

DESCARGAS PARCIALES EN CENTRALES GENERADORAS ELÉCTRICAS

Ingeniería electromecánica con orientación electrónica

Camila Isabel González López. Tutor: Msc. Ing. Rodrigo Ramos. Co-Tutor: Lic. Ariel Guerrero

Resumen— Los sistemas de aislamiento de equipos eléctricos pueden estar sometidos al fenómeno de DP debido a una serie de factores. Físicamente, ocurre un aumento del campo eléctrico en un punto localizado de la aislación, dando lugar al inicio del proceso degenerativo de ruptura dieléctrica. En este trabajo se presenta el estado del arte de las mediciones de DP, el cual indica que la medición en línea es el método más recomendado para una evaluación oportuna de los sistemas de aislación. Este método brinda información suficiente para realizar un monitoreo basado en condiciones, favoreciendo la realización del mantenimiento preventivo para una gestión de activos eléctricos más eficiente. Además de presentar información actualizada acerca de las centrales generadoras eléctricas en Paraguay, se presenta la descripción de una cadena de medición típica del fenómeno y la especificación técnica de una bancada capaz de realizar mediciones de DP.

Palabras clave— Descargas parciales (*partial discharges*), especificación técnica (*technical specification*), gestión de activos eléctricos (*electrical asset management*), mantenimiento preventivo (*preventive maintenance*), medición en línea (*online measurement*), monitoreo basado en condiciones (*condition-based monitoring*), sistema de aislamiento (*insulation system*).

I. NOMENCLATURA

DP: Descargas parciales.

II. INTRODUCCIÓN

Se denomina Descarga Parcial a una descarga eléctrica que abarca parcialmente el aislamiento de un conductor. Este fenómeno ocurre por virtud de una ionización gaseosa transitoria debida a que la tensión en una irregularidad de la aislación excede un valor crítico [1].

El fenómeno de las descargas parciales afecta a varios equipos que operan en alta tensión, entre los principales se pueden citar: transformadores, generadores y conductores. En las unidades generadoras de una central eléctrica, las ocurrencias de este fenómeno son más difíciles de predecir, comparando con otras magnitudes tales como la vibración y la temperatura, por lo que su estudio se convierte en una necesidad para las industrias. [2] Menciona que la vida útil de un sistema de aislamiento siempre estará asociada con el proceso de degradación más rápido. Por esta razón la medición de DP, que a menudo es el proceso de degradación de mayor velocidad, se está convirtiendo en la herramienta principal

para el diagnóstico de sistemas de aislamiento. En la presente investigación se realizó una investigación bibliográfica profunda con la finalidad de comprender el fenómeno estudiado, conocer sus características y elaborar la especificación técnica de una bancada para efectuar mediciones de DP.

III. MARCO TEÓRICO

A. Centrales generadoras

La dependencia de la energía eléctrica crea un desafío para los ingenieros; el mismo consiste en hacer del sistema de potencia el más eficiente y confiable. Los Sistemas de Potencia están constituidos por tres componentes: generación, transmisión y distribución [3]. Existen distintos tipos de centrales generadoras, que generalmente se clasifican de acuerdo a los recursos empleados para la transformación de la energía. Entre los recursos primarios se pueden citar a combustibles fósiles y nucleares y la energía hidroeléctrica, mientras que los recursos secundarios incluyen todas las energías renovables menos la hidroeléctrica. De acuerdo a los datos publicados por [4], los sistemas de energía continúan evolucionando de redes aisladas y no competitivas a mercados integrados nacionales e internacionales y las perspectivas mundiales a largo plazo continúan mejorando para la generación a partir de fuentes renovables y gas natural.

1) Generación de energía eléctrica en el Paraguay

La referencia [5] menciona que Paraguay participa con 50% del capital social en dos empresas hidroeléctricas de naturaleza jurídica binacional: Itaipú, con capacidad instalada de 14.000MW (Paraguay/Brasil) y Yacyretá con capacidad instalada de 3.200MW (Paraguay/Argentina). La ANDE opera la central hidroeléctrica Acaray, con capacidad instalada de 210MW. Dos empresas del sector privado también operan como distribuidoras: CLYFSA en Villarrica y la Cooperativa Menonita del Chaco. ANDE cuenta además con generación térmica a través de grupos electrógenos en ciudades alejadas de la red. Desde hace algunos años también existen centrales solares estratégicamente ubicadas en la región del Chaco. Según la misma fuente, dadas las altas capacidades de generación, la energía eléctrica generada en el Paraguay es casi exclusivamente del tipo hidráulico. Es por ello que esta investigación se enfocó principalmente en el estudio de aquellos equipos que pueden ser afectados por DP y se encuentran en centrales generadoras, tales como: conductores e hidrogenadores.

B. Descargas parciales

La definición presentada por [6] se transcribe a continuación:

La descarga parcial es una descarga eléctrica localizada que, solo parcialmente, abarca el aislamiento entre los conductores y que puede o no puede ocurrir adyacente a un conductor. Las descargas parciales son, en general, una consecuencia de las concentraciones de tensión eléctrica local en el aislamiento o en la superficie del aislamiento. Generalmente tales descargas aparecen como pulsos que tienen duraciones de mucho menos de 1 μ s. Las descargas parciales a menudo van acompañadas de emisiones de sonido, luz, calor y reacciones químicas.

Cuando los aislantes de los equipos eléctricos son sometidos a una tensión V sinusoidal pueden aparecer DP en las imperfecciones. Esto sucede a partir de un nivel de tensión llamado tensión de ignición v_i . El campo eléctrico debido a esta tensión provoca una avalancha de electrones en las zonas no homogéneas que inicia la descarga. Las condiciones para que sigan apareciendo las descargas parciales solo desaparecen cuando la tensión cae por debajo de un valor llamado tensión de extinción v_e . [7]

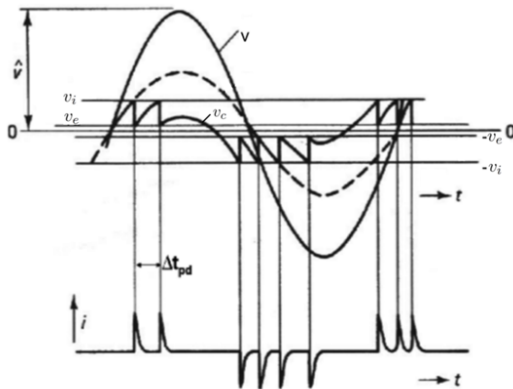


Fig. 1. Patrón de DP según Kreuger (1989) [7].

1) Antecedentes

La referencia [8] corresponde a un estudio que buscaba determinar las causas y el lugar de las fallas en hidrogeneradores. Para lograrlo se han definido dos conceptos: daño y causa raíz. El daño puede considerarse como perjuicio o lesión a la propiedad; en el caso de un hidrogenerador resulta en la pérdida del valor o el deterioro de la unidad. Para este estudio se establecieron cuatro categorías de daño: daños en el aislamiento, térmicos, mecánicos y de rodamientos. Por otra parte, la causa raíz de falla se encuentra cuando se sigue una cadena de causa y efecto desde un estado final conocido, de regreso a un origen o punto de inicio; el propósito principal de intentar encontrar las causas raíz es resolver un problema que realmente haya ocurrido o evitar que un problema menos serio se extienda a un nivel inaceptable. Se han definido causas raíz de aislación, térmicas, mecánicas y de rodamientos.

Las conclusiones principales a las que arribó el estudio son las siguientes: para observar la gravedad de una falla se deben tener en cuenta dos aspectos principales, la extensión del daño y la interrupción producida. Una falla infrecuente que produce una interrupción muy larga es tan grave como otra falla más común que produce interrupciones más cortas. La Fig. 2 muestra la relación entre la causa raíz del fallo y la extensión del daño. Como se puede ver, las fallas más destructivas son aquellas originadas por causas raíz de aislamiento.

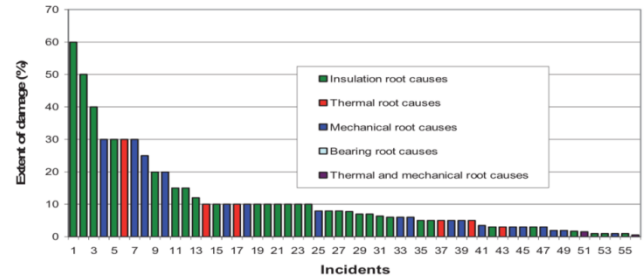


Fig. 2. Distribución de los incidentes por causa raíz de falla y extensión del daño [8].

Los resultados de esta investigación también muestran que los daños de aislamiento son las causas más frecuentes de falla y las que producen mayor daño. La distribución de las causas raíz de falla es similar a la del daño, pero una falla de aislamiento no siempre se debe a una causa de raíz de aislamiento. Debe tenerse en cuenta que la gravedad (costo, grado de daño y parada de máquina) de un fallo mecánico, térmico o de rodamientos puede ser tan importante como el de una falla de aislamiento.

Las causas de fallas en el aislamiento parecen ser más evolutivas y sensibles al tiempo que otras (mecánica, térmica y de rodamiento). Por lo tanto, la responsabilidad de reducir estas últimas causas de origen recae principalmente en los fabricantes (diseño preciso, estándares de alta calidad, etc.) por un lado, y por otro lado, la responsabilidad de la evaluación de la condición del hidrogenerador recae en los usuarios. El monitoreo de descargas parciales y el monitoreo de vibraciones son los métodos más valiosos, ya que son vitales para prever la ocurrencia de fallas futuras y para planificar las medidas correctivas adecuadas.

2) Ocurrencia de descargas parciales

Las descargas parciales en el aislamiento técnico son consecuencia de imperfecciones dieléctricas, como bordes afilados en el aire ambiente e inclusiones gaseosas en dieléctricos líquidos y sólidos [9]. Esto causa un incremento del campo local, que podría exceder la intensidad de campo intrínseca, de modo que se puedan iniciar las avalanchas de electrones autosostenibles como puede verse en la Fig. 3. El movimiento de los portadores de carga dentro de las inclusiones gaseosas se asocia con rápidos pulsos de corriente transitoria detectables en los electrodos del objeto de prueba, lo que puede ser utilizado ventajosamente para el reconocimiento de descargas parciales. Como las descargas parciales están asociadas con la ionización de las moléculas de

gas, tales eventos ocurren no solo en el aire ambiente sino también en cavidades llenas de gas de dieléctricos sólidos o en burbujas y vapor de agua de líquidos dieléctricos. Debido a la formación de avalanchas de electrones dentro del rango de nanosegundos, cada evento de descarga parcial individual está asociado con un pulso de corriente muy rápido causado por los portadores de carga en movimiento. En 1966, Bailey estimó teóricamente que el tiempo de subida más corto de los impulsos DP originales podría estar en el rango de nanosegundos. Desde principios del siglo pasado, cuando los altos voltajes se utilizaron cada vez más para la transmisión de energía eléctrica a larga distancia, se supo que las descargas en inclusiones llenas de gas de dieléctricos sólidos pueden considerarse un precursor de una ruptura definitiva. Por lo tanto, la detección de descargas parciales se volvió cada vez más interesante cuando se adoptaron varias herramientas para medirla, como métodos ópticos, químicos, acústicos y eléctricos. En cuanto al aislamiento técnico, el defecto de DP no es accesible, la forma real de los impulsos de corriente de DP no se puede medir. La única forma es desacoplar los transitorios DP de los terminales del objeto de prueba. Sin embargo, bajo esta condición, el contenido de frecuencia de la señal DP se reduce drásticamente debido a la inevitable atenuación y dispersión de los impulsos DP cuando se propagan desde la fuente DP a los terminales del objeto de prueba.

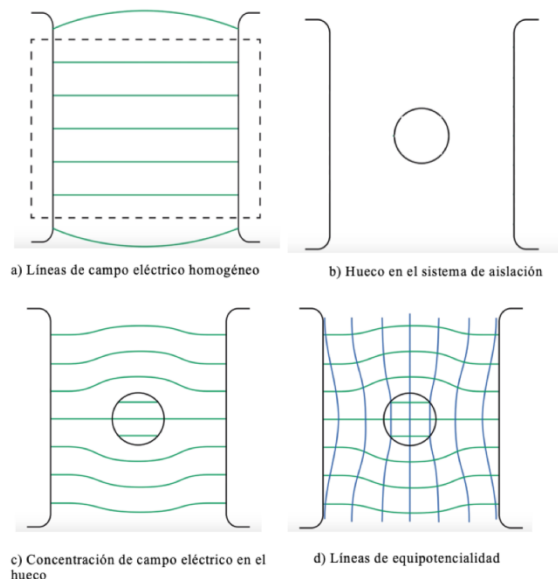


Fig. 3. Concentración de campo eléctrico en una imperfección de la aislación [10].

Si se supone que la permitividad relativa del material es $\epsilon_r = 3$, dentro del hueco la permitividad es $\epsilon_r = 1$, lo que sucede es que se tendrá un campo eléctrico mayor en ese punto que en el exterior. En este caso particular, 3 veces mayor. [10] De esta situación se presentan los siguientes tres problemas: En primer lugar, se tiene una concentración de campo eléctrico mayor en un punto, en segundo lugar, se presenta una amplia caída del voltaje y en tercer lugar ocurre lo más grave, en ese punto ya no existirá aislación sólida como mica u otros polímeros, lo que solía ser parte de un sistema de

aislamiento sólido es ahora aire. Y es justamente en ese punto en el que se tendrá una DP en el caso de que el campo eléctrico sea suficientemente grande. El valor de la permitividad relativa de un sistema de aislación es mayor a 1 en la mayor parte del tiempo (1 es el valor para el aire), usualmente el valor de la permitividad relativa en un sistema de aislación es 2, 3 o inclusive mayor.

Es importante mencionar que, los sistemas de aislamiento pueden ser sólidos, como mica, vidrio, polietileno, resina, etc., líquidos como el aceite en el caso de los transformadores y gaseosos como el gas hexafluoruro de Azufre SF6 utilizado en subestaciones aisladas a gas. Todos estos materiales poseen una alta rigidez dieléctrica que les permite soportar niveles altos de tensión mientras mantienen, sostienen y separan los conductores y zonas activas de las máquinas del exterior. Sin embargo, estas propiedades dieléctricas pueden disminuir con el tiempo debido a los esfuerzos térmicos, mecánicos y otros a los que se ha sometido el material, teniendo así una incidencia directa en la disminución de la vida útil de los equipos [7].

Según lo expresado por [7], las descargas parciales son un fenómeno estocástico que varía en el tiempo. Un fenómeno estocástico se refiere a sistemas que evolucionan a lo largo del tiempo, o del espacio, de acuerdo a unas leyes no determinísticas, es decir, de carácter aleatorio. Éste fenómeno, se desarrolla en tres estados. En el primero, estado Streamer, las DP son pulsos rápidos del orden de nanosegundos y tienen la mayor amplitud de los tres estados, creando corrientes de 10 a 100mA. y apareciendo entre los 10-60 minutos primeros de actividad. Tras estos 10-60 minutos, aparece un proceso más lento, estado Townsend, durante el cual, la amplitud de la corriente disminuye y se pueden apreciar ciertos indicios de deterioro y oxidación. Finalmente, y después de varios días de actividad permanente, la magnitud de las DP sigue decreciendo, hasta el orden de μA , y la repetición aumenta a decenas de descargas por microsegundo, estado Pitting, en el que el dieléctrico está muy cerca del fallo.

3) Implicancia de las descargas parciales

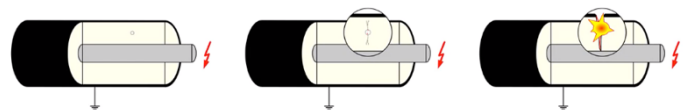


Fig. 4. Ejemplo ilustrativo de ocurrencia de DP en un conductor [10].

En la Fig. 4. se tiene un conductor, un sistema de puesta a tierra donde hay un micro hueco que representa un tipo de falla o impureza en el sistema de aislamiento. Debido a esta falla se origina en el lugar un aumento de campo eléctrico, tal como se muestra en la Fig. 3. posteriormente, el micro hueco es sometido a alta tensión y si se alcanza un valor conocido como tensión de ignición v_i , entonces, se obtiene en ese punto una descarga parcial. Lo que ocurrirá luego la primera descarga parcial, es que este pequeño punto se agrandará; esto hace que la discontinuidad en el sistema de aislamiento aumente y tarde o temprano podría presentarse una rotura total del sistema del mismo, lo cual no es deseable debido a que, en caso de llegar a ese punto crítico, el dispositivo de alta tensión,

sea éste un transformador o una máquina rotativa, podría presentar un cortocircuito, ocasionando graves daños, tales como explosiones y otros [7], [10].

Con estas aseveraciones, vuelve a destacarse la importancia de realizar mediciones periódicas y monitoreo en los sistemas de aislamiento; éstas dos prácticas son de vital importancia para poder evaluar la condición del aislamiento, generar un registro y evitar a tiempo la ocurrencia o incremento de los daños que pueden derivarse de una descarga parcial, promoviendo la protección de los equipos y principalmente de las personas.

Las descargas parciales crean un canal de plasma de un par de miles de grados Kelvin. Algunas fuentes mencionan que el valor es de 5.000°K y otras mencionan que es de hasta 10.000°K . Si el canal es pequeño, se tendrá una pequeña descarga, pero debido al calor se destruirá todo a su alrededor. Los elementos metálicos también podrían sufrir daños, pero los sistemas de aislamiento de plástico son los que se ven mayormente afectados. Lo que sucede es que el calor destruye el sistema de aislación, carbonizándolo, tal como se puede apreciar en la Fig. 5. A medida que esto suceda, ocurrirán más descargas parciales, y cuanto mayores DP se tengan más calor se generará. Por esto, el peligro radica en que la ocurrencia de DP es un proceso auto acelerado o degenerativo, es decir, una vez que empieza tiende a empeorar [10].

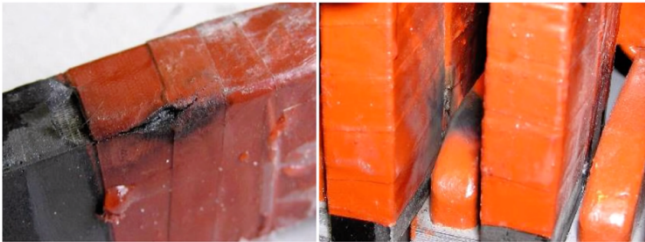


Fig. 5. Daños en una barra de estator y en una máquina rotativa [10]

Al inicio de este documento se hizo mención de la importancia y el desafío que implica el hecho de brindar energía segura a los consumidores y, tal como se puede apreciar luego de estas explicaciones, las implicaciones de las ocurrencias de DP en el desempeño del sistema eléctrico son directas y pueden llegar a ser graves si no se toman las acciones preventivas y correctivas correspondientes. Un monitoreo de condiciones realizado oportunamente permitirá evitar daños mayores que puedan llevar a eventuales paradas de máquina u otros efectos perjudiciales que pueden acarrear pérdidas en el orden de varios miles de dólares. Para reducir los efectos no deseados derivados de la ocurrencia de DP el manejo de riesgos se convierte en una herramienta crucial. A continuación, se definen algunos aspectos importantes a considerar.

La gestión de los activos eléctricos pone cada vez más énfasis en la calidad de la energía, incluidas las interrupciones del suministro eléctrico, asociadas con la reducción de los costos de mantenimiento. Las técnicas de diagnóstico que revelan la condición del equipo proporcionan un medio para

una gestión efectiva, permitiendo planes de mantenimiento basados en la condición del aislamiento, la operación del sistema y el riesgo asociado. Una propiedad de diagnóstico o marcador, debe tener una tendencia temporal que esté correlacionada con el estado de envejecimiento del sistema bajo evaluación. El marcador debe estar asociado con un valor umbral que establezca el nivel límite para la operación correcta del sistema. La elección tanto de la propiedad diagnóstica como del umbral tiene implicaciones fundamentales en la efectividad diagnóstica del sistema. El umbral está relacionado con el nivel de riesgo que el administrador de activos considera aceptable. Refiriéndose a la llamada curva bañera, que representa el comportamiento temporal del riesgo de falla, peligro o tasa de falla, ver Fig. 6., las mejores condiciones de operación para un sistema eléctrico son las correspondientes al riesgo mínimo, parte II de la curva, que proporciona la máxima confiabilidad permitida para el sistema. El riesgo de falla aumenta con el tiempo de operación debido al envejecimiento del aparato [2].

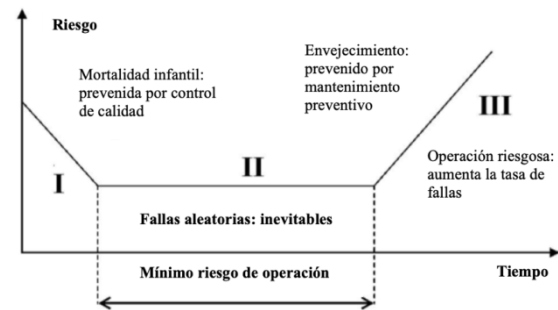


Fig. 6. Curva de tasa de riesgo (curva bañera) para sistemas eléctricos [2]

El mantenimiento se hace efectivo solo si se conoce el estado del sistema, lo que significa que el nivel de envejecimiento debe diagnosticarse de manera eficiente para establecer el tiempo de mantenimiento adecuado. Dicho enfoque puede promover un procedimiento llamado monitoreo basado en condiciones, que permite la optimización de las condiciones operativas de un activo eléctrico, la minimización de los costos de mantenimiento y el logro de un nivel de riesgo de falla que el administrador de activos considere aceptable [2].

Respecto a la expectativa de vida útil de una gran máquina rotativa existen varias afirmaciones, algunos sostienen que puede durar entre 20-30 años hasta necesitar rebobinado, otros determinan la vida útil de acuerdo a la operación a determinada temperatura con x horas límite de uso, y otros se guían por el valor económico y la depreciación, por ej.: 15 años. Es difícil o imposible realizar una predicción exacta, por lo tanto, métodos de diagnóstico o monitoreo son necesarios para dar lugar a lo que se conoce como monitoreo basado en condiciones (CBM), ya que generalmente no se posee una sola máquina sino varias, todas deben ser monitoreadas y si una empieza a fallar se deben buscar los motivos para evaluar el posible comportamiento de las demás [10].

C. Medición de descargas parciales

1) Sistemas utilizados para la medición de DP

La referencia [10] menciona tres sistemas de medición de DP. Estos son: sistema analógico, sistema digital y sistema digital con procesamiento digital. Los mismos han evolucionado a la par del aumento las investigaciones acerca de las DP y del surgimiento de innovaciones tecnológicas que permiten dicha modernización, siendo el último método mencionado el más utilizado en la actualidad.

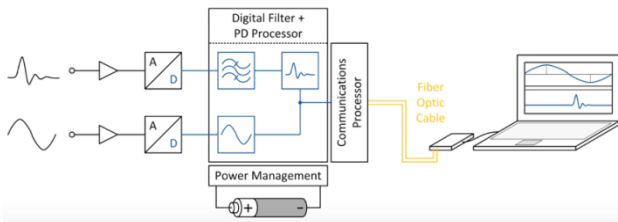


Fig. 7. Esquema de un sistema digital de medición de DP con filtrado digital [10]

En el método mostrado en la Fig. 7., las señales tanto de DP como de voltaje se conectan directamente a un convertidor analógico digital que envía los datos a un procesador digital de DP que a través del empleo de software a medida es capaz de analizar el fenómeno y almacenar los datos para permitir posteriores análisis. Inclusive permite a los fabricantes realizar pruebas y mantener registros históricos de las condiciones del sistema de aislamiento de sus equipos [10].

Este sistema también puede ser considerado más seguro que realizar las mediciones en un laboratorio de alta tensión, puesto que, existe un cable de fibra óptica entre el sistema de medición ubicado en la instalación real y el equipo que posee los datos (ordenador) que es manipulado por un experto. Es decir, si algo falla no se presentan altos riesgos de fatalidad y además el cable de fibra óptica puede llegar a ser realmente muy extenso sin que esto implique que se presenten mayores perturbaciones. Otra ventaja que presenta este método es que las mediciones pueden ser fácilmente adaptables a los requerimientos y estándares de distintas normas técnicas, CIGRÉ, IEEE e IEC por mencionar algunas, por lo que a pesar de sus altos costos iniciales es el método más utilizado [10].

2) Tipos de medición de descargas parciales

Los tipos de medición de DP según la condición de operación de las máquinas [11] pueden ser:

a) Medición fuera de línea (Offline)

Esto requiere tomar mediciones de DP a intervalos regulares. Es un procedimiento generalmente más caro porque implica parada de máquina y una fuente externa de alto voltaje. Las mediciones fuera de línea difieren en que todo el devanado se eleva al mismo potencial de alto voltaje para que

cualquier sitio de descarga que no aparezca durante la operación se vea en el patrón de resolución de fase, lo que aumenta en gran medida las posibilidades de detección temprana. Otra ventaja es que el nivel de ruido generalmente es muy bajo, lo que significa que se pueden usar frecuencias de filtro mucho más bajas. Esto permite medir pulsos lentos, lo que resulta en la detección de descargas parciales a lo largo de la mayor parte del devanado. Las mediciones fuera de línea también permiten calibrar la configuración de prueba. Estas ventajas se ven compensadas por el hecho de que la medición es más costosa y requiere más tiempo, ya que la máquina debe desconectarse y debe instalarse una fuente externa. Por otro lado, este tipo de medición se lleva a cabo normalmente mientras se realiza el mantenimiento. Como otra desventaja de las mediciones fuera de línea, debe tenerse en cuenta la influencia de la humedad. Esto puede tener una influencia significativa en las descargas externas, tales como descargas de ranura y/o descargas de superficie.

b) Medición de DP en línea (Online):

Se trata de mediciones continuas en la máquina, sin fuente externa, mientras está en funcionamiento. En este caso, los datos se pueden generar en varios puntos de operación y bajo condiciones variables de carga o temperatura sin tener que apagar la máquina. Por lo tanto, las mediciones se realizan en condiciones reales de funcionamiento. Sin embargo, esta ventaja se ve afectada por una probabilidad mucho mayor de que exista interferencia externa; esto no proviene del sistema de aislamiento de la máquina, por lo que no debe incluirse en el diagnóstico. Para sortear este problema y garantizar una distancia adecuada entre la señal útil y la señal no deseada, normalmente se necesitarán frecuencias de filtro más altas. Los componentes de alta frecuencia medidos se atenuarán muy rápidamente entre su fuente y la ubicación de medición, lo que significa que solo se pueden diagnosticar correctamente partes del devanado. A modo de compensación, la distribución de voltaje del devanado hacia el punto de estrella disminuye cuando la máquina está en funcionamiento.

Como los dos tipos de medición tienen sus ventajas y desventajas y ofrecen diferentes posibilidades de diagnóstico, las mediciones fuera de línea y en línea se pueden ver como formas complementarias de determinar la condición del aislamiento [11].

Las referencias [2] y [10] apuntan al método de medición online como el más utilizado.

3) Principales inconvenientes en la medición de DP

Los problemas históricamente relacionados con las mediciones de DP [2] son: la cancelación de ruido, la separación e identificación de fenómenos de DP, la ubicación de la fuente de PD y la evaluación de riesgos. El ingeniero que realiza mediciones normalmente se enfrenta a tres desafíos [11]:

- a) *Interferencias externas*
- b) *Superposición de varios fenómenos de DP*
- c) *Acoplamiento cruzado de fases vecinas en la medición en línea*

Los nuevos desarrollos en las técnicas de adquisición digital, procesamiento de señales e inteligencia artificial han mejorado la eficiencia de las mediciones de DP, proporcionando nuevos enfoques para abordar la gestión de los sistemas eléctricos.

D. Tipos de fallas de DP

1) Tipos de fallas de DP según su origen [7]:

a) Descargas internas

Las descargas internas ocurren en huecos de los sistemas de aislamiento que tienen baja rigidez dieléctrica. Pueden localizarse como huecos en los sólidos o como burbujas en los aislantes líquidos, así como dentro del aislante o en la frontera cercana a alguno de los electrodos. Debido a la actividad en estos puntos débiles, pueden provocar una rotura y una posterior descarga total, llevando al fallo de los equipos eléctricos. Debido a esto, son las descargas más dañinas [7].

b) Descargas de superficie o superficiales

Son descargas que aparecen entre dos dieléctricos, habitualmente entre aislante y aire y son debidas a las componentes tangenciales de campo eléctrico de gran intensidad. La contaminación o humedad, por ejemplo, en cadenas de aisladores, puede acelerar el proceso que provoca este tipo de descargas [7].

c) Descargas corona

Estas descargas se producen en zonas metálicas aisladas sometidas a tensión, principalmente, en los conductores de las líneas de alta tensión y se manifiesta en forma de halo luminoso a su alrededor [7]. La "corona" es una forma de descarga parcial que ocurre en medios gaseosos alrededor de conductores que están alejados del aislamiento sólido o líquido. "Corona" no debe usarse como un término general para todas las formas de DP [6].

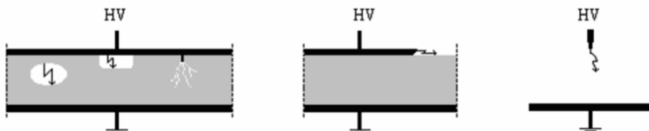


Fig. 8. Descargas parciales internas, superficiales y corona [7]

2) Tipos de fallas de DP en máquinas rotativas

La medición DP en devanados en máquinas eléctricas rotativas proporciona un método no destructivo y no invasivo [11] para identificar sitios de descarga individuales en su aislamiento. [10] menciona cuatro lugares críticos en los que

pueden ocurrir descargas parciales en una máquina rotativa. Ver Fig. 9.

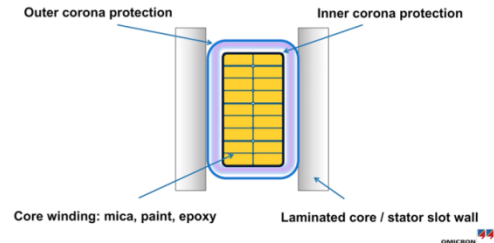


Fig. 9. Perspectiva general de fallas de DP [10]

Como puede verse en la Fig. 10, los tipos de falla que pueden presentarse son [10]:

a) Micro huecos internos

Se trata de imperfecciones en el material aislante que producen pequeñas burbujas de gas o micro huecos.

b) Delaminación de capas de cintas aislantes

La delaminación es un modo de falla en materiales compuestos que consiste en la separación de capas que lo componen, y que supone una significativa pérdida de resistencia mecánica del material

c) Delaminación entre el conductor y el aislamiento principal

En este tipo de falla la delaminación ocurre en el punto de contacto entre el conductor y la aislación principal.

d) Descargas en la ranura debido a abrasión de pintura semiconductiva

La abrasión es un desgaste de la película de pintura causada por fricción, en este caso, la falla ocurre en las ranuras.

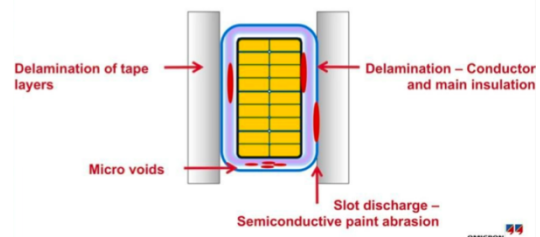


Fig. 10 Tipos de fallas de DP en máquinas rotativas [10]

3) Técnicas de visualización de DP

Algunas técnicas utilizadas en algoritmos de clasificación en sistemas de adquisición de DP son los diagramas PRPD, mapas T-F y mapas PRL-PRH. Los diagramas PRPD, patrones de descargas parciales resueltos en fase, son una técnica fiable para identificar los diferentes tipos de fuentes y de DP. Los mapas de tiempo frecuencia T-F y PRL-PRH dan información adicional de las DP y ruido. En estos mapas, se representan las señales mediante nubes de puntos para poder separar las diferentes fuentes y, posteriormente, se llevan a un diagrama PRPD para identificarlas [7].

Lo que se conoce como el patrón PRPD se ha establecido como la forma más fiable de interpretar la medición de descargas parciales [11]. Este enfoque correlaciona los pulsos de DP individuales en términos de frecuencia, amplitud, polaridad y fase con respecto a la alta tensión. Su ventaja radica en el mapeo de patrones típicos al tipo de defecto en el devanado. Esto permite no sólo la identificación del tipo de fallo, sino que también proporciona una clasificación del riesgo de acuerdo con las normas internacionales. Un ejemplo se ilustra en la Fig. 11, donde el patrón resuelto de fase se correlaciona con los defectos conocidos correspondientes.

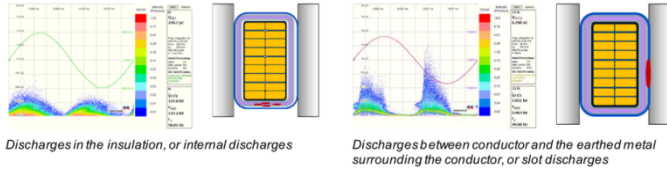


Fig. 11. Patrones PRPD con sus defectos asociados [11]

E. Técnicas de medición de descargas parciales

El concepto de carga aparente es empleado para efectuar mediciones del fenómeno estudiado. A continuación se transcribe su definición [6].

La carga aparente de un pulso de DP es esa carga que, si se inyecta dentro de un tiempo muy corto entre los terminales del objeto de prueba en un circuito de prueba específico, daría la misma lectura en el instrumento de medición que el pulso actual de DP. La carga aparente generalmente se expresa en picocoulombs (pC).

NOTA La carga aparente no es igual a la cantidad de carga involucrada localmente en el sitio de la descarga, que no se puede medir directamente.

1) Método eléctrico o de detección de pulso eléctrico

Debido a que una DP involucra un flujo de electrones e iones a través de una pequeña distancia en un período finito de tiempo, una pequeña corriente fluye cada vez que ocurre una DP. La corriente total se registrará por el transporte de un cierto número de picocoulombs de carga. El flujo de corriente crea un pulso de voltaje a través de la impedancia del sistema de aislamiento. Una de las principales formas de detectar DP es medir el pequeño pulso de voltaje que acompaña a cada DP, o el pulso de corriente resultante. Estas cantidades se miden en circuitos alejados de la fuente de DP. Nótese que en una bobina, barra o devanado típico, puede haber cientos de DP por segundo; por lo tanto, se pueden detectar cientos de pulsos eléctricos cada segundo. El pulso de voltaje se puede detectar por medio de condensadores de alto voltaje, que normalmente están conectados al terminal de fase o en otra parte del devanado. La salida de los condensadores son pulsos de voltaje o corriente, respectivamente, que se pueden medir con un osciloscopio, un analizador de espectro o un analizador de altura de pulso. Se pueden utilizar variaciones de estos métodos para pruebas en línea y fuera de línea [6].

a) Modelo capacitivo

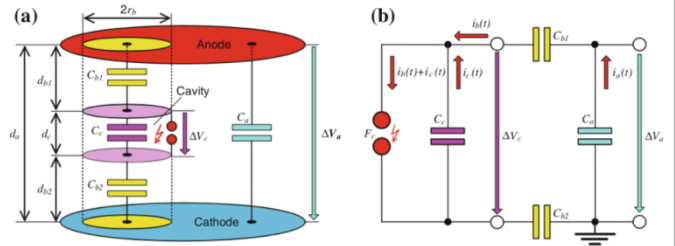


Fig. 12. Modelo capacitivo de DP basado en red. (a) Electrodo de plano paralelo con elementos de circuito (b) Circuito capacitivo equivalente modelo abc [9]

b) Radiofrecuencia

Además de crear pulsos de voltaje y corriente dentro del devanado del estator, la chispa de descarga parcial también crea algunas ondas electromagnéticas de RF que se propagan lejos del sitio de descarga. La perturbación electromagnética creada por una DP tiene frecuencias de RF de 100 kHz a varios cientos de megahercios. Por lo tanto, las radios de AM con una antena adecuada pueden usarse para detectar que se está produciendo actividad de DP [6].



Fig. 13. Modelo para detección de DP con Radiofrecuencia [13]

2) Métodos no eléctricos de detección de DP

Los métodos no eléctricos utilizados para la de detección de DP incluyen métodos acústicos, ópticos y químicos y también, de ser posible, la observación posterior de los efectos de cualquier descarga en el objeto de prueba. En general, estos métodos no son adecuados para la medición cuantitativa de cantidades de descargas parciales, pero si son utilizados para detectar y/o localizar las descargas [6].

a) Método acústico

Observaciones auditivas realizadas en una habitación con bajo nivel de ruido pueden utilizarse como un medio para detectar descargas parciales. Las mediciones acústicas no subjetivas, generalmente realizadas con micrófonos u otros transductores acústicos en combinación con amplificadores y unidades de visualización adecuadas, también pueden ser útiles, particularmente para localizar las descargas [6].

b) Técnica de Detección Óptica

Las observaciones visuales pueden llevarse a cabo en una habitación oscura, después de que los ojos se hayan adaptado a la oscuridad y, si es necesario, con la ayuda de binoculares de gran apertura. Alternativamente, se puede hacer un registro fotográfico, pero generalmente son necesarios tiempos de exposición bastante largos [6].

c) Método químico

La presencia de descargas parciales en aparatos aislados con petróleo o gas puede detectarse en algunos casos mediante el análisis de los productos de descomposición o subproductos disueltos en el aceite o en el gas. Estos productos se acumulan durante la operación prolongada, por lo que el análisis químico también puede usarse para estimar la degradación causada por descargas parciales.

F. Normas técnicas para la medición de DP.

Dos instituciones de referencia en Ingeniería se han abocado a la creación de especificaciones y normas; éstas son la IEC y la IEEE [12]. La selección de cuál norma utilizar responde a criterios individuales de la persona física o jurídica o del comité técnico que desee llevar a cabo una medición de este tipo.

El contenido de éstas normas define las reglas que guían los procesos de medición y son bastante específicas en cuanto a requerimientos, aparatos y niveles de tensión. Se detallan circuitos equivalentes de prueba para pruebas de rutina y pruebas de rendimiento, unidades de medida a utilizar, procesos de calibración, tiempo de duración de las pruebas, forma correcta de almacenar los datos obtenidos, temperatura a la que debe estar el objeto de prueba, entre otros.

Éstas normas aparte de guiar el proceso de medición también se encargan de definir conceptos relacionados al fenómeno de descargas parciales y a los principales inconvenientes que pueden ocurrir durante la medición, además de aportar sugerencias acerca de cómo reducir los efectos negativos de los últimos.

IV. ANÁLISIS DE DATOS DE MEDICIONES DE DESCARGAS PARCIALES

Considerando el objetivo de obtener familiarización con la interpretación de datos de mediciones previamente realizadas del fenómeno estudiado, se seleccionaron datos disponibles en fuentes públicas y en artículos científicos. En las figuras siguientes se presentan ejemplos de dichos datos, obtenidos tanto en equipos en operación como en laboratorio.

La Fig. 14 corresponde al espectro de frecuencia de la señal, ilustra la gran cantidad de componentes senoidales de una señal de DP, identificando la componente principal en color azul.

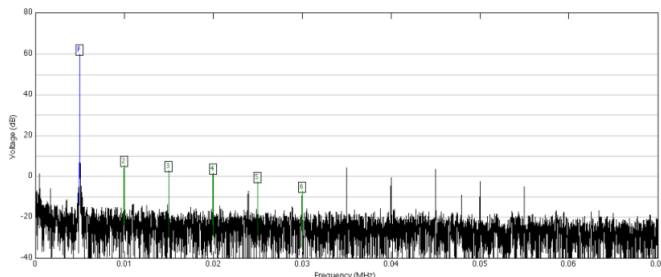


Fig. 14. Espectro de frecuencia de una señal de DP [14]

Los gráficos de la Fig. 15 corresponden a un ensayo de laboratorio donde se ha simulado el comportamiento del aislamiento de las barras de estator, pueden observarse tanto la magnitud como el momento de ocurrencia de las DPs, a lo largo de un ciclo.

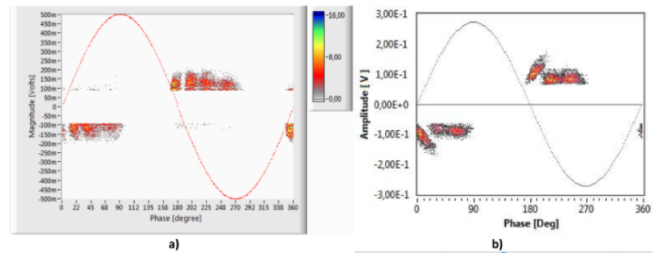


Fig. 15. Señal de DP en estator [15]

La Fig. 16 presenta los patrones PRPD de los tres tipos de DP según su origen [7], cuyos patrones pueden distinguirse claramente.

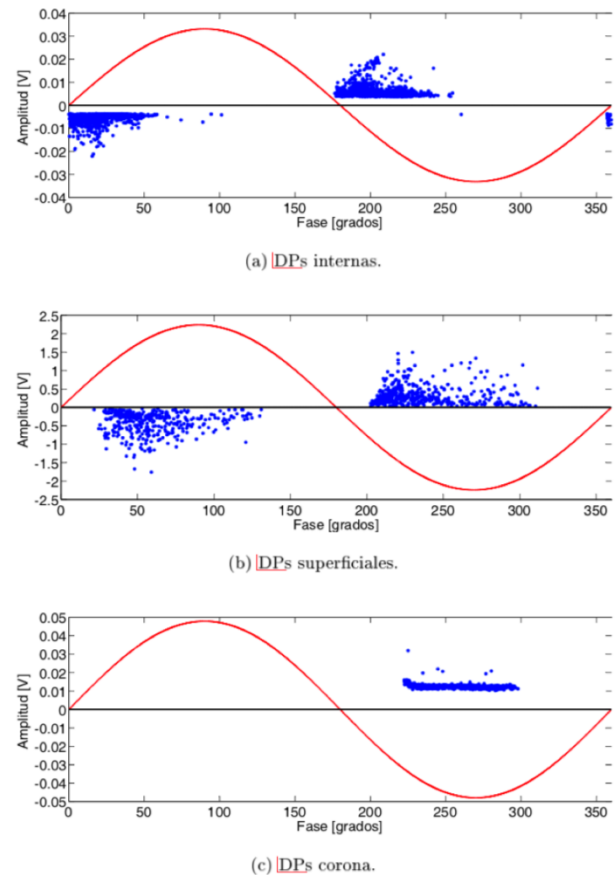


Fig. 16 Patrones de DP de distintos tipos de DP según su origen [7]

V. ELABORACIÓN DE LA ESPECIFICACIÓN TÉCNICA DE UNA BANCADA PARA EL ESTUDIO Y MEDICIÓN DE DP

Para poder elaborar la especificación técnica de una bancada capaz de efectuar mediciones de descargas parciales, primeramente se debe conocer la secuencia de procesos necesarios para realizar la medición, por lo que a continuación se realiza una descripción de la misma. La cadena típica de medición descrita a continuación fue redactada tomando como base la experiencia de profesionales en el proyecto e instalación de un sistema de monitoreo de DP.

A. Descripción de la cadena típica de medición, transmisión de señales medidas y procesamiento de las mismas, para un generador síncrono de grandes dimensiones.

En primer lugar, son instalados en las unidades unos capacitores de acoplamiento. Estos sensores están compuestos por dos partes: el capacitor propiamente dicho y el cuadripolo que se encarga de convertir las señales de descargas parciales detectadas en señales analógicas que pueden ser transmitidas a los equipos de análisis. Se pueden adquirir por separado o ya embutidos. En la Fig. 17 se observan los capacitores, uno por cada fase, instalados próximos al generador. Nótese los conductores de color naranja, que están conectados directamente a los devanados del estator del generador. Estos conductores poseen niveles de tensión de varios miles de voltios.



Fig. 17 Capacitores de acoplamiento [11]

En la Fig. 18 se muestra un sensor capacitivo de otro fabricante, en donde ya está integrado el cuadripolo en la parte inferior derecha del mismo. De este modo, este último sensor ya proporciona la señal analógica, típicamente enviada a los equipos de análisis por medio de un cable coaxial.



Fig. 18 Capacitor de acoplamiento con cuadripolo [16]

Los cables coaxiales que salen de los cuadripolos, deben llegar a los equipos de análisis de estas señales analógicas. Estos equipos realizan el filtrado y las demás funciones de procesamiento de señales crudas.

En el caso correspondiente a la Fig.19. se observan 3 tarjetas. Las dos de la derecha son las que reciben los cables coaxiales procedentes de los cuadripolos, mientras que la tarjeta de la izquierda realiza la función de osciloscopio. En este caso, las lecturas de los cables coaxiales no se realizan simultáneamente, el sistema posee una metodología de “barrido”, captando las señales consecutivamente. El módulo presentado se encarga de procesar y analizar las señales y enviarlas al computador al que está conectado para que el operador pueda visualizar los datos, estos registros se almacenan en discos de gran capacidad.

En este caso particular, los sensores capacitivos deben ser colocados en distintos ángulos a lo largo del estator, de

manera a poder utilizar estas distancias diferentes para poder determinar la zona de ocurrencia de las descargas parciales. Se hace notar que, en el caso de un generador de gran porte, identificar el lugar exacto de la descarga parcial es extremadamente difícil, sino imposible. Por eso se hace énfasis en el término “zona” de ocurrencia.

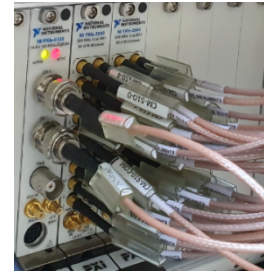


Fig. 19 Tarjeta de adquisición de datos [17]

Para la realización de esta especificación técnica se ha tomado como referencia el modelo capacitivo mostrado en el apartado III-E-I-a.

B. Lista de componentes necesarios y características técnicas

1) Transformador elevador de potencia

Su función es elevar la tensión disponible en la red eléctrica del laboratorio a la tensión que será aplicada al objeto de ensayo. Esta tensión secundaria se encuentra en el orden de varios miles de Voltios. En este caso, se tienen varias posibilidades: utilizar un transformador cuya tensión primaria sea de 220 V (fase-tierra) o 380 V (fase-fase). La tensión secundaria puede ser en tensión alternada o tensión continua. Se presentan las opciones disponibles:

Tabla I Características técnicas del transformador [19]

Fabricante	Tensión primaria	Tensión secundaria	Secundario variable
Rayon Energy Private Limited	230 V, 50 Hz, monofásica	400 kV, continua	SI
Petter Nodeland	350 V, 20 kHz	10 kV, 20 kHz	NO
General Electric	480 V, 50 Hz	65.3 kV	SI (con regulador externo)

2) Regulador de tensión

Este equipo puede ser opcional de acuerdo al transformador seleccionado, permite variar la tensión del secundario.

3) Capacitor de acoplamiento

Es el encargado de detectar la ocurrencia de la DP en el objeto de ensayo, al cual está conectado en paralelo.

Tabla II Características técnicas del capacitor de acoplamiento [19]

Fabricante	Capacitancia	Máxima tensión	Cuadripolo incluido
Iris powers	1nF	30 kV	SI
Quartz teq	1000pF	20 kV	SI
Sparks instruments	1000pF	24 V	SI

4) Cuadripolo

Este dispositivo convierte las señales detectadas por el condensador de acoplamiento, de manera a poder enviar las mismas a los equipos de adquisición y análisis de datos. Este cuadripolo puede o no estar integrado en el propio sensor capacitivo, como se muestra en la Fig. 17 y Fig. 18. Típicamente, los cuadripolos se construyen en el laboratorio, considerando las características de los ensayos a ser realizados.

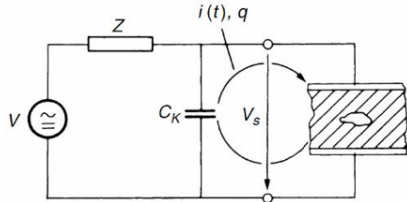


Fig. 20. Circuito simplificado de un cuadripolo [16]

5) Tarjeta de adquisición de datos

Encargada de realizar el procesamiento de la señal analógica que procede del cuadripolo. Sus funciones principales son el filtrado de las señales y la digitalización de las mismas. Posee un osciloscopio integrado. Se han seleccionado dos fabricantes, que son referencia mundial, en procesos de adquisición de datos de muy alta frecuencia.

Tabla III Características técnicas de la tarjeta de adquisición de datos [19]

Fabricante	Origen	Modelo	Tipo de Hardware
OMICROM	AUSTRIA	MPD 600	Equipo portátil
NATIONAL INSTRUMENTS	EEUU	NI PXIe-5162	Tarjeta para gabinete (rack)

6) Computador

Utilizando un software adecuado, realiza el análisis de las señales digitalizadas oriundas de la tarjeta de adquisición. Se puede, para ambos fabricantes citados arriba, utilizar tanto una Desktop o una Notebook disponibles comercialmente.

7) Cables y conectores diversos

Tabla IV Características técnicas de los conductores [19]

Tipo	Sección	Nivel de Tensión	Aislamiento
Cable común multifilar	6 mm ²	220 – 480 V, 50 Hz	PVC
Cable para alta tensión	185 mm ²	32 kV	XLPE
Cable coaxial tipo RG-6/U	2 mm ²	+/-10 V	Sólido PE

C. Esquema del circuito a emplear para realizar la medición de DP.

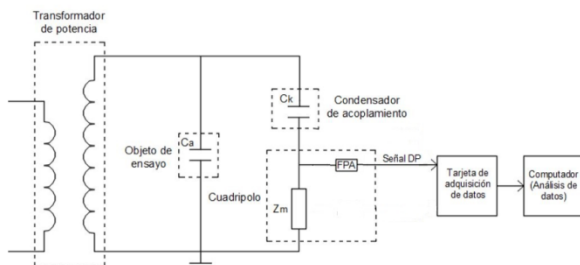


Fig. 21 Esquema del circuito a utilizar ([18] Adaptado de [15])

D. Estimación del costo de la bancada propuesta

Tabla V Presupuesto del costo de implementación de la bancada propuesta [18]

Equipo	Costo en USD
Transformador elevador de potencia	15.000
Regulador de tensión	1.000
Condensador de acoplamiento con cuadripolo integrado	20.000
Tarjeta de adquisición de datos	35.000
Computador	1.000
Cables coaxiales y conectores diversos	400
Objeto de prueba	A conseguir o ser proporcionado por el cliente
INVERSIÓN TOTAL APROX.	72.400\$

VI. BIBLIOGRAFÍA

- [1] *IEEE Guide for the Measurement of Partial Discharges in AC Electric Machinery*, IEEE Standard 1434, 2014.
- [2] G. Montanari, *Insulation Diagnosis of High Voltage Apparatus by Partial Discharge Investigation*, IEEE, Dept. of Electrical Engineering, University of Bologna, Italy, 2006.
- [3] M. A. El Sharkawi, *Electric Energy, An Introduction*, vol 3, United States, Ed. CRC Press, 2013.
- [4] U.S. Energy Information Administration, “International Energy Outlook 2017”, 14 Sept. 2017.
- [5] Vice Ministerio de Minas y Energía, Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones. Sector eléctrico, Disponible en: https://www.ssme.gov.py/vmme/index.php?option=com_content&view=article&id=1216&Itemid=603, 15 de marzo de 2019.
- [6] *IEC High-voltage test techniques - Partial discharge measurements*, British Standard EN60270, March 2001.
- [7] R. Albarracín Sánchez, “Medida de descargas parciales en radiofrecuencia”, Tesis doctoral dirigida por G. Robles Muñoz, Departamento de Ingeniería eléctrica, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, feb. 2014.
- [8] J. L. García Araco, E. Uriarte del Río, D. McLaren, J. L. Amundsen, L.-E. Kampe, R. Egli, . . . N. Whiteoak, *Survey of hydrogenerator failures*. Cigré, Oct. 2009.
- [9] W. Hauschild, E. Lemke, *High-Voltage Test and Measuring Techniques*, Germany, Ed. Springer, 2014.
- [10] R. Hummel, “Partial discharge measurement: an effective method for electrical insulation diagnosis”, presented at the CWIEME, Berlin, Germany, May. 2015.
- [11] F. Oettl, M. Krueger, W. Koltunowicz, L.-V. Badicu, and B. Gorgan, Partial discharge measurements on rotating machines - experience and innovation, OMICROM, Germany, 2017.
- [12] G. A. Gómez Ramírez, *Medición de Descargas Parciales en Transformadores de Potencia bajo los estándares internacionales IEC e IEEE*. Costa Rica, 2017.
- [13] P.J Moore, I. Portugues, and I.A. Glover, *A Non-Intrusive Partial Discharge Measurement System based on RF Technology*, IEEE, 2003.
- [14] I. Roen Velo, *Experimental Set-up for partial discharge detection*, Universitet, Norgen Tesnisk-Naturvitenskapelige, 2015.
- [15] J.A. Vanegas Iriarte, “Desarrollo de un sistema prototipo de medición y análisis de descargas parciales generadas en laboratorio”, Tesis de maestría dirigida por F.A. Muñoz, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad del Valle, Santiago de Cali, 2016.
- [16] Imagen extraída de internet, 2019.
- [17] Modelo standard de osciloscopio de la National Instruments.
- [18] Elaboración propia, 2019.