene como objetivo general

obtener un nuevo producto, que le permita a dicha empresa poder brindar un servicio asociado al mantenimiento predictivo de motores asíncronos de gran porte. Durante la duración del proyecto se realizarán una serie de tareas conducentes al desarrollo de un dispositivo que permita predecir fallos típicos en motores asíncronos de gran tamaño a partir de la sensorización de parámetros claves de operación del motor y el posterior tratamiento de los datos obtenidos. De la misma forma, se planteará una metodología de diagnóstico de fallos en motores asíncronos que permita facilitar la operación del dispositivo a desarrollar y reducir los costos de sensorización y procesamiento de los datos.

A continuación se detallan algunos fundamentos cualitativos sobre análisis de defectos en motores rotativos de gran porte, los cuales han dado origen a la metodología de ensayos a realizar durante la ejecución del proyecto. Se presentan ejemplos de métodos de detección de defectos en motores rotativos y posteriormente se describe un ejemplo de metodología de ensayo para uno de los defectos identificados.

Fundamentos cualitativos sobre análisis de defectos en motores rotativos de gran porte.

a. Detección de Barras rotas.

Para un motor trifásico de corriente alterna de P pares de polos, con una velocidad sincrónica N_s , se cumple que:

$$f_1 = N_s \cdot P$$

$P = N^\circ$ pares de polos $f_1 =$ frecuencia de alimentación de las bobinas del estator (Hz) $N_s =$ Velocidad de sincronismo (rev/seg)
--

Si la simetría del rotor es perfecta entonces solo existe un campo magnético giratorio sincrónico.

Definiendo el deslizamiento del rotor como:

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s}$$

Con: $N_r =$ Velocidad del rotor

Entonces,

$$f_2 = (N_s - N_r) \cdot P$$
$$f_2 = s \cdot N_s \cdot P$$

Siendo: $f_2 =$ frecuencia de la corriente del rotor
--

La velocidad de rotación del campo magnético producido por la corriente de los conductores del rotor con respecto al estator es:

$$N_r + N_2 = N_r + N_s - N_r = N_s$$

La rotura de barras del rotor genera una asimetría en el diseño, lo cual produce un campo magnético rotativo de sentido contrario al giro del rotor:

$$N_s - N_r = s \cdot N_s$$

Si se sitúa un observador en el estator, este aprecia un campo magnético rotativo (N_b) hacia atrás y hacia adelante producido por las barras rotas.

Como es un campo pulsante, este se descompone en dos campos giratorios a velocidad relativa $\pm N_b$ por lo tanto el que va hacia delante va a girar con una velocidad absoluta $N'_b = N_r + s.N_s = N_s$ por lo que no se aprecia en el análisis de frecuencias.

$$N_b = N_r - s.N_s$$

siendo :

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s}$$

$$N_r = N_s(1 - s)$$

Por lo tanto;

$$N_b = N_s - 2.s.N_s$$

Expresándolo en términos de:

- frecuencia (f_b)
- Número de pares de polos

$$f_b = (N_s - 2.s.N_s).P$$

$$f_b = \left(\frac{f_1}{P} - 2.s.\frac{f_1}{P}\right).P$$

$$f_b = f_1 - 2.s.f_1$$

$$f_b = f_1(1 - 2.s)$$

f_b es la frecuencia a la cual el campo magnético rotativo corta las bobinas del estator induciendo así, una corriente de frecuencia f_b .

Esto significa que f_b es la doble frecuencia de deslizamiento que se manifiesta a una distancia $2.s.f_1$ por debajo de la frecuencia de alimentación del motor f_1 .

Las oscilaciones en velocidad y torque que ocurren a la frecuencia $2.s.f_1$ inducen la banda superior a una distancia $2.s.f_1$ de la frecuencia de alimentación [2] [3].

$$f_b = f_1(1 \pm 2.s)$$

b. Detección de cortocircuito en el bobinado.

Con respecto de los fallos en los bobinados, éstos se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Cortocircuito de espiras contiguas
 - El motor puede seguir operando durante un tiempo incierto.
- Cortocircuito entre bobinas de una misma fase.
 - El motor puede seguir operando durante un tiempo incierto.
- Cortocircuito entre fases distintas
 - El motor falla y el guardamotor desconecta la alimentación de potencia del motor.
- Circuito abierto en una fase
 - El motor puede seguir operando dependiendo de la carga a la que se lo someta y del equipo de protección que tenga.

Ecuación predictiva para el diagnóstico de cortocircuitos en estator mediante el análisis de señal de corriente en motores eléctricos (MCSA):

Estudios previos han demostrado que la siguiente ecuación da los componentes de la onda de flujo de entrehierro que son función de espiras cortocircuitadas.

$$f_{st} = f_1 \cdot \left\{ \frac{n}{p} \cdot (1 - s) \pm k \right\}$$

Donde

- f_{st} = Frecuencias de componentes de onda que son función de espiras cortocircuitadas
- f_1 = Frecuencia de alimentación
- $n = 1, 2, 3, \dots$
- $k = 1, 3, 5, \dots$
- p = pares de polos
- s = deslizamiento

El diagnóstico de espiras cortocircuitadas via MCSA está basado en la detección de los componentes de frecuencia dados por la ecuación anterior. Las ondas de flujo rotativo a esas frecuencias inducen los correspondientes componentes de corriente en el bobinado del estator [4].

c. Detección de excentricidad del rotor.

Existen dos clases de excentricidades las cuales no son mutuamente excluyentes. Se conocen como excentricidad estática y dinámica.

La excentricidad estática se produce cuando la posición de mínima longitud del entrehierro radial está fija en el espacio. Esta puede ser causada por:

- Núcleo del estator ovalado.
- Posicionamiento incorrecto del rotor
- Posicionamiento incorrecto del estator.

Siempre existe un nivel inherente de excentricidad estática debida a defectos de fabricación u holgura.

La excentricidad dinámica tiene lugar cuando la longitud mínima del entrehierro gira con el rotor, siendo así función del espacio y tiempo.

Esta puede ser causada por:

- Sección exterior del rotor no concéntrica con el eje.
- Deformación por temperatura.
- Desgaste de rodamientos.

Los fabricantes de motores acostumbran especificar la holgura radial total. O sea, la excentricidad estática más la dinámica. Siendo esta, por lo general, expresada en porcentaje de entrehierro nominal [2] [5].

La ecuación que rige la excentricidad total es:

$$g(\phi, t) = g \cdot (1 - e_s \cdot \cos \phi - e_d \cdot \cos(\omega t - \phi))$$

Donde:

- g = longitud del entrehierro
- e_s = Excentricidad estática
- e_d = Excentricidad dinámica
- ω = Velocidad angular del rotor
- ϕ = distancia angular alrededor del entrehierro

La frecuencia patrón de la excentricidad es:

$$f_{ec} = f_1 \cdot \left[(r \pm n_d) \cdot \left(\frac{1-s}{p} \right) \pm n_{ws} \right]$$

Donde:

- f_{ec} = Frecuencia de excentricidad
- f_1 = Frecuencia de alimentación.
- r = N° de ranuras.
- $n_d = \pm 1$
- $n_{ws} = 1, 3, 5, 7$
- s = deslizamiento

d. Desgaste de rodamientos

Las excentricidades en el entrehierro de la máquina causan variaciones en la densidad de flujo, lo cual produce cambios visibles en el espectro de corrientes del estator a frecuencias predecibles.

El análisis realizado con el fin de predecir excentricidades en el rotor también puede ser utilizado con el fin de determinar el desgaste de los rodamientos del motor, pudiéndose aproximar las bandas de frecuencia inferiores y superiores, por las siguientes expresiones [5] [6]:

$$\begin{aligned} f_0 &= 0.4 * n * f_{rm} \\ f_1 &= 0.6 * n * f_{rm} \end{aligned} \quad [6]$$

Donde:

- f_0 = Frecuencia inferior
- f_1 = Frecuencia superior.
- f_{rm} = Frecuencia de giro mecánica de la máquina
- n = Número de bolas

Este análisis puede ser complementado con la realización de un análisis de vibraciones, con el fin de determinar de forma certera el desgaste de los rodamientos del motor.

Metodología de Ensayo

A continuación se presenta un ejemplo de metodología de ensayos a utilizar en el caso de barras rotas en el rotor.

Este ensayo es realizado con el motor trabajando a plena carga.

a. Cálculo del deslizamiento a plena carga (s_{pc})

$$s_{pc} = \frac{N_s - N_{pc}}{N_s}$$

Siendo N_{pc} la velocidad de giro del rotor a plena carga.

- b. Cálculo de la frecuencia doble de banda a plena carga:

$$f_b = f_1(1 \pm 2.s_{pc})$$

- c. Se procede a relevar el valor de la corriente consumida I_{med} .
- d. Se compara la corriente medida I_{med} con la corriente medida I_N
Si I_N es mayor que I_{med} entonces el rotor está girando a mayor velocidad que la velocidad correspondiente a plena carga. Lo que significa que $f_{b, real} < f_b$ ya que el deslizamiento (s) va a ser menor.
- e. Se debe seleccionar una resolución adecuada para efectuar una sensorización precisa de la señal de corriente. Permitiendo inspeccionar la onda para la detección de bandas laterales.
- f. Se realiza un FFT (Fast Fourier Transformer) con el fin de realizar una interpretación adecuada de las señales muestreadas.
- g. Interpretación de los datos:

Estimación del número de barras rotas (n)

$$n = \frac{2.R}{\frac{N}{10^{20}} + P}$$

siendo:

R =Números de ranuras del rotor

N =diferencia en dB entre picos superior e inferior contra frecuencia de alimentación.

$$N = \frac{(f_1 - f_{b1}) + (f_1 - f_{b2})}{2}$$

$$N = \frac{2.f_1 - f_{b1} - f_{b2}}{2}$$

P es el Número de pares de polos.

- h. Diagnóstico
i. Resultados

Desarrollo de un Banco de Pruebas

La forma más práctica y sencilla para comprobar el sistema de medida y de verificar resultados consiste en construir un banco de pruebas, donde se pueda analizar el comportamiento de motores con diferentes fallas.

El banco de ensayos debe contemplar la forma de cargar el motor entre el 50 y el 100% de su potencia nominal y de mantener la carga constante en el eje.

Varias formas se utilizan para obtener la carga en el eje; la solución más usual consiste en acoplar un generador al eje del motor y conectar resistencias en el circuito del generador para que disipen la potencia que sea necesaria.

Una forma más eficiente consiste en conectar dos motores de inducción acoplados a través de poleas de diferentes diámetros.

El motor que se desea ensayar se acopla a la polea de mayor diámetro. El segundo motor, acoplado a la polea de menor diámetro, operará a mayor velocidad que la de sincronismo, operando como generatriz asíncrona.

Este conjunto generador motor, conectados ambos a la red presenta una forma muy eficiente de operación, ya que la potencia consumida por el generador es devuelta a la red y no se necesitan resistencias.

Solamente la diferencia de potencias entre el motor y generador debe ser provista por la red.

Variando la relación de diámetro de las poleas puede variarse la carga que soporta el motor a ensayar.

El motor operará con un deslizamiento s_{MOT} positivo del orden de 2 a 3%.

El motor que se utiliza como carga operará a una velocidad:

$$n_{GEN} = \frac{D_{MOT}}{D_{GEN}} n_{MOT}$$

Siendo su deslizamiento

$$s_{GEN} = 1 - \frac{D_{MOT}}{D_{GEN}} (1 - s_{MOT})$$

Donde s_{GEN} es el deslizamiento de la máquina que actuará como generador y D_{MOT} y D_{GEN} son los diámetros respectivos de las poleas de cada máquina.

Si s_{GEN} es negativo, lo que corresponde a que la velocidad de giro es mayor que la velocidad de sincronismo, la máquina actuará como generador.

La red debe entregar la potencia activa correspondiente a la diferencia de potencias consumida por el motor y la entregada de nuevo a la red por el generador, o sea, solamente las pérdidas de ambas máquinas.

En forma aproximada

$$P_{RED} = \text{Perd}E_{GEN} + \text{Perd}E_{MOT} + P_{mec} \approx \frac{3r_{2MOT}^2 I_{2MOT}^2}{s_{MOT}} + \frac{3r_{2GEN}^2 I_{2GEN}^2}{s_{GEN}} + P_{mec}$$

La red debe entregar toda la potencia reactiva necesaria para la operación de motor y generador.

$$Q \approx \frac{V^2}{X_{mMOT}} + \frac{V^2}{X_{mGEN}} + 3X_{ccMOT} I_{2MOT}^2 + 3X_{ccGEN} I_{2GEN}^2$$

Donde

r'_{2MOT} = Resistencia del bobinado rotórico referido al estator para el motor

r'_{2GEN} = Resistencia del bobinado rotórico referido al estator para el generador

X_{ccMOT} = Reactancia de cortocircuito del motor

X_{mMOT} = Reactancia magnetizante paralelo del motor

X_{mGEN} = Reactancia magnetizante paralelo del generador

X_{ccGEN} = Reactancia de cortocircuito del generador

I'_{2MOT} = Corriente del rotor, referida al estator para el motor

I'_{2GEN} = Corriente del rotor, referida al estator para el generador

Actualmente el proyecto se encuentra en fase de montaje y sensorización del banco de ensayos planteado anteriormente, no obstante ya se han realizado ensayos en motores industriales, con el fin de validar el desarrollo presentado. Sobre este banco de ensayos se forzarán los defectos tipificados previamente y se relevarán datos de interés para su posterior procesamiento.

Sensorización

Con el fin de obtener la información necesaria para determinar los efectos de cada uno de los desperfectos se realizan medidas de corriente, vibración, velocidad, etc. con los siguientes equipos:

Pinzas amperimétricas.

Acelerómetros.

Sensores de temperatura.

Sensores de velocidad.

Ejemplo de ensayos realizados

Se han realizado ensayos en motores industriales con el fin de corroborar de forma práctica los resultados teóricos expuestos anteriormente. A modo de ejemplo, se cita el ensayo realizado en un motor de 750kW con el fin de corroborar el estado general del mismo.

Datos del motor a ensayar:

POTENCIA	750 kW
RPM NOMINAL	1450
TEMPERATURA TERMINALES	35 °C
I Nominal	82 A
V Nominal	6000V

A continuación se presentan los resultados obtenidos en de dicho ensayo:

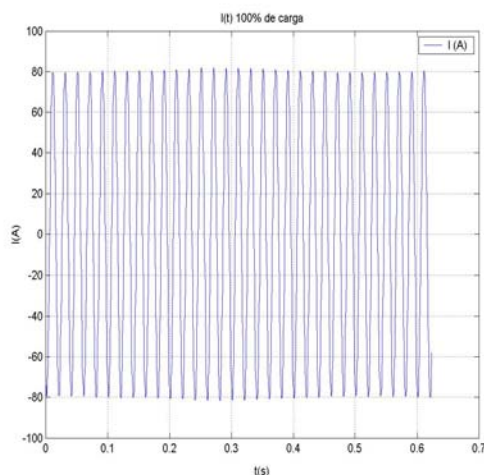


Gráfico 1: Corriente en función del tiempo (estado estacionario)

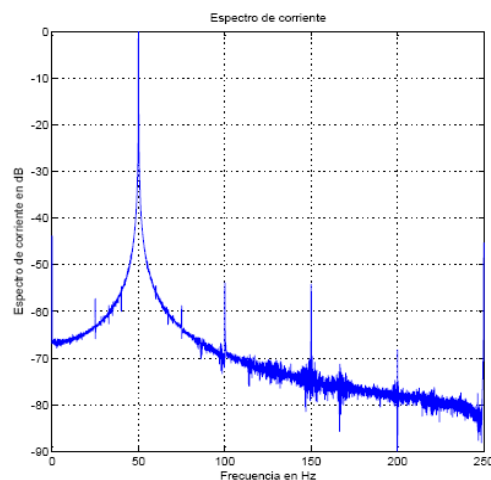


Gráfico 2: Espectro de corriente

De los gráficos 1 y 2 se deduce que el estado del motor con respecto a los desperfectos mencionados anteriormente es muy bueno. En el gráfico 3 se puede apreciar una parte del gráfico 2 ampliada, con el fin de relevar el estado de las barras del motor.

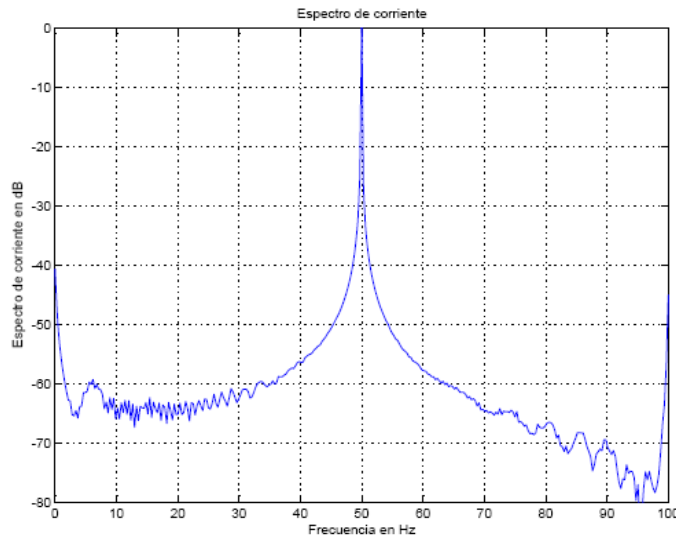


Gráfico 3: Espectro de corriente ampliado sobre el armónico principal

También se han realizado sobre el mismo motor ensayos de vibraciones, a fin de determinar el nivel de balance del motor. Para esto se realizaron medidas en dos ejes ortogonales utilizando dos acelerómetros modelo AC – 102. Los datos obtenidos se encuentran reflejados en el Gráfico 4, pudiéndose constatar la no existencia de desbalance mecánico del motor.

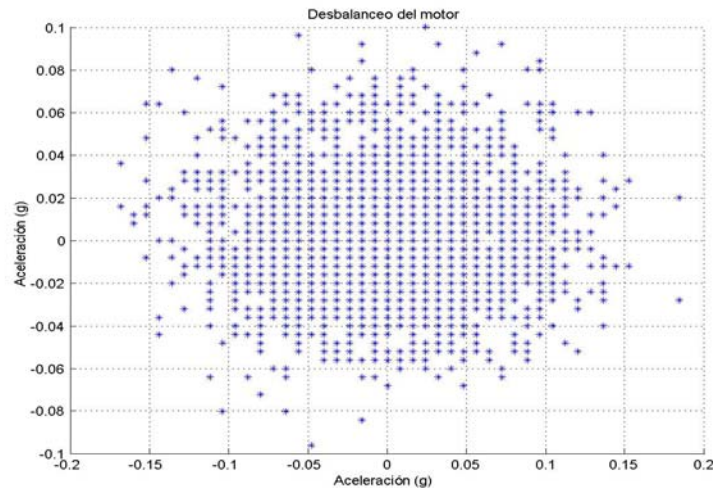


Gráfico 4: medida de vibraciones mecánicas

Los ensayos presentados anteriormente reflejan una parte de los ensayos a realizar en el momento de culminar el desarrollo, pudiéndose en ese momento realizar un diagnóstico general del motor en el cual se refleje el estado del mismo en relación a los fallos más típicos que pueden suceder, los cuales han sido identificados y tipificados previamente.

Conclusiones

Los ensayos realizados en motores industriales han arrojado resultados alentadores que permiten confiar en que el desarrollo presentado será realizado sin mayores inconvenientes, pudiéndose de esta forma cumplir con los objetivos del proyecto, brindando un servicio de mantenimiento predictivo para motores asíncronos de gran porte, de alta calidad a un costo reducido, aumentando de esta manera los estándares de mercado que se presentan hoy en día a nivel nacional.

Bibliografía

[1] On-Field Experience With Online Diagnosis of Large Induction Motors Cage Failures Using MCSA. Alberto Bellini, Fiorenzo Filippetti, Giovanni Franceschini, Carla Tassoni, Renzo Passaglia, Massimo Saottini, Giorgio Tontini, Mauro Giovannini, and Alessandro Rossi. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 38, Nº. 4, July/August 2002.

[2] Motor Current Signature Analysis to Detect Faults in Induction Motor Drives-Fundamentals, Data Interpretation, and Industrial Case Histories. William T. Thomson and Ronald J. Gilmore. Proceedings of 32rd Turbomachinery Symposium, 2003.

[3] Quantitative Evaluation of Induction Motor Broken Bars by Means of Electrical Signature Anlysis – Alberto Bellini, Fiorenzo Filippetti, Giovanni Franceschini, Carla Tassoni, and Gerald B. Kliman, Transactions on Industry Applications, Vol. 37, Nº 5, September/October 2001.

[4] Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults – William T. Thomson and Mark Fenger. IEEE Industry Applications Magazine, July/August 2001.

[5] Bearing Fault Detection via Autoregressive Stator Current Modeling. Jason R. Stack, Thomas G. Habetler, and Ronald G. Harley. . IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 40, Nº. 3, May/June 2004

[6] Motor Bearing Damage Detection Using Stator Current Monitoring – Randy R. Schoen, Thomas G. Habetler, Farrukh Kamran and Robert G. Bartheld. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 31, Nº 6, November/December 1995.

Autores

Castelli Léméz, Marcelo Javier: Ingeniero Industrial, Universidad de Montevideo, 2004. PhD en curso (pendiente de defensa de tesis), Escuela de Ingenieros de San Sebastián TECNUN, Universidad de Navarra. Líneas de Investigación: accionamientos eléctricos lineales, control vectorial de máquinas eléctricas, sistemas de levitación, diseño de generadores. IEEE Member.

Andrade Raffo, Marcos Tabaré: Formación académica: Ingeniero Electricista, Universidad de la República, Facultad de Ingeniería, 1975. Especializaciones: puestas a tierra, sistemas de protección, mantenimiento de subestaciones, medida de aislamiento de máquinas rotativas. Director de ALFEX S.A. IEEE Senior Member. IEEE-Uruguay Section – Presidente 2006-2007.

Portillo Laurino, Álvaro Carlos: Formación académica: Ingeniero Industrial Opción Eléctrica, Universidad de la República, Facultad de Ingeniería, 1980. Especializaciones: transformadores de distribución y potencia, software de cálculo orientado a fabricantes y empresas eléctricas, asesoramiento en procesos industriales. Consultor permanente de INGENER S.A. IEEE Senior Member.

***Desarrollo de un equipo para realización de mantenimiento predictivo en motores asíncronos de gran porte
URUMAN 2006, Montevideo, Uruguay***

Daoudian Seibane, Nicolás Krikor: Cursando 5º año de Ingeniero Industrial, Universidad de Montevideo. Desarrollo de métodos de calibración, desarrollo de equipos a medida, ensayos en motores asíncronos, medición y mantenimiento de puestas a tierra, calibración de equipamiento eléctrico, construcción de equipos de medida de vibraciones mecánicas y corriente eléctrica. IEEE Student Member.

Farinella, Diego: Cursando 4º Año de Ingeniero Industrial, Universidad de Montevideo. Ayudante de Laboratorio. Participación en proyectos de I+D sobre desarrollo de accionamientos eléctricos lineales, cálculo y modelización por medio del método de elementos finitos de generadores lineales síncronos de imanes permanentes. IEEE Student Member

Casas Espino, Natalia: Cursando 5º año de Ingeniero Electricista, Universidad de la República. Desarrollo de métodos de calibración, desarrollo de equipos a medida, ensayos en motores asíncronos, medición y mantenimiento de puestas a tierra, calibración de equipamiento eléctrico, construcción de equipos de medida de vibraciones mecánicas y corriente eléctrica.