



EFFECTOS DE LOS CONTAMINANTES EN LOS DEVANADOS DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATIVAS

WALTER EVALDO KUCHENBECKER¹, DANIEL RODRIGO MORETTI²

¹ Investigador Doctor Colaborador de Posgrado en ENERGÍA - UFABC, walterk@weg.net

² Analista de Servicios Externos - WEG Equipamentos Elétricos S.A., morettid@weg.net

RESUMEN

Una parte significativa de las fallas de aislamiento en máquinas eléctricas rotativas está directamente relacionada con factores ambientales que causan contaminación del equipo. Normalmente, son inherentes al proceso productivo donde se instala el equipo y en consecuencia sometido a estos factores.

Los efectos de contaminantes en los materiales aislantes de máquinas eléctricas se evidencian mediante mediciones aplicadas a los sistemas de aislamiento. Estas evaluaciones se pueden realizar por curvas de tendencia de varias mediciones en paradas programadas o por monitoreo continuo. La incipiente identificación de cambios en las características dieléctricas de los aislantes por contaminantes y el mantenimiento correctivo evitan una posible falla inesperada y prematura.

Este artículo presenta la relación causa-efecto de los factores ambientales contaminantes que reducen progresivamente la vida útil del equipo, dejándolo fuera de funcionamiento prematuramente.

PALABRAS CLAVE: dieléctricos, contaminantes, envejecimiento, camino de fuga (tracking).

1. INTRODUCCIÓN

La ocurrencia de fallas en los devanados de máquinas eléctricas rotativas se redujo con la introducción del sistema de impregnación al vacío (VPI - *Vacuum Pressure Impregnation*) a mediados de 1960. La evolución tecnológica de los materiales aislantes y resinas epoxi también ha sido constante desde la implantación del sistema VPI.

Con el aumento de la resistencia térmica de los materiales aislantes, se logró reducir las áreas consumidas por este material, durante la fabricación de las máquinas eléctricas rotativas y consecuentemente ayudó a hacerlas más compactas, aumentando la eficiencia, capacidad térmica e incluso mejorando el factor de potencia. Además, los materiales modernos resistentes al efecto corona aplicados a los devanados, reducen el impacto de sobretensiones sometidos durante las maniobras del disyuntor a vacío y pulsos de semiconductores utilizados en los convertidores de frecuencia.

Sin embargo, las superficies de los devanados contaminados tienden a provocar descargas intensas y posibles caminos de fuga. Estas superficies contaminadas pueden llevar a los devanados a fallas prematuras, actuando desde la superficie hacia el interior de la bobina. Los contaminantes abrasivos en el aislamiento en la superficie de los devanados crean caminos de fuga, a través de reacciones químicas, (sea por el movimiento de las bobinas o partículas en suspensión), causadas por daños mecánicos en general, limpieza y secado inadecuados de los devanados, neblina de aceite, humedad, solventes de limpieza, condensación de contaminantes. El ciclo de falla consta básicamente de cuatro factores: estrés eléctrico, térmico, mecánico o contaminación proveniente del medio ambiente. Estos factores pueden interactuar con los componentes del sistema de aislamiento causando un envejecimiento prematuro y, en consecuencia, fallas en el equipo. Los factores de estrés pueden contribuir al envejecimiento del sistema de aislamiento individualmente o en combinación.

Los contaminantes del medio ambiente están directamente relacionados con el proceso de modificación de las propiedades dieléctricas de los materiales, provocando la aparición de



subproductos corrosivos, aumentando la conductividad del aislamiento, provocando condiciones para el aumento de las actividades de descargas parciales y como consecuencia inevitable, la rotura prematura del estator de alta tensión.

La contaminación generalmente ocurre en las cabezas de las bobinas de los estatores. Si la contaminación tiene propiedades conductoras, entonces se establece un flujo de corriente, siempre que haya una diferencia de potencial.

La Figura 1 presenta el ciclo de falla del sistema de aislamiento según la norma IEC 60505 y puede determinar los factores de estrés que está sometido el sistema de aislamiento.

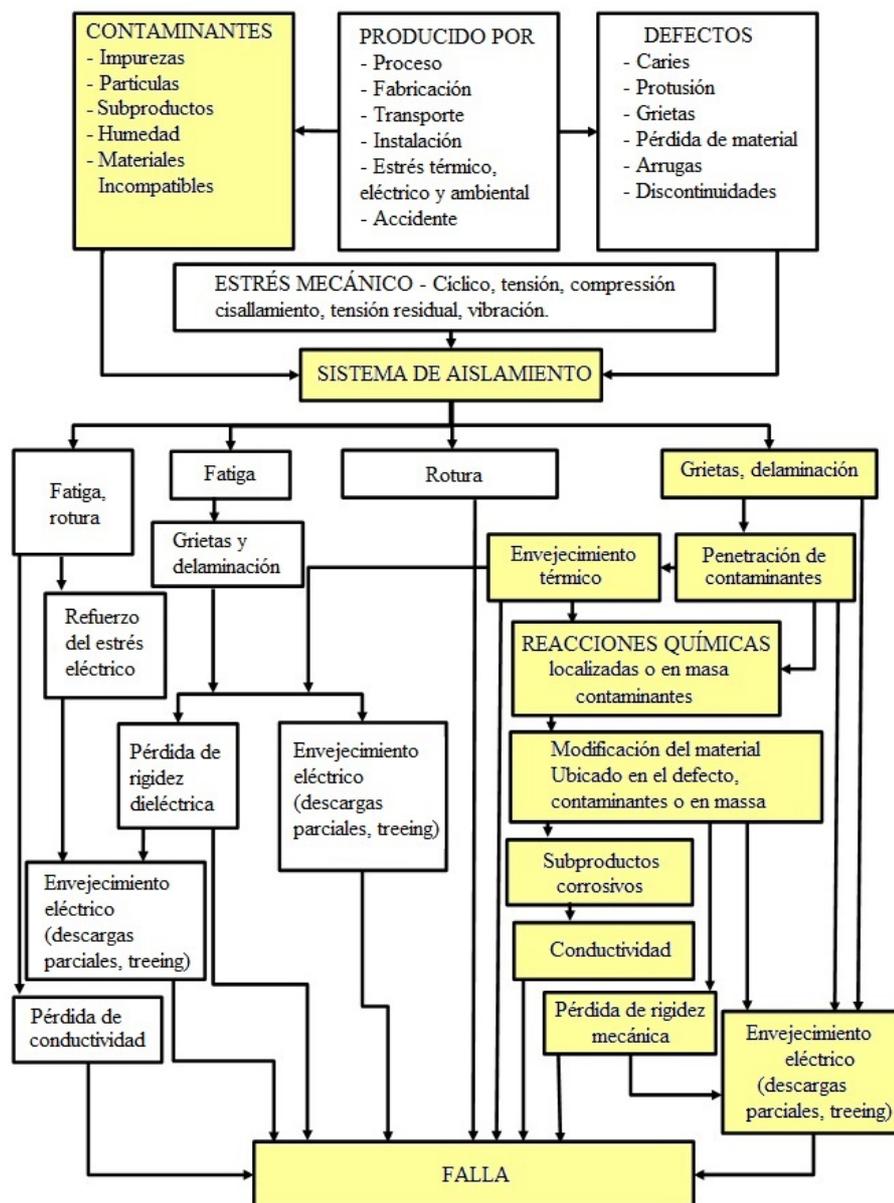


Figura 1: Diagrama de flujo de la evolución y correlación de factores que causan el envejecimiento del sistema de aislamiento del estator de alta tensión en máquinas eléctricas rotativas (Fuente: IEC 60505, 2011)



La Figura 2 presenta el modelo de un aislamiento contaminado. Como resultado de la contaminación, las regiones que se denominan "secas" generalmente se crean y se muestran como R_{seco} y otras como $R_{\text{contaminación}}$. Las regiones más secas se caracterizan por tener una resistencia mucho mayor que las otras regiones contaminadas y en esta situación, cualquier diferencia de potencial (tensión fase-fase) se establece en esta pequeña región de mayor resistencia. La alta diferencia de potencial, en esta pequeña región contaminada, seca y aislada, provoca la ruptura de la rigidez dieléctrica del aire atmosférico en su alrededor. Estas descargas eléctricas degradan y carbonizan la resina orgánica y las cintas del sistema de aislamiento en la región seca, haciéndola más conductora. El aumento de la conductividad en esta pequeña área permite establecer la diferencia de potencial fase-fase en otra pequeña región y, por tanto, la carbonización se convierte en un proceso sucesivo.

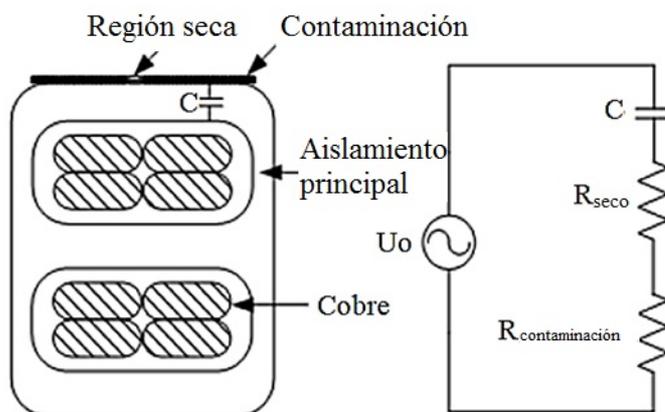


Figura 2: Sección transversal de la cabeza de bobina de un estator de alta tensión y su respectivo circuito equivalente que muestra el flujo de corriente de fuga (Fuente: LIN, L; 2016)

Los efectos de los contaminantes en los devanados siempre han sido motivo de preocupación. Soltani (2009) evaluó el efecto de la humedad en el dieléctrico del aislamiento utilizando la técnica de medición de la corriente de fuga en corriente continua. Utilizó barras y bobinas con diferentes tecnologías de aislamiento (asfalto, epoxi y poliéster) y sometió a diferentes grados de humedad. En el estudio se demostró que un moderno aislamiento epoxi-mica tiene una disminución significativa en los valores de índice de polarización y resistencia de aislamiento, cuando sometido a contaminación. La reducción gradual en el valor del índice de polarización está directamente relacionada con el tiempo de exposición al ambiente húmedo simulado. Soltani también señaló que las descargas parciales tienden a caer en los devanados con un alto contenido de humedad.

Se observa un comportamiento análogo al medir la resistencia de aislamiento hace 1 minuto. Soltani (2011) observó que el impacto es aún mayor en los valores de resistencia de aislamiento y concluyó que la humedad afecta la resistencia de aislamiento a través de la formación de una capa conductora sobre la bobina y consecuentemente aumenta la corriente de fuga.

Neti (2011) simuló formas de detectar los efectos y tendencias de la humedad y los caminos de fuga en los devanados. Utilizó la técnica de protección diferencial de alta sensibilidad, monitoreando la tendencia de las pérdidas dieléctricas durante la pulverización de contaminantes en los devanados y también monitoreando la actividad de las descargas parciales. Ambas las mediciones fueron efectivas para detectar la tendencia de fallas por agentes contaminantes en las superficies de los devanados. Se demostró en el estudio que un aislamiento contaminado presenta aumento en el nivel de descargas parciales y puede conducir a una falla inminente.

De manera similar, Neti (2011) ha verificado un aumento en las pérdidas dieléctricas debido a la contaminación superficial de las cabezas de bobina. Los sucesivos ciclos de spray contaminante fueron interrumpidos por la rotura del aislamiento. La contaminación provocó un aumento en la conductividad superficial de las cabezas de bobina de los devanados, aumentando las descargas parciales y el camino de fuga superficial.



En este trabajo, se utilizó la misma técnica de simulación, pero analizando los efectos con todas las pruebas de evaluación que se practican actualmente.

Lin (2016) estudió la influencia del vapor de agua en bobinas contaminadas con aceite lubricante. En máquinas grandes es muy común tener contaminación de aceite o neblina de aceite debido a pequeñas fugas en los cojinetes. Esta contaminación conduce a un aumento de las descargas parciales, sin embargo, con la mezcla de niebla de vapor de agua esto hace que las descargas parciales aumenten mucho más. El autor utilizó bobinas contaminadas con aceite y varió la humedad relativa, concluyendo que en 80% de los casos, los caminos de fuga aumentan considerablemente y degradan el aislamiento rápidamente. Lin (2016) también mostró que la contaminación por aceite y grafito puede ocurrir en las cabezas de bobina del estator bobinado y que tiene propiedades conductoras.

El objetivo de este artículo es presentar los efectos de los contaminantes en las superficies de los devanados, incluso con los aislamientos desarrollados con tecnologías más modernas disponibles en el mercado. Los parámetros utilizados para los análisis se basaron en los más modernos equipos disponibles para la evaluación, tales como: resistencia de aislamiento, tangente delta y descargas parciales.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Técnicas para diagnóstico

Las técnicas utilizadas en la detección de fallas de aislamiento han presentado una evolución considerable y han reducido la frecuencia de fallas inesperadas. Es común encontrar varios métodos de diagnóstico, desde técnicas consolidadas hasta condiciones de prueba que no están muy extendidas en las comunidades internacionales. Es de suma importancia señalar que los métodos de diagnóstico no estandarizados generan una serie de divergencias entre fabricantes, usuarios y empresas especializadas en la venta de servicios de diagnóstico. Aquí no se discute la eficiencia de los métodos no estandarizados, pero se observa que técnicas que no han sido ampliamente discutidas generan fallas en la interpretación y, consecuentemente, un retraso en la toma de decisiones.

El diagnóstico del sistema de aislamiento depende de la disponibilidad de equipos, personal calificado y recursos por parte del usuario para contratar servicios especializados. Como se mencionó, las pruebas mínimas de aislamiento no están definidas en una norma, por lo que a continuación se presenta un enfoque seguro para diagnóstico del sistema de aislamiento.

2.1.1. Resistencia de aislamiento

El diagnóstico del sistema de aislamiento realizado según la norma IEEE43 es sin duda el más extendido y proporciona una respuesta rápida y accesible. La imposición de tensión en corriente continua y la medición de corriente de fuga permite determinar características importantes como el valor de la resistencia de aislamiento durante 1 minuto y el índice de polarización (IP). Aunque la ejecución de la prueba sea relativamente simple, la Figura 3 muestra el circuito de aislamiento equivalente para una prueba de índice de polarización y resistencia de aislamiento.

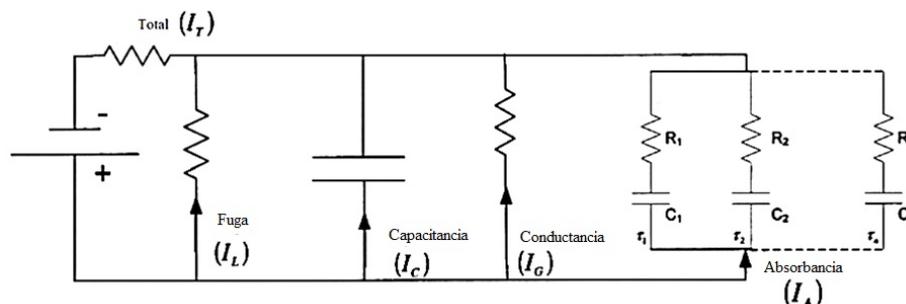


Figura 3: Circuito equivalente de monitoreo del aislamiento durante la prueba de resistencia de aislamiento (Fuente: IEEE43; 2013)



La Figura 4 presenta el comportamiento de las corrientes del circuito equivalente del sistema de aislamiento. La corriente de fuga I_L es constante en el tiempo y normalmente fluye sobre la superficie del aislamiento. La corriente capacitiva I_C tiene alta magnitud durante un corto período de tiempo, ya que decae exponencialmente con el tiempo y la tensión aplicada y depende de la geometría del aislamiento. La corriente I_G es constante en el tiempo y fluye desde la superficie en contacto con el núcleo hasta el conductor energizado y está directamente relacionada con el tipo del sistema de aislamiento. La corriente I_A es el resultado del proceso de polarización molecular y desplazamiento de electrones.

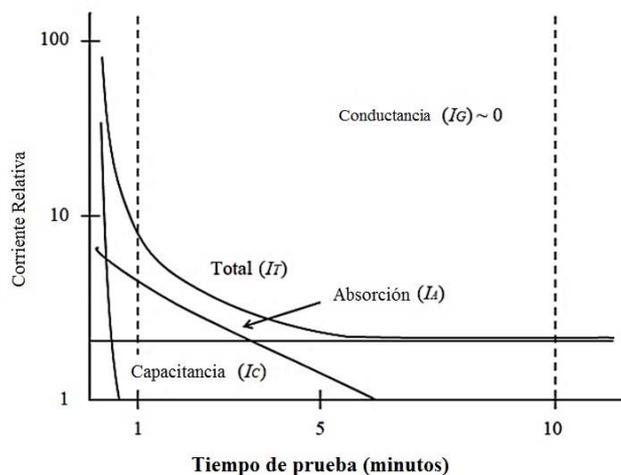


Figura 4: Comportamiento de las corrientes del circuito equivalente del sistema de aislamiento

2.1.2. Descargas dieléctricas (DD)

La prueba de descarga dieléctrica mide la corriente de descarga 60 segundos después de finalizada la carga durante un período de 30 minutos.

$$DD = \frac{I_{descarga} (1min)}{U \cdot C_{Aislamiento}}$$

El sistema de aislamiento es sometido a un proceso de carga similar al dieléctrico en un condensador, como mostrado en la Figura 5. El temporizador es estandarizado para 30 minutos de carga, que suele ser el tiempo suficiente para que ocurra la absorción total.

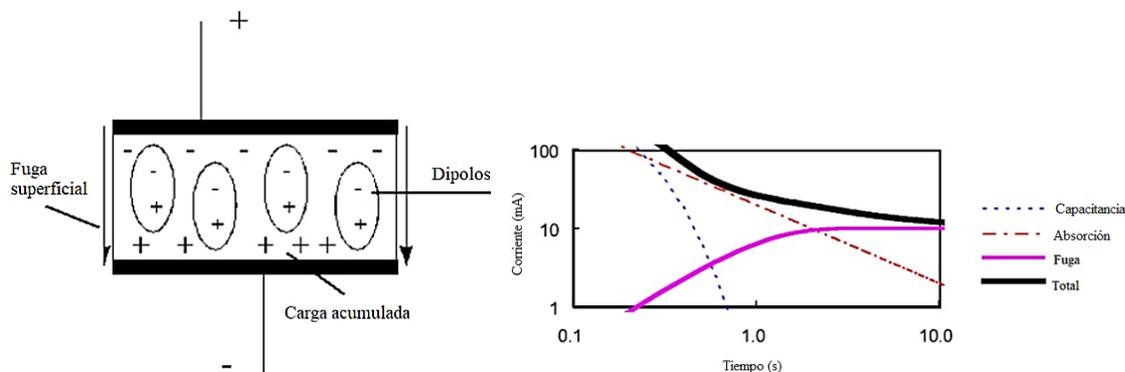


Figura 5: Carga del sistema de aislamiento - Corrientes eléctricas involucradas (Fuente: Megger)



La carga que se almacena durante la prueba de aislamiento se descarga automáticamente al final de la prueba. La tasa de descarga depende solo del resistor de descarga y de la cantidad de carga almacenada en el aislamiento, conforme la Figura 6.

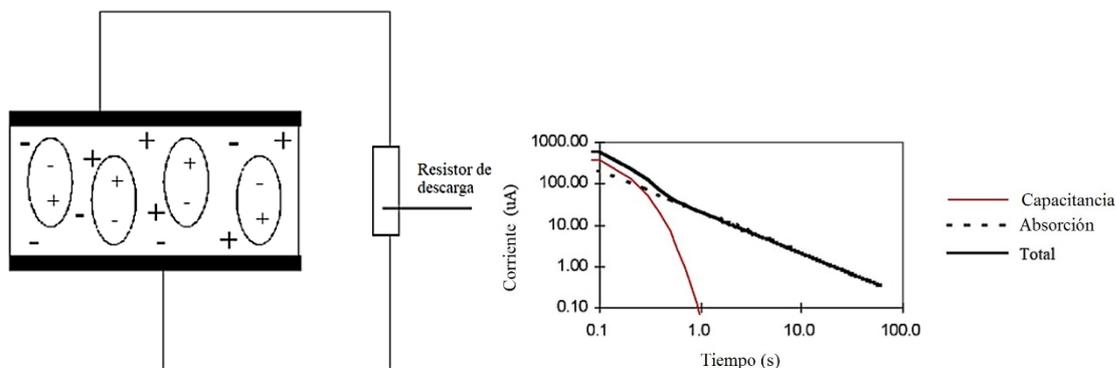


Figura 6: Descarga del sistema de aislamiento - Corrientes eléctricas involucradas (Fuente: Megger)

La prueba de descarga dieléctrica mide las corrientes de descarga 1 minuto después de completar una prueba de aislamiento. En este momento, la corriente capacitiva generalmente se vuelve insignificante en comparación con la corriente de reabsorción. El nivel de reabsorción después de este período muestra el estado del material aislante, siempre que el aislamiento se haya cargado completamente para que se produzca la absorción total (generalmente de 10 a 30 minutos). Una corriente de reabsorción alta muestra que el aislamiento se ha contaminado, generalmente por humedad. Una corriente baja suele indicar que el aislamiento está limpio y no ha absorbido mucha agua.

2.1.3. Paso de tensión (Step Voltage)

La prueba de paso de tensión es aplicable a máquinas eléctricas con tensión nominal mayor o igual a 2300V. Esta prueba se puede realizar para evaluaciones en fábrica, así como para máquinas en campo. La aplicación de tensión para realizar esta prueba se puede realizar mediante pasos con tiempos recomendados de 1 a 3 minutos para cada paso. El incremento típico es de 1 kV por minuto. La prueba se traza en los ejes XY (corriente versus tensión aplicada), lo que resulta una respuesta de corriente progresiva y continua. La Figura 7 muestra un ejemplo de pasos de tensión y posibles resultados para evaluaciones.

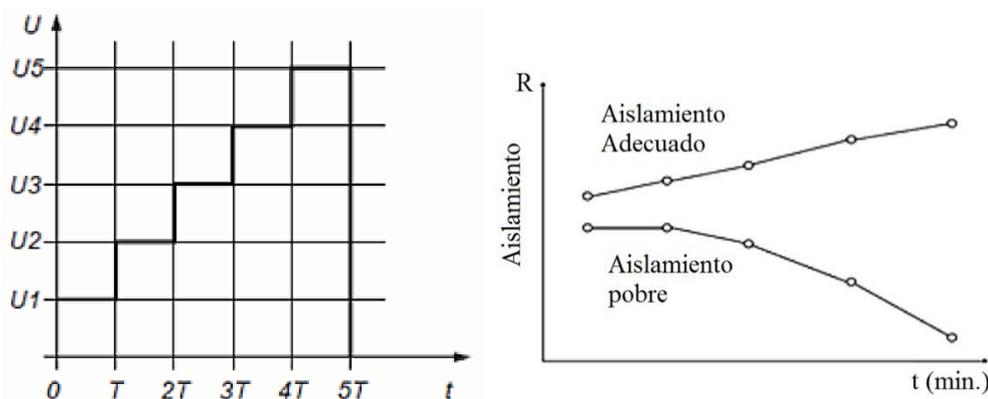


Figura 7: Típico paso de tensión y comportamiento del aislamiento bajo prueba de paso de tensión. (Fuente: BALAN H; 2010)



2.1.4. Pérdidas dieléctricas (tangente delta)

La determinación de las pérdidas dieléctricas en el diagnóstico del sistema de aislamiento de alta tensión ha demostrado ser uno de los métodos de evaluación más importantes. El método está estandarizado, pero sin límite definido para devanados completos, lo que requiere la determinación de curvas de tendencia para monitorear la evolución de las pérdidas. Según la norma IEEE286, la causa del aumento de las pérdidas dieléctricas puede ser desde una falla de fabricación, caracterizada por una desviación en el proceso de curado, hasta mismo la evolución de los niveles de descargas parciales. Similar al método presentado anteriormente, el ángulo de pérdidas varía según las corrientes dieléctricas I_o , corriente de carga de la capacitancia geométrica I_p , corriente de polarización I_{pd} , corriente de ionización de las descargas parciales y corriente de fuga I_L . La Figura 8 muestra cómo cada mecanismo puede afectar las pérdidas dieléctricas.

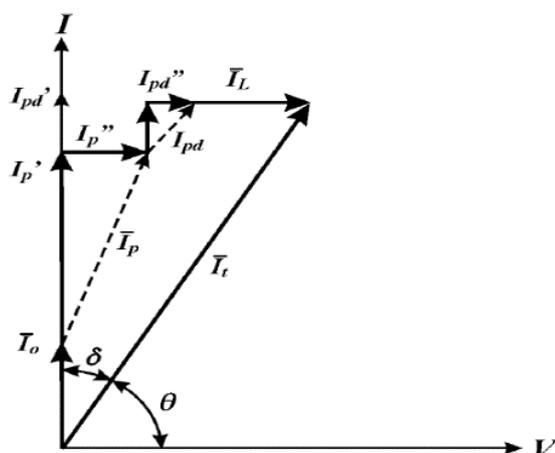


Figura 8: Representación de los mecanismos de pérdida dieléctrica (Fuente: MORETTI; 2016)

2.1.5. Descargas parciales

El monitoreo de la tendencia de descargas parciales ha demostrado ser una herramienta eficiente para prevenir fallas prematuras del sistema de aislamiento. Es innegable que el método, ya estandarizado, tiene un papel destacado para permitir que el diagnóstico se realice de forma online. A Figura 9 presenta el ejemplo típico de montaje de acoplamiento capacitivo para monitoreo online de descargas parciales (DP). Se instala un acoplador capacitivo en cada una de las fases, generalmente mediante conexión individual. El acoplamiento genera una señal de baja tensión que luego se filtra y se trata mediante un software específico.

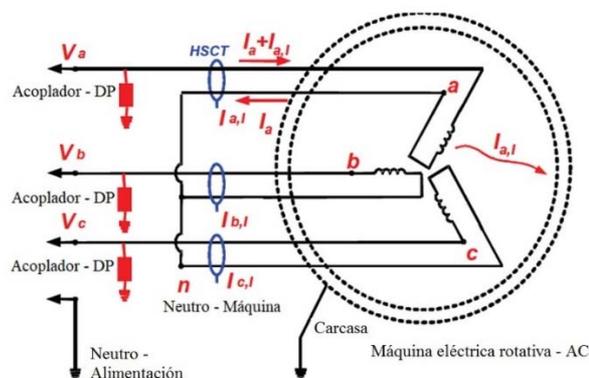


Figura 9: Ejemplo típico de instalación de acoplamiento capacitivo para monitoreo de descargas parciales. (Fuente: NETI, P; 2011)



La Figura 10 muestra la posición de las fuentes de descargas parciales dentro del espectro angular de la señal sinusoidal de tensión aplicada durante el diagnóstico. Para cada nivel de tensión durante la prueba se verifica la magnitud del predominio de las descargas parciales.

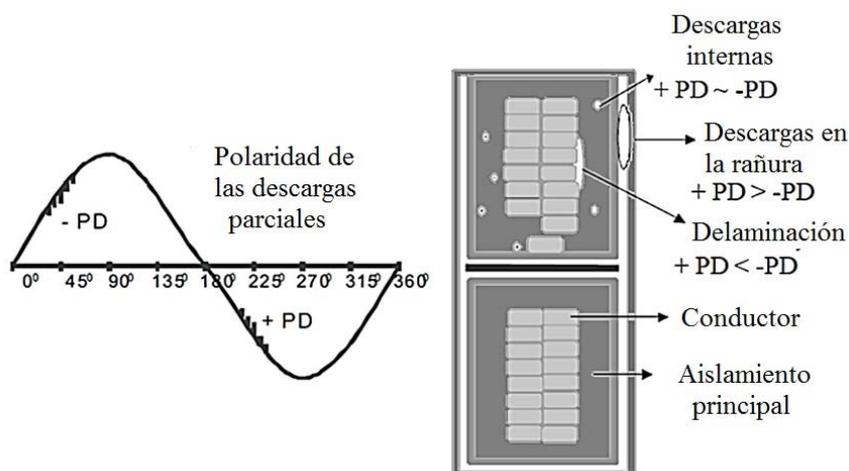


Figura 10: Fuentes de descargas parciales en un aislamiento de alta tensión para máquinas eléctricas rotativas (Fuente: MORETTI; 2016)

2.2. Preparación de muestras experimentales

Para demostrar la relación entre la contaminación superficial y los efectos dañinos a los dieléctricos utilizados en los devanados estáticos de las máquinas eléctricas rotativas de alta tensión, se fabricó un prototipo que contiene todas las características necesarias para soportar una tensión nominal de 4,16 kV. Para que el comportamiento de la muestra fuera fiel al estator de alta tensión, se utilizaron todos los materiales necesarios, tales como: aislamiento individual de los conductores, aislamiento principal con mica y capa de acabado superficial. Para completar el proceso, el estator se sometió al proceso de impregnación VPI.

Por razones de viabilidad del proceso, no se utilizó la cinta contra efecto corona. Este hecho no tiene impacto en el estudio abordado ya que las conclusiones son relativas, es decir, los resultados se presentan comparando la muestra ideal con la muestra sometida al contaminante. La Figura 11 presenta la muestra en su forma original.



Figura 11: Muestra de estator de alta tensión (Fuente: WEG)



La muestra en cuestión ha sido sometida a la prueba de envejecimiento a través de la prueba Voltage Endurance Test (VET) durante un período de 400 horas. El objetivo principal de ejecutar el VET es crear una condición de degradación similar a la que se encuentra con la máquina en operación. Los detalles del VET no se presentan aquí, ya que el objetivo principal es la evaluación de la contaminación superficial en un aislamiento ya degradado por condiciones operativas como temperatura y estrés eléctrico.

Con la muestra envejecida, primeramente, se realizaron mediciones de las condiciones iniciales sin contaminantes para realizar comparaciones. Luego, se seleccionaron los materiales contaminantes más comunes, buscando similitudes con los encontrados en aplicaciones, como agua salina y hollín húmedo.

Para simular el comportamiento dieléctrico de los devanados de máquinas eléctricas utilizadas en ambientes salinos (plataformas petrolíferas), se utilizaron alrededor de 35 g de sal por cada litro de agua, relación aproximada a que se encuentra en el agua de mar. La Figura 12 presenta la muestra siendo rociada con el contaminante, en ambos lados de las cabezas de bobina.



Figura 12: Muestra de estator de alta tensión - Contaminado (Fuente: WEG)

Justo después de finalizar las mediciones, para el análisis del efecto del contaminante del agua salina en un devanado envejecido, la muestra pasó nuevamente por un proceso de lavado, limpieza y respectivo secado en horno para volver a las condiciones iniciales. En estas condiciones, se hicieron nuevas mediciones para comparación con un nuevo proceso de contaminación.

Las máquinas eléctricas operan en las aplicaciones más diversas y, por lo tanto, también están sujetas a los más diversos contaminantes suspendidos en el aire. Estos hollines que contaminan los devanados en la operación fueron representados por la aplicación de aserrín fino y humedecido en la muestra, como muestra la Figura 13



Figura 13: Muestra contaminada con aserrín fino húmedo (Fuente: WEG)



3. MEDICIONES Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1. Prototipo con aislamiento envejecido y contaminado con agua salina

Como condición inicial, una muestra de estator bobinado de 4,16kV fue sometida al proceso de envejecimiento acelerado. El envejecimiento del aislamiento se simuló mediante el uso de dos factores: tensión y temperatura.

Tras el término del envejecimiento, la muestra se sometió a un proceso de rejuvenecimiento y posteriormente a pruebas dieléctricas. La Tabla 1 muestra que los resultados presentados en la columna “Condiciones iniciales” demuestran que la muestra presenta parámetros ideales para ser utilizada como referencia.

Tras la aplicación de agua salina, se constató que la resistencia de aislamiento para la fase W presentó un nivel muy bajo y, por lo tanto, no se realizaron los demás ensayos para evitar daños mayores. Al evaluar la causa raíz de la falla en la muestra, se concluye que el alto nivel de contaminación superficial sumado a una posible grieta causada por los efectos operacionales simulados durante la prueba VET fueron las causas del bajo nivel de aislamiento.

Tabla 1: Resultados de la prueba - Muestra contaminada con agua salina

Prueba		Muestras					
		Condiciones iniciales			Contaminado		
		U	V	W	U	V	W
R. óhmica	Ω	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
R1min @ 40°C	G Ω	4.82	4.87	4.72	3,40	4.20	0,02
IA	-	1,9	1,9	1,9	-	-	-
IP	-	5,20	5,00	5,20	-	-	-
Tan δ @20°C	%	3,71	3,84	4.25	-	-	-
Media Tan δ (Tip-up)	%	0,24	0,18	0.46	-	-	-
Máx. Δ tan δ	%	1,46	0,94	1.05	-	-	-
QM +	mV	181	191	-	-	-	-
QM -	mV	-	112	-	-	-	-
DD	-	1,50	1,60	1,50	-	-	-
DAR	-	4.20	4.20	4,80	-	-	-

3.2. Prueba 2 - Muestra revitalizada y contaminada con agua salina

Debido a la falla detectada en la prueba 1, la muestra fue sometida al proceso de revitalización. El proceso de revitalización consiste en rejuvenecer la parte superficial del devanado, evitando que los contaminantes provoquen un déficit en el grado de aislamiento del estator. Tras la revitalización, la muestra de estator bobinado se sometió a nuevas pruebas para garantizar la condición inicial y luego ser sometida al efecto del contaminante superficial.

La Tabla 2 muestra que la contaminación por agua salina tiene impacto significativo en la resistencia de aislamiento provocando una caída considerable del índice de polarización para la fase W. Esta disminución, tanto en la resistencia de aislamiento como en el índice de polarización, está directamente relacionada con un aumento corriente de fuga superficial.

Se destaca el aumento en las pérdidas dieléctricas Tan δ @20°C para la fase W y la caída de la media del Tan δ (Tip-up) para las fases U y W. La caída en la media del Tan δ (Tip-up) puede estar relacionada al aumento de la corriente de fuga y, por lo tanto, un cambio en las pérdidas en todos los niveles de tensión de prueba.

No hubo cambios significativos en los niveles de descargas parciales al comparar la muestra revitalizada con la muestra contaminada. Este comportamiento indica que la contaminación superficial no permite de manera consistente la propagación del “tracking” cuando el campo eléctrico se mantiene por un corto período. El “tracking” es un fenómeno acumulativo y requiere la existencia constante de campo eléctrico para generar un impacto en las mediciones de descargas parciales.



La respuesta a la descarga dieléctrica indica que el aislamiento no absorbió el contaminante. Este comportamiento está coherente con el hecho de que la muestra ha sido sometida al proceso de rejuvenecimiento, es decir, la muestra se encuentra encapsulada.

Los datos de DAR muestran que la contaminación no tiene un impacto directo sobre la absorción. Esto se debe a que la corriente de absorción está directamente relacionada con la polarización molecular y, por tanto, implica en la medición de corrientes con magnitudes superiores que la corriente de fuga.

Es importante destacar que el aislamiento epoxi-mica posee una característica no higroscópica, por lo que, al aplicar el contaminante se verificó mediante las pruebas de descarga dieléctrica (DD) y relación de absorción (DAR), que no hubo cambios significativos ya que no se esperaba absorción de la humedad presente en el contaminante.

Tabla 2: Resultados de las pruebas – Muestra revitalizada y contaminada con agua salina

Prueba		Muestras					
		Condiciones iniciales			Contaminado		
		U	V	W	U	V	W
\R. óhmica	Ω	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
R1min @ 40°C	G Ω	7.04	6.44	7.27	6.21	3,78	1,77
IA	-	1,9	2.0	2.1	1.8	1,9	1.4
IP	-	5.5	5.5	4.4	3.9	4.6	1.0
Tan δ @20°C	%	3.36	4.26	4.26	3.38	4.28	4,80
Media Tan δ (Tip-up)	%	0,16	0,15	0,12	0,07	0,14	0,04
Máx. Δ tan δ .	%	0,80	0,94	0,77	0,66	0,74	0,58
QM +	mV	251,0	242,0	146,0	200,0	289,0	129,0
QM -	mV	53,0	233,0	131,0	171,0	293,0	117,0
DD	-	0,8	0,8	0,9	1,0	1,0	1,0
DAR	-	4.2	4.6	4.2	4.2	4.5	4.2

3.3. Prueba 3 - Muestra revitalizada y contaminada con aserrín húmedo

Tras la realización de las pruebas con muestra contaminada con agua salina, la muestra fue sometida a un nuevo proceso de lavado para eliminar la contaminación. Tras el procedimiento de limpieza, el estator fue sometido a nuevas pruebas para evaluar el impacto de la contaminación por aserrín húmedo.

La Tabla 3 presenta los resultados de las pruebas antes y después de la contaminación por aserrín húmedo. Los resultados presentados en la columna "Condiciones iniciales", demuestran que el prototipo presentó mejores resultados para la resistencia de aislamiento (R1min @40°C) y el índice de polarización (IP). Hubo caída en las pérdidas dieléctricas (Tan δ @20°C) y pequeña mejora en la respuesta al (DAR). Este comportamiento es consistente ya que el prototipo fue sometido al proceso de limpieza para eliminar el contaminante.

En la columna denominada "Contaminado" se observa una caída en el valor de la resistencia de aislamiento (R1min @40°C), posiblemente causada por exceso de material contaminante. Al insertar un material contaminante en cantidad suficiente para obstruir los canales de ventilación, hubo una variación en el valor de capacitancia de fase que afectó la corriente capacitiva durante el proceso de polarización. Considerando que las otras características, absorción y fuga, no han sido afectadas, hubo un aumento en los valores de (IA), (IP) y (DAR). Por otro lado, hubo un aumento de las pérdidas dieléctricas (Tan δ @ 20°C), lo que puede demostrar que la corriente de fuga es más expresiva cuando la prueba se realiza en corriente alterna. El hecho de que los valores de media del Tan δ (Tip-up) y (Max Δ tan δ) indican que el contaminante utilizado no afectó significativamente la magnitud de las descargas parciales.

Los niveles de descarga dieléctrica (DD) presentaron un aumento considerable. Este aumento indica pérdida de homogeneidad del aislamiento provocada por la inserción del material contaminante entre los canales de ventilación del estator.

Los niveles de descargas parciales representan una tendencia de caída en las magnitudes al comparar la prueba antes y después de la contaminación. Este comportamiento puede estar relacionado con la alta humedad aplicada al aserrín durante la simulación de contaminación.



La alta humedad provoca un aumento de la corriente de fuga entre los devanados de diferentes fases "ecualizando" la diferencia de potencial sobre el material contaminante. El efecto del camino de fuga (tracking) se produce cuando la región contaminada presenta elevada diferencia de potencial y esto ocurre solo en regiones contaminadas y secas, según el modelo de la Figura 2. Un comportamiento similar fue verificado por Soltani (2009). En el estudio sobre el efecto de la humedad sobre la actividad de descargas parciales, Soltani (2009) identificó que después de días sucesivos de exposición a alta humedad, se suprimió la actividad de descargas parciales.

Tabla 3: Resultados de las pruebas - Muestra revitalizada y contaminada con aserrín húmedo

Prueba		Muestras					
		Condiciones iniciales			Contaminado		
		U	V	W	U	V	W
R. óhmica	Ω	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
R1min @ 40°C	G Ω	9,73	9,59	14,05	8,40	7,31	11,05
IA	-	1,80	1,74	1,50	1,9	1,8	2,1
IP	-	4,43	4,29	3,37	5,7	5,0	4,8
Tan δ @20°C	%	2,60	2,50	3,40	2,75	2,88	4,00
Media Tan δ (Tip-up)	%	0,04	0,15	0,10	0,06	0,06	0,06
Máx. Δ tan δ .	%	0,70	0,70	0,60	0,70	0,88	0,75
QM +	mV	206,0	310,0	243,0	108,0	147,0	182,0
QM -	mV	53,0	175,0	287,0	85,0	128,0	175,0
DD	-	0,9	0,9	1,0	1,71	1,74	1,77
DAR	-	3,70	3,65	3,67	4,2	4,7	4,9

4. CONCLUSIÓN

El principal objetivo de este artículo es presentar los efectos de los contaminantes en el sistema de aislamiento de media tensión aplicado a los devanados de máquinas eléctricas rotativas. Para eso, en un prototipo de estator bobinado con tensión nominal de 4,16 kV, se aplicaron dos contaminantes que se encuentran habitualmente en las más diversas aplicaciones. Las pruebas elegidas para la evaluación han sido seleccionadas por referencia normativa, metodología y capacidad para diagnosticar tendencias en fallas.

El prototipo fue sometido a un ciclo de VET para envejecimiento acelerado, pero manteniendo los parámetros del sistema de aislamiento dentro de los criterios de aceptación. En la primera contaminación con agua salina, el aislamiento fue afectado, llevando a cero las altas tasas de aislamiento en una de las fases (W) del devanado, por lo que fue necesario interrumpir los experimentos. Esta absorción del contaminante se produjo a través de microfisuras en el aislamiento.

Para la repetición de este contaminante, fue necesario rejuvenecer el prototipo y posteriormente realizar una nueva medición, devolviendo los valores de aislamiento. Por tratarse de una contaminación superficial, se verificó un impacto significativo en la corriente de fuga, comportamiento que se puede validar a través de la caída del índice de polarización después de la contaminación. El aumento de la corriente de fuga también presentó cambio en el comportamiento de las pérdidas dieléctricas, que se pudo ver en el aumento de Tan δ @20°C para la fase W y en la caída de la Media Tan δ (Tip-up) de las fases U y W. La caída de la Media Tan δ (Tip-up) está relacionada con el aumento de las pérdidas en los pasos menores de la tensión de prueba.

Tras la revitalización del prototipo, se aplicó el segundo contaminante, aserrín húmedo, en cantidad suficiente para obstrucción completa de los canales de ventilación del estator. Esta situación afectó el valor de la capacitancia de fase y, por lo tanto, aumentó la corriente capacitiva durante la polarización dieléctrica. El aumento de la corriente capacitiva redujo la resistencia de aislamiento, pero provocó un efecto contrario al esperado para (IA), (IP), (DAR). Es intuitivo concluir que los devanados contaminados presentan valores bajos de (IA), (IP) y (DAR), pero posibles cambios en la capacitancia geométrica pueden afectar significativamente estos índices. El índice (DD) presentó una respuesta significativa, demostrando que la inserción del contaminante provocó una pérdida de homogeneidad del aislamiento del estator.



La tendencia de caída en las descargas parciales puede estar alineada con la publicación “*Electrical insulation for rotating machines*”, STONE C.G., 2014. Esta publicación muestra que las regiones contaminadas y denominadas “húmedas” no provocan la aparición de elevada diferencia de potencial, por lo que no permite que descargas eléctricas provoquen la aparición de daños por caminos de fuga. A medida que la temperatura de la máquina aumenta debido al funcionamiento, la humedad superficial disminuye y permite la aparición de descargas, desencadenando otros fenómenos como efecto corona y camino de fuga.

Los experimentos han demostrado que los sistemas de aislamiento envejecidos son fácilmente afectados por contaminantes, incluso con buenos parámetros de aislamiento cuando están limpios y secos. Con rejuvenecimiento, el sistema de aislamiento demostró ser más resistente a los contaminantes, pero con variaciones en algunos parámetros medidos. Los factores de estrés, inherentes al funcionamiento de la máquina eléctrica, combinados con contaminantes, aceleran la degradación del sistema de aislamiento y pueden hacer que el equipo pierda su nivel de confiabilidad. La pérdida de confiabilidad está directamente relacionada con el riesgo de disponibilidad reducida y, en consecuencia, tiempo de inactividad inesperado en la producción, donde está involucrada la máquina eléctrica. Se recomienda monitorear los parámetros de la máquina eléctrica rotativa y realizar los mantenimientos predictivos necesarios.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a WEG Equipamentos Elétricos S.A. por el prototipo utilizado en los experimentos, por la posibilidad de utilizar la estructura y equipos, así como, por todo el apoyo en el desarrollo de este trabajo. También agradecemos al profesor Dr. Julio Carlos Teixeira de la UFABC, por su revisión en la propuesta de estudio.

6. REFERENCIAS

- [1] BALAN H., BUZDUGAN M., MUNTEANU R. A., BOTEZAN A., COZORICI I., AVRAM V.; *Insulation resistance testing of the medium voltage switches*, 2010. Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering, N 34, 2010.
- [2] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE 43: *Recommended practice for testing insulation resistance of rotating machinery*, New York, 2000. Disponible em: < <https://standards.ieee.org/findstds/standard/43-2000.html>>. Acceso em: 15 Jun. 2014. Acceso exclusivo para assinantes da coleção eletrônica.
- [3] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE 56: *IEEE Guide for Insulation Maintenance of Electric Machines*, New York, 2016. Disponible em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7830766> >. Acceso em: 7Out. 2019. Acceso exclusivo para assinantes da coleção eletrônica.
- [4] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE 95: *IEEE Recommended Practice for Insulation Testing of AC Electric Machinery (2300 V and Above) With High Direct Voltage*, 2002. Disponible em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/996345>>. Acceso em: 28Jul. 2020. Acceso exclusivo para assinantes da coleção eletrônica.
- [5] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE 1434: *Guide for the measurement of partial discharges in AC electric machinery*, New York, 2000. Disponible em: < <http://standards.ieee.org/findstds/standard/1434-2000.html> >. Acceso em: 15 Jun. 2014. Acceso exclusivo para assinantes da coleção eletrônica.
- [6] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION 60505: *Evaluation and qualification of electrical insulation system*, Switzerland, 2011. Disponible em: <<https://webstore.iec.ch/publication/2276> >. Acceso em: 29 Ago. 2019. Acceso exclusivo para assinantes da coleção eletrônica.
- [7] LIN, L; KANG, A; SONG, J; LEI, Z; ZHAO, Y; ISENBERG, A; *Effect of Water Vapor on Oil-contamination Discharge of Stator Windings*. China, 2016. Disponible em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7736828>>. Acceso em: 7Out. 2019. Acceso exclusivo para assinantes da coleção eletrônica.
- [8] MEGGER; User guide - MIT515, MIT525 and MIT1025, 2008. Disponible em: <<https://megger.com/10-kv-diagnostic-insulation-resistance-tester-mit1025#overview>>. Acceso em: 28 Jul. 2020. Acceso exclusivo para assinantes da coleção eletrônica.



- [9] MEGGER; *Dielectric discharge test*. Disponible em: <<https://megger.com/support/technical-library/application-notes/dielectric-discharge-test>>. Acceso em: 28 Jul. 2020. Acceso exclusivo para assinantes da coleção eletrônica.
- [10] MORETTI, D.R.; Investigación experimental sobre faltas em isolação de alta tensão aplicada em estatores de máquinas elétricas, 2016. Dissertação (mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 2016.
- [11] NETI, P.; ZHANG , P.; QI, X.; ZHOU, Y.; YOUNSI, K.; SHAH, M.; WEEBER, K.; *Online detection of endwinding contamination in industrial motors*, 2011. Disponible em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/05996159>>. Acceso em: 26 Nov. 2019. Acceso exclusivo para assinantes da coleção eletrônica.
- [12] SPEZIA, F. R.; MORETTI, D. R.; *Effects of the lubrication oil over the endurance of na insulation systema of medium voltage turbogenerators*. INSULEC International Conference on Electrical & Electronic Insulating Materials & Systems, 2015.
- [13] SOLTANI, R.; DAVID, E.; LAMARRE, L.; LAFORTUNE, L.; *Effect of humidity on charge and discharge current of large rotating machines bar insulation*. Canada, Disponible em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7736828>>. Acceso em: 7Out. 2019. Acceso exclusivo para assinantes da coleção eletrônica.
- [14] STONE C. G.; CULBERT I.; BOULTER E.A.; DHIRANI, H.; *Electrical insulation for rotating machines*. USA, 2014.
- [15] VON ROLL; *Fundamentals of Insulation Technology*, 2008.



Walter Evaldo Kuchenbecker es PhD en ENERGÍA, en la línea de investigación de Máquinas de Eléctricas Rotativas por la UFABC. Actualmente participa del programa de investigación *PDC (Pesquisador Doutor Colaborador)* y es becario postdoctoral en ENERGÍA en la misma universidad. Sus investigaciones y publicaciones se centran en máquinas eléctricas rotativas. Experiencia de 33 años en la empresa WEG Equipamentos Elétricos S.A., también enfocada a aplicaciones, fabricación y análisis de máquinas eléctricas, y durante los últimos 11 años ha sido supervisor en las áreas de calidad y pruebas eléctricas.



Daniel Rodrigo Moretti es máster en MÁQUINAS ELÉCTRICAS, en la línea de investigación de aislamiento de Máquinas Eléctricas Rotativas por la UFSC. Actualmente trabaja con servicio de campo en WEG Equipamentos Elétricos S.A. - Unidad ENERGIA. 9 años de experiencia en la empresa WEG enfocada a aplicaciones, fabricación, control de calidad y análisis de máquinas eléctricas.