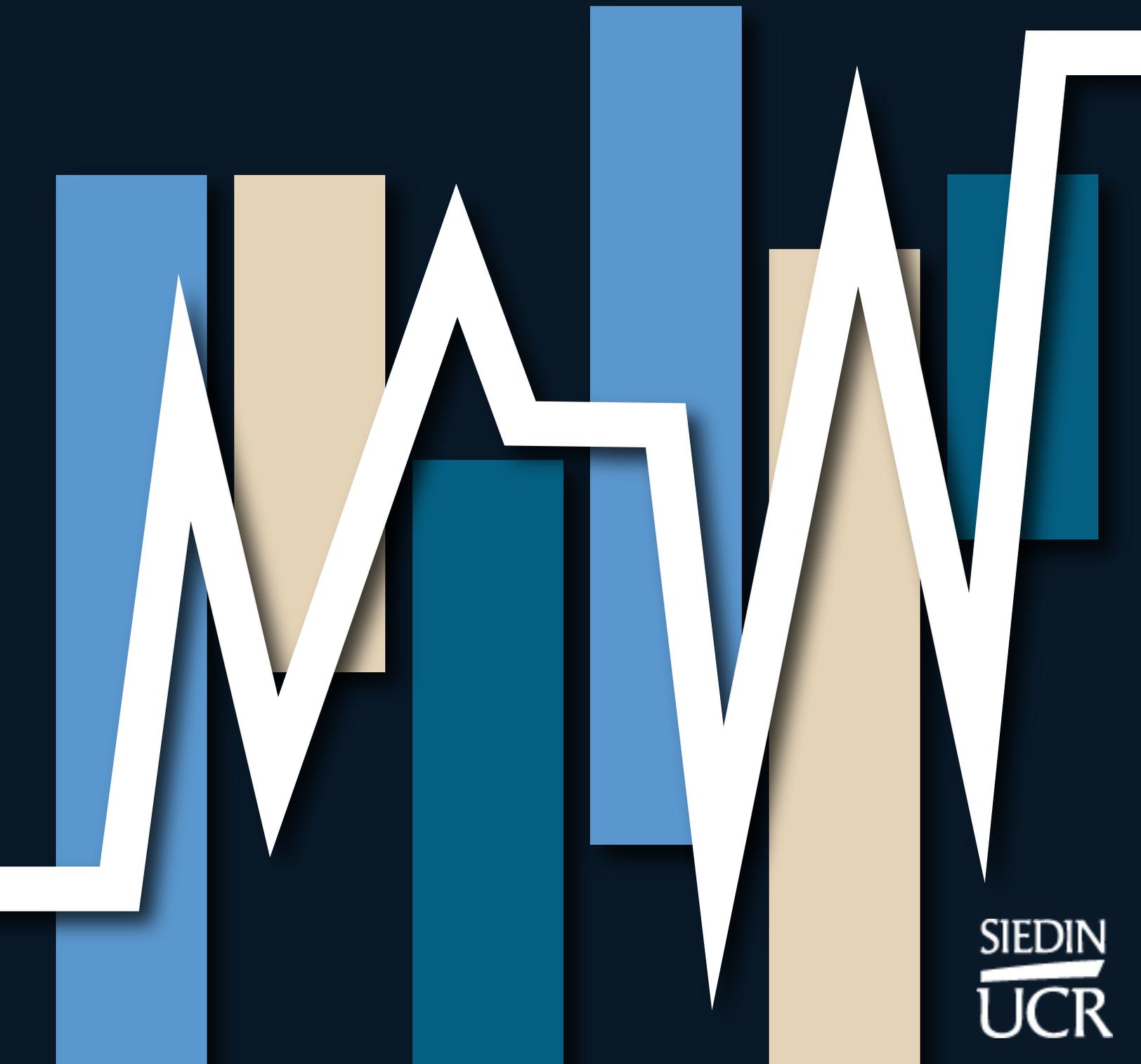


<https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/ingenieria/index>

www.ucr.ac.cr / ISSN: 2215-2652

Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica
ENERO/JUNIO 2022 - VOLUMEN 32 (1)



SIEDIN
UCR

Caracterización de descargas parciales en ranuras y por vibración presentadas en estatores de hidrogenadores

Characterization of partial discharges in slots and by vibration in stators of hydrogenators

Oscar Núñez Mata

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica

Email: oscar.nunezmata@ucr.ac.cr

ORCID:0000-0002-5410-6121

Jonathan Rodríguez Campos

Ingeniero Electricista, Instituto Costarricense de Electricidad, San José, Costa Rica

e-mail: jrodriguezcam@ice.go.cr

ORCID 0000-0002-3747-2277

Recibido: 14 de octubre 2021

Aceptado: 12 de diciembre 2021

Resumen

La confiabilidad y disponibilidad de los hidrogenadores depende en gran medida de la condición del aislamiento del devanado de estator, que está expuesto a una combinación de esfuerzos térmicos, eléctricos, ambientales y mecánicos. Una interrupción no programada de una máquina en funcionamiento podría poner en riesgo la estabilidad del sistema eléctrico, así como provocar pérdidas económicas, por lo que es necesario contar con técnicas de monitoreo de condición, como es la medición de descargas parciales en-línea. Una descarga parcial se define como una descarga eléctrica localizada, que solo une parcialmente el aislamiento entre los conductores, acompañada de movimiento de cargas, emisión acústica, radiación y reacción química, entre otros efectos. La medición de descargas parciales en-línea es una de las técnicas más utilizadas para seguir la evolución de grandes hidrogenadores. En este artículo se propone una metodología novedosa para detectar los mecanismos de falla de descargas parciales: i) en ranura; y ii) por el establecimiento de chispas por vibración, mostrando ejemplos utilizando una máquina en servicio. La metodología se basa en la medición de descargas parciales en-línea para distintos niveles de potencia activa. Lo anterior permite encontrar dependencias térmicas y mecánicas, que logren localizar y caracterizar el mecanismo de falla. Posteriormente, se establecen una serie de posibles causas-raíz de cada uno, y las recomendaciones de reparación. Los resultados obtenidos en las pruebas realizadas muestran que la medición de descargas parciales en-línea es efectiva cuando se trata de detección temprana de fallas repentinas, y se ha aplicado con éxito en el hidrogenador evaluado.

Palabras clave:

Análisis de falla, descargas parciales, generadores, mantenimiento, pruebas de aislamiento.



Abstract

The reliability and availability of hydro generators is highly dependent on the condition of the stator insulation, which is exposed to a combination of thermal, electrical, environmental and mechanical stresses. An unscheduled interruption of a generator in operation could jeopardize system stability, as well as cause economic losses, so it is necessary to have condition monitoring techniques, such as on-line partial discharge measurement. A partial discharge is defined as a localized electrical discharge, which only partially joins the insulation between the conductors, accompanied by movement of charges, acoustic emission, radiation and chemical reaction, among other effects. On-line partial discharge measurement is one of the most used techniques to follow the evolution of large hydro generators. This article proposes a novel methodology to detect the failure mechanisms of partial discharges: i) in slot; and ii) by sparks produced by vibration, showing one example using a generator in service. The methodology is based on on-line partial discharge measurement for different active power levels. The above allows finding thermal and mechanical dependencies, which are able to locate and characterize the failure mechanism. Subsequently, a series of possible root causes of each are established, and recommendations for repair. The results obtained in the tests carried out show that on-line partial discharge measurement is effective when it comes to early detection of sudden failures, and has been successfully applied in the hydro generator evaluated.

Keywords:

Failure analysis, generators, insulation tests, maintenance, partial discharges.

1. INTRODUCCIÓN

La confiabilidad y disponibilidad de los hidrogenadores depende en gran medida de la condición del aislamiento del devanado de estator, que está expuesto a una combinación de esfuerzos térmicos, eléctricos, ambientales y mecánicos [1]. Con el desarrollo de un sistema de energía de alta calificación para un mercado eléctrico desregulado, los hidrogenadores de media tensión juegan un papel clave en asegurar la rentabilidad y confiabilidad de la operación del sistema eléctrico. Por ejemplo, una interrupción no programada de una máquina en funcionamiento podría resultar en una inestabilidad del sistema al que está conectado, así como una pérdida de inversión de capital. Los programas de mantenimiento modernos incorporan diversas técnicas de diagnóstico, evolucionando desde los enfoques basados-en-tiempo a enfoques de mantenimiento basados-en-condición [2]. Así, hoy en día es posible evaluar el estado de una máquina eléctrica utilizando los parámetros obtenidos de: las pruebas de diagnóstico fuera-de-línea, los datos del monitoreo en-línea y la información del historial operativo. Estos métodos de evaluación proporcionan información útil para ampliar la vida operativa de diferentes aparatos de potencia, entre estos se destacan los generadores eléctricos, siempre buscando minimizar el riesgo de costosas fallas [3].

Las fallas en generadores están asociadas tanto a sus componentes mecánicos como aquellas fallas de origen eléctrico. En este sentido, se ha encontrado que cerca del 56 % de los problemas en grandes hidrogenadores se deben al deterioro del sistema de aislamiento de estator [1]. Entre las causas principales de falla del sistema de aislamiento, está la actividad de descargas parciales (DPs), que es tanto una causa como un indicador de seguimiento del estado. Por ejemplo, las DPs internas representan un 22 % de las causas-raíz de las fallas en devanados de estator de grandes generadores [4]. Por lo tanto, el seguimiento de la actividad de DPs es útil para detectar defectos y fallas latentes. La prueba de DPs se ha utilizado durante más de 80 años como una herramienta de control de calidad en fábricas de máquinas eléctricas y componentes. Gracias a esta prueba, es posible encontrar defectos de fabricación que, eventualmente, podrían conducir a fallas en el equipo [5].

Una descarga parcial se define como una descarga eléctrica localizada, que une parcialmente el aislamiento entre los conductores, acompañada de: movimiento de cargas, emisión acústica, radiación de luz y una reacción química [6]. Utilizando estas manifestaciones físicas de las DPs, las señales se pueden medir por diferentes métodos y dispositivos, incluyendo: detección eléctrica, detección acústica, detección de luz y método de detección química [1]. Entre los métodos más utilizados está la detección de señales eléctricas, ya sea con pruebas fuera-de-línea (máquina fuera de operación), como monitoreo en-línea (máquina en operación). La medición en-línea detecta directamente los pulsos eléctricos de las DPs del devanado del estator durante el funcionamiento normal del generador [7]. El monitoreo de DPs en-línea se puede realizar de forma periódica (por ejemplo: cada seis meses). O bien, es posible establecer monitoreo continuo de DPs en-línea.

Justamente, la tendencia mundial hacia el mantenimiento predictivo ha incrementado el interés por utilizar distintas pruebas en-línea con el equipo en operación. Con este método, es

posible establecer el estado dieléctrico de la máquina y observar su comportamiento bajo los esfuerzos (solicitaciones) reales de operación. Un sistema de monitoreo de DPs en-línea para hidrogenadores requerirá de dos pasos fundamentales, a saber: detección e interpretación. Cada descarga parcial crea un pequeño pulso de corriente eléctrica que se propagará por todo el devanado del estator. Estos pulsos tienen una duración de unos pocos nanosegundos, con frecuencias que van desde CC, hasta varios cientos de megahercios. Los pulsos eléctricos son detectados y procesados de varias formas por los diversos sistemas de monitoreo de DPs [7]. En general, el sistema de monitoreo en-línea requiere de los siguientes componentes: i) un sensor para detectar la corriente de la descarga y convertirla en una señal digital; ii) instrumentación para caracterizar las señales de DPs (determinación del número de eventos, su magnitud pico, polaridad y posición de la fase de CA), junto con ayudar a distinguir el ruido; y iii) software que procese la información sobre el estado del aislamiento [5].

El diagnóstico en-línea permite obtener información sobre la severidad y localización de las DPs, detectando distintos modos de falla, tales como: abrasión del aislamiento, cuñas de estator sueltas, degradación térmica del aislamiento o defectos de fabricación, entre otros. En este sentido, desde fines de la década de 1980 algunos devanados de estator de hidrogenadores aparentemente han fallado debido a un mecanismo conocido como “erosión por chispas” o “chispas por vibración” presentado en las ranuras de estator. El mecanismo puede producir chispas relativamente intensas entre la superficie de la barra del estator y el núcleo magnético, durante la operación del hidrogenador. La intensidad de las chispas es tal que puede erosionar la pared a tierra del aislamiento, mucho más rápido que las descargas de ranura típicas [8]. Durante el funcionamiento del hidrogenador, la abrasión de los devanados del estator se produce debido a la vibración causada por la fuerza electromagnética, que provoca una descarga parcial de la ranura (erosión por chispas) [9]. Además, el calentamiento producido por la corriente en los devanados (que se puede agravar por deficiente disipación de calor) incrementará el fenómeno de la erosión por chispas [9].

Los mecanismos de falla de DPs en las ranuras han sido ampliamente estudiados en la literatura [9], [5], [4], [2], [10], [11], [8]. Sin embargo, no se encuentra en la literatura una metodología detallada que logre identificar las dependencias mecánicas y térmicas, que lleven a un diagnóstico del mecanismo de falla predominante. Como se indica en [8], es difícil distinguir entre distintos mecanismos de falla, lo que puede dificultar el diagnóstico y la toma de decisiones para los responsables de la operación de hidrogenadores.

Comprender el proceso de desarrollo de DPs en las ranuras de estatores de hidrogenadores mientras están en operación es fundamental con el fin de proporcionar una alerta temprana de fallas. En este artículo se propone una metodología novedosa para detectar y caracterizar separadamente los mecanismos de falla de DPs conocidos como: i) en ranura; y ii) provocado por chispas por vibración, mostrando un ejemplo real al utilizar una máquina en servicio. La metodología se basa en la medición de DPs en-línea para distintos niveles de potencia activa, tal y como lo sugiere la normativa que se utiliza para este tipo de pruebas [12]. Lo anterior permite encontrar dependencias térmicas y mecánicas (por vibración), que logren localizar y caracterizar

el(los) mecanismo(s) de falla presente(s). Posteriormente, esto servirá para establecer una serie de posibles causas-raíz de cada uno, y las recomendaciones de reparación.

Este artículo está organizado de la siguiente manera: en la Sección 2 se revisa la teoría relacionada con la actividad de DPs en ranuras y por vibración. En la Sección 3 se presenta la propuesta metodológica. En la Sección 4 se muestra la evaluación de la propuesta. Finalmente, en la Sección 5 se presentan las conclusiones y trabajos futuros, en búsqueda de la reducción en la contaminación y aumento en las actividades económicas.

2. DESCARGAS PARCIALES EN RANURAS Y DEBIDAS A CHISPAS POR VIBRACIÓN

2.1. Introducción

Una descarga parcial se considera una descarga de baja energía localizada dentro de un micro volumen de aire, el cual se ubica en el estator (por ejemplo, una burbuja de aire atrapada dentro del aislamiento), y afecta parcialmente al material aislante (degradándolo y envejeciéndolo). Las DPs pueden presentarse en sistemas de aislamiento líquidos o sólidos de equipos eléctricos de media y alta tensión, como es el caso de los generadores eléctricos de media tensión [5]. Estas descargas deterioran la zona alrededor de donde se producen, ocasionando erosión de los materiales que conforman la protección mecánica y dieléctrica del devanado. Su origen tiene directa relación con distintos fenómenos, que son: i) durante el proceso de fabricación del sistema de aislamiento y de los devanados, donde pueden quedar pequeñas cavidades de gas aprisionado, formando zonas conocidas como “burbujas de aire”; y ii) durante la operación normal se forman cavidades o acumulación de contaminación, donde se pueden presentar estas descargas [13].

La Fig. 1 explica el fenómeno que sucede en el interior de un material aislante que incluye alguna burbuja de aire. El aislante y el aire pueden ser caracterizados por un parámetro conocido como su permitividad, con la permitividad del aire y la del material aislante, donde se tiene que La permitividad define la tendencia de un material a polarizarse frente a un campo eléctrico E y así anular parcialmente el campo interno [14]. Cuando se aplica la tensión HV (en Fig. 1 B), el campo tiende a concentrarse en la burbuja de aire. Las cargas se acumulan en los extremos (en Fig. 1 A) y una ionización gaseosa transitoria ocurre al exceder el valor crítico, y esta ionización produce una descarga por el aire. El tipo de descarga parcial está en función de su localización dentro del devanado. En general se clasifican en descargas [15]:

- internas (como la Fig. 1);
- superficiales (superficie de un dieléctrico o interface entre dos dieléctricos, o un dieléctrico y el núcleo laminado);
- superficies aislantes (como en las cabezas de bobinas contaminadas).

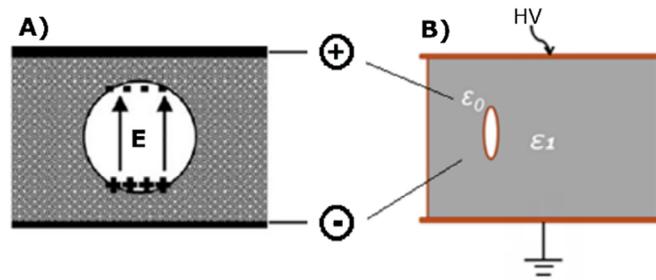


Fig. 1. Volumen de aire en material aislante como origen de DPs: A) acumulación de cargas en un micro volumen dentro del aislamiento, B) ubicación en el material aislante que es sometido a una tensión HV.

Dentro de las descargas superficiales están las denominadas *DPs en ranura*, que se establecen en zonas dentro de las ranuras del estator [16]. Son catalogadas como de riesgo alto, y se producen por el mal (o falta de) contacto entre la capa de nivelación del campo eléctrico y la pared de la ranura del núcleo de estator (tierra) [6].

2.2 Descargas parciales en ranura

Con la introducción de los sistemas de aislamiento de tipo epoxi-mica en máquinas de media tensión en la década de 1950, un mecanismo de falla denominado “descarga en ranura” se presentó con mayor regularidad [8],[17]. Por ejemplo, algunos de los sistemas utilizados por distintos fabricantes a base de epoxi-mica son [7]: i) General Electric con su sistema Micapals I y II; ii) Siemens con su sistema Micalastic; y iii) ABB con su sistema Micadur. Típicamente, las descargas en ranura sólo aparecen durante el funcionamiento de la máquina, ya que son las fuerzas electromagnéticas y la vibración las que conducen al establecimiento de las mismas. Sólo en caso de presentarse una gran degradación de la capa de nivelación del campo eléctrico de la barra, que se ubica en la ranura y en la zona inmediata a la salida de la misma, es que las mediciones fuera-de-línea podrán detectar este tipo de descargas. Hay tres fuentes generales de DPs en ranura, que son [8]:

- Barras sueltas: donde la vibración de la barra desgasta y deteriora el revestimiento de la ranura y el aislamiento a tierra.
- Recubrimiento de ranura mal fabricado: provocando una resistencia inicial excesivamente alta.
- Pobre conexión del revestimiento conductor de la barra a tierra: donde la barra no está debidamente conectada a tierra.

Parte del diagnóstico que se debe realizar a los hidrogenadores trata justamente de identificar cuál de estas tres fuentes anteriores inició el proceso de DPs en ranura. Distintas empresas generadoras de electricidad han informado de la erosión del revestimiento de ranura producido por este tipo de descargas [18]. Se ha encontrado con mayor frecuencia en generadores de hidráulicos refrigerados por aire de 6.6 kV y superiores, aunque se ha observado en generadores refrigerados por hidrógeno, donde la presión del gas se espera que suprima la actividad de las descargas. Por ejemplo, la empresa Canadiense Ontario Hydro ha reportado en el pasado que algunos de sus generadores hidráulicos mostraban signos de actividad de DPs en ranura [19].

La Fig. 2 muestra el equivalente esquemático de la descarga parcial en la ranura. Este tipo de descarga se da entre dos electrodos separados por un dieléctrico (aislante de barrera) [20].

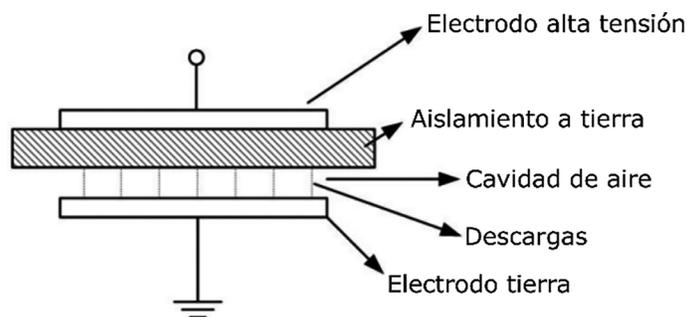


Fig. 2. Representación de una descarga parcial en ranura de hidrogenerador. Adaptada de [20].

2.3 Descargas parciales debidas a chispas por vibración

El mecanismo de falla denominado “erosión por chispas” o “chispas por vibración”, presentado en las ranuras, es diferente al de la descarga parcial en ranura, que se suele presentar en máquinas de media tensión [12]. Existe un proceso de deterioro similar, pero con ciertas diferencias que deben ser consideradas principalmente durante el diagnóstico de la máquina. A menudo, las chispas por vibración se confunden con el tipo de descarga parcial en ranura, porque la vibración de la barra está involucrada y se producen chispas en la superficie de las barras dentro de la ranura. La causa principal de las chispas por vibración es un diseño y fabricación defectuosos, y los fabricantes de máquinas pueden evitarlo en la mayoría de los diseños. El mecanismo es impulsado por el campo magnético en el núcleo del estator y, por lo tanto, puede ocurrir en cualquier punto del devanado, incluso en el neutro. Aunque este proceso es poco común, ocasionalmente aparece tanto en hidrogeneradores refrigerados por aire como en máquinas refrigeradas por hidrógeno. Las chispas de vibración solo se producirán cuando se cumplan dos siguientes condiciones simultáneamente [8]: a) el revestimiento conductor de la barra en la ranura tiene una baja resistencia óhmica; y b) las barras vibran durante la operación de la máquina, producto de las fuerzas magnéticas. Esto puede ocurrir en todo el devanado de estator.

La Fig.3 muestra una barra altamente dañada, que operó en un hidrogenerador eléctrico. En la barra se muestra el patrón típico de falla de chispas por vibración.



Fig. 3. Barra de hidrogenerador con daño debido a chispas por vibración: A) no deterioro en las zonas de los ductos de ventilación, B) gran deterioro en las zonas de contacto con el núcleo de estator. Fuente: [11].

El patrón de falla presentado en la Fig. 3 se debe al establecimiento de corrientes circulantes en lazos que abarcan: las capas aislantes de la barra, las láminas del núcleo, cerrándose el circuito por medio de la tornillería de sujeción del estator. Ese bucle de conducción posible permitirá el establecimiento de la corriente circulante en el momento que la tensión se induzca en este [11].

Finalmente, los dos mecanismos de falla eléctrica estudiados (descargas parciales en ranura y chispas por vibración) que se presentan en los devanados de estator pueden estar estrechamente relacionados entre sí (en la manifestación física o apariencia). Sin embargo, difieren fundamentalmente en la causa raíz y las acciones correctivas a seguir. Como resultado de lo anterior, la falla del devanado podría ser diagnosticada erróneamente y la acción correctiva a menudo no es la adecuada. Por lo tanto, es necesario contar con metodologías de diagnóstico de hidrogenadores, que distingan entre los distintos modos de falla.

3. METODOLOGÍA PROPUESTA

La metodología para la detección de descargas en ranura y debidas a chispas por vibración se basa en la medición de DPs en-línea, realizando cambios en el nivel de carga del hidrogenador (aumento/disminución). Para desarrollar dicha propuesta se tomó como base la recomendación general que aparece en la norma IEEE 1434-2000 sobre medición de DPs en máquinas rotativas. En la norma indicada, se propone realizar mediciones en-línea de DPs en hidrogenadores con variaciones de carga. Se busca encontrar relaciones entre el nivel de actividad de DPs con la carga y la temperatura del devanado de estator [12]. Sin embargo, en la norma mencionada, no se establece un procedimiento detallado para llevar a cabo los cambios de carga, establecer la cantidad de pasos, definir el tiempo para la realización de las mediciones, y más bien se dan recomendaciones generales.

Los efectos del aumento/disminución de la potencia activa sobre el aislamiento del devanado de estator serán los siguientes: i) el cambio de la amplitud de la vibración electromagnética; ii) el aumento de temperatura; y iii) la variación de la fuerza electromagnética [2]. Estos cambios pueden afectar la actividad de DPs. Se considera, entonces, que la dependencia de la actividad de DPs con la temperatura del devanado se atribuye a la variación del tamaño de las cavidades de aire presentes en el aislamiento de la ranura. Se espera que la cavidad de aire cambie, debido a la expansión del aislamiento con la temperatura. Por ejemplo, se reportan casos de disminución de la actividad de DPs en generadores hidroeléctricos que utilizan un sistema de aislamiento de asfalto-mica, con el aumento de la potencia y la temperatura [21]. Lo anterior se explica por la expansión del asfalto, causada por el aumento de temperatura, lo que disminuyó el tamaño de la cavidad (producida por la delaminación del aislamiento) y, por lo tanto, se redujo la actividad de las DPs. Por el contrario, en el caso de sistemas de aislamiento de epoxi mica, la presencia DPs en ranuras aumentará con la temperatura, debido a que la expansión térmica no es compensada por el nivel de actividad de DPs en ranura [22].

Basándose en lo anterior, se plantea una medición del hidrogenador en ocho (8) pasos, para distintos niveles de potencia activa, empezando desde el vacío, hasta la máxima potencia, y volviendo a disminuir al nivel de vacío. Este procedimiento considera únicamente la entrega de

potencia activa por parte del generador, con un nivel de potencia reactiva bajo. El objetivo de esto es lograr el mayor impacto sobre los cambios de temperatura en los devanados de estator. La Fig. 4 muestra una gráfica secuencial con los ocho pasos en los cuales se realizarán distintas mediciones en porcentaje de máxima potencia activa. Este procedimiento debe ser coordinado con el centro de despacho de energía y el departamento de operación de la central de energía, ya que la unidad en evaluación debe estar enteramente dedicado a la realización de las pruebas.

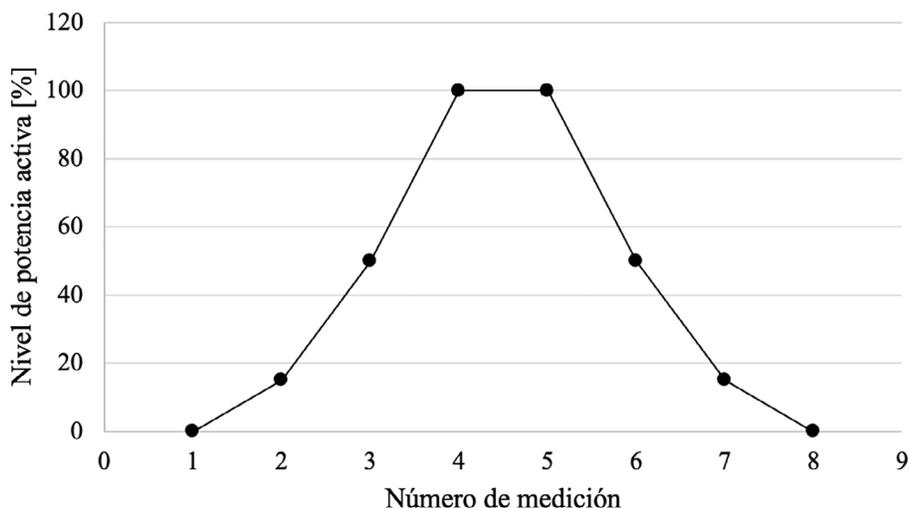


Fig. 4. Nivel de potencia para los pasos de la prueba de aumento/disminución de carga.

Algunas de las recomendaciones generales para la realización de la prueba y asegurar la validez de los datos registrados son las siguientes:

- Mantener condiciones operativas similares.
- Mantener condiciones ambientales similares (un cambio súbito implicaría la detención de la prueba). Un aspecto muy particular se tiene con la humedad relativa, ya que un cambio significativo en esta puede impactar las DPs superficiales, y afectar los resultados obtenidos.
- Realizar la prueba con valores de tensión y potencia reactiva con variaciones máximas de $\pm 2\%$.
- Incluir, dentro del análisis, los valores de referencia límites (definidos como: bajo, moderado, crítico) de la actividad de DPs en-línea según alguna normativa o recomendación de fabricantes (en el caso de estudio de la Sección IV se usará la recomendación del fabricante del equipo de medición de DPs en-línea).

Los resultados de las pruebas se analizan buscando dependencias entre la actividad registrada de DPs en-línea, con el nivel de potencia y la temperatura del devanado de estator. El diagnóstico se realiza siguiendo lo indicado en el CUADRO I.

CUADRO I
DIAGNÓSTICO DE HIDROGENERADORES PARA LA PRUEBA DE
AUMENTO/DISMINUCIÓN DE CARGA

<i>Resultado</i>	<i>Condición</i>	<i>Dependencia</i>	<i>Diagnóstico</i>	<i>Causa(s)-raíz posible(s)</i>
<i>Incremento en la actividad de DPs con el aumento de la potencia activa</i>	<i>Temperatura del devanado aproximadamente constante</i>	<i>Mecánica</i>	<i>Probable presencia de chispas por vibración</i>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Inadecuado diseño y/o fabricación, o montaje.</i> • <i>Resistencia de la capa semiconductor de la barra demasiado baja.</i> • <i>Aflojamiento de la barra en la ranura.</i>
<i>Incremento en la actividad de DPs con el aumento de la temperatura del devanado</i>	<i>Potencia activa constante</i>	<i>Térmica</i>	<i>Probable presencia de descargas parciales en ranura</i>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Inadecuado diseño y/o fabricación.</i> • <i>Resistencia de la capa semiconductor de la barra demasiado alta.</i> • <i>Aflojamiento de la barra en la ranura.</i>

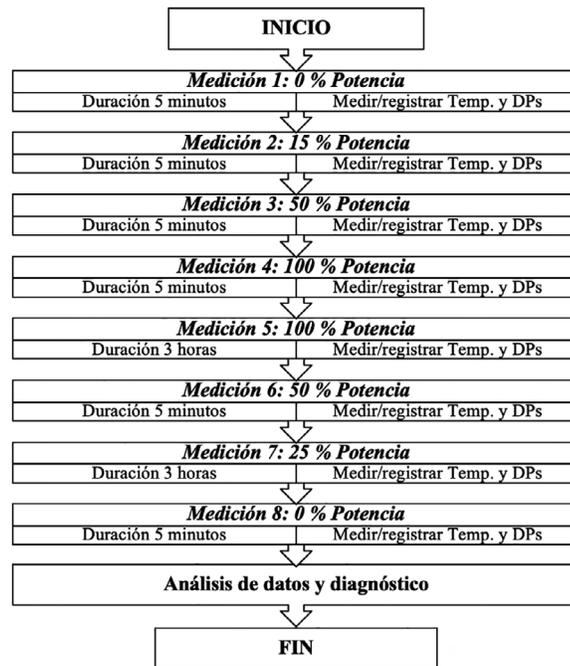


Fig. 5. Pasos de la prueba de aumento/disminución de potencia.

En caso de llegarse a un diagnóstico de probable presencia de descargas parciales en ranura, por la determinación de una dependencia térmica, se puede confirmar, de manera directa, mediante el monitoreo de ozono [8]. La experiencia demuestra que, si la concentración de ozono excede alrededor de 0,1 ppm, es altamente probable que se está produciendo un nivel de DPs superficial alto.

Al utilizar la metodología propuesta se realizaron pruebas en un hidrogenerador que está en operación para evaluar su condición. Los resultados se presentan a continuación.

4. CASO DE ESTUDIO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

El objetivo de la prueba es observar el efecto de las variaciones significativas de la potencia del hidrogenerador y la temperatura del devanado estator, en la magnitud de las DPs en-línea. Con los resultados obtenidos se busca: i) corroborar el estado actual del devanado; ii) identificar el mecanismo de falla que interviene directamente en la magnitud de las DPs; y iii) analizar el estado de la acción correctiva del reacondicionado realizado en el estator cinco años atrás. Los datos técnicos del hidrogenerador evaluado se muestran en el CUADRO II.

Inicialmente, se recomienda que el hidrogenerador esté en vacío (sin carga) con el estator a la menor temperatura posible. En este caso, la unidad se encontraba como condensador síncrono con una temperatura de estator que ronda los 60 °C. Según la metodología de la Fig. 5, se registrarán lecturas de DPs en ocho puntos, cada lectura tarda 5 min (el responsable de la prueba registra rápidamente los datos para minimizar el efecto de las diferencias de temperatura), con excepción de la No. 5, donde el generador se quedará entregando una potencia del 100 % por tres horas para propiciar el aumento de temperatura en el devanado de estator, y buscar con ello una temperatura estable. En esta prueba, los pasos fueron los siguientes:

- Inicio de la prueba.
- Paso 1. Con la unidad fuera de línea, se alimenta su excitación para obtener tensión nominal. Se registra la medición No. 1, duración 5 min.
- Paso 2. La unidad se sincroniza a la red, ajustando una potencia de 10 MW. Se registra la medición No. 2, duración 5 min.
- Paso 3. La unidad se lleva a una potencia de 30 MW. Se registra la medición No. 3, duración 5 min.
- Paso 4. La unidad se sube a una potencia de 60 MW. Se registra la medición No. 4, duración 5 min.
- Paso 5. La unidad se mantiene en una potencia constante de 60 MW. Se registra la medición No. 5, duración 3 h.
- Paso 6. La unidad se reduce a una potencia de 30 MW. Se registra la medición No. 6, duración 5 min.
- Paso 7. La unidad se reduce a una potencia de 10 MW. Se registra la medición No. 7, duración 5 min.
- Paso 8. Se abre el interruptor de la máquina, pero manteniendo la excitación en la unidad. Se registra la medición No. 8, duración 5 min.

Los cambios en la temperatura del devanado registrados durante la prueba se muestran en la Fig. 6.

CUADRO II
DATOS GENERALES DEL HIDROGENERADOR EVALUADO

<i>Potencia</i>	67 MVA
<i>Tensión</i>	13.2 kV
<i>Clase de aislamiento</i>	F
<i>Cantidad de polos</i>	24
<i>Año de fabricación</i>	2000

Durante la prueba de aumento/disminución de potencia (según se muestra en la Fig. 6) se realizaron mediciones de DPs con el equipo de monitoreo en-línea junto con el registro de la temperatura en el devanado. Para cada medición, se registraron las siguientes variables involucradas: i) potencia activa; ii) potencia reactiva; iii) humedad; iv) temperatura ambiente; iv) temperatura de estator; y iv) tiempo de la medición. Se pretende observar la variación de las magnitudes de DPs, verificando los niveles de los parámetros Q_{m+} y Q_{m-} , los cuales representan la magnitud de las descargas en mV a 10 pulsos/segundo. Los parámetros Q_{m+} y Q_{m-} corresponden a la magnitud pico de las DPs positivas y negativas, respectivamente, registradas por el instrumento de medición [7].

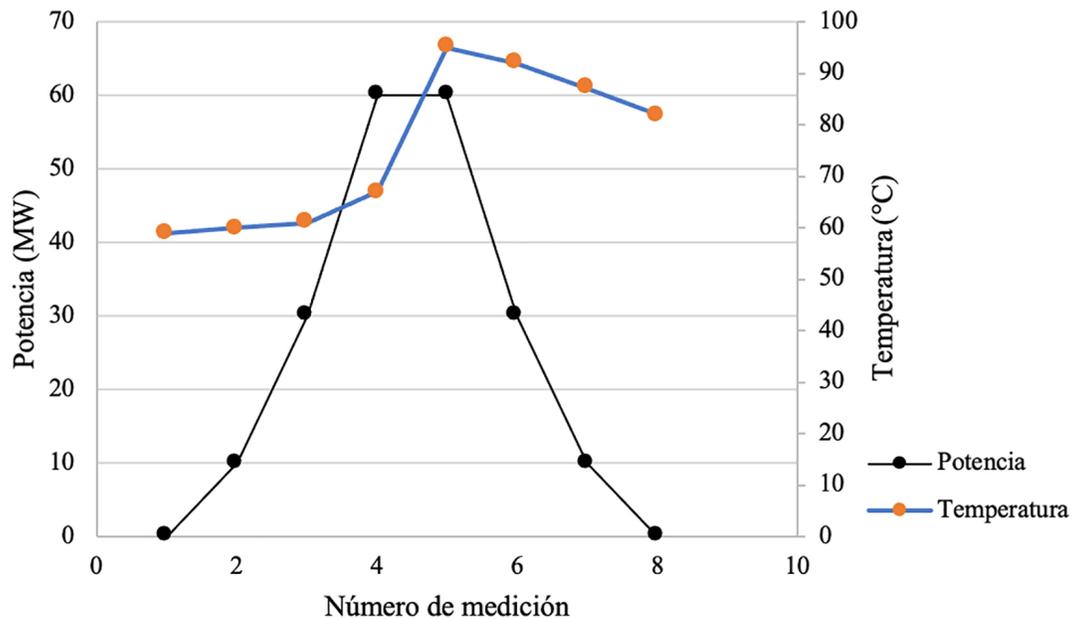


Fig. 6. Cambios en la temperatura del devanado durante la prueba de aumento/disminución de potencia.

Los cambios en la actividad de DPs durante la prueba se muestran en la Fig. 7.

Los datos son registrados para cada fase con los cuales se preparó la Fig. 7, tomando como base los valores límite recomendados por el fabricante del equipo de monitoreo. En primer lugar, la Fig. 7 muestra

el efecto que tiene sobre la actividad de DPs frente al cambio de la temperatura a potencia constante. En segundo lugar, se presenta el comportamiento de las DPs ante cambios de potencia a una temperatura constante. La Fig. 7 muestra únicamente el parámetro Qm+ por fase, ya que por tratarse de DPs en ranuras, el patrón típico presenta un predominio de los pulsos positivos [12].

En la Fig. 7 se confirman las variaciones en la magnitud de DPs positivas al cambiar la temperatura del devanado, con una potencia constante. Se verifica que un aumento en la temperatura tiene un efecto directo en el aumento de la magnitud de las DPs en todas las fases. Por el contrario, se concluye que no hay un efecto significativo en la magnitud de las DPs con la variación de la potencia, con temperatura aproximadamente constante.

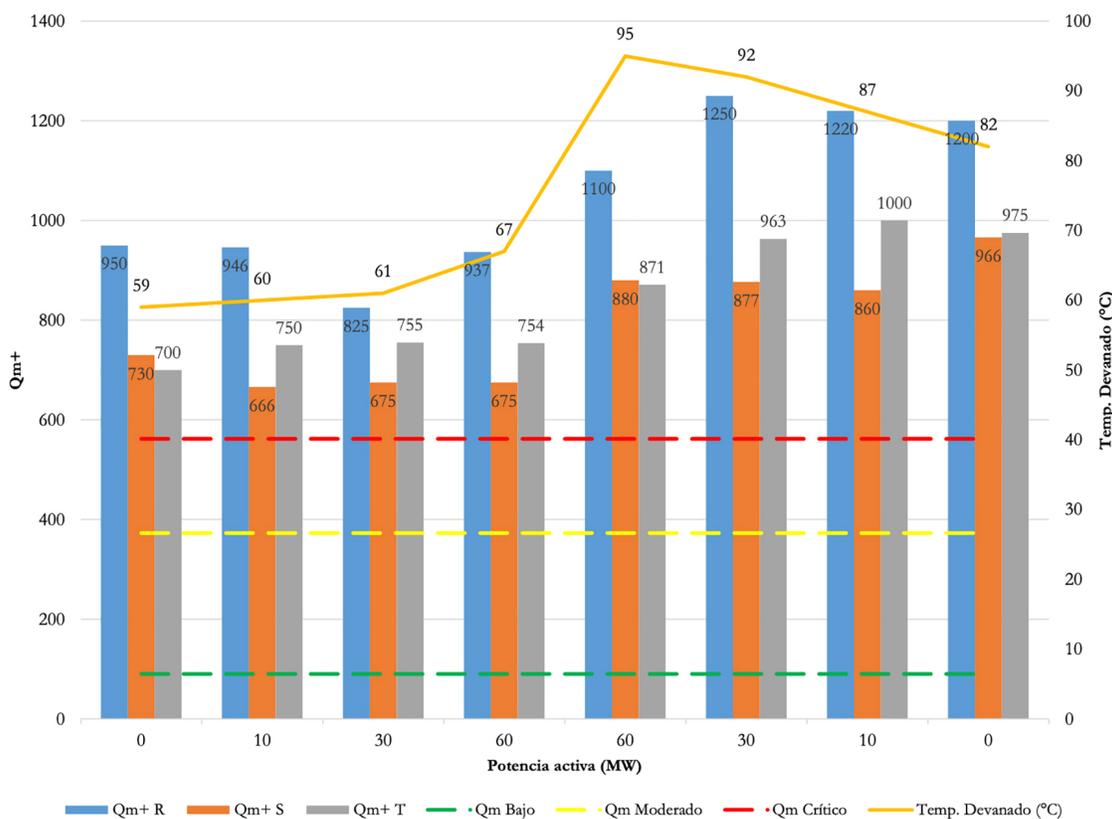


Fig. 7. Registro de la actividad de DPs para distintos niveles de potencia del hidrogenerador.

Tras el análisis del efecto que tienen los cambios de temperatura y la potencia en la magnitud de las DPs, junto con pruebas complementarias que salen del alcance de este artículo, la actividad de DPs en la unidad en evaluación es causada por un desgaste aumentado de la cinta semiconductor de las barras. Actualmente, no se presenta un cambio significativo en la magnitud de las DPs con dependencia mecánica, es decir, no hay movimiento significativo de las barras dentro de las ranuras (que provoca chispas por vibración).

La causa-raíz del daño de la superficie de la barra en la cinta semiconductor fue provocada por el movimiento de barras dentro de las ranuras, identificado antes del reacuñado. Este movimiento fue originado por la suma de varios factores, que fueron encontrados evaluando una serie de antecedentes que no están incluidos en este artículo, que se resumen como: i) una ejecución inadecuada del montaje de barras; ii) altas temperaturas de operación; y iii) oscilaciones de potencia.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este artículo, se estudió el desafío de evaluar y diagnosticar estatores de hidrogenadores mediante un enfoque práctico. Se propuso una metodológica para la evaluación del hidrogenador por medio de la medición de la actividad de descargas parciales, utilizando el monitoreo en-línea, a partir de la recomendación de la norma IEEE 1434-2000. El uso de una prueba de aumento/disminución de potencia de la unidad ofrece una herramienta novedosa para hacer frente a las dificultades de distinguir entre descargas parciales en ranura, de las causadas por el fenómeno conocido como chispas por vibración. En apariencia, estas dos manifestaciones de descargas parciales presentan similitudes, pero las acciones correctivas son diferentes. Esto permitirá a los responsables de la operación de hidrogenadores enfrentar el diagnóstico de las unidades de mejor manera.

Se demostró que bajo una prueba de aumento/disminución de potencia, se pueden establecer dependencias mecánicas y térmicas de la actividad de descargas parciales. Por lo tanto, se logrará diagnosticar el hidrogenador en cuanto a la presencia de descargas parciales en ranura y las ocasionadas por chispas por vibración. La metodología propuesta se probó en la evaluación de un hidrogenador en operación, el cual contaba con un registro histórico muy detallado para comprobar la efectividad del diagnóstico alcanzado. El principal resultado del estudio fue constatar que la metodología fue sensible a los cambios en las variables medidas. El buen desempeño de la metodología es resultado de la forma en que se establece el conjunto de pasos, con sus respectivas instrucciones, y el uso de la medición de descargas parciales en-línea y la temperatura del devanado, ya que el monitoreo fuera-de-línea no sería sensible a los síntomas presentados en el devanado de estator. Como técnica de comprobación, se midió el nivel de ozono presente, verificándose valores excesivos (típicos de actividad de descargas parciales en ranura).

El trabajo futuro se centrará en aplicar la metodología en nuevos hidrogenadores para su comprobación y ajuste. Además, se requieren desarrollar mayores análisis en cuanto a la relación de la metodología con otras pruebas de monitoreo en-línea y fuera-de-línea, incluyendo también métodos de análisis estadísticos y/o avanzados (por ejemplo: basados en aprendizaje de máquina). Finalmente, con el objetivo de mejorar el desempeño de la metodología, se sugiere realizar mediciones desde el inicio de la operación de un hidrogenador, para seguir la evolución de las variables medidas.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se realizó gracias al apoyo del proyecto de investigación: “Detección de fallas, control e integración de sistemas de energías renovables no convencionales con almacenamiento energético para redes inteligentes” código 322-C1-467 de la Universidad de Costa Rica.

REFERENCIAS

- [1] Y. Luo, Z. Li, y H. Wang, “A review of online partial discharge measurement of large generators”, *Energies*, vol. 10, no. 11, pp. 1–32, 2017, doi: 10.3390/en10111694.
- [2] T. Tsurimoto et al., “Development of Partial Discharge Monitor for Turbine Generators”, presentado en *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing and Coil Winding Conference (Cat. No.99CH37035)*, 2002, pp. 185–189, doi: 10.1109/EEIC.1999.826204.
- [3] G. Klempner y I. Kerszenbaum, *Operation and Maintenance of Large Turbo-Generators*, First. New Jersey, NY: John Wiley & Sons, 2004.
- [4] R. Brusch, M. Tari, K. Fröhlich, T. Weiers, y R. Vogelsang, “Insulation failure mechanisms of power generators”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 24, no. 4, pp. 17–25, 2008, doi: 10.1109/MEI.2008.4581636.
- [5] G. Stone, “A perspective on online partial discharge monitoring for assessment of the condition of rotating machine stator winding insulation”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 28, no. 5, pp. 8–13, 2012, doi: 10.1109/MEI.2012.6268437.
- [6] IEC, *IEC Std 60270 High-voltage test techniques – Partial discharge measurements*. Geneva, Switzerland: IEC, 2000, p. 108.
- [7] G. Stone, E. Boulter, I. Culbert, y H. Dhirani, *Electrical insulation for rotating machines*, First Edit. New Jersey, NY: John Wiley & Sons, 2004.
- [8] G. Stone y C. Maughan, “Vibration sparking and slot discharge in stator windings”, presentado en *Conference Record of IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 2008, pp. 148–152, doi: 10.1109/ELINSL.2008.4570298.
- [9] A. Kang, M. Tian, J. Song, L. Lin, W. Li, y Z. Lei, “Contribution of Electrical–Thermal Aging to Slot Partial Discharge Properties of HV Motor Windings”, *Journal of Electrical Engineering and Technology*, vol. 14, no. 3, pp. 1287–1297, 2019, doi: 10.1007/s42835-018-00076-8.
- [10] V. Warren, G. Stone, y H. Sedding, *Partial Discharge Testing: a Progress Report Pd - a Comparison Test*. Mississauga, Ontario, 2017, pp. 1–17.
- [11] M. Liese, “Vibration sparking, an ignored damage mechanism of high voltage windings”, presentado en *Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines, ICEM'08*, 2008, pp. 1–6, doi: 10.1109/ICELMACH.2008.4799823.
- [12] IEEE, *IEEE Std 1434 Guide to the Measurement of Partial Discharges*. USA: IEEE, 2000, p. 55.
- [13] G. Montanari y P. Seri, “A partial discharge-based health index for rotating machine condition evaluation”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 34, no. 2, pp. 17–25, 2018, doi: 10.1109/MEI.2018.8300440.
- [14] R. James y Q. Su, “Insulating materials utilized in power-system equipment”, en *Condition assessment of HV insulation in power system equipment*, vol. 53, no. 9, *T. I. of E. and Technology*, Ed. London, UK, 2008, pp. 1689–1699.
- [15] R. Bartnikas, “Partial discharges. Their mechanism, detection and measurement”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 9, no. 5, pp. 763–808, 2002, doi: 10.1109/TDEI.2002.1038663.
- [16] A. Basu, “Prevention of slot discharge and on-line condition monitoring of high voltage machine insulation”, presentado en *19th Electrical Electronics Insulation Conference*, 1989, pp. 305–309, doi: 10.1109/EEIC.1989.208247.
- [17] A. Wilson, “High and low intensity slot discharge”, presentado en *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 1990, pp. 363–366, doi: 10.1109/ELINSL.1990.109774.

- [18] C. Azuaje y W. Torres, “Experiences in identification of partial discharge patterns in large hydrogenerators”, presentado en IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, TDC’06, 2006, pp. 1–6, doi: 10.1109/TDCLA.2006.311605.
- [19] R. Jackson y A. Wilson, “Slot-discharge activity in air-cooled motors and generators”, presentado en IEE Proceedings B: Electric Power Applications, vol. 129, no. 3, pp. 159–167, 1982, doi: 10.1049/ip-b.1982.0022.
- [20] J. Song, C. Li, L. Lin, Z. Lei, X. Bi, y H. Yang, “Slot discharge pattern of 10 kV induction motor stator coils under condition of insulation degradation”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 20, no. 6, pp. 2091–2098, 2013, doi: 10.1109/TDEI.2013.6678857.
- [21] B. Lloyd, S. Campbell, y G. Stone, “Continuous on-line partial discharge monitoring of generator stator windings”, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 14, no. 4, pp. 1131–1137, 1999, doi: 10.1109/60.815038.
- [22] C. Hudon, M. Chaaban, M. Bélec, y D. Nguyen, “Effect of temperature and thermal expansion on slot partial discharge activity”, presentado en Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo, EEIC 2007, 2007, no. 1, pp. 122–126, doi: 10.1109/EEIC.2007.4562602.