

**A1 - Máquinas Eléctricas Rotativas****EFFECTO DE LA TEMPERATURA EN ENSAYOS ESTÁTICOS  
DE MOTOR DE MEDIA TENSIÓN**

**E. CALO\***  
**IITREE-FI-UNLP**  
**Argentina**

**H. MAYORA**  
**IITREE-FI-UNLP**  
**Argentina**

**L. CATALANO**  
**IITREE-FI-UNLP**  
**Argentina**

**R. E. ALVAREZ**  
**IITREE-FI-UNLP**  
**Argentina**

**P. MORCELLE del VALLE**  
**IITREE-FI-UNLP**  
**Argentina**

***Resumen** – Los grandes motores de media tensión suelen tener como objetivo accionar los mecanismos principales y procesos críticos de una industria, por lo que es preciso establecer un programa de mantenimiento adecuado. El correcto diagnóstico de estas máquinas puede ayudar a prevenir una salida intempestiva. Esto se traduce en una reducción de los costos asociados a la pérdida de productividad y la reparación o reemplazo de la máquina afectada. En el presente trabajo se presenta un caso de estudio de un motor de media tensión, al cual se le realizaron diversos ensayos a diferentes temperaturas para obtener un diagnóstico de la condición general de su aislamiento estático. El objetivo de los ensayos realizados a diferentes temperaturas fue el verificar el comportamiento de los parámetros más representativos que caracterizan el aislamiento de los motores: resistencia de aislamiento, tangente delta y descargas parciales. Se presentan los fundamentos principales de las pruebas realizadas y finalmente un análisis comparativo de los resultados obtenidos en diferentes condiciones térmicas del sistema de aislamiento.*

**Palabras clave:** Ensayos, Diagnóstico, Motor, Media tensión, Mantenimiento, Vida útil

## **1 INTRODUCCIÓN**

El mantenimiento y diagnóstico estático fuera de servicio de una máquina rotante se puede dividir en dos principales subsistemas: el mecánico y el eléctrico. En este trabajo, se hará foco principalmente en la parte eléctrica, más específicamente en el aislamiento estático, considerando que una proporción importante de las fallas eléctricas en motores y generadores se deben a problemas en éste componente [1][2].

El caso de estudio presentado se trata sobre un motor de media tensión y de elevada potencia que acciona un mecanismo de un proceso continuo con escasa fluctuación de carga. A partir de la tendencia de algunos indicadores, se sospechaba de un deterioro en el sistema de aislamiento como consecuencia de envejecimiento, humedad y/o indicios de contaminación. Para confirmar esta presunción y, como la temperatura podía tener un rol prominente considerando el régimen de carga, se realizaron ensayos diversos estáticos con el motor fuera de servicio.

En primera instancia se realizaron con la máquina a temperatura ambiente. Luego se procedió a su energización en vacío para elevar la temperatura lo más cercano posible a la temperatura normal de trabajo, para lo cual se hizo un monitoreo del perfil térmico.

Una vez que la temperatura en condición de vacío se estabilizó, se retiró del servicio y nuevamente se repitieron los mismos ensayos, obteniéndose de esta manera mayor información para realizar un diagnóstico más preciso.

## 2 ALCANCE

El alcance de este trabajo será el análisis de la influencia de la temperatura de ensayo para distintas pruebas eléctricas orientadas al diagnóstico de la condición del sistema de aislamiento estático de una máquina rotante de media tensión. Los ensayos realizados para el diagnóstico se centraron exclusivamente en el aislamiento del estator

Los ensayos considerados para el análisis fueron: medición de la resistencia del aislamiento e índice de polarización, medición de capacitancia y tan delta en escalones de tensión (TIP-UP) y medición de descargas parciales.

Se destaca que, al no disponer de acceso al centro de estrella del estator, los ensayos dieléctricos se realizaron con las tres bobinas en paralelo.

Para la ejecución de los ensayos, se consideraron lineamientos y recomendaciones establecidas a tal fin en las normativas IEC e IEEE.

## 3 DESARROLLO

En el marco de una parada programada para mantenimiento se realizaron ensayos para determinar la condición del sistema aislante de una máquina de 6,6 kV de tensión nominal y 5,4 MW de potencia. Algunos meses antes a los ensayos presentados en este trabajo, se habían realizado pruebas que, a partir de los resultados obtenidos, permitían sospechar de un deterioro en el aislamiento estático como consecuencia de envejecimiento, humedad y/o contaminación.

El objetivo de las nuevas mediciones era confirmar el diagnóstico anterior, utilizando como herramienta para el diagnóstico las mediciones en dos estados térmicos diferentes.

En primera instancia, luego de que la máquina esté fuera de servicio por varios días, y por lo tanto en equilibrio térmico con la temperatura ambiente, se realizaron los ensayos mencionados. La temperatura en esta instancia fue de 28°C, y de aquí en adelante se lo denominará como estado “*en frío*”.

Luego se procedió a energizar a la máquina a tensión nominal, pero con el mecanismo que accionaba desacoplado, es decir, sin carga. Se registró el perfil térmico de la máquina hasta que alcanzó el equilibrio térmico, luego de lo cual se procedió a desenergizar la máquina. Consecutivamente se realizaron los ensayos y se verificó que la temperatura inicial y final no tuvo grandes fluctuaciones durante las pruebas, siendo la temperatura promedio de 51°C. De aquí en adelante se lo denominará como estado “*en caliente*”.

### 3.1 Resistencia de Aislamiento e Índice de Polarización

La primera prueba realizada fue la de resistencia de aislamiento e índice de polarización. Al no disponer de acceso al centro de estrella de la máquina no se pudo realizar la medición para cada fase segregada, por lo que se cortocircuitaron los tres terminales de la máquina entre sí de forma de evaluar el aislamiento de las barras a tierra de manera integral. Las mediciones se realizaron con un megóhmetro, de acuerdo a los lineamientos presentados en IEEE Std 43-2013: “*IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery*” [3].

La resistencia de aislamiento se define como el cociente entre la tensión continua aplicada y la corriente a través del aislamiento, luego de un minuto de iniciada la aplicación de tensión. El índice de polarización es el cociente entre la resistencia medida a 10 minutos y la resistencia medida a 1 minuto.

El cambio en la resistencia de aislamiento o corriente total medida con la duración de la tensión de prueba puede ser útil para evaluar la limpieza y humedad de un bobinado. Si los devanados están contaminados con material parcialmente conductor o están húmedos, la corriente total será aproximadamente constante con el tiempo, ya que las corrientes superficiales y/o de conducción serán mucho más grande que la corriente debida al fenómeno de polarización. Si los devanados están limpios y secos, la corriente total normalmente disminuirá con el tiempo, ya que la corriente total estará dominada por la corriente de polarización [3].

En la Fig. 1 se presenta un diagrama del conexionado para la prueba.

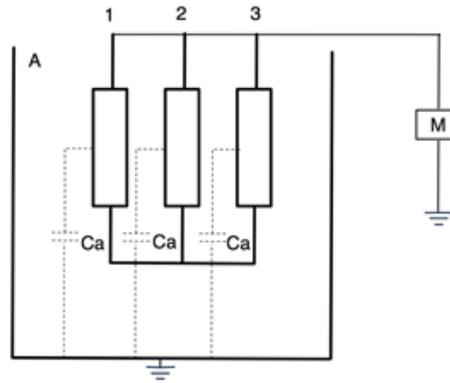


Fig. 1. Esquema de ensayo resistencia de aislamiento  
 A: cubierta del motor; Ca: aislamiento de cada fase respecto a la cubierta (a tierra); M: megóhmetro.

### 3.2 Capacitancia y Tangente Delta

Un aislamiento ideal puede ser caracterizado simplemente como una capacitancia pura, libre de pérdidas. Sin embargo, con la presencia de un campo eléctrico en los sistemas reales aparecen procesos que implican disipación de energía, y pueden modelarse como una resistencia, ya sea en serie o en paralelo, con la capacitancia.

Al aplicar una tensión, y por lo tanto un campo eléctrico a través del aislamiento se va a generar una corriente que tendrá una componente resistiva debida a las pérdidas y una componente capacitiva debida a la propia capacitancia del aislamiento, lógicamente desfasadas  $90^\circ$  entre sí. La tangente delta se define como el cociente entre ambas componentes.

La característica Factor de disipación vs Tensión de un sistema de aislamiento es el resultado de muchos fenómenos que ocurren en su estructura. Las inclusiones gaseosas durante los procesos de impregnación de las bobinas que están presentes en el material dieléctrico en forma de huecos o burbujas pequeñas aumentan la actividad de descargas parciales debido a la ionización de los gases presentes en dichos huecos. A medida que se aumenta la tensión aplicada al aislamiento el factor de disipación aumenta, llegando a valores elevados al sobrepasar los gradientes críticos de tensión del aislamiento

La medición de Capacitancia y Tangente Delta se realizó de acuerdo a lo establecido en la norma IEEE Std. 286-2000: *“IEEE Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation”* [4]. Las mediciones se realizaron en cinco escalones del 20% de la tensión nominal fase-tierra, hasta alcanzar la tensión nominal.

Para solicitar el aislamiento de la máquina hasta su tensión nominal se utilizó un transformador de 0,4/13,2 kV alimentado por un autotransformador variable. Debido a la elevada capacitancia del aislamiento de la máquina, se requeriría de una fuente de elevada potencia para poder realizar las pruebas a tensión nominal. Por esto mismo fue necesaria la utilización de reactores shunt en el lado de baja tensión del transformador para compensar la energía reactiva capacitiva del motor y de esta manera no sobrecargar al autotransformador.

Para la medición se utilizó un puente automático, con un capacitor de referencia de 500 pF, de bajas pérdidas y bajas descargas parciales.

En la Fig. 2 se presenta un esquema del conexionado.

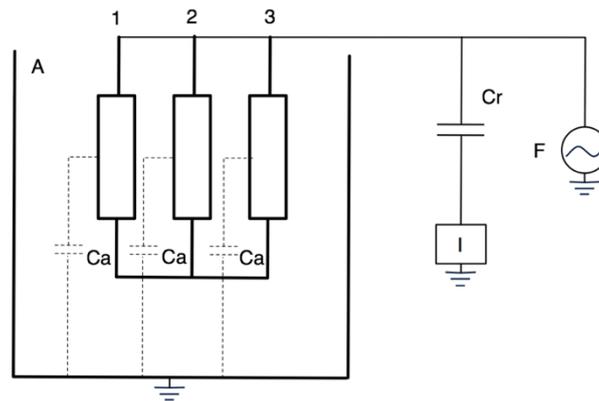


Fig. 2. Esquema de ensayo de capacitancia y factor de disipación  
 A: cubierta del motor; Ca: aislamiento de cada fase respecto a la cubierta (a tierra); Cr capacitor de referencia;  
 F: fuente de tensión alterna; I: Instrumento de medición.

### 3.3 Descargas parciales

El fenómeno de descargas parciales consiste en una descarga eléctrica que cortocircuita parcialmente un aislamiento sin que se produzca una descarga disruptiva. Se puede suponer un sistema de aislamiento que posee en su interior una inclusión gaseosa, es decir, accidentalmente queda atrapada una burbuja de aire en el material dieléctrico. Al someterlo a una tensión determinada aparece sobre ambos materiales (dieléctrico y aire) un campo eléctrico que se intensifica en el aire. Esta concentración del campo eléctrico puede provocar la ruptura eléctrica del aire dentro de la burbuja, cortocircuitándose las caras de la misma mediante un arco eléctrico.

La actividad de descargas parciales depende del tipo de aislamiento y no existe un valor máximo admisible. Cada máquina tendrá su nivel de descargas intrínseco, por lo que es importante tomar valores de referencia en las primeras mediciones.

Una herramienta importante a la hora de determinar la naturaleza de las descargas es el análisis de su patrón en fase resuelta. Esto es, la distribución de las descargas con respecto a la fase de la señal de excitación, y su repetitividad. De acuerdo a la forma de los patrones en fase resuelta se puede determinar el origen de las descargas y en qué sector del aislamiento se encuentran.

La medición de descargas parciales, al igual que la de capacitancia y tangente delta, fue realizada en escalones del 20% de la tensión nominal, para lo que se utilizó el mismo sistema de alimentación. Se utilizó el mismo capacitor de referencia como capacitor de acoplamiento junto con un cuadripolo de acoplamiento para vincularse al sistema de medición.

Las dos mediciones fueron realizadas en simultáneo acortando de esta manera los tiempos de conexión y de prueba. Previo a las mediciones se calibró con un calibrador adecuado, en el rango de la magnitud medida.

La prueba se realizó adoptando lineamientos indicados en IEEE Std. 62-2-2004 “*IEEE Guide for Diagnostic Field Testing of Electric Power Apparatus- Electrical Machinery*”. [5], IEEE Std. 1434-2014 “*IEEE Guide for the Measurement of Partial Discharges in AC Electric Machinery*”. [6] e IEC 60270-2000/AMD1-2015 “*High-voltage test techniques - Partial discharge measurements*” [7].

En la Fig. 3 se muestra el esquema de conexionado de la prueba.

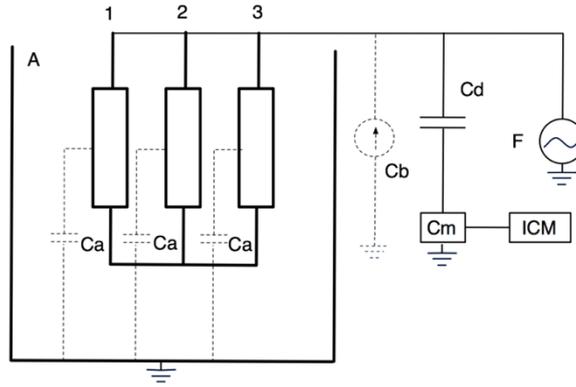


Fig. 3. Esquema de ensayo descargas parciales  
 A: cubierta del motor; Ca: aislamiento de cada fase respecto a la cubierta (a tierra); F: fuente de tensión alterna; Cd: capacitor de acoplamiento; Cb: calibrador; Cm: cuadripolo de acoplamiento; ICM: Medidor de descargas

## 4 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

### 4.1 Resistencia de aislamiento e Índice de polarización

Para la medición de la resistencia de aislamiento e índice de polarización se aplicó una tensión continua de 3 kV por 10 minutos. Los valores obtenidos en ambas mediciones se representan gráficamente en la Fig. 4.

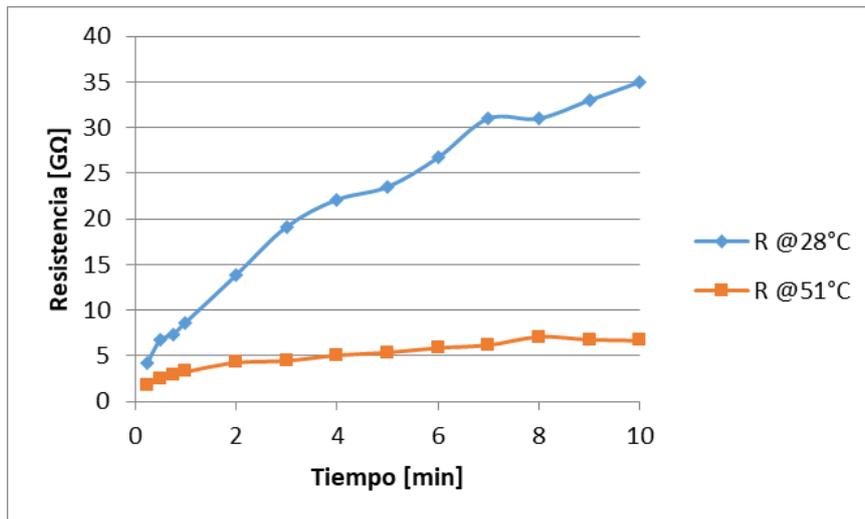


Fig.4. Resultados de la prueba de resistencia de aislamiento

De acuerdo a [3] para poder comparar dos mediciones de resistencia de aislamiento realizadas a distinta temperatura es preciso utilizar factores de corrección para referir ambas mediciones a la misma temperatura. Es usual utilizar 40°C como la temperatura de referencia.

Para el caso de materiales termoestables se presentan dos fórmulas para calcular el factor de corrección correspondiente:

$$K_T(T) = \exp \left[ -4230 \left( \frac{1}{(T+273)} - \frac{1}{313} \right) \right] \text{ si } 40^\circ\text{C} < T < 85^\circ\text{C} \quad (\text{Ec. 1})$$

$$K_T(T) = \exp \left[ -1245 \left( \frac{1}{(T+273)} - \frac{1}{313} \right) \right] \text{ si } 10^\circ\text{C} < T < 40^\circ\text{C} \quad (\text{Ec. 2})$$

Para el caso de la medición en caliente se utiliza la ecuación 2, mientras que para la medición en frío se utiliza la ecuación 1. En la Tabla I se presentan los resultados de las mediciones resistencia de aislamiento corregidos a 40°C, junto con el índice de polarización (IP).

TABLA I. VALORES DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO A 1 MINUTO REFERIDOS A 40 °C

Medición	Temperatura de medición [°C]	Factor KT [2]	Resistencia a 1 minuto sin corregir [GΩ]	Resistencia a 1 minuto corregida a 40 °C [GΩ]	IP
Medición 1	28	0,85	8,6	7,31	4,07
Medición 2	51	1,58	3,3	5,22	2,03

#### 4.2 Capacitancia y tangente delta

La medición de la capacitancia y del factor de disipación se realizó adoptando lineamientos indicados en [1], IEEE Std 286-2000 [3] e IEC 60076-27-3 [4].

La tensión de ensayo correspondió a la tensión nominal fase tierra (3,81 kV). Se registraron los valores de capacitancia y factor de disipación en incrementos del 20% de la tensión de ensayo.

En la Fig. 5 se presentan los resultados de las mediciones para ambos estados térmicos.

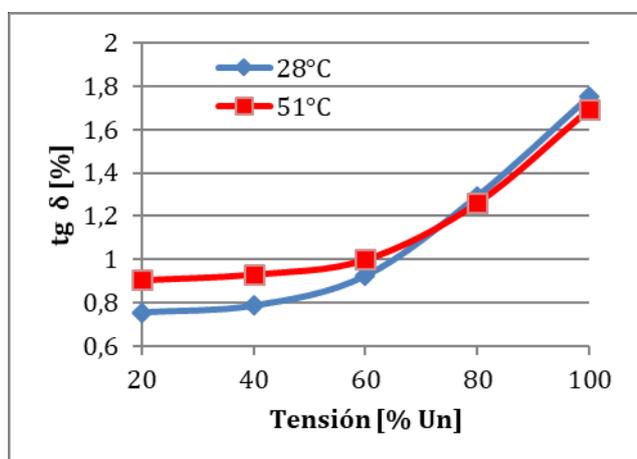


Fig. 5.a) Tangente delta

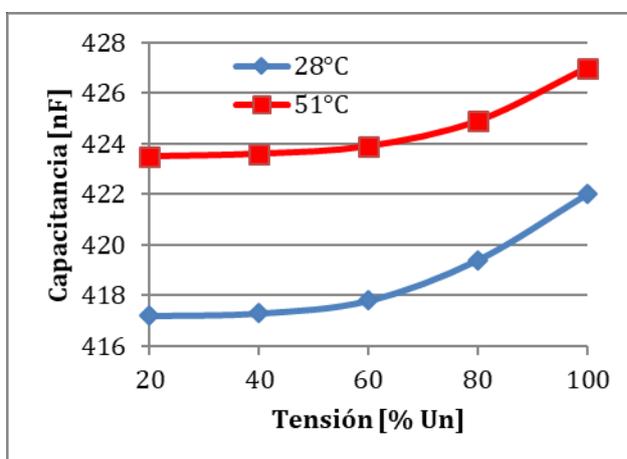


Fig. 5.b) Capacitancia

#### 4.3 Descargas parciales

En la Tabla II se presentan los valores de las descargas parciales para ambos estados, medidos en escalones del 20% de la tensión nominal fase-tierra, mientras que en la Tabla III se presentan los valores de tensión de ignición y tensión de extinción de las descargas para ambos casos.

En la Fig. 6 se presentan los patrones de descargas en fase resuelta para ambos estados a tensión nominal (3,81 kV).

TABLA II. VALORES DE DESCARGAS PARCIALES

U [% Un]	DP @28 °C [nC]	DP @51 °C [nC]
20	0,53	0,35
40	1,4	2,4
60	6,9	2,5
80	19,2	5,8
100	21,8	14

TABLA III. TENSIÓN DE IGNICIÓN Y DE EXTINCIÓN

Tensión	Medición en frío	Medición en caliente
Ignición [V]	1280	1400
Extinción [V]	980	1100

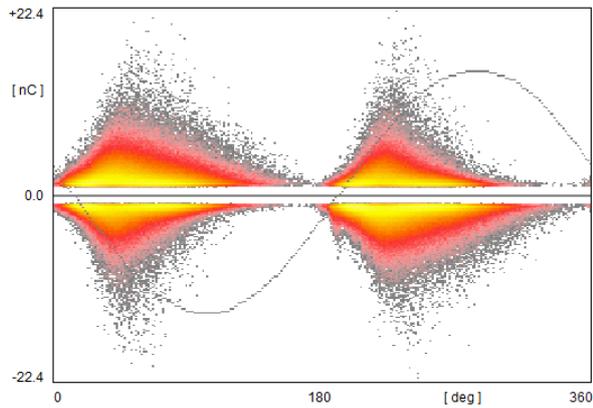


Fig. 6.a) Patrón en fase resuelta de DPs a 28 °C

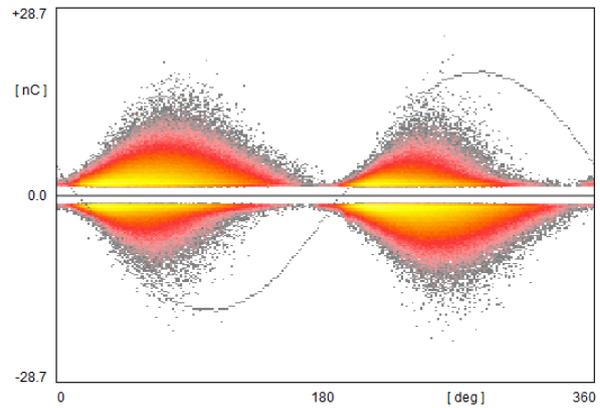


Fig. 6.b) Patrón en fase resuelta de DPs a 51 °C

## 5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

A partir de los resultados obtenidos en las pruebas se puede observar que la resistencia de aislamiento corregida a la temperatura de referencia (40 °C) no es igual en los dos casos. Esto se debe a que los factores son aproximados y calculados para barras individuales o porciones de barras, limpias y en buen estado.

Sin embargo, de acuerdo a la Tabla 1 de [5], el mínimo valor de la resistencia puntual (a un minuto), para el tipo de aislamiento ensayado a una temperatura de 40 °C, es de 100 MΩ. Los valores de resistencia medidos y corregidos al minuto fueron de 7,31 y 5,21 GΩ, es decir más de 50 veces superior al mínimo recomendado.

Con respecto al IP, la Tabla 2 de [5], indica un valor mínimo recomendado de 2 para aislamientos con clase térmica de entre 130 a 180 °C. En este caso se midieron IP superiores a dicho umbral. No obstante, de acuerdo a [3], cuando la resistencia de aislamiento a 1 minuto es superior a 5000 MΩ, el IP puede o no ser indicativo de la condición de aislamiento y, por lo tanto, no se recomienda como herramienta de evaluación.

En el caso de la tangente delta, la norma [4] indica que su variación (TIP-UP) para aislamiento de mica epoxi (o poliéster) puede ser del orden del 1% dependiendo del efecto del revestimiento de control de tensión. De acuerdo a lo medido se observa que la variación ha sido inferior al 1% en cada salto en las mediciones.

Los valores de las capacitancias resultan mayores cuanto mayor es la temperatura, lo cual es esperable considerando que la permitividad del aislamiento es dependiente de la temperatura (aumenta al aumentar la temperatura).

Los valores de las tensiones de igniciones de las descargas parciales en ambos casos fueron bajos, de menos del 40% de la tensión nominal, lo que confirma que el sistema de aislamiento tiene mecanismos de descargas preponderantemente a la tensión nominal.

Teniendo en cuenta el tipo de aislamiento del motor (aislantes con epoxi y/o poliéster), es esperable que al disminuir la temperatura aumente el tamaño los espacios vacíos, y con ello la actividad de descargas parciales (internas fundamentalmente) [8]. Dicho efecto queda de manifiesto al comprobar que el nivel de descargas parciales es levemente superior en la medición en frío respecto a los valores de descargas medidos en caliente.

El patrón de descargas en fase resuelta se corresponde con descargas del tipo superficial en cabezas de bobinas: comportamiento más o menos asimétrico, con mayor intensidad de descargas positivas en el semiciclo

negativo, que se encienden después que la tensión tiene los cruces por cero. A su vez, tampoco se descarta la presencia de descargas internas, aunque de menor intensidad a las superficiales.

## 6 CONCLUSIONES

En lo que respecta a la medición de resistencia del aislamiento se verifica que, al utilizar las fórmulas provistas para la corrección por temperatura para las dos mediciones, se obtienen valores del orden, a pesar de no estar desarrolladas para estatores completos y envejecidos, sino para barras individuales en buen estado. Se concluye que ambas ecuaciones son adecuadas para estos casos, aunque los resultados corregidos deben ser usados cuidadosamente.

Se encontró que la tangente delta medida en frío era levemente menor que la medida en caliente, mientras que a tensión nominal la situación se revirtió. Esto puede ser explicado ya que a tensiones por debajo de los valores de ignición de descargas parciales las pérdidas no dependen de las mismas.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se puede inferir que el sistema de aislamiento se encuentra con bajo nivel de pérdidas, con un valor aceptable del factor de disipación (tangente delta), lo cual permitiría descartar, por ejemplo, problemas de humedad.

Se detectaron elevados niveles de descargas parciales y que presentan un patrón de descargas en fase resuelta que corresponderían a descargas superficiales en las terminaciones de las bobinas, con un bajo nivel de ocurrencia. También se verifica, aunque en menor grado, la presencia de descargas internas en el seno del aislamiento.

Como comentario final, es importante mencionar que luego del diagnóstico la máquina fue sacada de servicio y desarmada, para ser reparada, confirmándose las hipótesis planteadas.

## 7 REFERENCIAS

- [1] O. Vaag Thorsen, M. Dalva, "*Failure Identification and Analysis for High-Voltage Induction Motors in the Petrochemical Industry*", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 35, No. 4, July/August 1999
- [2] V. Skundri, E. Tortello, D. Vizireanu, "*Motor Failure Survey*" Revista Electra N° 258 - Octubre 2011
- [3] IEEE Std. 43-2013 "*IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery*"
- [4] IEEE Std. 286-2000 "*IEEE Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation*"
- [5] IEEE Std. 62-2 "*IEEE Guide for Diagnostic Field Testing of Electric Power Apparatus- Electrical Machinery*".
- [6] IEEE Std. 1434-2014 "*IEEE Guide for the Measurement of Partial Discharges in AC Electric Machinery*"
- [7] IEC 60270-2000/AMD1-2015 "*High-voltage test techniques - Partial discharge measurements*"
- [8] IEEE Std 56-2016 "*IEEE Guide for Insulation Maintenance of Electric Machines*"