

“Metodología de monitoreo, detección y diagnóstico de fallos en motores asíncronos de inducción”

***Castelli, Marcelo - Universidad de Montevideo. – IEEE Member
Andrade, Marcos – ALFEX S.A. – IEEE Senior Member.***

Fossati, Juan Pablo-Universidad de Montevideo-IEEE Member.

Resumen

Dentro del programa de desarrollo tecnológico (PDT) la empresa ALFEX S.A. ha trabajado durante los últimos dos años, en conjunto con la Universidad de Montevideo, en el desarrollo de un equipo para detección y diagnóstico de fallos en motores asíncronos de inducción.

Durante la primera etapa del proyecto se ha trabajado principalmente en el estudio teórico de las principales fallas que típicamente suelen ocurrir, tales como cortocircuitos en los bobinados del estator, rodamientos dañados, excentricidad y desbalanceo en el rotor, rotura de barras y anillos en el rotor.

En una segunda instancia se simuló, en un banco de ensayo la rotura de barras de la jaula de ardilla. Los resultados fueron presentados en el congreso de URUMAN llevado a cabo en el 2007.

Este último año además de los ensayos realizados relacionados a la rotura de barras, se simularon cortocircuitos y rotura de rodamientos. Se realizaron mediciones en motores de más de 150 Hp en varias empresas con el objetivo de detectar diferentes tipos de fallas. Por último se perfeccionó la metodología de diagnóstico mediante la creación de un modelo lo que motivó la publicación de un artículo en una revista internacional.

En este artículo se presentan los estudios realizados relacionados exclusivamente a los defectos de cortocircuito en el bobinado del estator. Previamente se analizarán las distintas fallas que pueden afectar a un motor de inducción.

Introducción

Estudios recientes indican que el 90% de los fallos en máquinas ocurren a raíz del funcionamiento anormal de los componentes internos, como es el caso del motor principal [1]. En esta línea, el mantenimiento correctivo del equipo es una práctica muy costosa, ya que implica paradas no programadas y los daños provocados por las fallas de los equipos.

Las actuales exigencias de calidad consideran cada vez más necesaria la utilización de sistemas de monitoreo y detección de fallas, de modo de no interrumpir la producción. Los motores eléctricos de inducción son los responsables, en muchos casos, del correcto funcionamiento del sistema productivo.

Existen hoy muchas técnicas publicadas y herramientas avaladas comercialmente de detección de fallas en motores de inducción, que pueden garantizar un mayor grado de confiabilidad en su funcionamiento. A pesar de esto, la mayoría de las industrias aún no utilizan técnicas de detección y monitoreo de máquinas eléctricas.

La detección y diagnóstico de fallas exige el empleo de sensores adecuados. Enorme variedad de sensores pueden ser empleados para recolectar datos de parámetros de funcionamiento en motores eléctricos con el propósito de detectar y monitorear fallas.

Entre los parámetros a medir por estos sensores se pueden resaltar los siguientes: tensión y corriente en el estator, densidad de flujo magnético en el entrehierro, velocidad y posición del rotor, par entregado al eje, temperatura externa e interna, vibración, etc. Cuanto mas sean los parámetros monitoreados (cada uno con su respectiva sensorización), mayor información puede llegar a extraerse con respecto al funcionamiento del motor.

Sin embargo, existen algunos inconvenientes relacionados con la cantidad y tipos de sensores a utilizar en el motor. Pueden destacarse el costo de la sensorización requerida, la dificultad en la instalación de los sensores y fallos en la sensorización produciendo una parada no programada en la producción.

Los sistemas de monitoreo de motores eléctricos suelen detectar una variedad de fallas en el motor, tales como: cortocircuitos en los bobinados del estator, rodamientos dañados, excentricidad y desbalanceo en el rotor, rotura de barras y anillos en el rotor, problemas de ventilación, etc.

La sensorización de temperatura y vibración ha sido una técnica utilizada desde hace décadas para el monitoreo de motores asíncronos de inducción, sin embargo, recientemente los estudios se han centrado en el monitoreo de la parte eléctrica del motor, haciendo énfasis en el análisis de la corriente de estator. La mayoría de los estudios se han abocado al análisis del espectro de frecuencia de la corriente de estator, con el fin de determinar fallas en el motor.

Todas las técnicas de detección de fallas requieren un conocimiento previo de las medidas recolectadas, con el fin de distinguir situaciones normales de trabajo de las condiciones de operación bajo fallo. Esta exigencia, en cuanto al conocimiento del comportamiento normal de la máquina se magnifica cuando existe en ella una gran cantidad de armónicos provenientes de características constructivas o de variación de la carga a la que se encuentra sometido el motor. Estas características especiales no deben ser confundidas con fallos existentes en el motor.

Muchos métodos de monitoreo han sido propuestos para la detección de fallos en motores asíncronos de inducción. Muchas máquinas eléctricas se encuentran provistas de distintos sensores con el fin de recolectar datos relevantes a su funcionamiento. Algunas de estas técnicas emplean sensores frágiles, de difícil instalación en el motor y de elevado coste. Sin embargo, el monitoreo de corriente de estator puede proveer las mismas informaciones sin necesidad de acceso a la parte interna del motor, ya que se trata de una técnica no invasiva, y pudiendo así reducir los costos de implementación.

Fallas en motores eléctricos de inducción:

En este apartado son abordadas las principales fallas incipientes que ocurren en motores asíncronos de inducción. Fallas mecánicas y de aislamiento son discutidas y analizadas siendo enfatizadas sus causas y consecuencias.

La mayoría de las fallas en motores eléctricos pueden ser clasificadas en dos grupos: fallas de aislamiento y fallas mecánicas [2]. En [2] son brevemente presentadas las causas que pueden llevar a la ocurrencia de fallas en motores eléctricos de inducción.

Las fallas de aislamiento son caracterizadas por dañar las espiras del estator, conocidas como cortocircuito en el enrollamiento del estator.

Las fallas mecánicas, en su mayoría están asociadas a daños en el rotor o componentes relacionados al mismo. Dentro de las principales fallas mecánicas se pueden destacar las siguientes: daños en rodamientos, quiebre de barras y anillos del rotor, irregularidades en el entrehierro (excentricidades estáticas y dinámicas) y desbalances.

En [3] se presentan las principales causas de fallas en el rotor y estator del motor.

Causas de fallas en el estator:

Solicitaciones térmicas:

En general los usuarios y fabricantes de motores tienen buen conocimiento de los daños que pueden ocurrir debido al sobrecalentamiento de los sistemas de aislamiento. El bloqueo del ventilador en un motor puede causar sobrecalentamiento, así como también las sobrecargas a las que se vea afectado el motor. Este último punto es el motivo causante de buena parte de los daños de la parte eléctrica en motores de inducción. Para controlar este problema, en máquinas de medio y gran porte, pueden ser instalados sensores de temperatura en posiciones estratégicas del estator, y así poder monitorear temperatura, y de esta forma poder evitar el sobrecalentamiento.

Quiebra de barras y ralladura de los anillos del rotor también son responsables por el sobrecalentamiento de la máquina, con una consecuente reducción de par y aumento del nivel de vibraciones. Este problema puede ser detectado de varias formas, como análisis de vibración, análisis de corriente, o por simple inspección visual si el rotor es separado del estator.

Procedimientos normalizados, como por ejemplo AIEEE 510 e IEEE 275 revelan que cada 10°C que exceda la temperatura límite del aislamiento, la vida útil del mismo es reducida a la mitad [2] [3].

A menos que la temperatura de operación del motor sea extremadamente elevada como para ocasionar un daño inmediato, los efectos normales del envejecimiento térmico confieren al sistema vulnerabilidad a otras sollicitaciones que puedan ocurrir produciendo éstas alguna falla.

Causas de sobrecarga térmica:

Variación de tensión

Variaciones de tensión afectan la performance del motor y la temperatura de los bobinados. A la hora de diseñar motores, se suele utilizar un criterio que permita la operación satisfactoria del mismo con $\pm 10\%$ de variaciones de tensión.

Tensión de fase desbalanceada

Un pequeño desbalanceo de fase causará un aumento de temperatura en los bobinados del estator. Se ha constatado que cada 3.5% de desbalanceo por fase, la temperatura del bobinado aumenta en un 25% en la fase de mayor corriente. Por ello se deben mantener las 3 fases lo mejor balanceadas posibles, con el fin de evitar la ocurrencia de este problema.

Arranques cíclicos

Si el motor es sometido a sucesivos arranques en un corto período de tiempo, la temperatura de los bobinados aumentará rápidamente debido a las altas corrientes de arranque. Otra consecuencia de los arranques cíclicos es la contracción y expansión del aislante de las bobinas, tornándolo frágil y susceptible a quebraduras con el pasar del tiempo.

Sobrecarga

Muchos motores de inducción son fabricados con una cierta holgura en la carga máxima de operación en régimen continuo, caracterizado como factor de servicio (no debe ser confundido con la sobrecarga momentánea del motor, la cual vale para cortos períodos de tiempo). La utilización del factor de servicio implica una vida útil del motor menor a aquella en que el motor se encuentre operando con carga nominal.

Obstrucción del sistema de ventilación

El calor generado en el rotor y estator se disipa al exterior por medio de un sistema de ventilación, el cual, si por alguna circunstancia se encontrara obstruido o dañado, causaría un sobrecalentamiento en los bobinados del estator. Es importante recalcar la necesidad de utilización de un sistema de ventilación adicional si el motor opera con sobrecalentamiento en régimen normal.

Solicitaciones eléctricas:

Dieléctrico:

Existe una relación entre la vida del aislante del bobinado y la sobretensión aplicada. Cada material aislante posee sus particularidades, teniendo algunos mayor capacidad de tolerancia a la tensión que otros. Esta sobretensión puede causar cortocircuitos en el bobinado de 3 formas:

- Fase-fase
- Espira-espira
- Espira-tierra

Efecto Corona:

El efecto corona puede llegar a ser un problema serio particularmente en bobinados que operen a tensión superior a 5kV. El efecto Corona es una descarga localizada resultante de la ionización gaseosa en el sistema de aislamiento cuando la tensión excede un valor crítico. Existen 3 tipos básicos de descarga por efecto corona: descargas internas ocurridas en pequeñas cavidades del dieléctrico; descargas ocurridas en la superficie de las espiras, descargas puntuales provenientes de un fuerte campo eléctrico en extremidades o pequeñas aristas.

Sobretensiones de corta duración:

Condiciones de sobretensión ocurren con cierta frecuencia durante la utilización de motores eléctricos, dando como resultado la reducción de la vida útil del bobinado y pudiendo ocasionar fallas prematuras.

Oscilaciones de corriente y sobretensión normalmente dañan la el aislamiento de las espiras del estator pudiendo esto ocasionar cortocircuitos entre espiras. Estos problemas ocurren debido a la apertura y cierre de contactos [2]. Las sobretensiones pueden ser producto de las siguientes condiciones:

- Falta de aterramiento
- Abertura y cierre de disyuntores
- Conexión de banco de capacitares
- Colocación de fusibles limitadores de corriente.

Solicitaciones Mecánicas:

Movimiento de las espiras

El paso de corriente por los bobinados del estator produce esfuerzos directamente proporcionales al cuadrado de la corriente [3]. Estos esfuerzos alcanzan su máximo valor en el arranque del motor, ocasionando vibraciones en las espiras de los bobinados. Esta vibración provoca un movimiento relativo entre las espiras, el cual se acentúa más en las cabezas de bobinas, pudiendo ocasionar cortocircuitos.

Cualquier vibración excesiva también puede provocar daños en los rodamientos del motor. Para disminuir este problema es aconsejable mantener siempre alineada la máquina de modo de reducir las vibraciones excesivas.

Contacto entre estator y rotor

Las razones más comunes que conducen al contacto entre el rotor y el estator son las siguientes:

- Fallas en los rodamientos
- Deflexión del eje
- Desalineamiento entre rotor y estator.

Solicitaciones relacionadas al medio externo

La presencia de materiales extraños puede llegar a provocar daños en el estator, como por ejemplo reducción de la disipación de calor, con la consecuente reducción de la vida útil del aislante de los bobinados, fallas prematuras en el sistema de aislamiento debido a esfuerzos localizados y averías en el aislamiento causando cortocircuitos. Otro factor muy importante, a la hora de considerar fallas de aislamiento relacionadas al entorno en donde se encuentra operando el motor, es la humedad del medio, ya que el ingreso de humedad en el aislante puede ser un factor desencadenante de cortocircuitos en los bobinados.

Causas de fallas en el rotor

Solicitud térmica

Sobrecarga térmica

Puede ocurrir durante la partida, régimen permanente o en condiciones de rotor bloqueado, siendo esta última la condición responsable por lo mayores daños en el rotor. Las causas más comunes de falla por sobrecarga térmica son enumeradas a continuación:

- Gran número de arranques consecutivos ocasionando altas temperaturas en las barras y los anillos del rotor
- Rotor bloqueado debido a grandes cargas impuestas en el eje del motor
- Fricción entre estator y rotor debido a fallas en el sistema de rodamientos o condiciones de altas vibraciones
- Rotura de barras del rotor debido a la fatiga
- Ventilación insuficiente

El sobrecalentamiento es un problema bastante común en motores de inducción, con la ventaja de que puede ser fácilmente detectado y corregido. Medidas simples de mantenimiento pueden contribuir de forma significativa a solucionar este problema.

Desbalance térmico

El desbalance térmico puede tener su origen ya en el proceso de fabricación del rotor o puede ocurrir debido a condiciones de operación que traspasen los límites de trabajo

del mismo. Las causas más comunes de fallas por desbalance térmico son las siguientes:

- Arranques frecuentes del motor, pudiendo esto ocasionar diferentes temperaturas en las barras del rotor
- Transferencia de calor desigual entre el centro y las barras del rotor
- Gradientes de temperatura debido a la circulación de corriente desigual generada por rotura de barras.

Así como es relativamente sencilla la identificación de problemas de vibración en máquinas eléctricas, también lo es la identificación de desbalances térmicos, no así la identificación de la causa del problema.

Solicitud Magnética

Efecto Electromagnético

Las fuerzas electromagnéticas son proporcionales al cuadrado de la corriente, siendo unidireccionales y tienden a dislocar las barras produciendo una deflexión en las mismas [3]. El mayor esfuerzo sobre las barras ocurre durante el arranque del motor, debido a las altas corrientes generadas.

Atracción electromagnética desbalanceada

Idealmente el rotor se encuentra centrado y las fuerzas electromagnéticas balanceadas en direcciones opuestas, sin causar deflexión en el rotor. En la práctica, el rotor no se encuentra perfectamente centrado, ya que factores como el peso propio del rotor, desgaste en los rodamientos y alineación del motor influyen en el centrado del mismo.

El desbalance electromagnético es un problema que puede llevar a la flexión del rotor, pudiendo provocar que entren en contacto el rotor con el núcleo del motor o incluso con los mismos bobinados.

Solicitaciones dinámicas

La mayoría de las solicitaciones dinámicas ocurren por procedimientos de operación del motor que obligan al mismo a sobrepasar sus límites operativos de diseño, como por ejemplo torques excesivos en el eje o sobre-velocidades.

Solicitaciones relacionadas al medio externo

De la misma forma que para el estator, materiales que penetren dentro del motor pueden provocar abrasión, corrosión o impedir el correcto funcionamiento del sistema de ventilación provocando de esta forma sobrecalentamientos.

Solicitaciones mecánicas

Algunas de las causas más comunes de fallas mecánicas en el rotor son el desprendimiento de chapas o el incorrecto ajuste del eje del rotor.

En general los fallos en máquinas eléctricas se encuentran dominados por fallos en los rodamientos y en las bobinas del estator. Enfocados en motores asíncronos con rotor en jaula de ardilla, la estadística de fallos es la siguiente [4]:

Fallos relacionados a rotura en los rodamientos: 41%

Fallos relacionados a problemas en el estator: 37%

Fallos relacionados a problemas en el rotor: 10%

Otros fallos: 12%

Métodos de detección de fallos

Existen diferentes métodos invasivos y no invasivos para la detección de fallos utilizando técnicas de análisis de datos de origen eléctrico, mecánico o químico, entre los cuales se pueden resaltar los siguientes: análisis de vibraciones, análisis de temperatura, estimación de parámetros electromagnéticos del motor, análisis de partículas de aceite, análisis de señal de corriente del motor (MCSA).

En el Tabla 1 se realiza una comparación entre los principales métodos de detección de fallos, indicando las fallas que los mismos pueden detectar.

Método	Falla que puede detectar			
	Cortocircuito estator	Rotura de barras	Excentricidades	Rodamientos
Vibración	NO	SI	SI	SI
MCSA	SI	SI	SI	SI
Temperatura	SI*	NO	NO	SI*
Partículas	NO	NO	NO	SI

* Posibilidad de indicar indicio de falla

Tabla 1

Analizando la Tabla 1 se puede concluir que el método que es capaz de identificar el mayor número de fallos es el MCSA.

A lo largo de la ejecución de este proyecto se ha utilizado el MCSA como técnica de detección de fallos, la cual se basa en la utilización de la transformada rápida de Fourier de la señal de corriente del estator, con el fin de detectar los distintos tipos de fallos en función del estudio del espectro de frecuencia de la señal muestreada [5]

A continuación se presentan los resultados relacionados a los defectos de cortocircuito.

Estudio de cortocircuitos en bobinados:

En instancias previas se estudió la rotura de barras en la jaula de ardilla realizándose numerosos ensayos. Los estudios posteriores se centralizaron en los defectos de cortocircuito que afectan al bobinado estatorico. Los fundamentos teóricos y los ensayos realizados se presentan a continuación.

Para analizar este tipo de falla es conveniente hacer una división entre motores de alto voltaje y motores de bajo voltaje (consideramos alto voltaje a los motores que trabajan por encima de los 4.1 KV). Antes de estudiar las formas de detección de cortocircuitos vamos a exponer las causas que llevan a la destrucción del aislamiento (defecto que precede siempre a un cortocircuito) en los motores de alto voltaje.

En este tipo de motores (AV) existe un deterioro natural del aislamiento, pero no debemos considerar a esto como una falla. La contaminación superficial es una

importante causa en el deterioro de la protección del bobinado. Ejemplos de esto son: humedad, suciedad, aceite. La humedad puede ser producto de pérdidas de refrigerante en los intercambiadores de calor. En el caso de plataformas que se encuentran en el mar, el refrigerante usado es agua del océano lo que acelera aun mas el deterioro. Las vibraciones son probablemente la causa más importante de la destrucción de los bobinados. Estas pueden provenir de las fuerzas electromagnéticas o pueden ser externas. La presencia de estas fuerzas (electromagnéticas) durante el arranque produce sollicitaciones que dañan los bobinados, es por eso que se deben realizar monitoreos para asegurarse de que nos mantengamos dentro de las especificaciones. Al verse deteriorado el aislamiento se producen descargas parciales que pueden ser detectadas y por lo tanto darnos una idea de el estado de este. Existen varios métodos que ponen en evidencia la presencia de descargas parciales, se pueden usar capacitores o bobinas de Rowoski [7]. Una vez detectado este tipo de fenómeno se puede proceder ya sea reparando el motor o reduciendo la carga de forma que las sollicitaciones mecánicas y térmicas disminuyan.

En el caso de los motores que trabajan por debajo de los 4.1 KV, las descargas parciales no tienen lugar por lo tanto no hay modo de detectar el estado del aislamiento. A causa de esto no existe forma de monitorear la causa del cortocircuito.

Existen diferentes tipos de cortocircuito:

- 1) Cortocircuito dentro del mismo bobinado. El motor continúa funcionando
- 2) Cortocircuito entre dos bobinados de las mismas fases. El motor continúa funcionando.
- 3) Cortocircuito entre fases diferentes. El motor falla y la protección del equipo desconecta la alimentación.
- 4) Cortocircuito entre una fase y tierra. El motor falla y la protección del equipo desconecta la alimentación.
- 5) Que se desconecte una fase. El motor puede seguir funcionando o no dependiendo de la carga.

Las fallas 3 y 4 pueden ser predichas siempre y cuando sean antecidos por cortocircuitos dentro de una misma fase. Para hacer esto es necesario un monitoreo continuo. En el caso de los motores de alto voltaje el tiempo que transcurre entre una falla tipo 1 o 2 y una tipo 3 o 4 es muy pequeño. (Del orden de segundos o minutos). Por lo tanto un monitoreo continuo para detectar cortocircuitos dentro de un bobinado no vale la pena. El monitoreo del flujo magnético nos permite poner en evidencia la presencia de corto circuitos, pero esta técnica es invasiva, y dependiente de la carga y de la forma del motor. Estas fallas también pueden ser detectadas por medio del MCSA. Existe una expresión que nos permite encontrar la frecuencia característica de los cortocircuitos.

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

f_c =frecuencia característica de la componente producida por el cortocircuito

f_1 =Frecuencia de alimentación

$n=1, 2,3,\dots$

$k=1, 3,5,\dots$

p =pares de polos

s=deslizamiento.

Es importante señalar que estas frecuencias pueden ser confundidas con las producidas por otro tipo de fallas.

Como ya hemos mencionado, la condición más compleja de determinar en cuanto a cortocircuitos en bobinados del estator es la que involucra cortocircuitos fase-fase, ya que las protecciones del motor pueden no detectar el defecto. En este sentido se ha enfocado la investigación en la detección de cortocircuitos de distinta magnitud dentro del bobinado de una de las fases del motor.

En la ecuación anterior se ven reflejadas las componentes dentro del espectro de frecuencia correspondientes a los cortocircuitos en los bobinados del estator. Cabe destacar que la primer componente tomando $n=1$ y $k=1$ se corresponde con la componente debida a la aparición de excentricidades en el rotor, por lo cual es muy importante diferenciar unas de otras. En este sentido se ha optado por determinar el estado inicial del motor y no variar ninguna condición mecánica de operación con el fin de descartar la aparición de problemas debidos a excentricidades entre un ensayo y otro.

Metodología de ensayos:

De todos los tipos de cortocircuitos que se pueden dar en el motor, los que ocurren en una misma fase son los mas difíciles de detectar (las protecciones no se activan). Es por esto que nos concentraremos en este tipo de fallas.

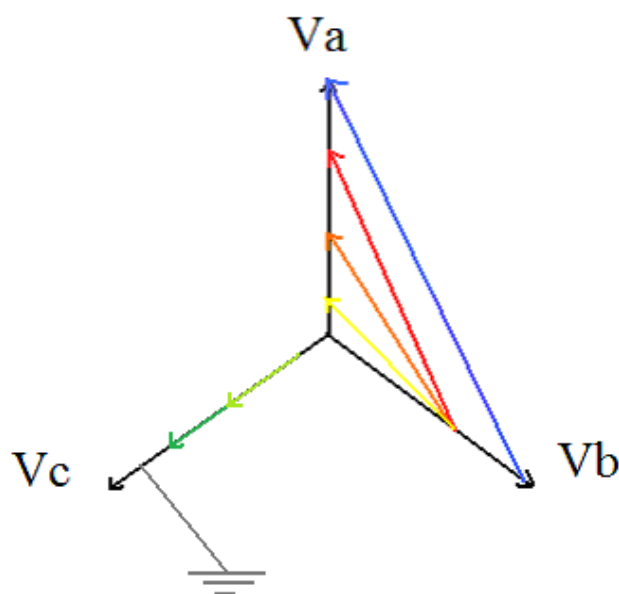


Figura 2: Diferentes tipos de cortocircuitos.

En la figura 2 se pueden ver los diferentes tipos de cortocircuitos posibles. En azul, naranja, amarillo y rojo se puede ver cortocircuitos entre dos fases de diferentes magnitudes. En gris se representa una falla a tierra y en verde dos cortocircuitos de una misma fase de diferente magnitud (estos son los defectos que vamos a simular).

“Metodología de monitoreo, detección y diagnóstico de fallos en motores asíncronos de inducción”

URUMAN 2008, Montevideo-Uruguay

Como primer paso se procedió a identificar las diferentes fases del bobinado del estator.

Luego dentro de una misma fase se limó el barniz en diferentes niveles. Para evaluar la magnitud de los posibles cortocircuitos se conectó la fase a una fuente y luego con un tester se midió la diferencia de potencial entre los diferentes puntos. Estas medidas se expresaron como un porcentaje del voltaje de la fuente. Luego se colocaron cables en los diferentes puntos limados (con estaño y cinta aisladora) y se sacaron hacia fuera por medio de un orificio en el estator. Para asegurarse de no haber producido algún cortocircuito no deseado se protegió el bobinado con una capa de barniz.



Figura 3: Medición de voltaje en el estator.



Figura 4: Conexión para realizar el cortocircuito

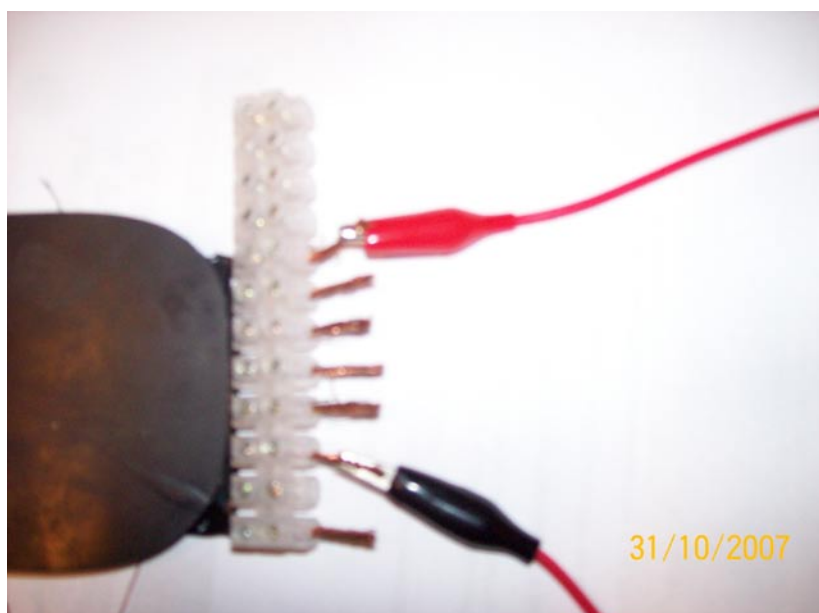


Figura 5: Diferentes posibilidades de cortocircuitos

	1	2	3	4	5	6	7
1							
2			0.51	1.58	0.64	5.81	1.93
3		1.95%		1.15	0.11	6.34	1.39
4		6.05%	4.41%		1.02	7.51	0.22
5		2.45%	0.42%	3.91%		6.47	1.27
6		22.26%	24.29%	28.77%	24.79%		7.75
7		7.40%	5.33%	.84%	4.87%	29.69%	

Tabla 2: Magnitudes de los cortocircuitos.

La figura 3 muestra como una vez conectada la fuente se procedió a medir la diferencia de potencial entre los diferentes puntos para determinar la magnitud del cortocircuito. El resultado de esto es la tabla 2 en donde se expresa la diferencia de potencial y el porcentaje que esta representa. La figura 4 muestra como se conectó en cada punto limado un cable para luego sacarlos por un orificio y simular un cortocircuito (ver figura 5). Si bien se hicieron las conexiones como para hacer varias pruebas solo se pudieron hacer unas pocas ya que el motor quedó dañado a causa de los cortocircuitos. En las fallas de mayor magnitud el motor se sobrecalentaba y los cables que se habían conectado a los diferentes puntos terminaban por quemarse. Otro problema que se debió afrontar es el hecho que la frecuencia de falla para los cortocircuitos coincide con la de excentricidad por lo que para que los ensayos tengan sentido se mantuvieron la condiciones de carga. A continuación presentaremos los resultados obtenidos. Los ensayos fueron realizados a 1477 rpm ($s=0.015$). Para estas condiciones de funcionamiento la frecuencia de la falla es 25.38 Hz.

Resultados obtenidos y análisis

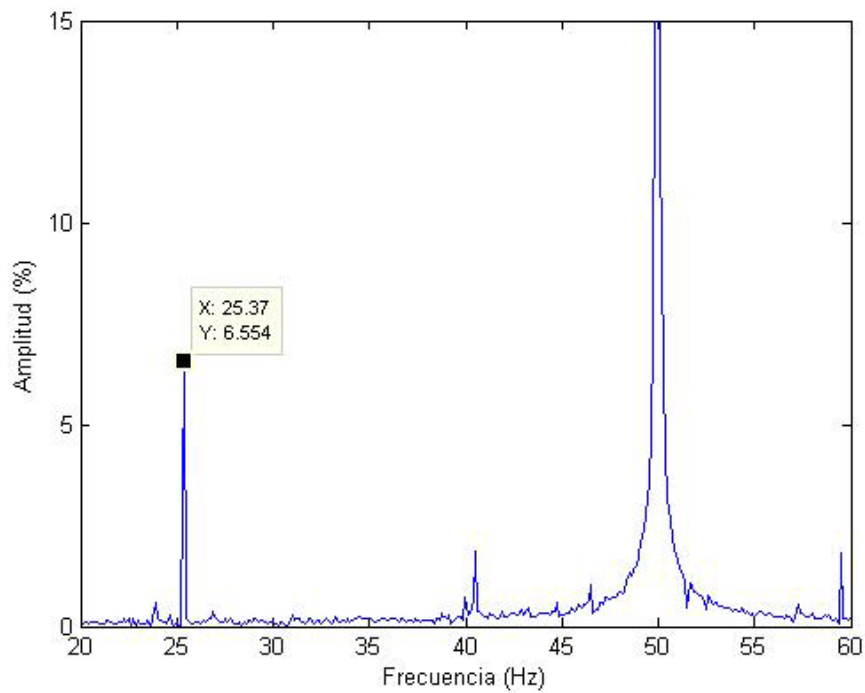


Figura 6: Sin cortocircuito

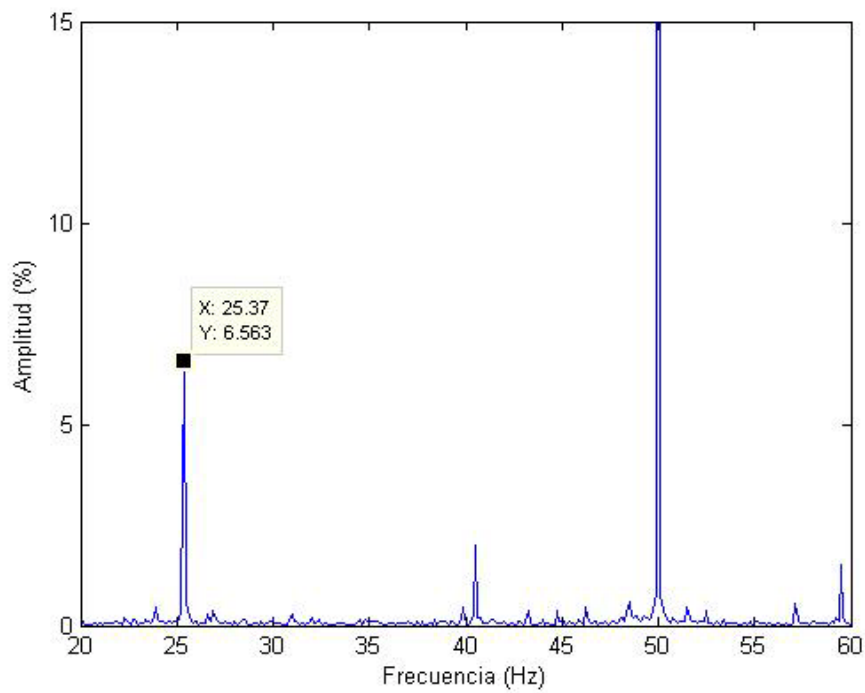


Figura 7: Cortocircuito de 1.5%

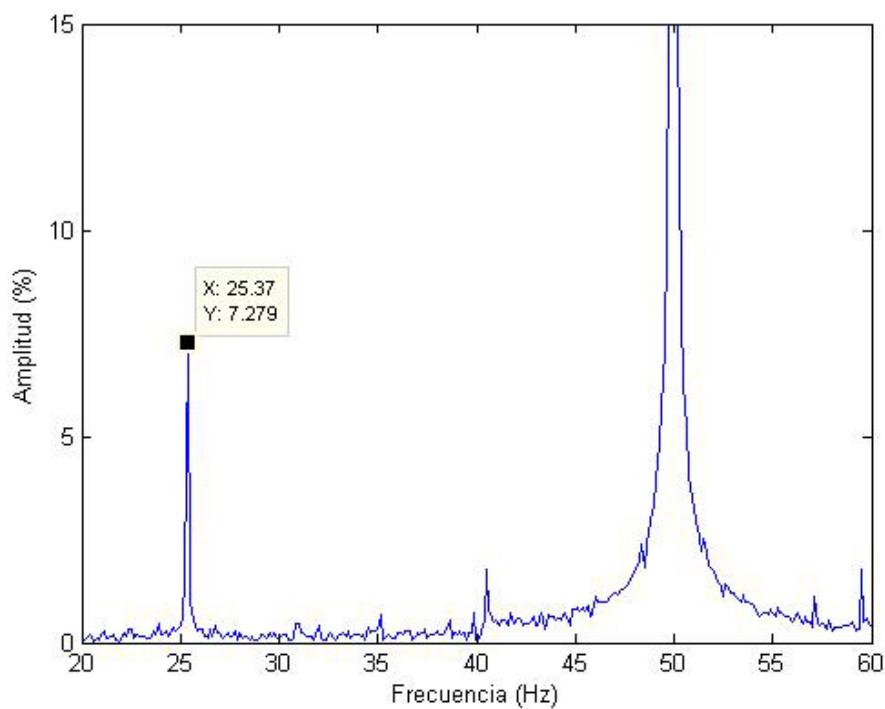


Figura 8: Cortocircuito de 2.45 %

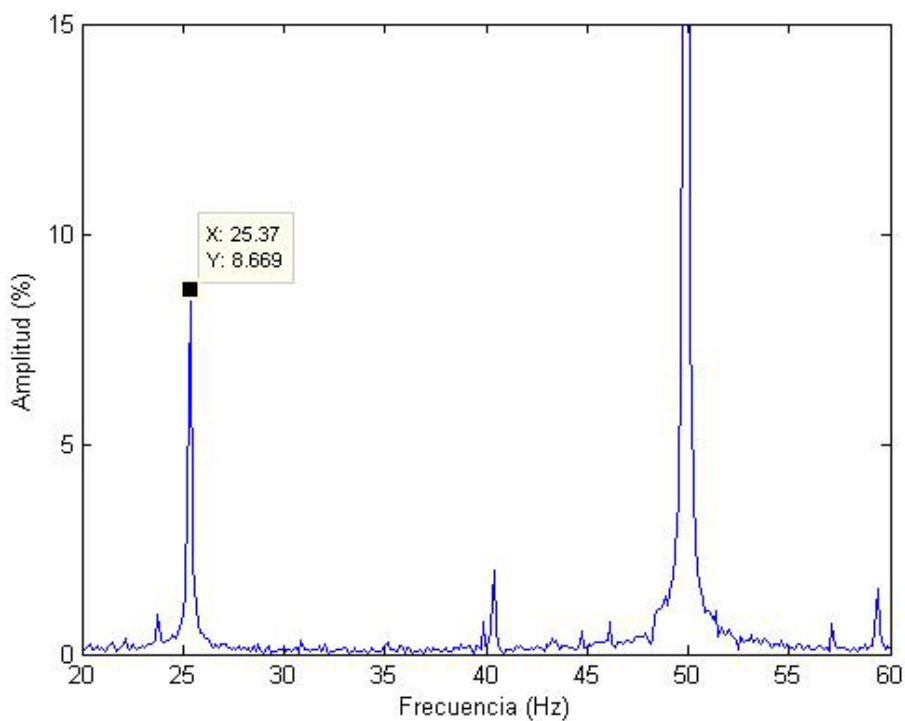


Figura 9: Cortocircuito de 4.41 %

Frec (Hz)	Amp (%)	CC (%)
25.37	6,554	0
25.37	6,563	1,5
25.37	7,279	2,45
25.37	8,669	4,41

Tabla 9: Amplitud en función de la magnitud del corto circuito.

En la tabla 9 se pueden ver los resultados de los cortocircuitos ensayados. En las figuras 6, 7, 8,9, se aprecia la presencia de un armónico para una frecuencia de 25.37 Hz. lo que coincide con lo predicho por la teoría (25.38Hz).

Graficando la magnitud de la componente a 25.36 Hz en función de la magnitud del defecto para ver si se puede observar esta tendencia (figura 10).

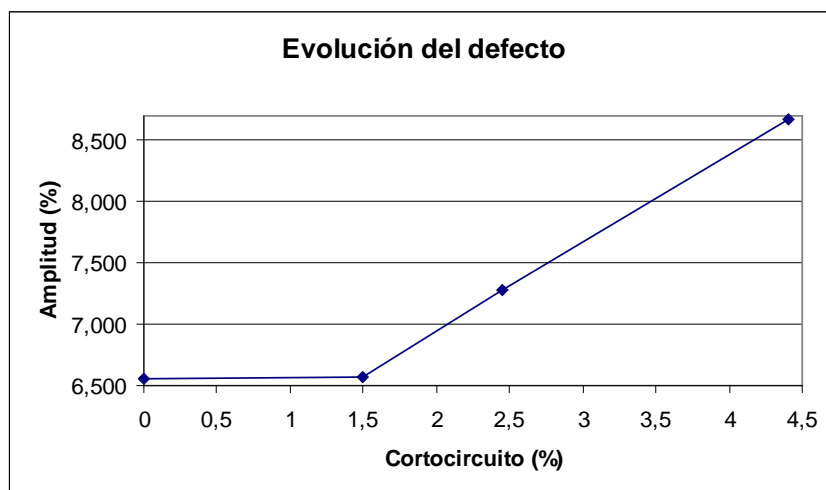


Figura 10: Amplitud vs. magnitud de cortocircuito.

Se puede observar que existe una marcada tendencia a medida que aumenta la magnitud de el defecto por encima del 1.5%. Si bien no se han hecho una cantidad suficiente de ensayos, se podría decir que es posible predecir la existencia de un cortocircuito que por su magnitud no haya producido que se activen las protecciones, pero que mas adelante podría dejar el motor fuera de servicio. Como se ha mencionado anteriormente; en los motores de alto voltaje es muy escaso el tiempo que transcurre entre un cortocircuito dentro de una misma fase y un cortocircuito entre fases (segundos o minutos) por lo que una metodología de este tipo seria difícil de aplicar. En el caso de motores de bajo voltaje, es posible detectar cortocircuitos; pero se requiere realizar los ensayos con una gran frecuencia debido al rápido desenlace que tienen este tipo de defectos.

Ensayos a nivel industrial:

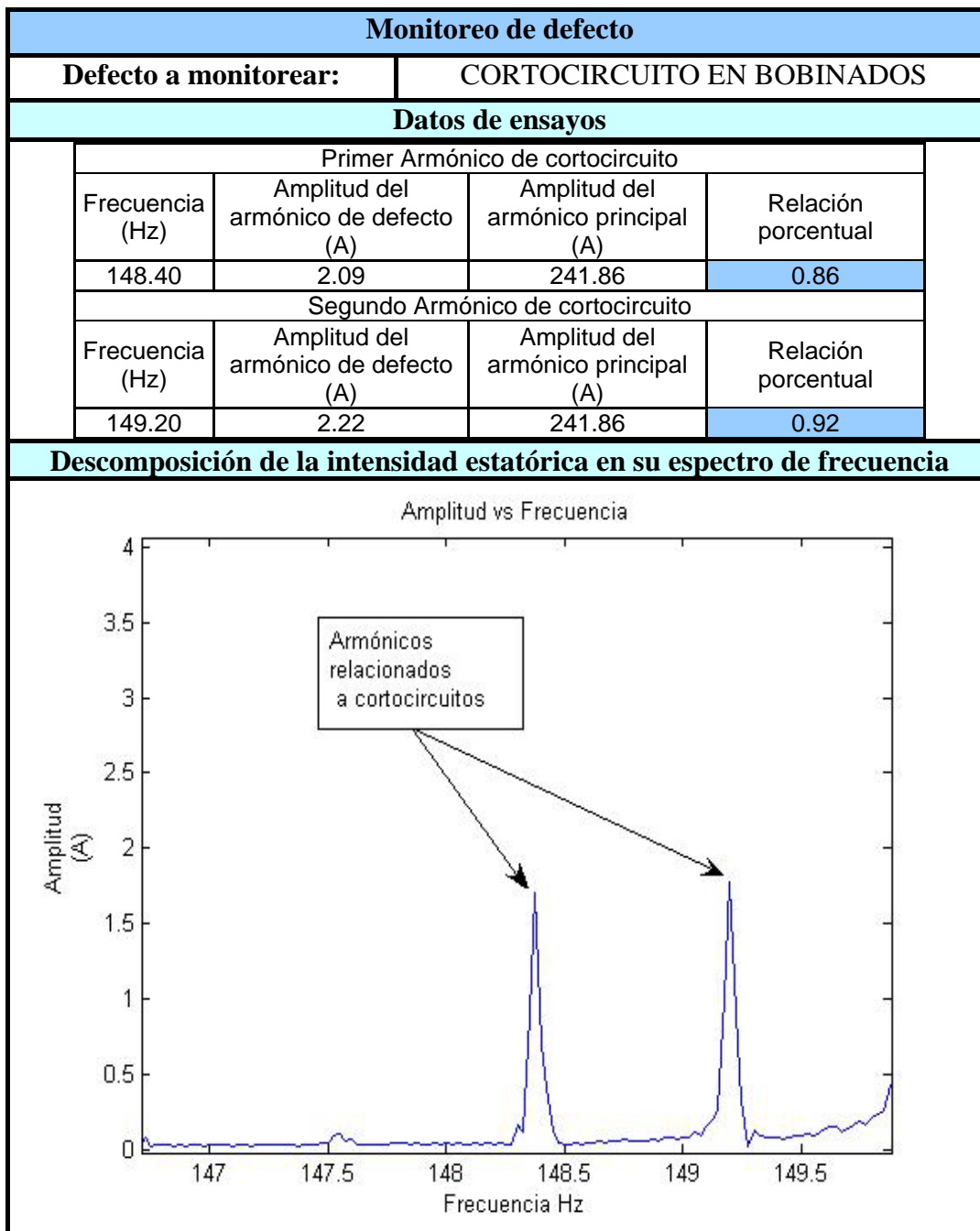
Habiendo realizado numerosas pruebas en el ámbito de laboratorio, se buscó validar los resultados fuera de este contexto, mediante el monitoreo de motores de gran porte (superiores a 150 Hp) en diferentes industrias.

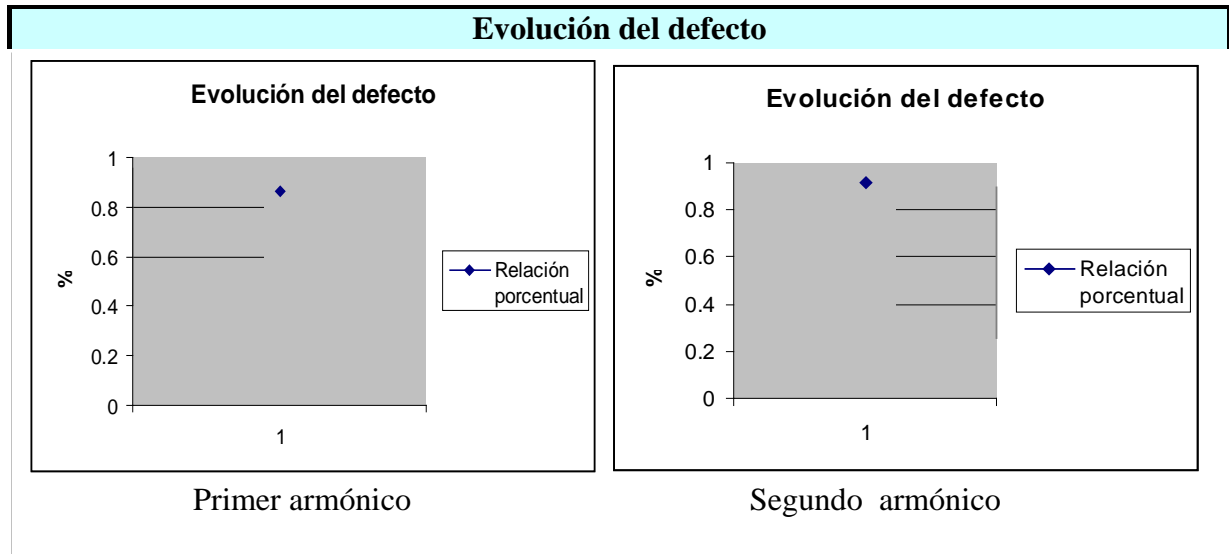
Los ensayos llevados a cabo tenían como objetivo la detección de los siguientes defectos:

- Rotura de barras en la jaula de ardilla
- Cortocircuitos en los bobinados del estator
- Excentricidades
- Problemas de rodamientos

Para implementar esta técnica de monitoreo es necesario realizar ensayos periódicos para tener un historial y de esta manera poder identificar tendencias. Dependiendo del caso las mediciones se realizan normalmente cada cuatro o seis meses.

A continuación se muestra los resultados obtenidos para uno de los motores monitoreados:





Conclusiones y futuras líneas de investigación :

Hasta el momento se han estudiado en profundidad los defectos de barras rotas y de cortocircuitos obteniéndose resultados concretos tanto a nivel de laboratorio como en el ámbito industrial. A pesar de que se hayan realizados ensayos sobre rodamientos es necesario continuar esa línea de investigación. También se realizarán pruebas relacionadas a las excentricidades.

La metodología desarrollada para el análisis de la señal mejora notablemente la precisión a la hora de realizar un diagnóstico.

Dado que los cortocircuitos en los bobinados evolucionan rápidamente desde los primeros indicios de falla hasta el momento que el motor debe ser sacado de servicio se desarrollará un dispositivo que mediante monitoreo on-line evalúe en tiempo real el estado del motor. De esta manera se disparará una alarma permitiendo detener el motor a tiempo evitando daños mayores.

Bibliografía:

- [1] Chow, M. Y. Methodologies of Using Neural Network and Fuzzy Logia Technologies for Motor Incipient Fault Detection. Singapore, World Scientific Publishing, 1997.
- [2] Botha, M. M. Electrical Machines Failure, Causes and Cures, Electrical Machines and Drives. 8va conferencia anual de IEEE, Nº 444, pp. 114-117, 1-3 de Septiembre de 1997
- [3] Bonnet, A. H. et al. Cause and Analysis of Stator and Rotor Failures in Three-Phase Squirrel-cage Induction Motors. IEEE Trans. On Ind. Applic. Volumen 28, pp. 921-937, Julio-Agosto 1992.
- [4] Thomson, W.T.; Fenger, M. Case Histories of Current Signatura Analysis to Detect Faults in Induction Motor Drives. Electrica Machines and Drives, IEMDC IEEE, Volumen 3; pp1459-1465, Junio 2003.
- [5] Castelli, M. Andrade, M. Portillo, A. Daoudian, N. Farinella, D. Casas, N. Desarrollo de un equipo para realización de mantenimiento predictivo en motores asíncronos de gran porte. URUMAN 2006. 16-18 Agosto 2006, Montevideo – Uruguay.
- [6] Thomson, W.T.; Gilmore, R. J. Motor Current Signature Analysis to Detect Faults in Induction Motor Drives- Fundamentals, Data Interpretation, and Industrial Case Histories. Proccedings of 32rd Turbomachinery Symposium, 2003.
- [7] Luis Alberto Pereira, Daniel da Silva, Luis F A Pereira. Motor current signature analysis and fuzzy logic applied to the diagnosis of short-circuit faults in induction motors

Marcelo Castelli: Nació en Montevideo Uruguay el 14 de febrero de 1979. Se recibió de ingeniero en la Universidad de Montevideo en el 2004. Luego realizó sus estudios de doctorado en la Universidad de Navarra (pendiente defensa de tesis) donde trabajó durante dos años en TECNUN (Campus tecnológico de la Universidad de Navarra). Actualmente trabaja en el CITEM (centro de investigación e innovación tecnológica de Montevideo) donde desarrolla sistemas de control y técnicas de mantenimiento predictivo.

Mail: mcastelli@um.edu.uy

Marcos Andrade: Nació en Montevideo Uruguay el 4 de agosto de 1949. Se recibió de ingeniero eléctrico en la Universidad de la republica en 1979. Actualmente es gerente de ALFEX S.A. y desarrolla proyectos de investigación en conjunto con el CITEM.

“Metodología de monitoreo, detección y diagnóstico de fallos en motores asíncronos de inducción”

URUMAN 2008, Montevideo-Uruguay

“Metodología de monitoreo, detección y diagnóstico de fallos en motores asíncronos de inducción”

URUMAN 2008, Montevideo-Uruguay

Marcelo Castelli Nació en Montevideo Uruguay el 14 de febrero de 1979. Se recibió de ingeniero en la Universidad de Montevideo en el 2004. Luego realizó sus estudios de doctorado en la Universidad de Navarra (pendiente defensa de tesis) donde trabajó durante dos años en TECNUN (Campus tecnológico de la Universidad de Navarra). Actualmente trabaja en el CITEM (centro de investigación e innovación tecnológica de Montevideo) donde desarrolla sistemas de control y técnicas de mantenimiento predictivo.

Mail: mcastelli@um.edu.uy

Marcos Andrade Nació en Montevideo Uruguay el 4 de agosto de 1949. Se recibió de ingeniero eléctrico en la Universidad de la república en 1979. Actualmente es gerente de ALFEX S.A. y desarrolla proyectos de investigación en conjunto con el CITEM.