



CRITERIOS PARA EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS GIRANTES PARA LA REALIZACIÓN DE SERVICIOS

Walter Evaldo Kuchenbecker

Investigador Doctor Colaborador del Programa de Posgraduación en ENERGÍA - UFABC, walterk@weg.net

RESUMEN

El mantenimiento frecuente de la máquina eléctrica girante es vital para su perfecto funcionamiento y esta responsabilidad es aún mayor en máquinas de gran porte, debido a los altos valores agregados a esas máquinas y al proceso en que están insertadas. Las máquinas de gran porte, construidas con devanados de media tensión, requieren tecnologías específicas y cuidados especiales en la fabricación. Estos cuidados deben ser aún más específicos en la operación y mantenimiento, ya que estas máquinas eléctricas son sometidas a severas condiciones de estrés eléctrico, mecánico, térmico y ambiental. Un mantenimiento periódico garantiza una vida útil mayor, ya que puede identificar posibles tendencias incipientes de fallas. Las herramientas, equipos y experiencias de los equipos de mantenimiento pueden identificar estas tendencias de fallas, las causas y las respectivas correcciones. Para estas evaluaciones, los devanados muchas veces deben ser sometidos a niveles de tensión que también pueden comprometer la actual situación de la máquina, que ya sufrió por muchos años los estreses de la operación. De esta forma, ese artículo tiene como objetivo presentar técnicas de evaluaciones en máquinas eléctricas girantes, utilizando la tensión nominal de fase +10%, o sea, los mismos niveles de tensión aplicados a los devanados en operación, una proposición diferente al que es descrito en las normas.

Palabras clave: Máquinas eléctricas; aislamiento; mantenimiento.

1 INTRODUCCIÓN

Las máquinas eléctricas poseen papel fundamental en cualquier proceso productivo, tanto en fuerza motriz como en fuente de energía. Entonces, para cualquier parada de una máquina eléctrica, serán sentidos impactos significativos en el proceso productivo.

Los altos índices de competitividad de mercado están llevando a las industrias a buscar confiabilidad y disponibilidad de los equipos, para minimizar interrupciones indeseadas en los procesos productivos, así como para reducir costos no programados de mantenimiento. Con base en eso, los sectores de mantenimiento desempeñan un papel fundamental, mediante estrategias en la gestión de mantenimiento preventivo y predictivo. En todo proceso fabril existen equipos que están en fase continua de depreciación, o incluso, a camino de tornarse obsoletos. El mantenimiento debe garantizar la confiabilidad en los equipos durante todo el proceso de depreciación [1].

La tradicional “curva de la bañera” de fallas de equipos, conforme la figura 1 [1], traduce la probabilidad de fallas en máquinas eléctricas girantes. Al inicio de la operación, se podrá deparar con fallas inherentes a la aplicación, al transporte o eventualmente a la producción. Después de pasado ese momento, el equipo entra en una operación estable, pudiendo fallar aleatoriamente, y pasado por este período, se entra en el límite de su vida útil. Para reducir el número de fallas debido a la producción, que ocurrirían tras la instalación, son realizados diversos ensayos, por parte del fabricante, antes de que el equipo sea liberado. Éstos no son ensayos adaptados para los otros momentos de la vida útil del equipo. El artículo se propone tratar las evaluaciones del sistema de aislamiento, cuando la máquina eléctrica esté en el último período de la “curva de la bañera”.

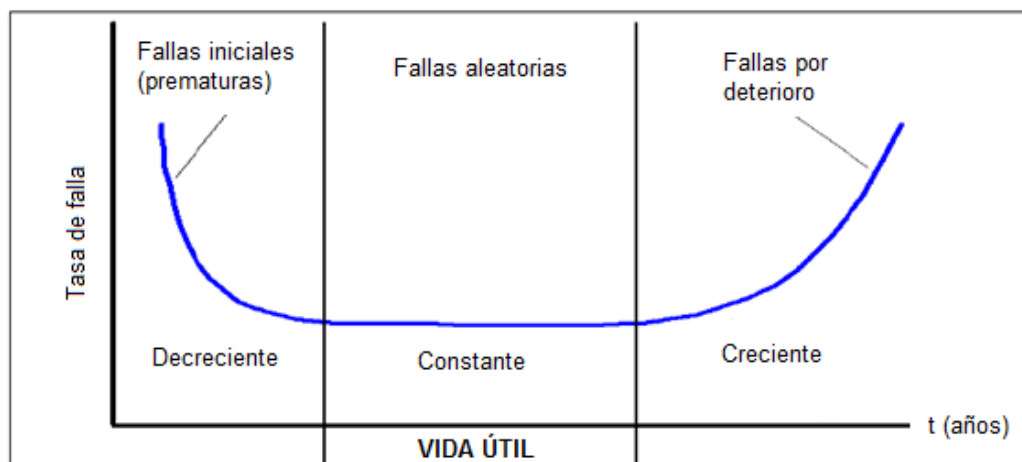


Figura 1: Tradicional “curva de la bañera” para las probabilidades de falla durante la vida útil del equipo [1]

Las máquinas eléctricas girantes son sometidas continuamente a estreses eléctricos, mecánicos, térmicos y ambientales, principalmente a los contaminantes que degradan los componentes de la máquina y comprometen su vida útil. El principal componente que es degradado en una máquina eléctrica es el sistema de aislamiento de los devanados. Este factor es aún más complejo en las máquinas de media tensión. La figura 2 presenta una estadística de fallas en generadores de gran porte, donde se puede observar que las fallas referentes al aislamiento son predominantes.

La vida útil de los aislantes normalmente define la confiabilidad de funcionamiento de la máquina eléctrica. Una máquina de buena calidad, y operando de manera recomendada, tiene una expectativa de vida útil de alrededor de 25 años [2; 3]. El aislamiento puede ser afectado por varios factores, tales como: absorción de humedad, oxidación, descomposición térmica, efectos electrolíticos y corrientes de fuga, descargas eléctricas y sus reacciones químicas, estreses termomecánicos, desgaste mecánico y abrasivos. Estos factores pueden acelerar degradaciones en los aislamientos y llevar a la máquina eléctrica a fallas prematuras e inesperadas.

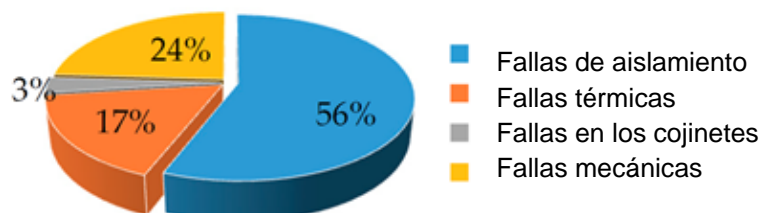


Figura 2: Estadísticas de fallas en generadores de gran porte y media tensión [2]

Estudios y equipos están siendo constantemente desarrollados para monitorear tendencias de falla. Los ensayos más comunes utilizados en las evaluaciones de estas máquinas eléctricas son: la medición de la resistencia de aislamiento, índice de absorción y polarización; prueba de sobrecarga de tensión (*surge test*), que es utilizado para identificar corto entre espiras; los aplicadores de tensión (*hipots*) usados para probar los aislantes de manera activa, midiendo la fuga de corriente y verificando el efecto corona; las pérdidas dieléctricas (el tangente delta), que son usadas para identificar la tendencia de las pérdidas en la capacitancia asociada al aislamiento y el medidor de descargas parciales que monitorea pequeñas descargas que ocurren en estos sistemas de aislamiento y traza una evolución de estos niveles.

El estator y el rotor de una máquina eléctrica están compuestos básicamente por tres tipos de materiales: los conductores de cobre (pudiendo ser de aluminio en algunos casos), el núcleo de chapas ferromagnéticas y los aislantes. Los conductores conducen la corriente necesaria para la creación del campo magnético y conversión de energía, el núcleo de chapas



conduce el flujo magnético y los aislantes separan las partes eléctricamente activas, garantizando que la corriente siga el camino correcto.

Los devanados de los estatores pueden ser fabricados de tres maneras: bobinado aleatorio, utilizado para bobinas de alta capacidad de corriente con varios conductores en paralelo, común en máquinas de tensión inferiores a 1kV (baja tensión). Las bobinas preformadas son normalmente utilizadas para máquinas con tensión superior a 1kV. Las bobinas son moldeadas y aisladas antes de la inserción en las ranuras de la máquina. Todas las bobinas poseen el mismo formato con separaciones entre cada bobina. Las bobinas de las máquinas superiores a 50MW son de difícil inserción en las ranuras, debido a su gran tamaño, aumentando la probabilidad de daños en el proceso de bobinado. Este proceso es facilitado por la inserción de devanados de barras del tipo Roebel. En esos devanados existen conexiones en los dos lados de las barras, para la formación de la espira.

El sistema de aislamiento de un devanado de la máquina eléctrica contiene varios componentes, los cuales evitan que la parte activa entre en cortocircuito. Los componentes básicos de un sistema de aislamiento son: aislamiento entre los cables, aislamiento entre espiras y aislamiento para tierra. El proyecto de aislamiento debe tomar en consideración la vibración originada por las fuerzas electromagnéticas y la dificultad extra que causan al enfriamiento de los devanados.

Las máquinas eléctricas de media tensión utilizan normalmente la conexión estrella con el neutro accesible para la alimentación del estator. Cuando la máquina tiene esta conexión, la composición de la tensión de línea se da por la suma vectorial de las dos tensiones de fase. En el caso de la conexión triángulo, la tensión de fase es exactamente la misma de la tensión de línea, y la corriente de línea se da por la sumatoria vectorial de las corrientes de fase. De esa forma, hay una relación de 1,73 veces (raíz cuadrada de 3) entre las grandezas de línea y de fase en máquinas trifásicas.

El proyecto del sistema de aislamiento toma en consideración más de un siglo de experiencia de los fabricantes de equipos electromagnéticos. Entretanto, los nuevos materiales y el uso de la electrónica de potencia, ambos con alta tasa de actualización en las últimas décadas, exigen un continuo perfeccionamiento del conocimiento sobre el tema. Las normas consideran las evaluaciones de los devanados, siempre con tensión de línea de la máquina. La tensión aplicada en el ensayo del “hipot” es normalizada en $2 \times U_{\text{Línea}} + 1\text{kV}$, valor este muy por encima de la tensión de línea de la máquina. Esta alta tensión produce un estrés concentrado durante 1 minuto y sólo debe ser aplicada en máquinas nuevas.

Máquinas que operaron por mucho tiempo, que aún están dentro de su vida útil, sometidas a las más diversas condiciones de agresividad, pueden estar con las propiedades de los aislantes modificadas, no cabiendo en ella este ensayo normalizado, ya que el estrés concentrado de este ensayo puede envejecer rápidamente el aislante, reduciendo su vida útil [4].

La proposición de este artículo es mantener los niveles de tensión de operación para las evaluaciones generales de los sistemas de aislamiento de las máquinas a ser reparadas. Por lo tanto, utilizar siempre $U_{\text{Línea}}/\sqrt{3} + 10\%$ para todos los ensayos recomendados para evaluar el equipo. El incremento de 10% en la tensión fue atribuido debido a la posibilidad de variación de tensión de los sistemas de suministro de energía eléctrica.

2 CARACTERÍSTICAS DE LOS AISLAMIENTOS

2.1 Tipos de construcción de estatores

Los estatores de las máquinas eléctricas de media tensión están compuestos por bobinas preformadas, núcleo de chapas ferromagnéticas finas con bajas pérdidas y de alta permeabilidad y el sistema de aislamiento. El aislamiento para la masa es hecho en la propia bobina para las bobinas preformadas, diferente de los devanados aleatorios de baja tensión en los que el aislamiento es hecho por filmes aislantes dentro de la ranura, pero éstos no serán discutidos en este artículo.

Los factores que definen un sistema de aislamiento son las temperaturas de trabajo, cuando la máquina eléctrica se encuentra en régimen, la tensión nominal, la resina utilizada en la impregnación y el ambiente en el que la máquina operará, así como la aplicación de la



máquina. Los devanados con bobinas preformadas generalmente son aplicados para máquinas eléctricas con potencia por encima de 1000kW y con tensión de línea normalmente superiores a 690V. La figura 3 muestra un estator con bobinas preformadas, debidamente espaciadas, resaltando cómo los cables rectangulares están dispuestos dentro de la ranura.

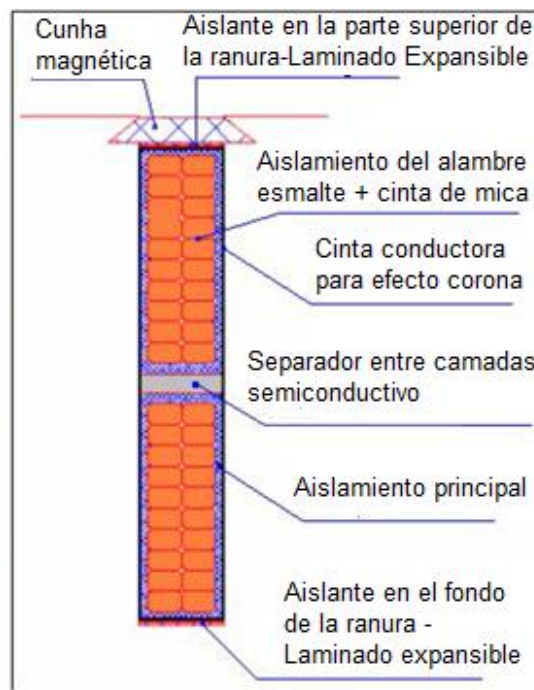


Figura 3: Estator con bobinas preformadas y ranura con disposición de los conductores [13]

Los devanados con bobinas preformadas están constituidos por cables rectangulares, que pueden ser aislados entre sí en cuatro maneras diferentes, seleccionados por el nivel de tensión deseado. Los cables rectangulares pueden ser revestidos por una camada de esmalte a base de poliéster. Para tensiones mayores, este aislamiento es reforzado con una o dos camadas de alambre aislante a base de fibra de vidrio. Otra solución es una camada de cinta de mica con base de poliéster. Finalmente, la opción de aislamiento por una camada de esmalte de poliéster y una camada más de cinta de mica es la más adecuada para tensiones más altas. Estas composiciones poseen rigidez dieléctricas en el orden de 70 a 100kV/mm [13].

En la figura 4 es mostrado un sistema de aislamiento completo de una bobina preformada para máquina eléctrica de media tensión.

Luego de la finalización de todo el proceso de aislamiento y formateado de la bobina, éstas son insertadas en las ranuras del núcleo de chapas magnéticas y trabadas por las cuñas de cierre de la ranura. Con todo el núcleo ferromagnético bobinado, con las conexiones de las bobinas realizadas y los cables de salida interconectados, el núcleo bobinado es sometido al sistema de impregnación a vacío y presión (VPI – *Vacuum and Pressure Impregnation*). Este proceso consiste en emerger los devanados en resina aislante bajo presión, para eliminar cualquier posible burbuja de aire. La cura de la resina es hecha en horno calentado, monitoreando la temperatura de los devanados. Cuando los devanados alcancen la temperatura específica, la máquina permanecerá en el horno por cerca de 12h para la cura. Luego de la cura, el proceso de impregnación estará completo.

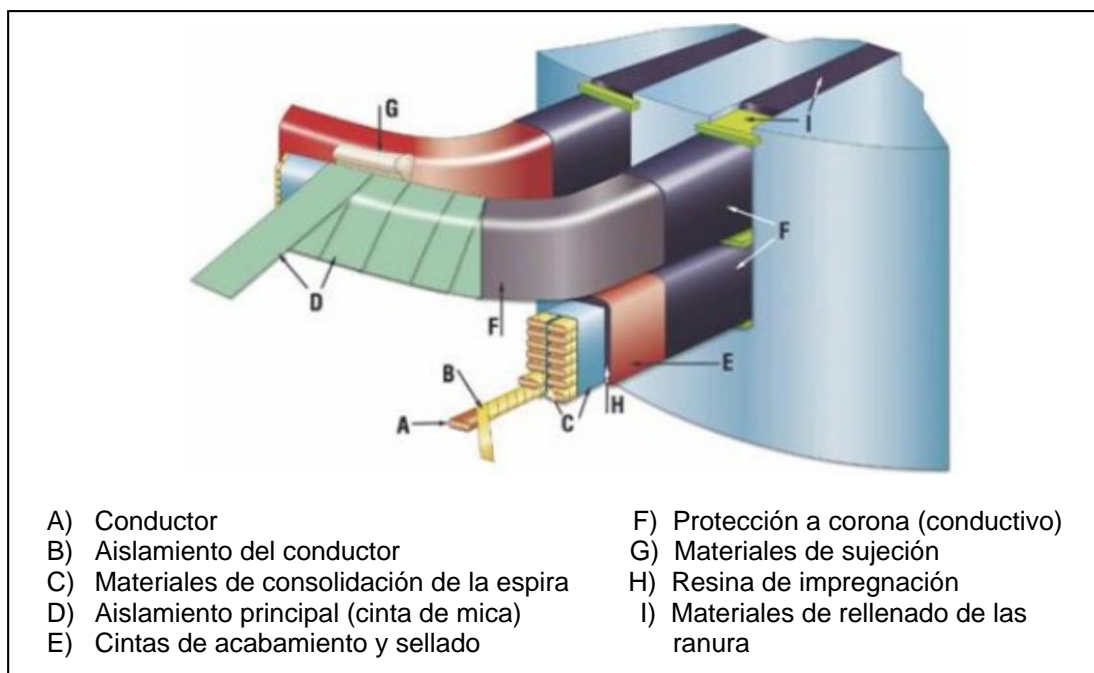


Figura 4: Sistema de aislamiento para máquinas de media tensión [13]

Los problemas asociados a la falla de aislamiento pueden estar relacionados al movimiento de las bobinas, debido a la vibración, normalmente consecuencia de condiciones operacionales inadecuadas. Estas vibraciones reducen la distancia de aislamiento, aumentando el estrés en el dieléctrico. Las condiciones de carga o altas variaciones de los ciclos de carga pueden llevar a deformaciones y fisuras en el material aislante. Para los ambientes contaminados, instalación y mantenimiento, las descargas son ocasionadas en la superficie del aislamiento por partículas conductoras (polvo, contaminación por agua, aceite, etc...). Limpiezas periódicas y procesos adecuados de mantenimiento pueden minimizar los efectos de los contaminantes.

3 EVALUACIONES Y PRUEBAS EN LOS SISTEMAS DE AISLAMIENTO

Con el pasar del tiempo y bajo los estreses sometidos en la operación, el sistema de aislamiento sufre alteración de sus propiedades, causando un envejecimiento natural o incluso acelerado. Esto hace que los aislantes disminuyan su capacidad dieléctrica y tiendan a una falla. Estas fallas pueden ocurrir en el medio de importantes procesos, en los cuales la máquina eléctrica está insertada. Estos eventos indeseados pueden ser minimizados con revisiones preventivas periódicas, donde especialistas utilizan técnicas de evaluaciones de tendencia y posibles fragilidades en los sistemas de aislamiento. Para eso, pueden ser aplicadas técnicas de evaluaciones normalizadas o inclusive mediciones específicas que muestran esta tendencia.

Las principales evaluaciones consideradas son: resistencia de aislamiento, índice de absorción e índice de polarización, prueba de sobrecarga de tensión, tensión aplicada, corona visual, pérdidas dieléctricas (tangente delta) y descargas parciales. El ensayo de la medición de la resistencia de aislamiento en las máquinas eléctricas es utilizado para identificar daños en el sistema de aislamiento, que producen cortocircuitos francos o una reducción en la resistencia de aislamiento, comparada a la resistencia de máquinas del mismo tipo, en buenas condiciones, o a una medición anterior. Los índices de absorción y polarización están relacionados a las lecturas de 30 segundos y 10 minutos del aislamiento.

El ensayo de tensión aplicada (*hipot*) tiene el objetivo de evaluar la capacidad dieléctrica del sistema de aislamiento, para soportar los estreses sometidos a la máquina eléctrica en operación. Si el sistema de aislamiento soporta la prueba de *hipot*, significa que soportará los estreses sometidos en operación, con bajo riesgo. La figura 5 presenta un ejemplo de sobrecarga de maniobra de un disyuntor a vacío, al cual el motor eléctrico de 11kV de tensión nominal está sujeto. Éste llega a 36,2 kV (la escala del gráfico es de 10 kV por división).



Existen dos posibilidades para realizar las pruebas de tensión aplicada, en CA o CC. La prueba en CA es preferida, ya que somete el aislamiento de manera similar a la operación. Además de eso, puede detectar mejor posibles defectos y es también utilizado en otras pruebas como corona visual, tangente delta y descargas parciales. Las ventajas de la prueba CC es que el equipo es más barato y portátil, característica importante para las pruebas en campo, debido a la movilidad. Además de eso, presenta también la ventaja de un control mejor para abortar la prueba en un diagnóstico o tendencia de falla. La prueba normalizada en CA es aplicar $2 \times U_{\text{Línea}} + 1\text{kV}$ y en el caso de CC es 70% mayor que el de CA.

El efecto corona está presente en máquinas eléctricas de media tensión (por encima de 10kV). El efecto corona es causado por la ionización del gas adyacente a los devanados con bobinas preformadas. Tal ionización es provocada por el campo eléctrico en torno de los conductores.

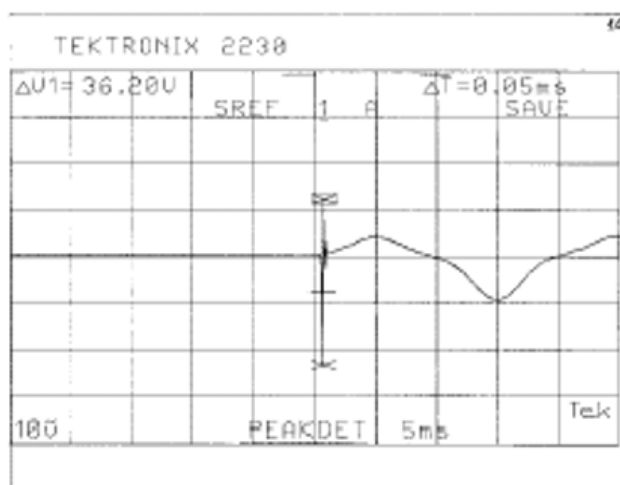


Figura 5: Ejemplo de sobrecargas de tensión ocasionados por maniobras de disyuntores

La prueba de sobrecarga de tensión, conocida como *surg test*, es realizada aplicando una breve sobrecarga de tensión en la bobina, que responde por medio de una forma de onda senoidal amortecida. La forma de onda que el instrumento presenta está directamente relacionada con la impedancia de la bobina, que presenta una característica propia y única.

Evaluaciones de aislamiento difícilmente revelan el estado del aislamiento por una simple medición, una vez que cambios en las pérdidas dieléctricas dependen del material de las cuales éstas están constituidas, tamaño de las máquinas, condiciones ambientales y operacionales. Entretanto, un seguimiento de las mediciones de tangente delta, también conocido como factor de disipación, muestra tendencias a lo largo del ciclo de vida de la máquina eléctrica, que puede diagnosticar tendencia de degradación del sistema de aislamiento. El ensayo de tangente delta es utilizado también para la evaluación de la calidad de la impregnación, secado y cura del aislamiento a lo largo del proceso de fabricación de la máquina eléctrica [5].

La tensión aplicada en un sistema de aislamiento somete los aislantes a una diferencia de potencial que se distribuye en todo el devanado, con relación a tierra. No obstante, vacíos y cavidades existentes pueden alterar el dieléctrico, reduciendo la rigidez dieléctrica por los gases en el interior de éstos. Estas faltas pueden generar pequeñas centellas de descargas parciales hacia el interior de las burbujas, provocando un proceso progresivo de deterioro del material y eventual falla del aislamiento. Estos vacíos pueden estar relacionados a procesos de impregnación, secado o cura del devanado, o también por el envejecimiento y micro fisuras causadas por la operación, principalmente sobre temperatura.

Estas pruebas, de forma general, fueron desarrolladas para evaluar fallas en el proceso de fabricación y suministran muchas informaciones importantes, sin embargo, provocan un estrés extra en los aislantes. De esa forma, sistemas de aislamiento fragilizados por una vida larga pueden ser llevados a falla durante las pruebas. En el próximo párrafo es mostrado un



ejemplo de precipitación de fin de vida útil de un sistema de aislamiento, que podría operar por algunos años más.

Durante la prueba de la tensión aplicada, todo el devanado (entre el inicio y el final de éste) queda sometido a la misma diferencia de potencial, con relación a tierra, conforme la figura 5 (b). Por otro lado, en la condición de funcionamiento normal, el nivel de tensión al que están sometidas las bobinas en las proximidades del punto neutro es menor al de la salida de la fase, conforme es mostrado en la figura 6 (a) [6].

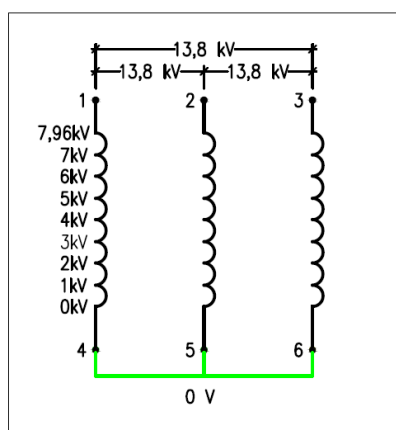


Figura 6(a)

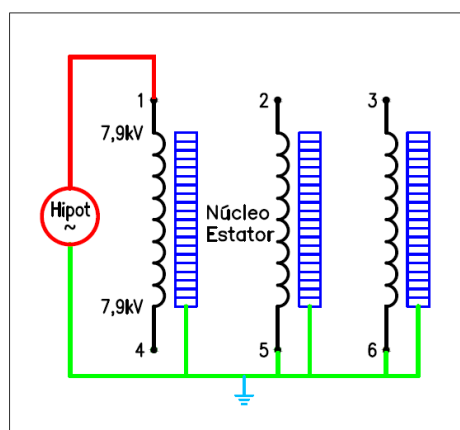


Figura 6(b)

Figura 6: (a) Ejemplo ilustrativo de la distribución de la tensión en los devanados, cuando el equipo está en operación. (b) ejemplo ilustrativo de un devanado siendo sometido a un ensayo de hipot

3.1 Resistencia de aislamiento e índice de polarización y absorción

Este ensayo es hecho con tensiones continuas, con amplitud que depende de la magnitud de la tensión nominal de la máquina a ser ensayada. El megóhmetro es el instrumento típico para la realización de este ensayo. Los megóhmetros poseen escalas de 500 a 15.000V y los factores de temperatura ambiente y la humedad relativa del aire influyen fuertemente en las mediciones. Por eso, es muy importante siempre referenciar estos dos factores ambientales con la medición.

Tabla 1: Guía para selección de tensión CC para la medición de resistencia de aislamiento (IEEE43)

Tensión Nominal (VCA)	Tensión de Prueba CC. (VCC)
< 1000	500
1000 – 2500	500 - 1000
2501 – 5000	1000 - 2500
5001 – 12000	2500 - 5000
>12000	5000 - 10000

La corriente total que circula por el aislamiento está compuesta por tres componentes: la corriente de fuga conductiva, la capacitiva y la de absorción de polarización. La corriente de fuga conductiva (I_L) es una pequeña cantidad de corriente (μA) que fluye a través del aislante. Esta corriente aumenta a medida que el aislamiento se deteriora. La corriente de fuga de carga capacitiva (I_C) ocurre debido a la proximidad de los conductores, a través de su aislamiento. Esta corriente dura solamente algunos segundos, hasta que el aislamiento sea cargado con la tensión CC aplicada por el instrumento. Finalmente, la corriente de fuga de absorción de polarización (I_A) es causada por el desplazamiento de cargas dentro del material dieléctrico. En equipos de baja capacitancia, la corriente es alta en los primeros pocos segundos, disminuyendo lentamente a casi cero. Para equipos de alta capacitancia o aislamiento contaminado, no habrá disminución en la corriente de absorción por un largo período, conforme la figura 7, [14].

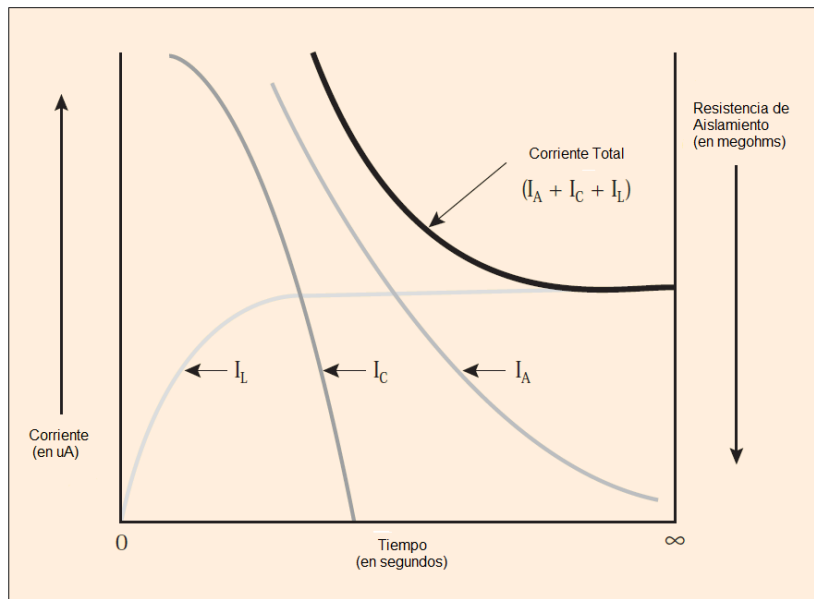


Figura 7: Descomposición de la corriente total durante la medición de la resistencia de aislamiento [14] (escala de la izquierda del gráfico) y su correspondiente resistencia de aislamiento (escala a la derecha del gráfico, en la unidad típicamente mostrada por el megóhmetro)

El valor de resistencia de aislamiento es medido en 1 minuto y corregido para la temperatura de referencia (40°C) por la ecuación 1, conforme IEEE43. El criterio de aceptación es de 100MΩ para bobinas preformadas.

$$R_{Aisl40^{\circ}C} = K_{40^{\circ}C} \cdot R_{Medida} \quad [1]$$

$$K_{40^{\circ}C} = (0,5)^{\frac{(40-T_{Medida})}{10}}$$

Los valores de los índices I_P e I_{Abs} son determinados por las ecuaciones 2 y 3 y se hace necesaria la medición de aislamiento en 30 segundos y 10 minutos:

$$I_P = \frac{R_{10Minutos}}{R_{1Minuto}} \quad [2]$$

$$I_{Abs} = \frac{R_{1Minuto}}{R_{30Segundos}} \quad [3]$$

Tabla 2: Criterios de evaluación para la medición de resistencia de aislamiento (IEEE43)

Índice de Absorción	Índice de Polarización	Evaluación del aislamiento
----	1 o menor	Malo
Por debajo de 1,1	<1,5	Peligroso
1,1 a 1,25	1,5 a 2,0	Regular
1,25 a 1,4	2,0 a 3,0	Bueno
1,4 a 1,6	3,0 a 4,0	Muy Bueno
Por encima de 1,6 (1)	>4,0	Óptimo

El ensayo de medición de la resistencia de aislamiento no tiene restricciones, respetando los valores indicados en la tabla 1. Además de eso, los instrumentos disponibles en el mercado tienen tensión CC limitada en 15kV y, principalmente, potencia insuficiente para mantener una fuga de corriente perjudicial al devanado, reduciendo automáticamente la tensión aplicada.



3.2 Prueba de sobrecarga de tensión

La prueba de sobrecarga de tensión es fundamental para detectar corto entre espiras, pero también es posible identificar fallas como: cortocircuito entre bobinas, cortocircuito entre fases, conexiones invertidas y número de espiras diferentes. El valor de la inductancia de una bobina (medida en henry) es básicamente determinado por el número de espiras, por el formato de la espira y por las propiedades geométricas y físicas del núcleo de ésta. Cuando la inductancia disminuye, la frecuencia de la oscilación del circuito aumenta, de acuerdo con la ecuación 4.

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L*C}} \quad [4]$$

La norma IEEE 522 ítem 6.2 informa el nivel de tensión que debe ser utilizado para el ensayo, determinado por la ecuación 5.

$$V_2 = 3,5 \cdot \left[\left(\sqrt{2/3} \right) \cdot V_{Línea} \right] \quad [5]$$

Nota: A partir de las constantes de la ecuación, se puede considerar la misma de forma resumida como: $2,85 \times U_{Línea}$.

Si la resistencia del dieléctrico no soporta la tensión V_2 , el aislamiento será roto y/o algunas espiras serán corto cortocircuitadas, reduciendo la inductancia y, por lo tanto, aumentando la frecuencia, conforme la ecuación 4. El cambio de la forma de onda ocurre cuando la corriente (i) varía de acuerdo con el tiempo del pulso (t). Cuando el aislamiento entre espiras es frágil, el resultado es una oscilación de pequeña amplitud deformada. Esta amplitud es determinada por la ecuación 6:

$$V = L \cdot \frac{di}{dt} \quad [6]$$

La medición por el surge prueba es de fácil control, ya que la rampa de subida de la tensión que es aplicada es acompañada y, ante cualquier tendencia de un evento, el operador podrá interrumpir la prueba rápidamente. Sin embargo, el nivel de tensión recomendado por la norma puede someter los aislantes a valores considerablemente altos. Por ejemplo, para una máquina con tensión nominal de 13,8kV, la tensión recomendada por la norma para el ensayo de surge prueba es 39,5kV. Para máquinas en campo, la norma IEEE522 sugiere el valor de prueba de $0,75 \times 2,85 \times 13,8kV$, que resulta en 29,5kV.

Para las evaluaciones de máquinas a ser reparadas y con posibles aislamientos envejecidos, la proposición es utilizar la tensión de fase +10%. Como se trata de un pulso de tensión tendiendo a una tensión continua, multiplicar por 1,7. Por ejemplo, para una máquina de 13,8kV de tensión nominal, el valor a ser utilizado en la prueba es 14,91kV.

3.3 Tensión aplicada

Las pruebas con tensión aplicada son necesarias para asegurar que los sistemas de aislamiento posean capacidad mínima de soportar los estreses sometidos durante la operación normal. Por ejemplo, deben soportar las sobrecargas (dV/dt's) de maniobras de los disyuntores como el mostrado en la figura 5.

La prueba para una máquina nueva o rebobinada consiste en aplicar una tensión alterna de $2 \times U_{Línea} + 1kV$ (ejemplo: para una máquina de 13,8kV, será aplicado 28,6kV). Para una máquina en servicio, la norma IEC 60034-1 recomienda aplicar $U_{Línea} \times 1,5$ (ejemplo: para una máquina de 13,8kV, será aplicado 20,7kV). Para aplicar tensión continua, multiplicar los valores de tensión alterna por 1,7. Para ambos casos, el aislamiento debe soportar este nivel de tensión durante 1 minuto.

Básicamente, el criterio de aceptación es del tipo pasa o no pasa (falla). Por lo tanto, en principio, un sistema de aislamiento que falla en esta prueba se puede considerar que fallaría en un



corto período de operación. Su función es reducir la tasa de mortalidad característica de la fase inicial de la curva de la bañera. La experiencia muestra que varios puntos fragilizados en el sistema de aislamiento son evidenciados por el *hipot*.

Para máquinas eléctricas con largos períodos de operación, o sea, con un aislamiento ya estresado, la prueba de *hipot* puede reducir algunos años la vida útil del equipo, llevando a una falla debido a la aplicación de tensión en un aislamiento que no es nuevo. La decisión de realizar o no esta prueba, tras una revisión, es siempre delicada, y debe ser tomada por cualquier fabricante o empresa prestadora de servicios, para reparaciones o revisiones basadas en los criterios normalizados.

La proposición de este artículo es utilizar tensión de fase +10% para el *hipot*, ya que de esta manera se hace una evaluación del sistema de aislamiento similar al de cuando la máquina eléctrica está en operación, no obstante, midiendo la corriente de fuga del sistema de aislamiento. Con base en la figura 5, también puede existir una posibilidad de falla en la prueba de *hipot*, pero con riesgo bastante reducido.

Tabla 3: Niveles de tensión recomendados por norma y propuesta del artículo

Condiciones de aislamiento	Nivel de tensión Hipot CA	Nivel de tensión Hipot CC
Máquinas nuevas (norma)	$2 \times U_{\text{Línea}} + 1000$	$2 \times U_{\text{Línea}} + 1000 \times 1,7$
Máquinas de reparación (norma)	$U_{\text{Línea}} \times 1,5$	$U_{\text{Línea}} \times 1,5 \times 1,7$
Máquinas de reparación (proposición)	$U_{\text{fase}} + 10\%$	$(U_{\text{fase}} + 10\%) \times 1,7$

3.4 Corona visual (*Black-out test*)

El efecto corona tiene origen en la descarga eléctrica por la ionización del gas entre bobinas o la tierra. El aspecto azulado acompañado de ruido es característico del efecto que ioniza parcialmente el gas, con formación de ozono. Este efecto deteriora el material aislante, con correspondiente disminución de la rigidez dieléctrica del aislamiento, llevando a descargas eléctricas que conducen a la posterior falla de aislamiento.

Este ensayo es aplicable para máquinas con tensión por encima de 10 kV. Es realizado con $1,15 \times U_{\text{Línea}}$ (ejemplo: para una máquina de 13,8kV, se utiliza 15,87kV), conforme IEEE 1799. Este ensayo identifica puntos visuales de descargas eléctricas entre bobinas. Estos puntos de corona, si no son corregidos, aceleran el deterioro de los aislantes.

La proposición para esta prueba también es aplicar 10% a más de la tensión de fase (ejemplo: para una máquina de 13,8kV, se utiliza 8,76kV), no obstante, en dos devanados, usando dos aplicadores de tensión desfasados de 120° , conforme la figura 8 (b). Esta condición es exactamente la misma de la operación, conforme lo muestra la distribución fasorial en la figura 8 (a). Con esta prueba propuesta fue posible identificar en torno de 60 a 70% con relación a la misma prueba, aplicando niveles de tensión sugeridos por norma (15,87kV para el ejemplo de 13,8kV).

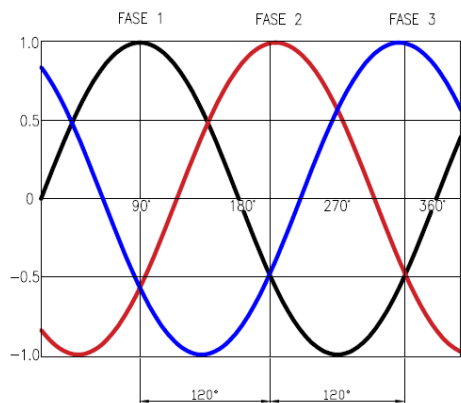


Figura 8 (a)

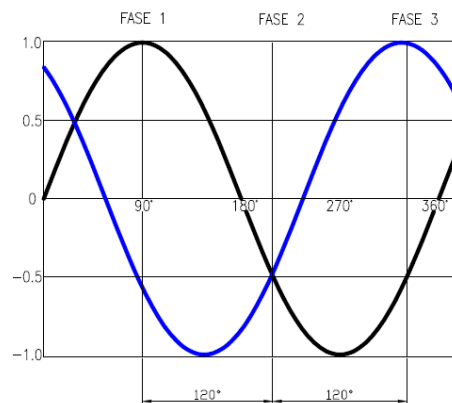


Figura 8 (b)

Figura 8: (a) Distribución fasorial de un sistema trifásico de tensión. (b) Tensión aplicada en dos fases diferentes y aplicada por dos aplicadores de tensión desfasados de 120°



3.5 Tangente delta

El ensayo de “tangente delta” también es aplicable para máquinas con tensión $\geq 6\text{kV}$. Es realizado con $1,2 \times U_{\text{Línea}}$ (Ejemplo: Para una máquina de $13,8\text{kV}$, se utiliza $16,56\text{kV}$), conforme IEEE286. En el ensayo es realizado un comparativo de la curva de pérdidas dieléctricas estándar de la norma con los valores medidos en la máquina. Estos resultados presentan tendencias del posible comprometimiento de la aislamiento. Una nueva impregnación VPI, o incluso el rebobinado, pueden ser recomendados para restablecer los parámetros.

La prueba de tangente delta se basa en el hecho de que todos los materiales aislantes poseen pérdidas dieléctricas. De esa forma, un sistema de aislamiento puede ser modelado por un condensador en paralelo con una resistencia que representa las pérdidas dieléctricas. A partir de este modelo, las pérdidas pueden ser calculadas por la ecuación 9. El diagrama fasorial de las corrientes que circulan en ese modelo está representado en la figura 9.

$$P_{\text{Perdidas}} = V \cdot I \cdot \cos\varphi = V \cdot I \cdot \text{sen}\delta \quad [7]$$

$$I \cdot \cos\delta = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot V \quad [8]$$

$$P_{\text{Perdidas}} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot V^2 \cdot \left(\frac{\text{sen}\delta}{\cos\delta}\right) \quad [9]$$

$$\tan\delta = \frac{P_{\text{Perdidas}}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot V^2} \quad [10]$$

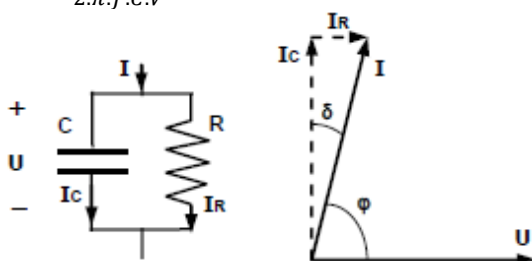


Figura 9: Representación del modelo del factor de disipación de pérdidas y el diagrama del vector para el cálculo de la tangente delta [6]

Para esta medición de tendencia de tangente delta en máquinas en operación también es propuesta la utilización de la tensión de fase (+10%) ya que se trata de medición de tendencia y son realizadas las mismas condiciones de medición para esta evaluación, la curva de tendencia será con la misma base de datos y referencias.

3.6 Descargas parciales

Las descargas parciales son pequeños arcos eléctricos en cavidades de aire dentro o adyacentes al aislamiento. Este fenómeno ocurre porque la rigidez dieléctrica del aire de 3kV/mm es menor que el aislamiento sólido que es de aproximadamente 100kV/mm .

El ensayo de descargas parciales, así como el tangente delta, es tratado como tendencia para la evaluación de los sistemas de aislamiento. Para este ensayo, existen dos opciones de medición: el ensayo off-line, en el cual es necesario aplicar tensión de fase + 10%, conforme IEC60034-27; y el ensayo online, cuando las mediciones son hechas directamente en la máquina con tensión nominal y rodando en vacío, conforme IEC60034-27-2, ofreciendo así, monitoreo tanto periódico como continuo.

El ensayo es aplicado para diagnosticar condiciones de los devanados estáticos con tensión mayor a $3,3\text{kV}$. Este ensayo no tiene criterio de aceptación, siendo utilizado para un seguimiento de tendencia a lo largo del tiempo de operación.

Para el ensayo de descargas parciales, ya es aplicada en la práctica la tensión de fase +10% para el caso del ensayo off-line y, cuando ya existe el equipo instalado en la máquina eléctrica para un monitoreo continuo, el sistema es energizado como en el proceso normal de operación.



4 CONCLUSIÓN

El principal objetivo del artículo fue proponer una opción más, además de las recomendadas por las normas, para las tomacorrientes de decisión sobre los niveles de tensión a ser utilizados en las evaluaciones de los sistemas de aislamiento envejecidos, para las reparaciones y servicios en las máquinas eléctricas. La decisión a ser tomada en estas evaluaciones siempre es compleja, ya que existen riesgos en todas ellas. La opción propuesta apunta a evaluar los sistemas de aislamiento en los mismos niveles de tensión a los que son sometidas las máquinas eléctricas, cuando están en operación, minimizando el riesgo de falla en ese momento. Sin embargo, es imposible prever el tiempo que podrá ser extendida la vida útil de la máquina, luego de las evaluaciones y servicios realizados.

La mayoría de las evaluaciones requiere someter los sistemas de aislamiento a niveles de tensión, para verificar la capacidad dieléctrica de los aislantes. Para máquinas nuevas, este proceso debe ser garantizado por el fabricante de la máquina eléctrica, por tratarse de un equipo nuevo. Estos niveles de tensión son normalizados y considerablemente altos, pues las máquinas eléctricas están sujetas a altos dV/dt 's en operación normal.

No obstante, máquinas con largo período de operación y sistema de aislamiento envejecido pierden naturalmente su capacidad dieléctrica. Al mismo tiempo, en caso de revisiones o reparaciones, se espera un período más de operación con una eventual falla mitigada. Sin embargo, para la evaluación de la integridad de este equipo, se hace necesario energizarlo para verificaciones de los sistemas de aislamiento. Estos mismos ensayos que son utilizados para evaluaciones pueden eventualmente ocasionar una falla en aislamientos comprometidos.

Los niveles de tensión para los ensayos dieléctricos que comprueban la integridad de los sistemas de aislamiento son recomendados por la norma específica. El artículo propone utilizar las tensiones de fase de los devanados +10%, pero también alerta que el dieléctrico sometido en la prueba de evaluaciones no es totalmente igual al de la operación, ya que existen niveles graduales de tensión en el devanado en operación. Por eso, la posibilidad de falla todavía existe.

Las principales pruebas fueron descritas en el artículo, donde la de resistencia de aislamiento no presenta ningún riesgo. El *surge test* tampoco es tan crítico por el fácil control de la prueba, no obstante, los valores fueron sugeridos considerando la tensión de fase +10% veces 1,7, por poder considerar una tensión casi CC (poca variación), no teniendo el mismo efecto tan crítico para el aislante.

Por otro lado, las pruebas de tensión aplicada y corona visual son las más críticas. Para tensión aplicada, la prueba es hecha con +10% de la tensión de fase, monitoreando así la corriente de fuga y, para corona visual, la misma condición de tensión, sin embargo, aplicando en dos fases, simulando el efecto del campo eléctrico sometido en las bobinas en operación. Los resultados de los puntos de corona visual quedaron alrededor de 60% a 70% de la misma prueba, aplicando las recomendaciones de norma.

En las pruebas de tendencia de tangente delta y descargas parciales es posible utilizar la tensión propuesta por el artículo, ya que presenta niveles de referencia que pueden ser comparados con otras medidas anteriormente realizadas. Por lo tanto, la proposición del artículo presenta resultados eficaces en la identificación de tendencias de falla en el sistema de aislamiento en máquinas para reparaciones y revisiones con tensión de fase +10%, mitigando la posibilidad de falla en las pruebas.

Los resultados presentados en este trabajo serán complementados con una investigación de tiempo medio de sobrevida, a partir de la aplicación del método propuesto. En este trabajo futuro, serán analizadas las correlaciones entre este tiempo, las fallas que causaron la nueva parada y los resultados de ensayo.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a WEG Equipamentos Eléctricos y a sus especialistas en máquinas eléctricas, por la contribución y el apoyo en el desarrollo de este trabajo. El agradecimiento se extiende también al profesor Dr. Julio Carlos Teixeira de UFABC, por todas las revisiones en la propuesta del estudio.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SILVA, C. S. **Prescripción de la modalidad de mantenimiento de motores eléctricos, considerando el costo de mantenimiento y la depreciación del activo**. Disertación de maestría de la Universidad Tecnológica Federal de Paraná (Campus Ponta Grossa), 2012.
- [2] RODENBURG, R. L. **Replacements, Units, Service Lives, Factors**, Prepared for U.S. Department of Energy, U.S. Department of the Interior and U.S. Bureau of Reclamation, 1995, PO No. AA-P0-12652-22503.
- [3] STONE, G.C., H.G. SEDDING, B.A. LLLOYD, GUPTA, B.K. **The Ability of Diagnostic Tests to Estimate the Remaining Life of Stator Insulation**. IEEE Transactions on Energy Conversion, December 1988, Vol. 3, No. 4, pp. 833-840.
- [4] 1. CIGRE WG A1.10. **Survey of Hydrogenerator Failures**. Cigre Report 392; CIGRE: Paris, France, 2009.
- [5] GUEDES, A. S. **Estudio y proposición de técnicas para la evaluación del aislamiento en motores de inducción trifásicos de baja y media tensión**. Tesis de doctorado de la Universidad Federal de Minas Gerais, 2018.
- [6] MELERO, M. G.; CABANAS, M. F.; ROJAS, C. H.; NORNIELLA, J. PEDRAYES, F.; BARRERA, J. M. **Fault detection in the manufacturing process of form-wound coils by means of dissipation factor and hipot tests**. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ 09), Valencia (Spain), 2009.
- [7] GUPTA, B. K.; STONE, G. C.; STEIN, J. **Stator winding hipot (high potential) test**. IEEE Electrical Insulation Conference, Montreal, Canada. 2009.
- [8] HENAO, H.; CAPOLINO, G. A.; CABANAS, M. F.; BRUZZESE, C.; STRANGAS, E.; PUSCA, R.; ESTIMA, J.; RIERA-GUASP, M. ; HEDAYATI-KIA, S. **Trends in fault diagnosis for electrical machines**. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2014.
- [9] BELKO, V. O.; KOSTELIOV, A. M.; PETRENYA, Y. K.; ANDREEV, A. M.; ROITGARZ, M. B.; **Numerical Simulation of discharge activity in HV rotating machine insulation**. Conference Paper, Saint Petersburg, Russia, 2014.
- [10] SCHUELLER, M.; SENN, F.; LADSTAETTER, W. **Influences of the one minute withstand voltage test on the electrical endurance of insulation systems of rotating electrical machines**. Inductica, Berlin, Germany, 2009.
- [11] RUX, L. M.; **The physical phenomena associated with stator winding insulation condition as detected by the ramped direct high-voltage method**. Dissertation submitted to the Mississippi State University, USA, 2004.
- [12] STONE, G. C.; BOULTER, E. A.; CULBERT, I.; DHIRANI, H.; **Electrical insulation for rotating machines. Design, Evaluation, Aging, Testing, and repair**. IEEE Press Series on Power Engineering, 2004.
- [13] RÜNCOS, F.; **Proyecto y análisis de la máquina eléctrica trifásica**. Editora OitoNoveTrês, 2ª Edición, Volumen 1, 2019.
- [14] VORTEX Equipos. **Prueba de resistencia de aislamiento**. Fabricante Fluke. <http://www.vortex.com.br>
- [15] FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR, C.; KUSKO, A.; **Máquinas Eléctricas**. Editora McGraw-Hill de Brasil, Ltda, 1975.



[16] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery.** IEEE Std 43 - 2000

[17] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **Guide for Testing Turn Insulation of Form-Wound Stator Coils for Alternating-Current Electric Machines.** IEEE Std 522 – 2004.

[18] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **Rotating Electrical Machines – Part 1: Rating and Performance.** IEC 60034-1. Geneva, 2004.

[19] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **Recommended Practice for Quality Control Testing of External Discharges on Stator Coils, Bars, and Windings.** IEEE Std 1799 - 2012

[20] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation.** IEEE Std 286 - 2000

[21] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **On-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines.** IEC 60034-27+2. Geneva, 2012.



Walter Evaldo Kuchenbecker es PhD en ENERGÍA, en la línea de investigación de Máquinas Eléctricas Girantes por UFABC. Actualmente participa del programa de investigación PDC (Investigador Doctor Colaborador) y es postdoctorado en ENERGÍA en la misma universidad. Sus investigaciones y publicaciones están focalizadas en máquinas eléctricas girantes. Experiencia de 33 años en la empresa WEG Equipamentos Eléctricos, también concentrada en aplicaciones, fabricación y análisis de máquinas eléctricas. En los últimos 10 años viene siendo supervisor de las áreas de la calidad y ensayos eléctricos.