

A1 - Máquinas Eléctricas Rotativas

DIAGNÓSTICO DE MÁQUINAS ROTANTES: NORMALIZACIÓN Y ESTADO DEL ARTE ACTUAL

E. CALO*
IITREE-FI-UNLP
Argentina

R. E. ALVAREZ
IITREE-FI-UNLP
Argentina

H. MAYORA
IITREE-FI-UNLP
Argentina

P. MORCELLE del VALLE
IITREE-FI-UNLP
Argentina

L. CATALANO
IITREE-FI-UNLP
Argentina

***Resumen** – Considerando la importancia que revisten los procesos accionados con maquinaria rotante de potencia, resulta imperioso tener un pormenorizado conocimiento de la condición de dichas máquinas, a los fines de adoptar las medidas necesarias para optimizar la producción, evitando salidas intempestivas. El presente trabajo tiene como objetivo presentar una recopilación del estado actual de las directrices y recomendaciones del mantenimiento eléctrico de grandes máquinas rotatorias. De esta forma, la publicación ofrecerá una guía para el diagnóstico de máquinas rotatorias tomando como referencia los principales lineamientos establecidos en normativas y documentos técnicos internacionales vigentes.*

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

1 INTRODUCCIÓN

Hoy en día, en el ámbito industrial, uno de los primeros objetivos es buscar la optimización de los procesos asociados a los mecanismos de producción. Es decir, se busca minimizar los tiempos muertos y de producción reducida. Esto tiene como principal implicancia unas elevadas exigencias de disponibilidad de las máquinas asociadas a los procesos.

Para poder alcanzar estas exigencias es necesario que las máquinas se encuentren en un buen estado funcional y, de esta manera, evitar fallas intempestivas y salidas de servicio por problemas operativos. De acuerdo a diferentes estadísticas de fallas en motores de media tensión, se ha comprobado que la mayor tasa de incidencias ocurre en los devanados y aislamiento del estator. Es por ello, que se deben orientar los ensayos y controles a esta parte constructiva de los motores. Dichos controles pueden ser de naturaleza off line u on-line. En el presente trabajo se desarrollarán los principales lineamientos off-line establecidos en las normativas IEEE e IEC, principalmente.

En particular IEEE cuenta con una guía de diagnóstico de máquinas rotatorias de más de 4000 V (IEEE Std 62.2-2004 [1]) cuyo objetivo es brindar las recomendaciones y procedimientos de evaluación para inspecciones y ensayos de diagnóstico off-line. En dicha norma se indican lineamientos de cuales pruebas realizar y de qué manera realizarlas.

Siendo que uno de los principales causantes de falla es el deterioro del aislamiento de las máquinas, también se cuenta con una guía de mantenimiento del aislamiento de máquinas rotatorias de más de 1000V (IEEE Std 56-2016 [2]). Su objetivo es brindar la información necesaria para una efectiva evaluación del estado del sistema aislante, sirviendo como guía para determinar indicadores de la confiabilidad del equipo y permitiendo determinar cuándo la máquina va a requerir mantenimiento, o ser reemplazada definitivamente.

A su vez, existen documentos de IEEE para las principales pruebas eléctricas recomendadas en las guías mencionadas anteriormente, que incluyen metodologías de ensayo, valores límites y recomendaciones para la interpretación de resultados. En el caso de medición de resistencia de aislamiento existe la IEEE Std 43-2013 [3], para medición de factor de disipación (factor de potencia) la IEEE Std 286-2000(R2006) [4] trata específicamente los aspectos de dicha prueba, para el ensayo de impulso (Surge Test) se establece la norma IEEE Std 522-2004 [5] y para la medición de descargas parciales existe la norma IEEE Std. 1434-2014 [6].

Respecto a IEC, se cuenta con la norma IEC 60270 [7] que establece los criterios de los sistemas de medida para los ensayos de descargas parciales. También se dispone de la especificación técnica IEC 60034-27-1 [8], que brinda una serie de patrones de descargas parciales que resultan de aplicación y soporte para las mediciones off-line.

En el caso de Cigré se cuentan con documentos técnicos orientados a la evaluación del sistema aislante de máquinas rotantes: el Technical Brochure 552 [9] plantea una guía para determinar la condición del aislamiento estático; el Technical Brochure 558 [10] una guía de monitoreo y diagnóstico de grandes motores; y el Technical Brochure 386 [11] lineamientos para el mantenimiento, inspección y programación de ensayos en generadores.

En el presente trabajo se desarrollarán específicamente los fundamentos, metodologías y análisis de resultados de los ensayos de resistencia de aislamiento e índice de polarización, surge test, tangente delta y medición de descargas parciales off-line, por ser considerados los más importantes a la hora de evaluar el estado del sistema de aislamiento estático de grandes máquinas.

2 DESARROLLO

Todas las máquinas fallan eventualmente lo cual es inevitable debido a las sollicitaciones térmicas, mecánicas eléctricas y ambientales a las cuales se ven expuestas a lo largo de su vida útil. En [2] se describen detalladamente las sollicitaciones que pueden afectar a cada parte de la máquina, pero no van a ser descritas en esta publicación por encontrarse fuera del alcance. Sin embargo, con una adecuada estrategia de mantenimiento es posible evitar fallas intempestivas y lograr que la máquina llegue al fin de su vida útil en el tiempo estimado.

Antes de comenzar a realizar pruebas, es importante conocer el historial de la máquina, ya que cualquier condición operativa inusual podría indicar hacia donde apuntar la lupa.

Una herramienta muchas veces subestimada es la inspección visual. Según [1] ninguna prueba va a revelar más información que una minuciosa inspección visual realizada por personal debidamente calificado. Dependiendo del tamaño y del tipo constructivo de la máquina en ciertos casos es posible realizar una inspección visual limitada que permita detectar barras flojas en la cabeza de bobina entre otros tipos de defectos. Existen técnicas más avanzadas, como la utilización de inspección robótica, que permiten obtener información más detallada. De acuerdo a [2] se recomienda realizar esta tarea en intervalos de 1 a 5 años, mientras que la inspección con rotor retirado entre 5 y 10 años.

Dentro de todas las pruebas sugeridas en las diferentes guías para mantenimiento, se destacan las siguientes.

2.1 Resistencia de aislamiento

La medición de resistencia de aislamiento consiste en aplicar una tensión continua, y medir la corriente resultante. A partir de la ley de Ohm se obtiene el valor de la resistencia de aislamiento.

La corriente total medida estará formada principalmente por la suma de cuatro componentes: capacitiva, conductiva, superficial y de absorción.

La corriente capacitiva es una corriente que aparece debido a la propia capacitancia del aislamiento, pero que posee una constante de tiempo muy corta y por lo tanto decae exponencialmente de manera rápida. Depende principalmente de las características geométricas del devanado.

La corriente conductiva se debe a la conducción electrónica e iónica a través del volumen del aislamiento propiamente dicho, y por lo tanto dependerá del tipo del sistema aislante, los materiales utilizados y de su condición (envejecimiento, presencia de humedad, contaminantes, entre otros).

La corriente de pérdidas superficiales es una corriente constante que se debe a la resistividad superficial del material, y por lo tanto su magnitud dependerá fuertemente de la humedad y contaminación superficial. Suele ser menor a la corriente de absorción, aunque en casos de elevada contaminación puede ser del mismo orden, o incluso superarla.

Por último, la corriente de absorción es el resultado de la polarización de las cadenas moleculares. Dicho fenómeno puede ser de tipo electrónico (el átomo se distorsiona generando una concentración de electrones a un lado del núcleo), iónico (los enlaces atómicos se deforman elásticamente formando dipolos), dipolar (implica la orientación de los dipolos naturales con respecto al campo) e interfacial (por presencia de impurezas se produce una carga eléctrica en las interfaces de dos materiales). En el caso de los sistemas aislantes de máquinas rotantes el mecanismo de polarización interfacial es el que predomina, ya que el mismo está formado por numerosas interfaces de distintos materiales como mica, vidrio y matrices poliméricas.

Los tiempos de relajación son tales que incluso la medición a 10 minutos cae dentro del rango de la corriente de polarización. Es por esto que se utiliza como herramienta, adicional a la resistencia puntual medida a 1 minuto, el índice de polarización (IP). El mismo se define como el cociente entre las resistencias medidas a 10 minutos y a 1 minuto.

En la Fig. 1. Se presenta un esquema circuital de las corrientes mencionadas.

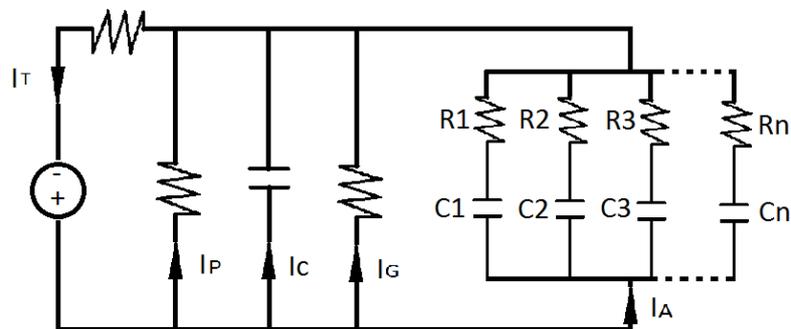


Fig. 1. Modelo circuital de las corrientes asociadas a la presencia de un campo eléctrico

Para la realización de la prueba se suele usar un megóhmetro, el cual permite la lectura directa de la resistencia de aislamiento. En [3] se sugieren los siguientes valores de tensión de prueba en función de la tensión (de línea) nominal de la máquina, presentados en la Tabla I.

TABLA I. TENSIONES DE ENSAYO PARA RESISTENCIA DE AISLAMIENTO

Tensión nominal del bobinado [V]	Tensión de prueba [V]
<1000	500
1000-2500	500-100
2501-5000	1000-2500
5001-12000	2500-5000
>12000	5000-10000

Uno de los principales factores que afectan a los resultados es la condición de la superficie. La presencia de contaminantes como aceite o partículas de carbón puede llevar a un incremento considerable de la corriente de fuga superficial. Algunos contaminantes como sales suelen ser no conductores cuando están secos, pero con la presencia de humedad o aceite pueden volverse conductores, lo que se deriva en un aumento de la corriente superficial. Sin embargo, en estos casos luego de una limpieza y secado es posible que las corrientes vuelvan a valores normales.

Independientemente del estado de la superficie del aislamiento, cuando la temperatura cae por debajo del punto de rocío es posible que se deposite una capa de humedad en la superficie que puede reducir el valor de RA. El efecto es aún más pronunciado cuando el aislamiento tiene ranuras a través de las cuales puede penetrar la humedad.

Otro de los factores que afectan a la medición de RA es la temperatura. El aumento de temperatura permite la liberación de cargas y mejora la movilidad de los electrones, reduciendo de esta manera la resistencia. De acuerdo a [3], lo ideal es corregir la medición a 40 °C, utilizando un factor de corrección. En el caso de materiales termoplásticos se sugiere la siguiente ecuación:

$$K_T = 0,5^{(40-T)/10} \quad (\text{Ec. 1})$$

Mientras que para los materiales termoestables se presentan las siguientes dos ecuaciones:

$$K_T(T) = \exp \left[-4230 \left(\frac{1}{(T+273)} - \frac{1}{313} \right) \right] \text{ si } 40^\circ\text{C} < T < 85^\circ\text{C} \quad (\text{Ec. 2})$$

$$K_T(T) = \exp \left[-1245 \left(\frac{1}{(T+273)} - \frac{1}{313} \right) \right] \text{ si } 10^\circ\text{C} < T < 40^\circ\text{C} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde T es la temperatura en el momento de la medición.

Para el caso del IP, si la temperatura no se modificó significativamente durante los 10 minutos de prueba, no es necesaria la corrección.

Por último, la resistencia puede verse afectada por la tensión de prueba. Si el aislamiento está en buenas condiciones y completamente seco la RA no se ve afectada por la tensión de ensayo. Por otra parte, una disminución significativa de la RA con la tensión puede ser un indicador de problemas en el aislamiento.

Para analizar los resultados obtenidos en la prueba lo ideal es analizar el historial de pruebas y contrastar con mediciones previas. Sin embargo, en caso de no tener esa información disponible en [3] se sugieren valores límites para la RA y en [9] para el IP de acuerdo al tipo de máquina. En la Tabla II se presentan los valores sugeridos para RA y en la Tabla III los valores para IP.

TABLA II. VALORES MÍNIMOS DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO

Resistencia de aislamiento mínima [MΩ]	Tipo de devanado
$R_{A(\min)} = kV^{*+1}$	Fabricados antes de 1970, devanados de campo y otros no descriptos.
$R_{A(\min)}=100$	Mayor parte de los bobinados fabricados después de 1970
$R_{A(\min)}=5$	Para las demás máquinas con tensión nominal inferior a 1kV, bobinados aleatorios y bobinas preformadas

**kV se refiere a la tensión de línea nominal en máquinas trifásicas, tensión de fase nominal de máquinas monofásicas y tensión DC para máquinas de tensión continua*

TABLA III. VALORES MÍNIMOS DE IP

Clase térmica del aislamiento	IP mínimo
Clase A	1,5
Clase B	2
Clase F	2
Clase H	2

Es importante destacar que cuando se obtienen valores de RA mayores a 5000 MΩ, la corriente medida puede estar por debajo del orden de los microampere. En este nivel de sensibilidad requerida del instrumento de prueba, pequeños cambios en la tensión de suministro, la humedad ambiental, las conexiones de prueba y otros componentes no relacionados pueden afectar a la corriente total medida durante el intervalo de 1 min -10 min requerido para un IP. A causa de estos fenómenos, el IP puede o no ser una indicación de la condición de aislamiento y, por lo tanto, no se recomienda como una herramienta de evaluación.

2.2 Surge test

El surge test es la única prueba que permite detectar tanto cortocircuitos entre espiras, como evaluar la capacidad del aislamiento a tierra de soportar impulsos. Consiste básicamente en aplicar un impulso conocido a un devanado, cuya impedancia entregará como respuesta una onda que dependerá de la geometría y las características constructivas del bobinado.

El análisis de resultados se realiza mediante inspección visual, utilizando un oscilograma para comparar las formas de ondas con resultados anteriores obtenidos en el mismo devanado. Modificaciones en las respuestas pueden implicar una posible falla como espiras en cortocircuito. El surge test es un ensayo “pasa o no pasa”.

Antes de realizar la prueba de surge test se recomienda primero realizar la prueba de resistencia de aislamiento e índice de polarización, asegurándose de esta manera que el bobinado será capaz de soportar los impulsos. La superficie deberá estar limpia y seca, y es recomendable que la temperatura se encuentre por encima del punto de rocío para evitar la condensación de agua en el aislamiento. Durante el surge test se somete al bobinado a una sollicitación anormal, por lo que si se presume que la máquina cuenta con aislamiento reducido se recomienda ajustar el valor de tensión de prueba a uno seguro para evitar un daño mayor.

La tensión mínima de prueba sugerida por [5] dependerá del tiempo del frente de onda. Tiempos de frente elevados tienden a sollicitar el aislamiento a tierra, por lo que se sugiere utilizar frentes entre 0,1 y 0,2 μs . En la Fig. 2 se presenta el gráfico tensión de prueba vs tiempo de subida recomendado, donde los valores se presentan en *por unidad* referido a $V = V_L \sqrt{2/3}$, donde V_L es la tensión de línea de la máquina.

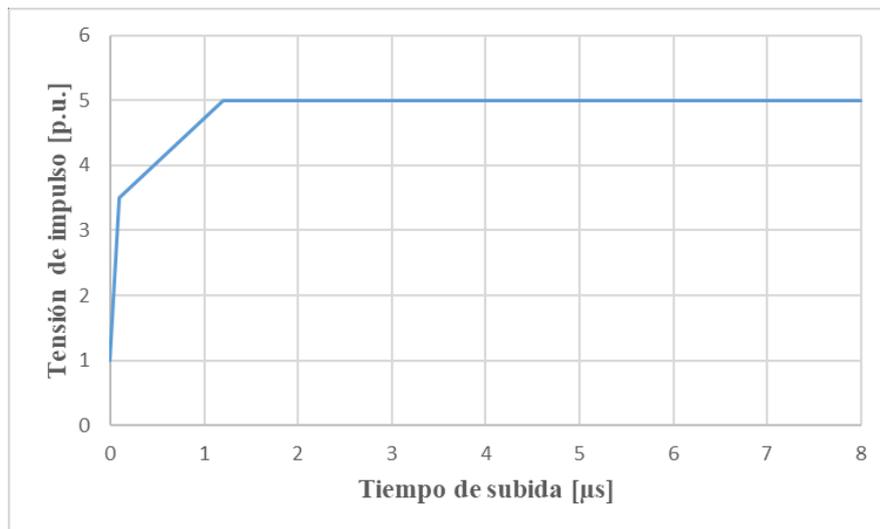


Fig. 2. Tensión de ensayo vs tiempo de frente de la onda para la prueba de Surge Test

2.3 Tangente delta y capacitancia

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° entre sí. La tangente delta se define como el cociente entre ambas componentes.

Si bien resulta útil, la medición de tangente delta o factor de disipación (FD) a un solo valor de tensión no brinda suficiente información. Es por eso que en el caso de aislamientos secos como es el caso de las máquinas rotantes se recomienda realizar medición en distintos valores de tensión, es decir un TIP-UP.

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.

A la hora de realizar la prueba hay que tener especial cuidado en las conexiones, ya que se podrían generar descargas del tipo corona que afectan a los resultados de la medición, llevando a un diagnóstico erróneo. Durante la prueba de descargas parciales es posible determinar si se tienen pérdidas del tipo corona al analizar los patrones en fase resuelta.

Para realizar la prueba, lo ideal es medir el FD y la capacitancia de cada bobina por separado, ya que si se miden en conjunto es posible que se enmascare algún defecto puntual. Sin embargo, no siempre es posible realizarlo de esta manera, por lo que se suele realizar la medición entre cada fase y tierra, con las fases no ensayadas también conectadas a tierra. En el caso de que no se tenga acceso al centro de estrella la medición se realiza cortocircuitando las tres fases entre sí y aplicando la tensión entre las tres fases y tierra, evaluando de esta manera el aislamiento de forma integral. En los casos que no se disponga de mucho tiempo para realizar las mediciones, esta última variante es una alternativa válida ya que se realiza una única medición.

La tensión se debe aplicar en escalones sucesivos de tensión, del 20% de la tensión nominal de acuerdo a [8], y medir el FD y la capacitancia en cada uno de estos factores. Se evalúa el FD y capacitancia de forma individual, así como las variaciones de ambos en cada escalón de tensión. En [8] también se establecen límites de aceptación para el TIP-UP, presentados en la Tabla IV.

TABLA IV. LÍMITES DE FACTOR DE DISIPACIÓN

Valor inicial de FD a 0,2 Un	2%
Variación de FD en cada escalón de 0,2Un hasta Un	0,5%
Variación de FD entre 0,6Un y 0,2 Un	0,5%

Muchos factores afectan el grado de aumento del factor de disipación. Algunos de estos factores son la delaminación, impregnación imperfecta, curación incompleta, adherencia inadecuada, arrugas y contaminantes. La condición de las bobinas, el tratamiento superficial y el sistema de graduación de tensión también influyen en el grado de aumento del factor de disipación.

La capacitancia del devanado se reduce con la formación de huecos en el aislamiento y aumenta si estos se saturan de agua. La medición periódica de la capacitancia puede ser útil para determinar delaminación por sobrecalentamiento o contaminación por agua en el devanado.

Es importante destacar que la prueba de FD no puede ser utilizada por sí sola como un indicador absoluto de la condición de la máquina, sino que debe ser utilizada en conjunto con las demás pruebas.

2.4 Descargas Parciales

En general, la mayoría de los equipos son diseñados para evitar la generación de descargas parciales (DPs) en normal funcionamiento. Las máquinas rotantes son la excepción a esto, ya que son capaces de tolerar niveles apreciables de descargas.

Una de las principales fuentes de DPs en una máquina rotante son las descargas internas, que se deben a cavidades en el seno del aislamiento principal por el proceso constructivo. Estas descargas pueden estar presentes desde el primer día de funcionamiento hasta el fin de su servicio, sin reducir la vida útil.

Sin embargo, modificaciones en los niveles de DPs durante su vida útil pueden ser indicadores de algún defecto, y en ciertos casos son alarmas de una falla inminente.

La medición de DPs puede realizarse en diferentes configuraciones. En caso de poder desvincular el centro de estrella se puede ensayar cada fase por separado, con las dos fases restantes puestas a tierra. Caso contrario, se deben cortocircuitar los tres terminales entre sí y de esa forma evaluar el aislamiento a tierra completo, excluyendo el aislamiento entre fases.

Al realizar la medición de FD y capacitancia, muchas veces se suele aprovechar el mismo sistema de alimentación, por lo que las mediciones se pueden realizar de forma simultánea. De esta manera, también se

miden las descargas parciales en escalones del 20% de la tensión nominal. Adicionalmente, es importante registrar la tensión de ignición y de extinción de las DPs.

Uno de los principales factores que pueden afectar la medición es el ruido externo. El ruido electromagnético generado por otros equipos puede interferir con las mediciones, por lo que tiene que ser medido y considerado a la hora de efectuar el ensayo. A partir de esto existen numerosas técnicas de supresión de ruido, que deben ser utilizadas con sumo cuidado para asegurarse que no se está suprimiendo una señal que efectivamente proviene de DPs en la máquina.

De la misma manera, las conexiones de alta tensión también pueden afectar fuertemente a la prueba, ya que si se tienen bordes filosos o puntas agudas la concentración de campo generará descargas por efecto corona no deseado. Todas las conexiones deben ser lo más suavizadas posibles a fin de evitar este inconveniente. A su vez, es importante que los equipos utilizados para la alimentación también sean de bajo nivel de descargas (transformador y capacitor de acoplamiento principalmente)

La temperatura es otro parámetro que puede afectar la medición de DPs. Al calentarse el aislamiento se expande, y por lo tanto se reducen las cavidades que generan DPs, reduciéndose la carga aparente. Mientras que con temperaturas más frías el aislamiento se contrae y aumenta la actividad de DPs. Por esto mismo es necesario registrar la temperatura de ensayo, a fin de comparar los resultados con futuras mediciones.

El comportamiento de las descargas con respecto a la humedad dependerá del material utilizado para la construcción del aislamiento. En los materiales antiguos de asfalto-mica (altamente higroscópicos) las DPs aumentan con la humedad, mientras que en materiales modernos del tipo epóxico sucede lo contrario.

Para la interpretación de los resultados obtenidos existen varias alternativas. En primer lugar, se puede analizar la carga aparente (Q_m), con respecto a mediciones anteriores. Ya que cada máquina tendrá su nivel de descargas característico no es posible establecer un valor límite que indique una falla inminente. Sin embargo, en caso de no contar con ninguna referencia, es válido comprar los valores entre cada fase, o incluso con máquinas gemelas, siempre y cuando se utilice el mismo sistema de medición.

Además del valor de la carga aparente, una herramienta muy útil es el análisis del patrón de las descargas en fase resuelta. Esto es, la distribución de las descargas con respecto a la fase de la tensión de ensayo y su repetitividad.

De acuerdo a estos patrones, es posible determinar la naturaleza y en qué sector del aislamiento se encuentran las descargas. La gran desventaja de esta técnica es que suele depender fuertemente de la experiencia del operario para un correcto diagnóstico. En [8] y en [6] se presentan algunos patrones típicos de los distintos tipos de descargas. A modo de ejemplo, en la Fig. 3 se presenta el patrón característico de descargas en ranura.

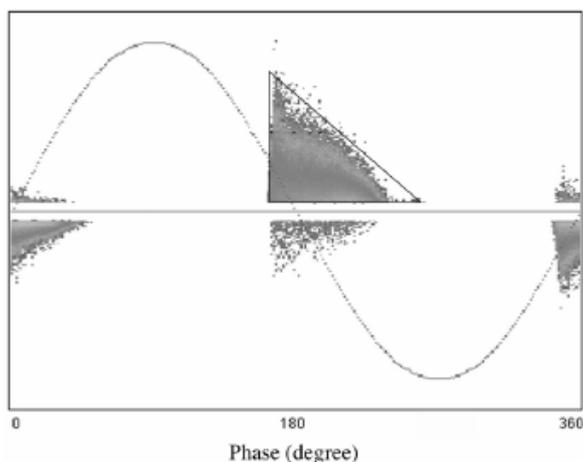


Fig. 3. Patrón en fase resuelta para descargas parciales en ranura

3 CONCLUSIONES

El correcto diagnóstico de la condición de una máquina es una acción que implica el aumento de la vida del activo y reducir considerablemente costos asociados a reparación y reemplazo, y principalmente a la pérdida de producción.

Para que esto suceda es imprescindible utilizar estrategias de mantenimiento que permitan, dentro de lo posible, realizar inspecciones con periodicidad. Si las pruebas no se realizan de acuerdo a lo estipulado en las normas y documentos técnicos internacionales vigentes será muy difícil obtener una trazabilidad y una correcta interpretación de los resultados. La trazabilidad es muy importante cuando los activos se ensayan con diferente instrumental y personal.

Una de las principales herramientas del diagnóstico es el análisis histórico de tendencias que permitan un análisis predictivo. Para ello, puede ser necesario la corrección de los resultados, donde nuevamente el uso de procedimientos estandarizados resulta fundamental para una correcta sensibilidad en los resultados.

Los principales ensayos del diagnóstico se centran fundamentalmente al estado del sistema de aislamiento, siendo éste uno de los elementos críticos para la operación de la maquinaria rotatoria. Los resultados de los ensayos desarrollados deben integrarse en un diagnóstico final, de forma de identificar con mayor precisión las posibles condiciones defectuosas en el aislamiento.

Se puede concluir que hay suficientes documentos técnicos y normas orientadas al mantenimiento y diagnóstico de máquinas rotantes para realizar las acciones de manera correcta. En los mismos se detalla la naturaleza de las diferentes sollicitaciones que sufren las máquinas, los efectos que las mismas generan en los aislamientos, qué pruebas realizar para evaluarlos, cómo realizarlas y cómo interpretar los resultados obtenidos.

Cabe destacar que los ensayos presentados no son los únicos existentes para el mantenimiento Offline, pero pueden ser considerados como pruebas básicas y elementales.

4 REFERENCIAS

- [1] IEEE Std. 62-2 “*IEEE Guide for Diagnostic Field Testing of Electric Power Apparatus- Electrical Machinery*”.
- [2] IEEE Std 56-2016 “*IEEE Guide for Insulation Maintenance of Electric Machines*”
- [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. 522-2004: “*IEEE Guide for Testing Turn Insulation of Form-Wound Stator Coils for Alternating-Current Electric Machines*”
- [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] IEC 60034-27-1 “*Rotating electrical machines – Part 27-1: Off-line partial discharge measurements on the winding insulation*”
- [9] Technical Brochure N°552 “*Guide of methods for determining the condition of stator winding insulation and their effectiveness in large motors*”
- [10] Technical Brochure N° 558 “*Guide for the Monitoring, Diagnosis and Prognosis of Large Motors*”
- [11] Technical Brochure N° 386 “*Generator Maintenance, Inspection and Test Programmes*”