

**Universidad Carlos III de Madrid**



**Trabajo Fin de Grado**

Grado Ingeniería Eléctrica

Revisión de normativas sobre detección de descargas parciales en máquinas eléctricas rotativas: Comparativa y Alcance.

Autor: Jorge Picazo Rivero

Director: Juan Manuel Martínez Tarifa

## Índice

Capítulo 1.- Introducción.....	5
Capítulo 2.- El aislamiento eléctrico en máquinas rotativas. ....	7
2.1.- Aspectos constructivos de los devanados .....	7
2.2.- Materiales utilizados en los sistemas de aislamiento .....	9
2.3.- Sistemas de aislamiento .....	11
2.4.- Componentes básicos en un sistema de aislamiento .....	12
2.5.- Mecanismos de degradación .....	14
2.6.- Descargas Parciales .....	20
2.6.1.- Introducción.....	20
2.6.2.- Sistemas de detección de descargas parciales.....	21
2.6.3.- Tipos de descargas e información diagnóstica aportada.....	24
Capítulo 3.- Revisión de la guía IEEE 1434 de 2000. ....	27
3.1.- Introducción.....	27
3.2.- La naturaleza de las descargas parciales en los devanados de la máquina.....	27
3.3.- Descripción general de los métodos de detección de DP .....	28
3.4.- Los sistemas de detección de radiación de impulsos eléctricos y de RF. ....	29
3.4.1.- Sensores.....	30
3.4.2.-Sistemas de detección para ensayos en línea.....	32
3.4.3.- Sistemas de medición para ensayos fuera de línea.....	33
3.4.4.-Sistemas de medición para mediciones en bobinas y barras individuales .....	34
3.5.- Los instrumentos de medida de pulsos e interferencias en radiofrecuencia.....	35
3.6.- Propagación del pulso y calibración.....	35
3.7.- Comparación entre medidas con la máquina en servicio o desconectada .....	36
3.7.1.-Pruebas con la máquina en funcionamiento " on-line".....	36
3.7.2.-Pruebas con la máquina desconectada " off-line" .....	36
3.7.3.-Pruebas de control del estator (bobinas, barras, arrollamientos...) .....	38
3.8.- Los procedimientos de ensayo. ....	38
3.8.1.-Procedimiento en pruebas con la máquina en funcionamiento ("on-line").....	38
3.8.2.-Procedimiento de las pruebas cuando la máquina no está funcionando ("off-line"): .....	40
3.9.-Interpretación de las pruebas de descargas parciales .....	42
3.9.1.-Magnitud máxima del pulso y polaridad. ....	42
3.9.2.-Lecturas de la sonda electromagnética .....	43

3.9.3.-Registro de descargas parciales .....	43
3.9.4.-Los cambios en la magnitud de DP.....	44
Capítulo 4. La guía IEEE 1434 de 2014. Comparación con la versión de 2000. ....	46
4.1.- Descargas parciales con tiempos de subida cortos e impulsos de tensión repetitivos... 46	
4.2.- Chispas provocadas por vibración.....	46
4.3.- Instrumentos de detección de corona. ....	46
4.4.- Los sistemas de detección de radiación de impulsos eléctricos y RF.....	47
4.5.- Analizadores y clasificadores de DP en tiempo y frecuencia.....	50
4.7.- Sistema multi-espectral sincrónico. ....	51
4.8.-Ensayos off-line.....	51
4.9.- Ensayos on-line. ....	51
4.10.-Aplicación de la tensión de prueba en medidas "on.line".....	52
Capítulo 5.- Revisión de la guía IEC de 2012-2013.....	53
5.1.- Naturaleza de las descargas parciales en máquinas rotativas.....	53
5.2.- El ruido y la perturbación. ....	54
5.2.1.- Separación de ruido en el dominio de la frecuencia. ....	55
5.2.2.- Técnicas de separación del ruido .....	55
5.3.- Técnicas e instrumentos de medición .....	56
5.3.1.- Sensores.....	58
5.3.2.- Parámetros de medición de DP.....	59
5.3.3.-Instalación.....	60
5.4.- Normalización de las mediciones y evaluación de la sensibilidad del sistema.....	61
5.4.1.- Sistemas de baja frecuencia.....	61
5.4.2.    Sistemas de alta frecuencia (HF/VHF).....	63
5.5.- Procedimientos de medición .....	64
5.6.- Visualización de mediciones. ....	66
5.6.1.- Medidas de tendencia. ....	66
5.6.2.- La visualización de los patrones de las DP. ....	67
5.7.- Interpretación de las mediciones en línea .....	69
5.7.1.- Interpretación de tendencias.....	69
5.7.2.- Interpretación de patrones de descargas.....	70
5.7.3.- Efecto de las condiciones de operación de la máquina.....	71
5.8.- Ensayos de las PRPDs. ....	72
5.8.1.- Descargas <i>internas</i> : .....	73

5.8.2.- Deslaminación interna:.....	73
5.8.3.- Deslaminación entre el conductor y el aislamiento. ....	74
5.8.4.- Descargas en ranuras.....	74
5.8.5.- Descargas en el revestimiento semiconductor y cubierta de graduación de campo del estator.....	75
5.8.6.-Descargas superficiales por contorno (“tracking”).....	75
5.8.7. Descargas de hueco .....	76
Capítulo 6. Comparación de la norma IEEE 1434 2014 con la norma IEC 60034 27-2.....	77
6.1.-Detección de DP y del ruido eléctrico .....	77
6.2.- Instrumentos y técnicas de medida .....	78
6.3.-Normalización en las mediciones y procedimientos de medición.....	78
6.4.- Visualización de mediciones .....	79
6.5.- Tipos de descargas parciales.....	80
Capítulo 7.- Conclusión. ....	82
Capítulo 8.-Bibliografía.....	83

## Capítulo 1.- Introducción

Existen muchas diferencias entre los equipos y redes eléctricas que se empleaban hace 70 años con los que actualmente hay en funcionamiento. Esta evolución tecnológica tiene como prioridad asegurar la seguridad en los equipos, en las instalaciones y en las personas, además del ahorro económico (alargando más la vida útil de los equipos). También se han reducido los tamaños de las máquinas (para mejor rendimiento) y el tamaño de los aislamientos. La razón principal por la que se le dedica gran esfuerzo al mantenimiento de la maquinaria rotativa de alta tensión es, asegurar el suministro de energía eléctrica a través de la red, de tal forma que ningún punto de consumo se quede sin abastecimiento de energía.

Actualmente los requisitos de seguridad, calidad, continuidad y calidad de suministro son muy estrictos. Para cumplirlos, es necesario que la red eléctrica posea unos equipos y unas líneas eléctricas muy fiables, es decir, con poca probabilidad de fallo. En las máquinas rotativas de alta tensión, el aislamiento es la segunda causa de fallo inesperado y se degrada por muchos factores como son: altas temperaturas, ciclaje térmico, conexiones eléctricas defectuosas, bobinas sueltas dentro de las ranuras de la máquina... las descargas parciales es otro factor de degradación, pero también es consecuencia de los anteriores. Es por eso que la medida de descargas parciales puede diagnosticar muchos tipos de problemas, en la máquina y en el sistema de aislamiento.

Las descargas parciales son ionizaciones que cortocircuitan una parte del sistema de aislamiento. Estas pequeñas ionizaciones son objeto de estudio en muchos laboratorios de todo el mundo donde se implementan tecnologías para clasificar y monitorizar datos que nos proporcionen información sobre los defectos en los sistemas de aislamiento y planificar posibles reparaciones o actividades de mantenimiento.

Durante el siglo XX se ha intentado realizar un mantenimiento predictivo, es decir, basándose en el diagnóstico de la máquina en funcionamiento y así poder analizar a la máquina en condiciones de operación. Fue en los años 50 cuando se empezaron a desarrollar equipos de medida de descargas parciales con la máquina en funcionamiento ya que este tipo de mediciones nos aporta valiosa información sobre el estado del sistema de aislamiento. Las mediciones con la máquina conectada se iniciaron en generadores hidroeléctricos, ya que la electrónica analógica de la época no era capaz de separar las descargas parciales del ruido eléctrico en turbogeneradores. Actualmente existen en el mercado aparatos digitales y software con los que poder monitorizar cualquier tipo de máquina eléctrica.

El objetivo del proyecto es la revisión y comparación de tres normativas sobre detección de descargas parciales en máquinas eléctricas rotativas de alta tensión: IEEE 1434 (de 2000), IEEE 1434 (de 2014) e IEC 60034 27-2 (2012-2013). En ellas se describen los tipos de descargas parciales, su naturaleza, los distintos métodos de detección y visualización, los métodos de separación del ruido eléctrico, los dos tipos de ensayos de las máquinas ("on line", con la máquina en funcionamiento y "off line", con la máquina desconectada) y el análisis de resultados para obtener información diagnóstica.

Este trabajo está dirigido a todos los ingenieros eléctricos y técnicos que se dediquen al sector de generación y maquinaria eléctrica, especialmente a los especializados en mantenimiento preventivo, para que puedan conocer los últimos avances en estandarización realizados y comparar límites y descripciones realizadas por dos organismos diferentes.

## Capítulo 2.- El aislamiento eléctrico en máquinas rotativas.

Las máquinas eléctricas rotativas, al ser equipos estratégicos en el sector industrial, tienen una complejidad en su diseño, que debe ser explicada para poder comprender sus partes más proclives a la degradación o fallo. Entre ellas, el aislamiento eléctrico es el uno de sus elementos críticos. Los mecanismos de degradación que pueden afectar al aislamiento son múltiples (serán descritos más adelante). La vida útil de la máquina dependerá, en gran medida, de los sistemas de aislamiento por lo que es necesario realizar ensayos a éstos y no solo a sus componentes. Las descargas parciales pueden ayudar a detectar estos factores de envejecimiento, por lo que el desarrollo de estándares y recomendaciones internacionales para la medición de descargas parciales es muy importante.

### 2.1.- Aspectos constructivos de los devanados

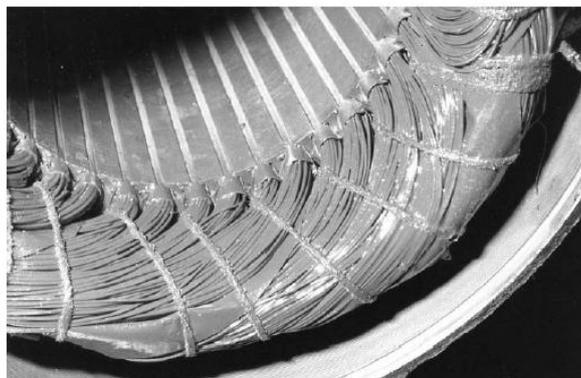
Existen tres tipos de estructuras de devanado que se emplean en el rango de 1 kW hasta 100 kW:

1. Estatores formados por bobinado aleatorio
2. Estatores formados por bobinas multivuelta.
3. Estatores formados por barras Roebel.

A pesar de que son estos tres los diseños más comunes, no es raro encontrar en el mercado diseños híbridos. Seguidamente se detallan ciertos aspectos de cada uno ([Stone], [J. Fraile Mora]):

#### **-Estatores formados por bobinado aleatorio**

Están formados por conductores de sección circular, que se enrollan a mano o mediante una máquina de bobinado a través de las ranuras del núcleo del estator para formar una bobina (ver Imagen 2.1). Este tipo de estatores operan a menudo en tensiones inferiores a 1000 V en máquinas de menos de cientos de kW.



**Imagen 2.1.- Bobinado aleatorio de una máquina de baja tensión.**

### **-Estatores con bobinas multivuelta/preformadas.**

Este tipo de estatores están destinados para máquinas que trabajan a 1000 V o más. Estos devanados se fabrican a partir de bobinas aisladas que han sido preformadas antes de insertarlas en las ranuras del estator. Este tipo de bobinas se forman a partir de un grupo de hebras de cobre para formar la sección transversal de la espira requerida, envolviendo, en algunos casos, varias capas de aislamiento alrededor de ellas. Por lo general, cada bobina puede tener de dos a doce vueltas, y varias bobinas son conectadas en serie para crear el número apropiado de polos. El diseño debe ser cuidadoso ya que es necesario que exista poca diferencia de tensión entre una bobina y la adyacente.



Imagen 2.2.- Devanado con bobinas multivuelta/preformadas

### **-Estatores con barras Roebel**

Se emplean en grandes generadores (de hasta 1000 MW). Puede haber dificultades a la hora de insertar en las pequeñas ranuras del núcleo bobinas preformadas grandes, ya que pueden sufrir algún daño. Es por eso que se utilizan las barras Roebel o bobinas de media vuelta porque la inserción de media bobina (una barra) es más fácil que la de una entera, realizando las conexiones entre ambas barras (lado de ida y vuelta) posteriormente.

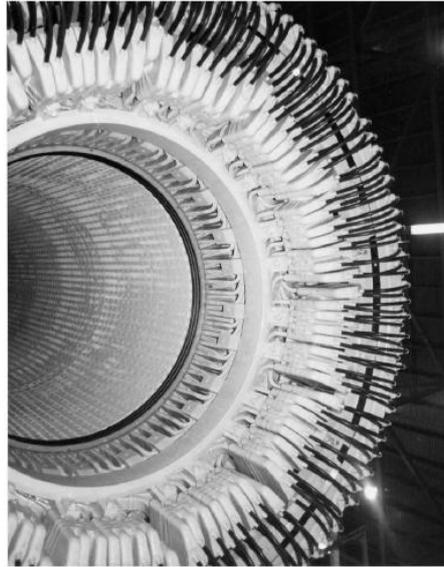


Imagen 2.3.- Devanado de un hidrogenerador con barras Roebel

## 2.2.- Materiales utilizados en los sistemas de aislamiento

Para empezar es, importante distinguir entre materiales de aislamiento y sistemas de aislamiento. Ambos están relacionados ya que los sistemas de aislamiento están formados por uno o varios materiales aislantes y diseñados para separar eléctricamente elementos con diferente tensión.

Los materiales encargados de aislar eléctricamente poseen una conductividad eléctrica muy baja y evitan conexiones no deseadas. Serán las características de los motores (necesidades técnicas, presupuesto, motor o generador) las que hagan decantarse por unos materiales u otros.

Antiguamente se utilizaban más los materiales naturales cuya selección se basaba en ensayos para saber si cumplían con las condiciones de diseño, pero actualmente, el mayor conocimiento de los materiales y sus técnicas de síntesis, han permitido obtener materiales a través de combinaciones que cumplen con creces las condiciones de diseño de máquinas de diferentes tensiones.

Seguidamente se introducen los diferentes tipos de materiales aislantes de máquinas rotativas de tensión ([Stone]).

### **-Materiales naturales:**

Estos materiales eran más utilizados en el pasado debido a la incapacidad de crear otros materiales. Además, muchos de los materiales naturales utilizados en los sistemas de aislamiento eran comúnmente usados para otros fines como podían ser el algodón, la seda, el

lino, cuero...etc. Se obtenían a partir del petróleo, arboles, plantas... que mezcladas con las fibras daban lugar a materiales aislantes. Estas mezclas se realizaban en función del uso específico que se le diera al aislante. Los materiales sólidos como la mica, la arena, el cuarzo y otros minerales se utilizaban como relleno en tierra o polvo. Los asfaltos naturales, materiales termoplásticos (al ser sometidos a temperaturas no excesivamente altas se reblandecen), fueron mezclados con mica para endurecerlos e incrementar su temperatura de fusión.

#### **-Materiales sintéticos.**

Los barnices aislantes sintéticos se utilizan para el revestimiento (mediante inmersión) de bobinas y para potenciar o mejorar aislantes ya existentes. Los que más se utilizan son las siliconas, poliésteres, resinas epoxi, el polipropileno, el poliuretano y el policarbonato.

#### **-Películas plásticas y telas.**

Fue a mediados del siglo 20 cuando comenzaron las investigaciones sobre materiales con películas de plástico y más tarde con telas de polímero de fibra. Estos materiales eran más utilizados en aislamientos de espiras y ranuras. Actualmente los materiales ofrecen una mayor vida útil y una eficiencia mejor.

#### **-Resinas sintéticas líquidas.**

Inicialmente se utilizaron las resinas naturales y sintéticas con base disolvente pero más tarde fueron remplazadas por resinas sintéticas sin disolvente. Estas ofrecían mejoras en sus propiedades físicas (térmicas), y además, al eliminar el disolvente de las resinas se hacían menos contaminantes. La temperatura de ablandamiento de las resinas termo-estables, se denomina temperatura de transición vítrea. Es la temperatura a la que cambia la resina de un estado rígido y cristalino a una goma de estado amorfo (peor rigidez dieléctrica y mecánica). Se suelen utilizar resinas que tienen una temperatura de transición vítrea por encima de la temperatura de servicio de aislamiento. Estos sistemas de aislamiento son más fuertes y menos flexibles a temperatura ambiente. Existen dos tipos de resinas de gran importancia para el aislamiento de tierra de los devanados ordenados:

- Poliésteres: Se utilizaron principalmente como aislantes de bobina, que, mezclados con fibras de vidrio, permitían conseguir laminados muy resistentes. Estos laminados se utilizaban para envolver las bobinas, que, dependiendo de la tensión con la que estuviesen trabajando, ofrecían mayor o menor rigidez dieléctrica. Es un material que a altas temperaturas se deteriora rápidamente, pero muy flexible.
- Resinas epoxi: Este material es uno de los principales del sistema VPI (ver apartado 2.3) . La mayoría de estas resinas eran termo-estables.

#### **-Mica**

Se caracteriza por la facilidad con la que se puede dividir en finas láminas. Si, las láminas son flexibles, la mica también puede serlo pero por sí sola no. Es bastante resistente frente a altas temperaturas y al ataque por descargas parciales y tiene una rigidez dieléctrica altísima. Por estos motivos se emplea más en máquinas de alta tensión. La mica está compuesta por silicatos de aluminio con magnesio, hierro, sodio, litio, flúor...etc.

- Papel de mica: Se utilizan diferentes tipos de resinas y aglutinantes sobre el papel de mica para mejorar la fuerza y proporcionar una mejor protección mecánica del producto, para que luego se pueda cortar y utilizarse en cintas para el aislamiento de bobinas de la máquina.

#### **-Fibra de vidrio**

La mayoría de fibras de vidrio que se utilizan como aislamiento eléctrico están compuestas de alúmina. Estas fibras son muy resistentes a esfuerzos de tracción y, al ser un material inorgánico, también a las descargas parciales (DP). No es aconsejable que entren en contacto con el agua ya que se deteriorarían rápido.

#### **-Laminados**

Los laminados para aislamiento eléctrico se producen a partir de polímeros termo-endurecibles (son polímeros que mediante la presión y la temperatura se reblandecen y pueden moldearse en su fase fluida una sola vez y antes de que la reacción de polimerización haya finalizado por completo) y se fabrican normalmente con papel impregnado o con rollos de tela con resina termo-endurecible.

### 2.3.- Sistemas de aislamiento

La función primaria del aislamiento de ranura (bobina-tierra) es separar al conductor del núcleo del estator con el fin de permitir una diferencia de tensión entre ambos. En las máquinas con el devanado aleatorio, el aislamiento de los conductores debe ser capaz de soportar toda la diferencia de tensión entre el principio y el final de la bobina, ya que el proceso aleatorio del bobinado puede hacer que esas espiras se toquen en algún punto.

Antiguamente se utilizaban unas resinas y barnices de no muy buena calidad como aislante que recubre a los conductores. En comparación con la actualidad el esmalte que se utilizaba para el aislamiento era más grueso, rígido, y tenía una capacidad térmica mucho más baja. Los modernos esmaltes sintéticos mejoran esas propiedades y se aplican mediante varias inmersiones en un tanque y posteriores secados en un horno especial, que producen un recubrimiento total. Al tratarse de un esmalte con mejores propiedades no es necesario un recubrimiento de igual grosor al utilizado anteriormente, lo que se traduce en menor rigidez y mayor facilidad de manipulación durante el montaje, además de mayor aprovechamiento del volumen de la máquina (más potencia por unidad de volumen) [Stone, 2004].

#### **-Primeros sistemas.**

Los primeros sistemas de aislamiento utilizaban una combinación de papel para el aislamiento de las bobinas de alta tensión o las barras. Este papel al principio era aplicado a mano para bobinas pequeñas, pero para bobinas grandes se necesitaba una máquina que hacía girar la bobina o la barra y así colocar el envoltorio.

#### **-Sistemas de mica-asfalto.**

En los años 20, las resinas asfálticas se combinaban con mica para mejorar el aislamiento a tierra de los devanados estatóricos. Las láminas de mica se recubrían por ambos

lados con papel de celulosa. También se usó barniz asfáltico modificado con tolueno para impregnar la hoja de mica.

La mayoría de los fabricantes de generadores aplicaban los nuevos materiales sobre los conductores a mano.

El cambio a una construcción con barras no se produjo hasta que el tamaño de los generadores aumentó y las bobinas eran demasiado grandes para su manipulación durante el montaje en el estator.

En el caso de las bobinas completas, aisladas con aislantes asfálticos y polvo de mica, se realizaba un precalentamiento de las mismas con una elevada corriente, lo que suaviza el aislamiento termoplástico y permite un cierto movimiento relativo dentro del aislamiento.

#### **-Sistemas termoestables de barras y bobinas individuales.**

Para prevenir la separación de las cintas de papel se desarrolló un aislamiento de tierra termoestable, produciendo un material rígido. Las primeras generaciones de aislamiento termoestable utilizaron resinas sintéticas que se ablandaban a temperaturas moderadamente altas, pero no se derretían (como algunas de las resinas asfálticas).

#### **-Tratamiento VPI o sistema global VPI.**

El alto coste de fabricar estatores con devanado ordenado cuyas bobinas o barras son impregnadas o recubiertas totalmente antes de la inserción en las ranuras condujo al desarrollo de otras técnicas. Una de ellas fue el sistema VPI (“Vacuum pressure impregnation”, Impregnación a Presión de Vacío), menos costoso y que facilita la fabricación porque todas las conexiones del bobinado y las barras se pueden hacer antes de la impregnación final.

En esta técnica, el bobinado se coloca en un gran tanque donde se le aplica el recubrimiento. El estator está totalmente inundado en una resina de baja viscosidad, presurizada hasta 0,6 MPa con un gas no reactivo, que impregna todo el aislamiento de tierra, el aislamiento bobina a bobina y el aislamiento de fase-tierra. Después se drena el exceso de resina y el estator se somete a temperaturas de 60 a 100 °C dentro de un horno para fijar el recubrimiento. Esta técnica permite eliminar aire de la resina para evitar la aparición de DPs.

A principios de los años 90, los fabricantes tenían la capacidad de aplicar el tratamiento sobre estatores de un máximo de 300 MVA.

La resina empleada para el proceso de VPI puede ser epoxi de baja viscosidad o poliéster. El poliéster es más barato y requiere controles de fabricación menos estrictos que el epoxi. Hoy en día, la mayoría de los fabricantes suelen preferir epoxi debido a su fuerza y resistencia química.

### 2.4.- Componentes básicos en un sistema de aislamiento

Los sistemas de aislamiento de un devanado estático contienen diferentes componentes y características que intentan evitar que se produzcan fallos eléctricos. Los componentes básicos que permiten garantizar la calidad del aislamiento estático son ([Stone]):

#### **- Aislante de hilo (strand insulation).**

Se trata del recubrimiento exterior de cada hilo conductor que forma una bobina. En el caso de hilos magnéticos, se trata del esmalte con el que se fabrican. El propósito fundamental es aislar los subconductores individuales que constituyen un paquete de espiras, para reducir

el efecto pelicular ( la corriente tiende a circular por la periferia del conductor) y las pérdidas de corrientes parasitas a causa del campo magnético axial. El campo magnético induce una corriente alrededor del área de la sección transversal del subconductor ver figura 2.4.

**- Aislante de espira (turn insulation).**

Es el material aislante que recubre una espira. Se encuentra alrededor de los apilamientos de cobre y se utiliza sobre todo cuando las espiras están formadas por varios conductores. En caso de que este aislamiento separe bobinas de diferentes fases, tendrá mayor rigidez dieléctrica. Para este tipo de aislantes se utilizan laminados fabricados a partir de polímeros termo-endurecibles y en la actualidad se aplican recubrimientos termoplásticos.

**- Aislante a tierra (groundwall insulation).**

Impide que las fases del devanado tengan contacto con las paredes metálicas de las ranuras del estator. Para este tipo de aislante se utiliza papel de mica combinado con algún tipo de resina o directamente resinas sintéticas líquidas termo-endurecibles como puede ser un poliéster o resina epoxi. Suele ser el aislamiento con mayor rigidez dieléctrica.

**- Cubierta semiconductora (semiconductive coating).**

Es una capa que cubre la superficie de las bobinas del estator para prevenir descargas parciales, rellenando los espacios de aire que pueda haber entre las bobinas y el núcleo (por deformaciones mecánicas). Sólo está presente en máquinas de AT (devanados preformados).

**-Cubierta para graduación del campo (stress grading system).**

Es una cubierta para suavizar el campo eléctrico de los conductores a la salida de la ranura (está a tierra). Están hechas de carbono y tienen una conductividad dependiente del campo. Se aplican sobre los conductores, a unos pocos centímetros desde la salida de la ranura.

**- Cuñas de apriete (slot Wedges).**

Dan rigidez mecánica a la bobina dentro de la ranura. Su objetivo es evitar o mitigar las vibraciones de los devanados dentro de las bobinas debidas a fuerzas electromecánicas. De especial importancia en máquinas de AT (devanados preformados).

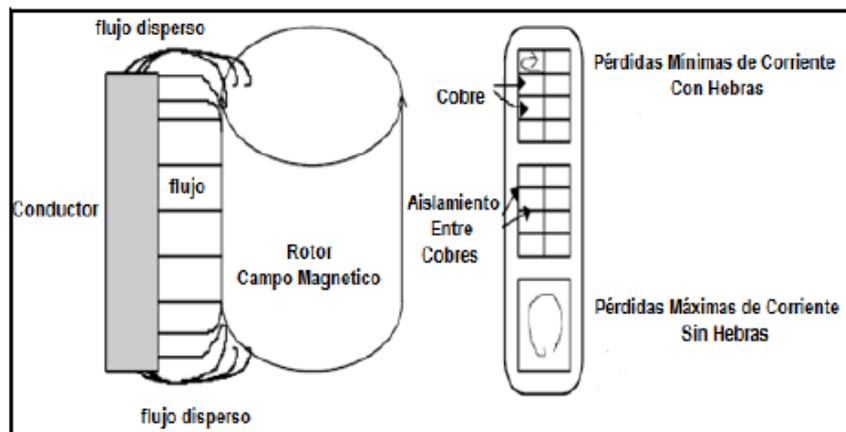


Imagen 2.4.- Pérdidas de corrientes parasitas en subconductores

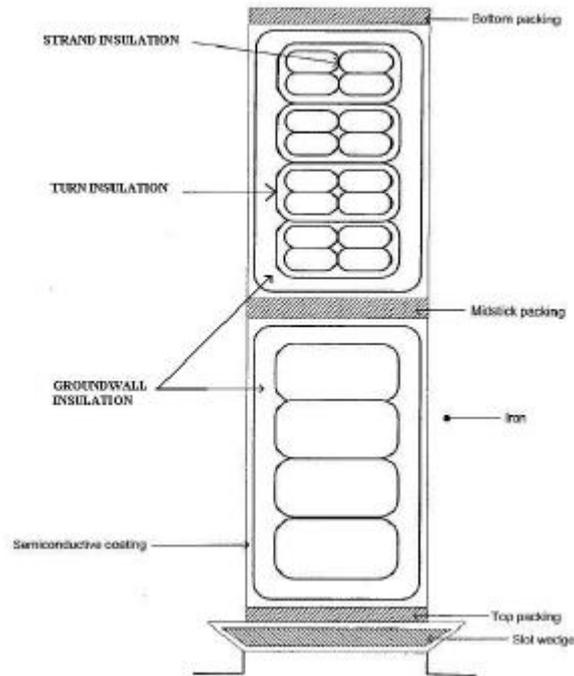


Imagen 2.5.- Diferentes aislantes de un devanado

## 2.5.- Mecanismos de degradación

En este apartado se tratarán los principales mecanismos de degradación y envejecimiento del bobinado de un estator.

### **-Deterioro térmico**

El deterioro térmico se produce en cualquier máquina ya que es la causa más común por la que aparecen complicaciones o averías en el estator. El deterioro térmico viene causado por el aumento de temperaturas debido a las corrientes de Foucault y las pérdidas de carga en los conductores de cobre provoca reacciones químicas como la oxidación. La oxidación provoca que el aislante se vuelva más frágil. Si la máquina esta refrigerada por aire existen aun más posibilidades de fallo. El deterioro térmico depende del ambiente en el que esté rodeada la máquina , del material aislante (si es termoestable o termoplástico) y de las condiciones en las que opere. Las altas temperaturas provocan un deterioro importante en el recubrimiento de los conductores dando lugar a fallos eléctricos.

A mayor temperatura, mayor es la velocidad con la que se degrada todo el sistema de aislamiento.

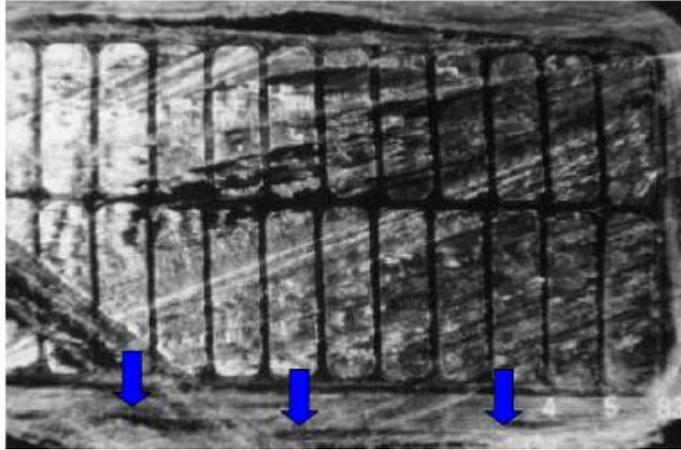


Imagen 2.6.- Detalle del deterioro en el aislante a tierra en una sección de una barra por exceso de temperatura.

Las causas del aumento de temperatura y del deterioro térmico son:

- Fallos en el diseño e instalar conductores demasiados delgados o problemas en el sistema de refrigeración.
- Sobrecarga de la máquina
- Desequilibrio de tensiones entre fases.
- Altas corrientes de armónicos.
- Errores en el diseño en el sistema de aislamiento.
- Barras o bobinas sueltas que dificultan la refrigeración
- Fallos en la refrigeración

Para saber si la máquina está padeciendo un envejecimiento debido a la degradación térmica, se debe estudiar si existen grietas o desprendimientos en el recubrimiento aislante de los conductores y en la posible decoloración y ausencia de brillo en el barniz.

Antes de reparar la máquina debemos saber la causa del sobrecalentamiento y saber qué es lo que está provocando el deterioro. Para subsanar los fallos se inyecta epoxy, pero esto no es una solución eficaz a largo plazo, aunque evitamos el alto coste que supone el rebobinado.

Estos son algunos métodos para prevenir este deterioro:

- Mejora de los intercambiadores.
- Instalar enfriadores en la refrigeración.
- Ajustar el factor de potencia en máquinas síncronas.
- Limpieza de los intercambiadores de calor.
- Realizar un nuevo tratamiento VPI para mejorar el contacto térmico entre las bobinas y el núcleo.

### **-Ciclaje térmico**

Se suele producir en máquinas con un núcleo estático largo y en máquinas donde se produzcan numerosas variaciones bruscas de carga ( grandes generadores de turbina de gas o como los hidrogenadores grandes). Cuando se produce una variación brusca de la carga, la corriente también varía bruscamente, y en poco tiempo provoca que aumente rápidamente la temperatura de los conductores y se expandan. Al mismo tiempo el material aislante, epoxy-mica, está a una menor temperatura y necesitará unos minutos más para incrementarla. La consecuencia es que al aumentar la temperatura, el cobre se expande pero el aislante no se expande lo suficiente (no tan rápido como el cobre), por tener un coeficiente de expansión térmico inferior, y se crea un sobreesfuerzo entre el conductor y el aislante que degrada éste último. Cuando la degradación es importante se producen vibraciones en los conductores lo que provoca una mayor degradación del aislante, pudiendo dar lugar a descargas parciales. Las causas de este fenómeno son:

- Cambios de carga demasiado rápidos para el diseño.
- Múltiples cambios de carga en condiciones normales.
- Funcionamiento a alta temperatura.
- Diseño inadecuado del sistema de aislamiento para resistir corrientes cíclicas.

Los síntomas son similares a los del deterioro térmico. Los daños que deja son irreversibles, es decir si los daños son significativos no se podría devolver al devanado a sus condiciones iniciales. Sin embargo, hay varios métodos disponibles para frenar el proceso:

- Disminución de la tasa de incremento y disminución de la alimentación.
- Disminución de la temperatura máxima de funcionamiento mediante la reducción de la carga admisible.
- Para estatores VPI, inyección de epoxy o caucho de silicona en las ranuras entre las bobinas y el núcleo.
- Llenar las grietas con goma de silicona o de otras resinas compatibles para mejorar la resistencia eléctrica del aislamiento de la bobina.

### **-Impregnación inadecuada**

Como se ha indicado anteriormente, muchos estatores utilizan el sistema VPI para el recubrimiento. Esto evita la aparición de descargas parciales en el aislamiento a tierra.

Cuando la impregnación no se realiza correctamente, es común en devanados aleatorios la aparición de cortocircuitos entre las espiras y al fallo total del sistema. Este defecto se puede visualizar bien ya que se aprecia la ausencia de brillo en la bobina y el núcleo.

Las causas son:

- Viscosidad de la resina o barniz demasiado alta o baja.
- Proceso de fabricación del devanado inadecuado.
- Uso de un aislamiento de los conductores que no es químicamente compatible con la resina o barniz. Los devanados aleatorios pueden ser reparados mediante un segundo baño y horneado. En cambio los devanados ordenados no, ya que la impregnación original bloquea el flujo de resina a los puntos próximos a los conductores de cobre.

### **-Deterioro del recubrimiento del semiconductor**

Este fenómeno se da en máquinas que trabajan con tensiones superiores a 6000 V, que están refrigeradas por aire y con devanado ordenado.

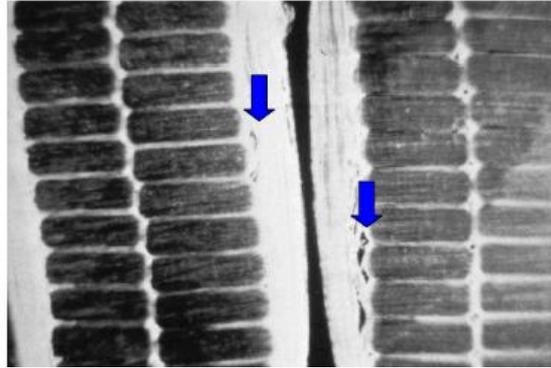


Imagen 2.7.- Deterioro aislamiento bobina-tierra.

Para comprobar si se está produciendo un deterioro en el recubrimiento solo tenemos que mirar si éste cambia de color. Este fenómeno es debido a un fallo en la fabricación o también por vibraciones excesivas de bobinas dentro de las ranuras. Una vez deteriorado el recubrimiento no se puede arreglar a no ser que se desarme, aunque podemos paliar el efecto, inyectando barniz cargado de carbón.

#### **-Sobretensiones repetitivas**

Una tensión entre espiras muy elevada puede llegar a superar la tensión de inicio de las DP si entre las dos espiras en cuestión existe una vacuola o bolsa de aire. La aparición repetida de estas DP's llegan a destruir el aislamiento del conductor, de forma que aparecen cortocircuitos entre espiras que degeneran rápidamente en cortocircuitos a tierra. También pueden aparecer fenómenos de inyección de carga, incluso en ausencia de vacuolas.

Los bobinados preformados son más inmunes que los aleatorios, porque su aislamiento contiene componentes inorgánicos (fibra de vidrio o mica) y porque la proximidad de espiras alejadas no es posible.

Por consiguiente, son las máquinas de BT alimentadas con convertidores electrónicos las más proclives a este mecanismo de degradación.

#### **-Contaminación**

La contaminación afecta sobre todo a máquinas de alta tensión refrigeradas por aire, ya que éste permite entrar suciedad mezclada con la humedad o aceite, dando lugar a un recubrimiento conductor que produce corrientes sobre las superficies de los aislantes ("tracking") causando un fallo a tierra.

El síntoma más evidente es observar y analizar el aire alrededor de la máquina.

#### **-Partículas abrasivas**

Ocurre en máquinas refrigeradas por aire del ambiente. La arena es una de las partículas más peligrosas en estos casos, ya que degrada los sistemas aislantes mediante su paso suspendido en el aire, desgastando el material y provocando defectos a tierra.

Podremos detectar este fenómeno mediante una inspección visual. Para evitar las partículas se instalan unos filtros de aire en la entrada de la refrigeración. Para revertir el daño causado bastará el tratamiento VPI para restaurar el aislamiento.

#### **-Ataque químico**

El ataque químico lo provoca la presencia de aceite, agua, líquidos de lubricación, pinturas, disolventes de resinas... que deterioran el aislamiento. El deterioro químico produce una disminución de la resistencia del aislante y por tanto, a altas tensiones, puede llegar a romperse. Si el aislante está decolorido o tiene hinchazones o si al golpearlo suena a hueco... es síntoma de que se ha producido este fenómeno. La mejor forma de evitarlo es mantener la máquina totalmente cerrada y evitar cualquier tipo de fuga.

#### **-Fugas de agua para refrigeración del estator**

Este fenómeno se da en generadores con refrigeración directa por agua. Las fugas de agua favorecen la aparición de corrosión en los metales del devanado y por tanto, la reducción de la resistencia mecánica y eléctrica de aislamiento. Además, favorece la aparición de posibles cortocircuitos.

Mediante una inspección visual es difícil de detectarlas debido a que la principal causa se debe a deficiencias en la soldadura del conductor o tubos por donde circula el agua de refrigeración y no quedan evidencias en la superficie del devanado.

La forma más eficiente de prevenir este problema es seguir las instrucciones de funcionamiento y mantenimiento indicadas por el fabricante. Para revertir este problema se puede añadir productos químicos al agua para sellar la fuga, inyectar epoxy en las fugas o reemplazar los conductos que están dañados.

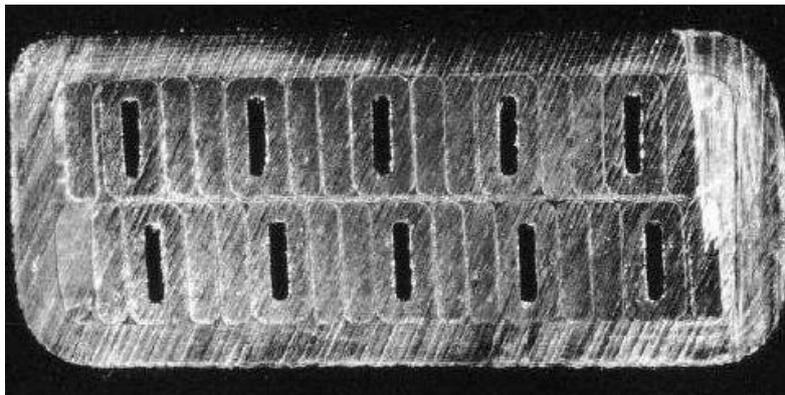


Imagen 2.8.- Detalle de los conductores de refrigeración directa. [Stone 2004 ]

**-Degradación debida a las vibraciones mecánicas de las bobinas, dentro y fuera de las ranuras.**

Este mecanismo es más usual en turbogeneradores y máquinas hidráulicas que en máquinas VPI o con aislamiento termoplástico.

Cuando se trabaja con grandes potencias, los conductores que hay dentro de las ranuras están sometidos a una fuerza radial:

$$F = \frac{k \cdot I^2 \cdot (1 - \cos 2\omega t)}{d} \quad (kN/m)$$

F es la fuerza por unidad de longitud axial,  $k \approx 0,96$ ,  $I = n/c$  la corriente total de los  $n$  de la bobina y  $d$  la anchura de la ranura.

Estas fuerzas son las causantes de que la bobina ( que esta suelta) comience a vibrar dentro de la ranura y comience a degradarse el aislamiento de la bobina. Aún cuando la pintura semiconductora no se ha desgastado por completo, se produce un chispeo debido a la carga acumulada entre la pintura y las paredes de la ranura. Una vez que esta pintura ha desaparecido, aparecen las descargas parciales entre el exterior de la bobina y el interior de la ranura, acelerándose así, el proceso de degradación.

Este fenómeno se produce debido a las fuerzas electromagnéticas, las holguras del conductor dentro de la ranura, encogimiento del aislamiento, deficiencia en la impregnación, ciclaje térmico o debido a que las cuñas de cierre pueden aflojarse con el paso del tiempo.

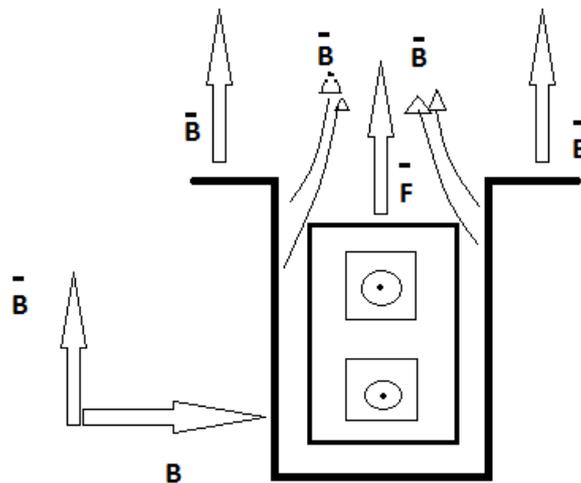


Imagen 2.9.- Representación de la intensidad de campo magnético y la fuerza en una ranura.

$$\vec{F} = I(d\vec{l} \times \vec{B})$$

**-Conexiones eléctricas defectuosas**

En los devanados las bobinas y barras están conectadas mediante soldaduras. Si la resistencia de las soldaduras es demasiada alta, éstas emitirán calor, provocando un sobrecalentamiento y por ende fallos en el sistema de aislamiento y en los conductores.

Para solucionar este problema se puede mejorar la refrigeración en las zonas donde exista un sobrecalentamiento. Este problema se puede detectar mediante una inspección visual ya que el aislamiento aparecerá quemado y descolorido o también se pueden utilizar cámaras infrarrojas para detectar conexiones con una resistencia alta.

## 2.6.- Descargas Parciales

### 2.6.1.- Introducción.

Una descarga parcial (DP), de acuerdo a la definición de la IEEE, es una ionización que cortocircuita parcialmente el aislamiento entre dos conductores. Ésta se produce entre el conductor y el aislamiento y no termina de descargarse hacia otro elemento conductor, de ahí el término “Parcial”, lo que indica que no hay una ruptura total del sistema de aislamiento, pues el resto (generalmente, dieléctrico sólido o líquido) puede seguir cumpliendo su función([Stone], [J. Fraile Mora]).

Estas descargas parciales causan una degradación progresiva en los materiales dieléctricos a través de ataque físico (bombardeo electrónico) y químico ([Stone], [J. Fraile Mora]) que puede desembocar en la ruptura completa del sistema de aislamiento.

Las descargas parciales se originan en el interior de aislamiento sólidos, líquidos o gaseosos. Las causas más comunes por la que se originan son:

- Errores en el diseño del aislamiento.
- Impurezas y elementos extraños.
- Degradación del aislamiento.
- Burbujas, huecos y grietas en el interior del aislamiento.

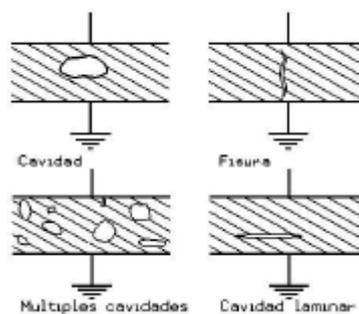


Imagen 2.10.- diferentes defectos en el aislamiento

Para que se origine el fenómeno de la descarga parcial es necesario llegar a la ruptura dieléctrica en una parte del sistema de aislamiento (generalmente, de naturaleza gaseosa), circunstancia que se ve influida por la geometría y localización del defecto, la tensión aplicada, factores ambientales (presión atmosférica), degradación previa del aislamiento ([Stone]). Por

todo ello, las variables medidas fruto de la actividad de descargas parciales, deben ser tratadas estadísticamente.

Las descargas parciales tienen la caracterización de no ser continuas, es decir, se extinguen ellas mismas debido a que el campo eléctrico no es lo suficientemente grande en ese punto como para mantenerlas, tras la ionización. Por estas razones, las descargas parciales provocan pulsos de corriente transitorios en el aislamiento.

### 2.6.2.- Sistemas de detección de descargas parciales.

Las descargas parciales se pueden medir mediante muchas técnicas, algunas de las cuales se explicarán en capítulos sucesivos del TFG. La técnica más extendida, mencionada en el estándar IEC 60270 de 2000, emplea circuitos capacitivos para medir los transitorios de corriente fruto de las descargas parciales.

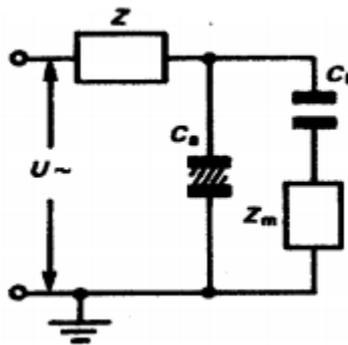


Imagen 1.11.- Circuito de detección indirecto impedancia de medida en serie con el condensador de acoplamiento

En el circuito anterior, la descarga se mide en la impedancia de medida ( $Z_m$ ), debido a que la descarga circula solamente en la malla capacitiva en el momento de producirse, ya que el condensador de acoplamiento  $C_k$  facilita el paso de estos pulsos de alta frecuencia generados en el objeto de ensayo (también de carácter capacitivo). La impedancia equivalente del generador es inductiva, por lo que no deja circular esa corriente por esa rama.

La señal medida en la impedancia (en un osciloscopio) se puede representar junto con la tensión aplicada medida (que, dividida, proporciona sincronismo) y así poder obtener los patrones resueltos en fase ("Phase Resolved Partial Discharge patterns", PRPD patterns), que muestran el evento de descarga parcial referido a la tensión aplicada. Así se consigue determinar ciertos parámetros físicos determinantes de las DP ya que la polaridad y el ángulo de fase respecto a la frecuencia de red. están relacionados con el tipo de descarga parcial. Respecto a la tensión de red, los pulsos de DP que se dan durante el semiciclo positivo de la tensión son de polaridad negativa y las DP que se dan en el semiciclo negativo son de polaridad positiva para el circuito de la figura anterior.

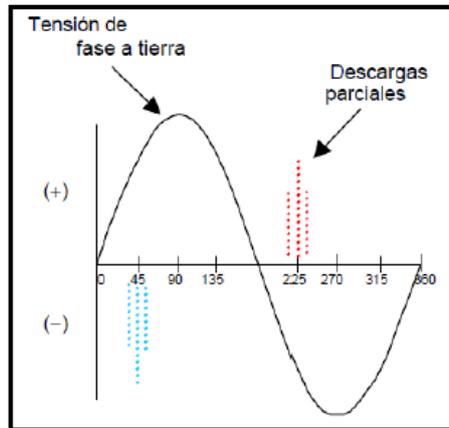


Imagen 2.12.- Ejemplo de PRPD.

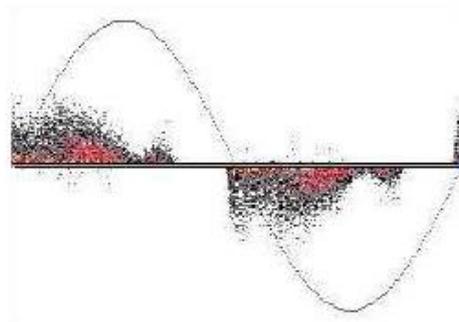


Imagen 2.13.- Representación de una descarga parcial.

La sensibilidad del sistema de detección a las medidas de descargas parciales, dependerá de dos factores:

- 1) Magnitud y ancho de banda de las señales de DP. En el caso de máquinas rotativas, esto dependerá mucho de la localización de la fuente de descargas.
- 2) Magnitud y ancho de banda del ruido eléctrico.

De la observación de la siguiente figura se puede apreciar que a medida que la frecuencia inferior de nuestro sistema de detección es más pequeña, podremos captar mayor magnitud de la DP. Pero también admitiremos más ruido eléctrico

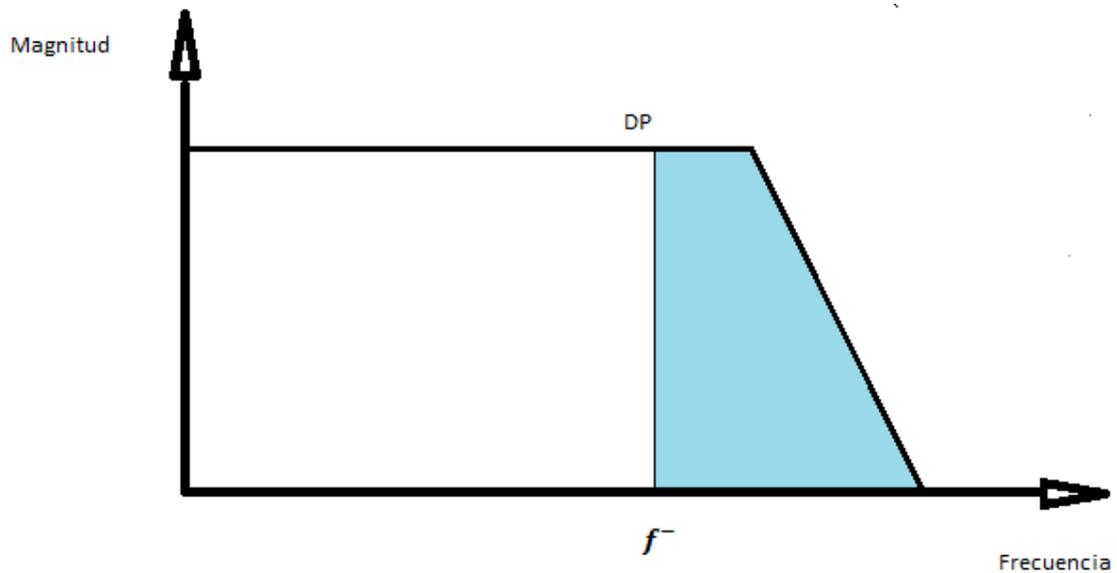


Imagen 2.14. Representación de la frecuencia mínima de corte.

Existen otros métodos no convencionales, que permiten medir este fenómeno mediante sensores acústicos, químicos y de radio-frecuencia. En el caso de máquinas rotativas, solamente se aplican los dos últimos, en forma de detectores de ozono y antenas. En los siguientes capítulos se mostrará más información sobre estos sensores.

En función de los sensores empleados, existen diferentes unidades de medida que tomen en cuenta las DP:

- MiliVoltios (mV). Aplicable a objetos inductivos (medida directa).
- PicoCulombios (pC). Aplicable para objetos capacitivos. Requiere calibración para cada objeto de medida. Representa la carga aparente de DP. Usual en laboratorios de ensayo/fábricas.
- MiliAmperios (mA). Cuando se utilizan transformadores de corriente para realizar la medida.
- Decibelios (dBm). Cuando se utilizan analizadores de espectros.

### 2.6.3.- Tipos de descargas e información diagnóstica aportada.

Los sistemas de aislamiento se deterioran con la actividad de las descargas parciales, pero este deterioro depende, no solo de la magnitud de las descargas parciales, sino también de la naturaleza del material, ya que la Mica soporta un nivel moderado de DP, mientras que los polímeros orgánicos se degradan más rápido debido a que se puede producir en su interior una arborescencia eléctrica ("treeing", fenómeno eléctrico que se produce previo a la ruptura dieléctrica, figura 2.15). Por otro lado, hay descargas eléctricas que no afectan directamente a ningún material aislante sólido/líquido y otras que, aunque lo hagan, sus efectos pueden ser fácilmente subsanables si se diagnostican a tiempo.

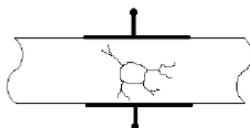


Imagen 2.15.- Fenómeno de arborescencia.

Por tanto, es muy importante, no solo cuantificar la actividad de descargas parciales, sino también identificar de qué tipo es cada fuente ([Stone], [J. Fraile Mora]). En un primer nivel de clasificación, se diferencian tres tipos de descargas parciales:

#### **- Descargas parciales internas**

Estas descargas se dan en el interior de un aislante sólido en cuyo interior hay burbujas de gas. Estas descargas son muy comunes entre conductores y en el aislamiento conductor-ranura, llegando a erosionar el material aislante hasta poder destruirlo. En la figura 2.17, se muestra un PRPD característico.

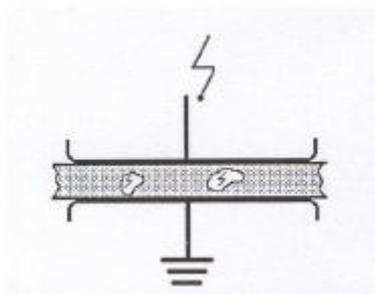


Imagen 2.16.- Fuente de descargas parciales internas

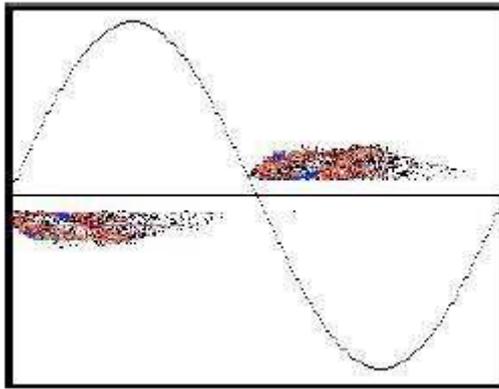


Imagen 2.17.- Ejemplo de patrón de DP internas

### -Descargas parciales superficiales

Se producen en huecos gaseosos que dejan superficies abiertas frente a materiales aislantes sólidos; las ionizaciones son perpendiculares al campo aplicado. Son típicas de contaminación en pasatapas y aisladores.

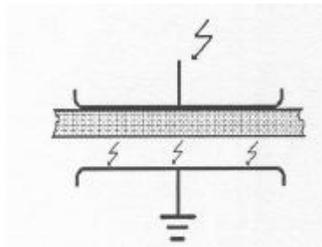


Imagen 2.18.- Fuente de descargas parciales superficiales.

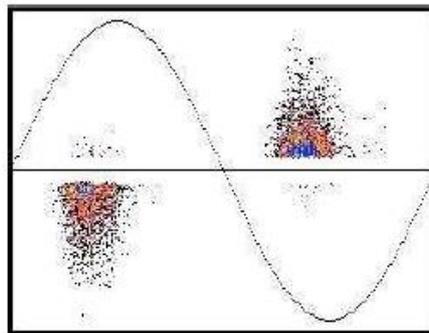


Imagen 2.19.-- Ejemplo de Patrón de DP superficiales

### -Descargas parciales por efecto corona

Este tipo de descargas se da en geometrías punta-gas-plano, de manera que la alta divergencia de campo eléctrico provoca una ruptura del aislamiento que proporciona el gas. Este tipo de descargas se suele dar en metales afilados sometidos a gran campo eléctrico, como a veces ocurre en una conexión defectuosa.

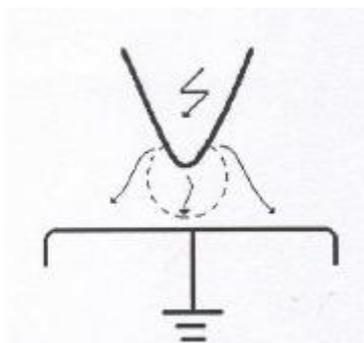


Imagen 2.20.- Fuente de descarga parcial por efecto corona.

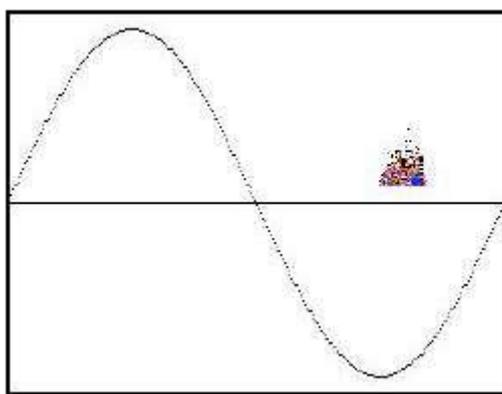


Imagen 2.21.- Ejemplo de patrón de descargas por efecto corona.

Es claro que algunas de estas fuentes de DPs pueden ser fruto de mecanismos de degradación que den lugar a espacios de gas donde estas ionizaciones pueden tener lugar o a efectos corona indeseados. Por tanto, la medida precisa de la actividad de descargas parciales es útil, no sólo para caracterizarlas como causa de fallo de la máquina, sino como consecuencia de otros mecanismos de degradación, que, por tanto, pueden ser diagnosticados mediante los PRPDs. La multitud de causas de envejecimiento que puede detectar esta técnica, explica que se haya hecho tan popular entre las empresas de mantenimiento, lo que ha obligado a introducir estándares como los aquí destacados.

Además de esta clasificación, que ya permite un diagnóstico de algunas fuentes de DPs de interés, en los siguientes capítulos se mostrará que existe un segundo nivel de clasificación de fuentes particularizado a máquinas de AT ya recogido en las normativas.

En términos de cuantificación, también estas normas han establecido indicadores. Particularizando para las descargas parciales internas (generalmente, las más dañinas en potencia), es bien conocido que la magnitud de una DP está ligada, en primera aproximación, con el tamaño de la vacuola que la generó o lo que es lo mismo, a la gravedad del daño del sistema aislante ([Stone], [J. Fraile Mora]). Por tanto, un crecimiento (estadístico) de esta magnitud puede indicar que la máquina está sufriendo algún tipo de envejecimiento anómalo. Igualmente, el número de pulsos por segundo está relacionado con la cantidad de vacuolas, o lo que es lo mismo, con la extensión del daño dentro del sistema aislante.

## Capítulo 3.- Revisión de la guía IEEE 1434 de 2000.

### 3.1.- Introducción

#### **-Campo de aplicación**

Esta guía trata temas como las mediciones de descargas parciales (" Partial discharges". PD) cuando las máquinas eléctricas rotativas están en servicio ("on-line") y cuando no ("off-line"), al igual que mediciones para comprobar cómo afectan las descargas parciales a las bobinas y barras individuales. Todas estas pruebas son aplicables en el momento de fabricación, instalación, operación y mantenimiento del bobinado en máquinas rotativas de corriente alterna.

#### **-Objetivo**

El propósito de esta guía es identificar métodos de ensayo que pueden ser útiles en la medición de la actividad de las DP, involucrando los sistemas de aislamiento eléctrico de las máquinas rotativas de corriente alterna. Esto suele aplicarse para el control de calidad y para detectar el envejecimiento del bobinado .

#### **-Limitaciones**

- Muchas mediciones de DP en línea se detectan mejor en defectos cerca de los sensores.
- Diferentes métodos de ensayo se pueden producir resultados diferentes, por lo que son difíciles de establecer resultados absolutos.
- No se intenta describir aquí todos los sistemas conocidos para medir la actividad de las DP.
- Muchas de las mediciones de DP están relacionadas con aspectos externos (condiciones ambientales) y los efectos que puede producir durante la medición de la actividad de las descargas puede ser muy importante. Para la comparación directa entre diferentes ensayos, es muy importante que las pruebas se lleven a cabo bajo condiciones similares.
- No se puede esperar que con las mediciones de las descargas parciales se puedan detectar todos los problemas a los que el sistema de aislamiento puede ser propenso.

### 3.2.- La naturaleza de las descargas parciales en los devanados de la máquina

La actividad de descargas parciales viene determinada por el estado de la máquina (grado de deterioro y calidad de la misma). Las DP se pueden dar en distintas cavidades de la máquina y pueden ser debidas a la vibración, envejecimiento de la máquina o por áreas erosionadas. Cuando la máquina está funcionando también se pueden producir DP en las ranuras provocadas por alteraciones en las capas semiconductoras.

Las formas de onda del pulso de las PD dependen de la geometría del emplazamiento donde se produzcan, así como del tipo de gas y su presión. El nivel de tensión a la que aparece una DP depende del tamaño del defecto y la presión del gas. Para que se dé lugar a una DP se debe de producir la ruptura dieléctrica del gas (lo que se produce a partir de un determinado nivel de tensión), para lo que, es necesario una avalancha de electrones en la cavidad y es aquí donde aparece el término retraso estadístico que representa el tiempo necesario para que un electrón libre aparezca en la cavidad, tras haberse superado una tensión aplicada suficientemente alta para la ignición. La diferencia entre la tensión de ruptura real y la tensión de ruptura nominal del defecto fruto de este retraso estadístico, se conoce comúnmente como la sobretensión a través del defecto. Cuanto mayor es la sobretensión mayor amplitud tiene el pulso y su tiempo de subida es más corto.

La amplitud de los pulsos de las DP detectados en las máquinas rotativas viene determinada por su tiempo de subida, aunque los detectores de pulsos funcionan mejor ante pulsos con tiempos de subida más cortos (son más fáciles de detectar).

Es de esperar que el tamaño de los defectos que puedan existir en una ranura varíe (por vibraciones, por ejemplo) y por tanto, que la magnitud de las descargas sea fluctuante ya que cuanto más separadas estén las ranuras y las bobinas mayor será la magnitud de las DP y más capacidad tendrán entonces de degradación y carbonización del aislamiento termoestable.

### 3.3.- Descripción general de los métodos de detección de DP

Las DP vienen acompañadas por pulsos eléctricos y pulsos de la radiofrecuencia.

Una forma de de detectar el pulso eléctrico es midiendo el pulso de la tensión que se crea a través de la impedancia del sistema de aislamiento o midiendo el pulso de corriente. Estos fenómenos se miden con circuitos remotos (circuitos de detección estándar) ya que en un devanado puede haber cientos de DP por segundo. Los pulsos de tensión se detectan gracias a condensadores de alta tensión conectados con el terminal de una fase del devanado. Los transformadores de intensidad también tienen cabida para las detecciones de las corrientes producidas por las DP .

Las DP provocan emisiones espectrales en radiofrecuencia desde 100 KHz hasta cientos de MHz. Es por ello que utilizando una antena de radiofrecuencia direccional podemos detectar e incluso localizar las DP en el devanado del estator.

El hecho de que se produzcan DP en el estator hace que aumenten las pérdidas, porque estas ionizaciones dan lugar a calentamientos del sistema de aislamiento. Por tanto, una forma de medir esa actividad de descargas en el devanado, es medir el factor de potencia (o tangente de delta) del aislamiento con una tensión menor a la nominal y después medirlo con la tensión de ignición de las descargas. Si la diferencia entre estos dos factores de potencia es importante, esto nos indica que el número de DPs que se producen en el devanado es grande. Esta prueba es menos sensible para detectar la DPs que la prueba de detección del

pulso eléctrico y la de métodos de radiofrecuencia, ya que da una medición global de la actividad de descargas, pero no permite distinguir entre las diversas fuentes.

En máquinas enfriadas por aire la presencia de DP en el devanado provoca reacciones químicas en éste. Estas reacciones químicas producen ozono ( $O_3$ ). El nivel de ozono se puede medir con tubos químicos y sensores eléctricos. Los parámetros como la temperatura, humedad, el factor de potencia o el grado de carga de la máquina afectan también al nivel de ozono detectado.

Las DP provocan una pequeña "onda mecánica expansiva" que crea un ruido muy característico. Es por eso que los micrófonos direccionales son también usados para la detección y localización de descargas parciales.

La detección de DP se puede realizar de forma visual en condiciones de completa oscuridad (ensayo de apagón); para mejorar la sensibilidad a la hora de medir el fenómeno se pueden utilizar equipos ultravioleta. Este tipo de equipos son muy eficaces para la detección de DP superficiales, localizar grietas o para controlar la actividad de las DP en las ranuras (por bobinas, individualmente).

### 3.4.- Los sistemas de detección de radiación de impulsos eléctricos y de RF.

Para escoger un sistema de detección de pulsos eléctricos debemos prestar atención al diseño de la máquina y la actividad de las descargas parciales.

Aspectos como el ruido eléctrico, la atenuación de los pulsos propagados y el ancho de banda de los equipos empleados pueden complicar la medición y se puede llegar a conclusiones erróneas sobre el estado de la máquina. En este sentido, cabe destacar:

- La reducción del ruido es un tema importante al realizar la prueba, ya que la rotación de las máquinas nos hace trabajar en un entorno no ideal para la medición de señales. En esas fechas, ya existían en el mercado existen fabricantes que ofrecen equipos que eliminan parcialmente o totalmente el ruido.
- Ancho de banda: La respuesta en frecuencia de un pulso de una DP es una función del tiempo de subida y de la amplitud del pulso. Las componentes en frecuencia de un impulso de una DP dependen de su ubicación, es decir, van cambiando según el material y bobinas que atraviese; por eso, el ancho de banda de detección de un sensor es una consideración muy importante. Muchos sistemas de medición de DPs ofrecen anchos de bandas limitados y solo son capaces de mostrar parcialmente la actividad de las DPs.
- Atenuación: Como los pulsos viajan a través del devanado, se distorsionan debido a la impedancia que presenta el devanado a altas frecuencias. Por esto podemos deducir que cuanto más viaje el pulso por el devanado mayor deformación sufrirá su forma de onda. Dependiendo del tipo de respuesta en frecuencia que tenga el detector, esta distorsión puede provocar resultados no concluyentes.

### 3.4.1.- Sensores

#### -Condensadores de acoplamiento

Los condensadores de acoplamiento se emplean para ofrecer una baja impedancia a altas frecuencias: por tanto se busca que los pulsos de DP circulen por ellas ( en la imagen 3.1 se mide en una resistencia conectada en el cable a tierra) y se midan en esa rama. Cuanto mayor es el condensador, más ancho de banda se tiene para medir la DP, pero también captará más ruido eléctrico. Para las mediciones con la máquina en servicio se utilizan condensadores de 0,25  $\mu\text{F}$  (condensadores de sobretensión existentes en algunas instalaciones aunque son menos habitual ya que son más sensibles al ruido) hasta 80 pF (dedicados en exclusiva para medir DPs). Los condensadores de sobretensión sirven para derivar corrientes de rayos que llegan desde la red a la máquina. Son condensadores de protección que pueden emplearse, además, en medir DPs.



Imagen 3.1.- Acoplador capacitivo.

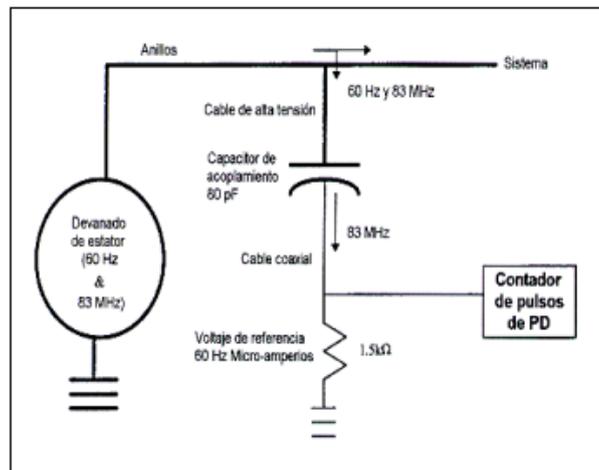


Imagen 3.2.-Ubicación del acoplador capacitivo.

#### -Transformadores de corriente

Los transformadores de corriente de alta frecuencia (“ High frequency current transformer”, HFCT) pueden ser eficaces para la vigilancia de motores y generadores. Un transformador de corriente puede ser utilizado para medir impulsos PD de alta frecuencia. Se construye con un núcleo de ferrita y por lo general está encerrado en una carcasa de metal. La mayoría de los transformadores de corriente disponibles comercialmente se proporcionan con una curva de transferencia que describe su respuesta de frecuencia.

**-Acopladores en la ranura del estator**

El acoplador de ranura del estator (“Stator Slot Coupler”, SSC) es una antena de dos puertos, sensible a la energía electromagnética de la actividad de las DO. Los SSC bloquean los pulsos de baja frecuencia pero dejan pasar los pulsos de alta frecuencia. Por su ubicación, sólo son sensibles a las descargas parciales que ocurren dentro de la ranura que alberga al sensor.



Imagen 3.3.- Acopladores en la ranura del estator.

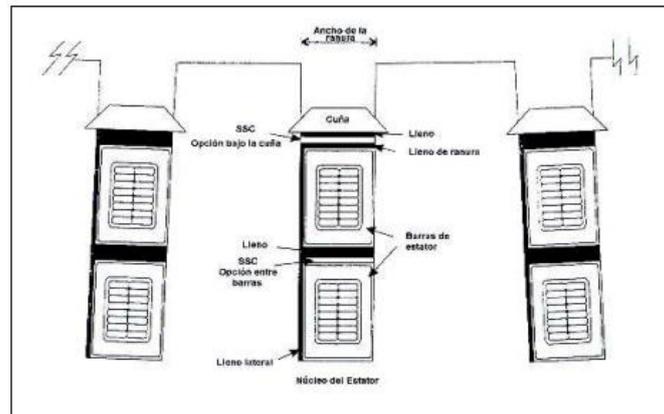


Imagen 3.4.- Ubicación de SCC

**-Sondas capacitivas**

Son sensores, por lo general de diseño personalizado, que constan de una sola placa, por lo general de latón, consisten en tres elementos: la cabeza de la sonda, el cable de interconexión y la terminación del cable. Para transmitir la señal desde la cabeza de la sonda al circuito de terminación se utiliza un cable coaxial, que es conectado a la entrada de un osciloscopio. La señal de DP se acopla electrostáticamente al sensor a través del aislamiento

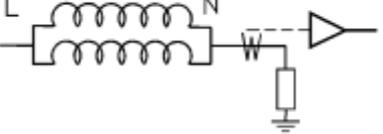
con el que entra en contacto. Se emplean para medir puntualmente en ciertas bobinas y su respuesta en frecuencia y sensibilidad dependerán de la geometría elegida.



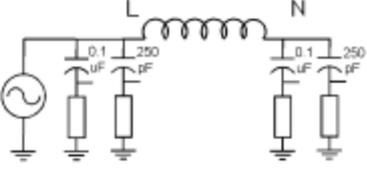
Imagen 3.5.- Sonda capacitiva de 1 GHz.

### 3.4.2.-Sistemas de detección para ensayos en línea

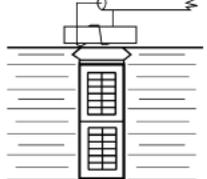
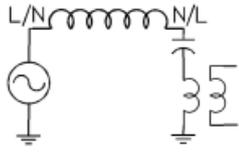
Sensores	Características	Rango de frecuencia
	<p>El sistema está compuesto de un condensador conectado en el devanado y un transformador de corriente conectado en el cable a tierra del condensador. No es capaz de eliminar muy bien el ruido y por tanto es vulnerable a él.</p>	100 kHz-30 MHz
	<p>El transformador de corriente está conectado en uno de los terminales del motor . Muy vulnerable al ruido.</p>	50-300kHz
<p>Diferencial:</p> <p>Direccional:</p>	<p>Medida Diferencial: se conecta un acoplador al principio de la línea y otro al final (de 80 pF ). El rechazo de ruido se consigue en base a los tiempos de llegada de los impulsos a los dos acopladores. Este tipo de sistemas están limitados a aplicaciones en hidrogeneradores.</p> <p>Medida direccional: Con un acoplador en el terminal de línea (por fase).</p>	40- 350 MHz
	<p>Conexión de un transformador de corriente y acoplador de 10 nF (hay uno en el neutro y otro en línea). El rechazo de ruido se consigue en base a los tiempos de llegada de los impulsos a los acopladores.</p>	10kHz-> 30MHz

	<p>Un acoplador instalado en la ranura de la máquina. Excelente inmunidad al ruido. Capacidad de respuesta limitada a una ranura. Requiere la extracción del rotor para la instalación del sensor.</p>	<p>30 MHz-&gt;1 GHz</p>
<p>Condensador de sobretensión</p>	<p>Se aprovechan los condensadores de sobretensión conectados a tierra a través de las resistencias, que son los elementos donde se mide la tensión de las señales DP. Los sensores también se encuentran en el neutro del generador El ruido es detectado en base al tiempo de llegada de los pulsos de los sensores</p>	<p>30 kHz- 10MHz</p>
	<p>El transformador de corriente está instalado la conexión entre el generador y la toma de puesta a tierra. El rechazo del ruido se basa en el análisis manual de los datos del espectro de frecuencias.</p>	<p>20 kHz- 50 MHz</p>
<p>Ozono</p>	<p>Monitorización del ozono mediante un sensor que analiza las propiedades del aire. Sólo detecta descargas parciales superficiales en bobinas o barras y no es muy sensible.</p>	<p>N/A</p>

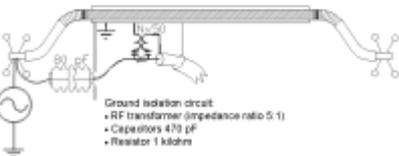
### 3.4.3.- Sistemas de medición para ensayos fuera de línea

Sensor	Características	Rango de frecuencia
	<p>Se instalan dos acopladores en cada extremo del bobinado, El acoplador de 100 nF mide en un rango cercano a 10kHz (responde a todas las fuentes de DP del devanado) y el de 250 pF lo hace en torno a 130KHz (responde a DP originadas cerca de los terminales del bobinado medido).</p>	<p>500 Hz– 21 kHz  y  90– 170 kHz</p>
<p>Sonda Acústica</p>	<p>La sonda acústica se coloca en una ranura bajo supervisión.  Utilizándola en conjunto con una sonda electromagnética puede ser muy fiable para localizar ranuras con alta actividad de DP.</p>	<p>36-44 kHz</p>

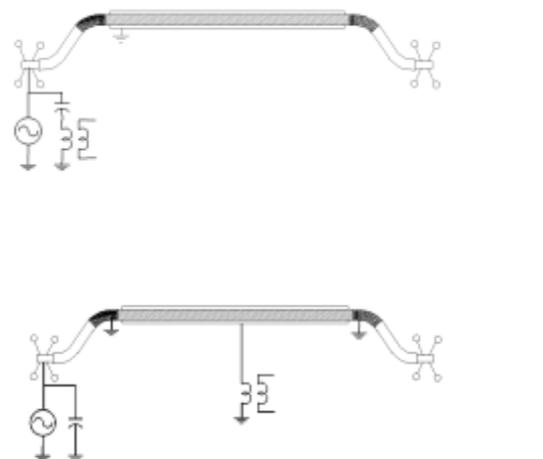
-Otros sistemas de medición:

	<p>Sonda electromagnética</p>		<p>Transformador de alta frecuencia, pero de tensión.</p>
---	-------------------------------	---	---

### 3.4.4.-Sistemas de medición para mediciones en bobinas y barras individuales

Sensores	Características	Rango de frecuencia
 <p>Ground isolation circuit:  <ul style="list-style-type: none"> <li>• RF transformer (impedance ratio 5:1)</li> <li>• Capacitors 470 pF</li> <li>• Resistor 1 kilohm</li> </ul> </p>	<p>Está conectado un acoplador de 80 pF a un transformador de tensión de relación 5:1. Posee buena sensibilidad para DP internas pero no tanto para descargas externas. Puede ser útil para la detección de huecos o defectos.</p>	<p>8-100 MHz</p>
<p>Sonda acústica</p>	<p>La sonda acústica se coloca en una ranura bajo supervisión. Utilizándola en conjunto con una sonda electromagnética puede ser muy fiable para ranuras con alta actividad de DP.</p>	<p>36-44 kHz</p>

-Otros sistemas de medición:

	<p>Estos sistemas de medición poseen transformadores de alta frecuencia de medida de tensión. Su rango de frecuencia va desde los 500 Hz hasta los 2 GHz.</p>
---	---

### 3.5.- Los instrumentos de medida de pulsos e interferencias en radiofrecuencia.

Existen unos sistemas de adquisición que se emplean junto a los sensores descritos anteriormente, como por ejemplo:

- Los osciloscopios, son instrumentos con los que podemos visualizar las señales que produce una descarga parcial en el dominio temporal. El ancho de banda del osciloscopio tiene que ser igual o mayor que el del sensor encargado de detectar la descarga parcial. En los sensores y detectores de DP comerciales ya vienen integrados los osciloscopios.
- Los analizadores de señales se encargan de mostrar la magnitud de las señales de cualquiera de los sistemas de medición en el dominio de la frecuencia. Este instrumento mide la intensidad de la señal en cada frecuencia observada. La existencia de inductancias y capacidades parásitas en el devanado generan una compleja función de transferencia, que analizada por un experto, puede permitir determinar el tipo y la ubicación de la DP dentro del devanado.
- Los medidores cuasi-pico y de interferencias en radiofrecuencia ("Radio interference voltage", RIV) son utilizados para medir las DPs de mayor magnitud (en un defecto considerable de un aislamiento, descargas de ranura...). Hasta la fecha del estándar, estos elementos se implantaban vía hardware.
- Analizadores de altura del pulso, se encargan de medir la magnitud de los pulsos provocados por una DP. El análisis de la altura de los pulsos y un registro permanente de los resultados obtenidos nos puede ayudar a descubrir las características de las DP y estudiar su actividad. También existen analizadores de la fase del pulso, muy similares a los anteriores, con la diferencia de que el análisis se hace utilizando la fase respecto a la tensión alterna.

### 3.6.- Propagación del pulso y calibración

La respuesta que ofrece un estator de una máquina rotativa a una DP depende de la longitud del núcleo del estator, del tipo de devanado (si es bobinado de una espira o de media bobina como las barras Roebel), la geometría de la cabeza de ranura... Las características del pulso (ancho de pulso, tiempo de subida...) marcarán cómo es de detectable para los sistemas de medida.

Los ensayos para saber cómo responde el devanado a los pulsos eléctricos han demostrado que un impulso de tiempo de subida rápido está acoplado capacitivamente a través de la bobina, y éste es seguido por una onda electromagnética que viaja más lentamente. Pero, debido a la red RLC del devanado, este tipo de pulsos se atenúan de una manera más o menos rápida. Respecto a la onda electromagnética, viaja por todas las bobinas

del devanado, cada una de las cuales posee un único grupo de frecuencias resonantes; si el grupo de frecuencias del detector coincide con alguna de estas frecuencias resonantes, la DP medida será anormalmente alta.

La calibración de las DPs se debería realizar en términos de carga aparente en la ubicación donde el sensor está instalado. Al inyectar el pulso de calibración, éste debe ser tan corto como sea posible para evitar la deformación de las señales, debido a la inductancia que presentan los cables de conexión. El método presenta bastantes problemas relacionados con la atenuación de los pulsos, su deformación, la existencia de resonancias... etc. Por ello, no se puede hacer una calibración con garantías en el devanado del estator de la máquina rotativa.

### 3.7.- Comparación entre medidas con la máquina en servicio o desconectada

Es posible obtener resultados de las pruebas de las DPs cuando las máquinas están, o no, en funcionamiento. Según el objetivo de la prueba se emplea un método u otro, y cada uno presenta unas ventajas y desventajas.

#### 3.7.1.-Pruebas con la máquina en funcionamiento " on-line"

Hay muchos equipos en el mercado para hacer las pruebas con la máquina en funcionamiento y poder determinar de qué manera afectan las DPs al rendimiento de la máquina durante su vida útil. Realizar ensayos con la máquina en funcionamiento nos permite examinar el comportamiento de la máquina bajo variaciones de carga, variaciones de temperatura y en algunos casos de humedad.

Con este método la mayor ventaja es que podemos averiguar con mayor certeza la tendencia de la máquina a tener algún problema. Esto es muy útil para tareas de mantenimiento, ya que se garantiza el mínimo coste y las mínimas horas de inactividad requeridas por la desconexión de la máquina. Este tipo de pruebas nos dan la capacidad de poder detectar algunos tipos específicos de descargas parciales, como las descargas en las ranuras y las generadas por deslaminación en el aislamiento.

#### 3.7.2.-Pruebas con la máquina desconectada " off-line"

Las pruebas cuando la máquina no está funcionando son más costosas y más lentas, aunque pueden ser un buen complemento para las otras pruebas. Las pruebas es conveniente realizarlas cuando la máquina esté nueva y cuando ya haya cumplido un año de servicio, de forma que se pueda comparar con datos de referencia y detectar cualquier tipo de tendencia.

Este tipo de pruebas presentan algunos inconvenientes:

- Se requiere una fuente de alimentación independiente (de alta tensión) para energizar el devanado de la máquina.
- Se necesita que la máquina esté fuera de servicio y a veces es necesario realizar un desmontaje parcial.
- Debido a que está fuera de servicio, no hay esfuerzos electromecánicos y por tanto, será más difícil identificar ciertos tipos de descargas parciales (de ranura, devanados sueltos....) y la temperatura del devanado será anormalmente baja. Por tanto, la actividad de descargas parciales detectada, no refleja fielmente su comportamiento normal.
- Todas las partes del devanado se encuentran a alta tensión, lo que aumenta las posibilidades de que se produzca DPs entorno al neutro de la máquina.
- El tipo de gas de refrigeración, su presión y el grado de humedad pueden afectar de forma importante al funcionamiento de la máquina, por lo que también lo harán a la actividad de descargas.

A continuación se exponen algunos puntos positivos de estas pruebas:

- Posibilidad de medir PDIV ("Partial Discharge Inception Voltage", es la tensión eficaz a partir la cual aparece la actividad de DP) y PDEV ("Partial Discharge Extinction Voltage", es aquella tensión eficaz a partir la cual se extingue la descarga parcial).
- Se puede eliminar las fuentes de ruido durante la prueba debido a que el resto del equipo eléctrico del generador /motor se aísla. Un ejemplo son las chispas de los anillos rotóricos y los equipos de electrónica de potencia empleados.
- Al energizar solo una fase y poner las otras a tierra, para después repetir el ensayo energizando las tres fases simultáneamente, se puede localizar en qué fase se encuentra las DPs.
- Dependiendo de la frecuencia de las fuentes de DP, puede ser posible localizarlas (con un equipo especializado). El poder localizar la fuente de DP sirve de ayuda a la hora de reparar el bobinado.
- Posibilidad de localizar fuentes de descargas parciales en diferentes bobinas de máquinas eléctricas mediante sondas de radiofrecuencia o acústicas.
- Para las pruebas fuera de línea se pueden realizar mediciones e inspecciones visuales (a oscuras) que pueden ser útiles para localizar las fuentes de DP.
- Se pueden obtener lecturas detalladas sobre el estado del devanado.
- Facilidad en la detección de DP.

Cuando los ensayos con la máquina fuera de servicio son realizados en las ranuras de la máquina con una sonda electromagnética, el usuario debe ser consciente de que las señales que proceden de una única fuente de DP pueden ser transmitidas a otras bobinas y barras a través del devanado, lo que puede dar lugar a errores en la interpretación de lecturas.

### 3.7.3.-Pruebas de control del estator (bobinas, barras, arrollamientos...)

Aunque la prueba de DP se realiza a veces para fines de control de calidad sobre el bobinado del estator, barras y el devanado en general, esta prueba no se realiza muy a menudo antes de publicar la norma. Las pruebas pueden dar información sobre la calidad y estado de las bobinas y del devanado en general, aunque estas pruebas tienen algunos puntos negativos como:

- Es necesario acondicionar las bobinas ya que nunca antes se habían puesto a tensión y en los primeros instantes las descargas parciales tienen mayor amplitud.
- La falta de correlación con otras pruebas. En la fecha de publicación del estándar había debate sobre si esta correlación existe.
- Aparecen muchas variables (derivadas del protocolo del ensayo) y detalles específicos del sistema de aislamiento que complican el establecimiento de los límites de calidad. Debido a las variaciones en los equipos de detección de DP y en los sistemas de aislamiento de alta tensión, cualquier especificación del control de calidad debe ser desarrollado en colaboración con el fabricante del devanado.

### 3.8.- Los procedimientos de ensayo.

Debe aplicarse un procedimiento bien claro cada vez que vamos a poner a examen a una máquina rotativa.

#### 3.8.1.-Procedimiento en pruebas con la máquina en funcionamiento ("on-line"):

Lo primero que debemos realizar es registrar las condiciones de funcionamiento de la máquina. Partimos de unos datos como los aportados por el fabricante (potencia nominal, velocidad nominal, frecuencia, fabricante, tensión nominal, corriente de línea nominal, sistema de refrigeración, tensión nominal rotórica, fecha de instalación y/o de devanado, tipo de aislamiento...etc.) y de la monitorización de la máquina (carga en KW, tensión del estator, corriente del estator por fase, nivel de vibración, número de horas de funcionamiento, temperatura estática, presión del gas refrigerante, presión atmosférica, modo de operación de la máquina, número de arranques...etc.), pues la actividad de descargas parciales se puede ver afectada por los mismos.

Con el fin de poder comparar los datos de descargas parciales de una prueba a otra, es obligatorio que la tensión del estator esté dentro de un margen que no exceda el  $\pm 2\%$ .

Durante las pruebas en línea, se debe prestar especial atención a una correcta conexión a tierra de las cubiertas de los cables en la entrada de la instrumentación de detección. Si el sensor es un acoplador capacitivo debe estar conectado a tierra por un cable con una resistencia adecuada. Si el detector es un transformador de intensidad debe haber un

aislamiento adecuado entre el sensor y el conductor. También existe la necesidad de utilizar dispositivos de protección contra sobretensiones en los circuitos de medida.

### -Ejemplo de un procedimiento de prueba en línea para hidrogenadores

Inicialmente se realizan lecturas sobre la actividad de las descargas parciales cuando la máquina trabaja a plena carga y a temperatura estable. Este proceso de llevar a la máquina hasta este punto de operación puede llevar entre cinco y diez horas para hidrogenadores, en función de su sistema de refrigeración. Después la carga se reduce lo más rápido posible hasta llegar a cero y se vuelven hacer mediciones en los acopladores que hayan registrado una mayor actividad de descargas parciales. Durante toda la prueba queda registrada la temperatura de la máquina mediante los sensores RTD ("Significative Resistive Temperature Detector". Son sensores de temperatura basados en la variación de la resistencia de un conductor con la temperatura. Esto se produce debido a que al aumentar la temperatura, los iones empiezan a vibrar con mayor amplitud, dificultando el paso de los electrones) ya que una temperatura elevada de la misma puede tener importantes consecuencias negativas para la vida útil de la máquina, el aislamiento, peor rendimiento...etc, además de afectar a la medida de DPs.

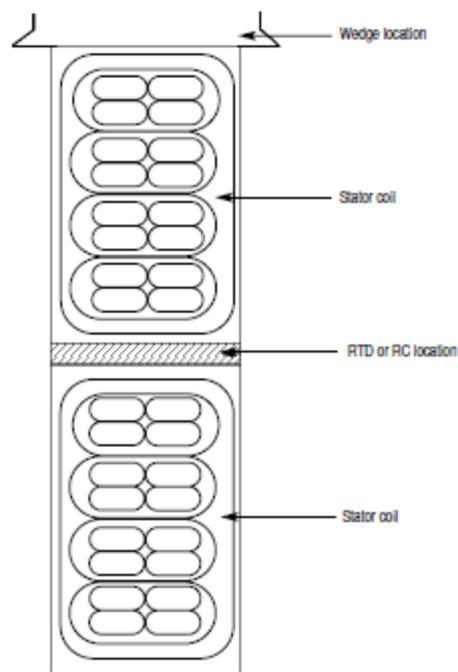


Imagen 3.6.- Ubicación de los sensores RTD. [Stone]

Las mediciones de DP se hacen generalmente por lo menos dos veces al año para reducir al mínimo el deterioro de la máquina que se pueda producir entre ambas medidas. Algunos usuarios prefieren realizar las pruebas en primavera y otoño cuando la temperatura ambiente es similar, mientras que otros prefieren invierno y en verano para obtener la diferencia máxima de temperatura. Si se pretende comparar los datos de DP con el fin de evaluar algún tipo de tendencia en la máquina, las condiciones de funcionamiento (tensión, temperatura, carga, humedad...) tienen que ser similares.

### 3.8.2.-Procedimiento de las pruebas cuando la máquina no está funcionando ("off-line"):

En estas pruebas es importante considerar que la máquina esté desconectada de todos los equipos auxiliares (circuitos de excitación, condensadores...), al igual que de cables y transformadores de salida. Primeramente se comprueba el comportamiento del devanado frente a tensiones nominales y tensiones superiores para comprobar el estado del devanado. Es útil estudiar la tendencia de variables como PDEV y PDIV además de la magnitud de los pulsos. Las comparaciones entre pruebas siempre se deben hacer:

- En la misma máquina.
- En condiciones similares.
- Comparación de las tres fases del bobinado en un mismo tiempo.
- Comparar con otros devanados de iguales valores nominales y diseño.
- Con los mismos sensores de detección de DP.

Es útil disponer de datos de comparación para ser capaces de averiguar la variación de la magnitud de la PDEV y PDIV y la magnitud de los pulsos cuando suba la tensión y cuando baje.

Durante este tipo de pruebas se suministra tensión para energizar el devanado sin sobrecarga. Esta fuente de tensión no debe tener actividad de DP. El suministro de tensión se hace a 50 ó 60 Hz, aunque hay equipos que trabajan a 0,1 Hz para poder alimentar con alta tensión un equipo de elevada capacidad equivalente. Como resultado de la comparación del efecto que producía trabajar a 60 Hz y 0,1 Hz, se introdujo la norma IEEE Std 433-1974. También se pueden emplear circuitos resonantes con inductancias variables que permiten compensar la capacidad equivalente del devanado.

La tensión a la que realizamos el ensayo debe ser medida por medio de un transformador de tensión o un divisor de tensión resistivo o capacitivo conectado a un medidor adecuado.

Como elementos de protección se utilizan contactores y un relé de sobre-intensidad. Este contactor debe estar vigilado por un operario, ya que se debe garantizar que se pueda cortar de forma segura el suministro de red debido a un fallo o a una descarga disruptiva. Esto es necesario para máquinas grandes para que puedan entrar los operarios al estar en contacto con el devanado (para hacer una inspección visual). Una vez que se han obtenido los resultados de las pruebas se determinan las medidas de seguridad.

En el caso de realizar la medición con una sonda electromagnética, esta es colocada cuidadosamente por un operario, en las ranuras del estator, con unos guantes de goma ya que es primordial garantizar la seguridad. El medidor que lleva consigo la sonda debe estar conectado adecuadamente a tierra. Este tipo de medición no es aconsejable, a menos que las conexiones de los extremos de las bobinas estén completamente aisladas.

También se pueden realizar mediciones con una sonda acústica que se monta dentro de una fibra de vidrio o tubo de plástico que actuarían como aislamiento eléctrico.

Las conexiones entre la fuente de tensión y el devanado deben ser lo más cortas posible, y los cables de alta tensión deben ser de un diámetro suficientemente grande para no producir DP (corona) durante la prueba. Una medida con el objeto de ensayo desconectado determinará si el suministro de tensión y el montaje está libre de DP.

La prueba se puede repetir con la conexión opuesta para determinar si hay una diferencia entre la actividad DP cerca de la línea y cerca del neutro.

Al probar cada circuito por separado con todos los demás circuitos conectados a tierra, se aplica poca tensión al aislamiento fase-fase.

Cuando se realizan mediciones de descargas parciales, es común normalizar el sistema de medición en términos de carga eléctrica en el arrollamiento, donde está conectado el condensador de acoplamiento, lo que implica el uso de un pulso de tensión con un tiempo de subida ( $t_r$ , 10% a 90% del valor de pico), que lleva la siguiente relación con la frecuencia superior de corte del sistema de medición.

$$t_r \leq \frac{0,03}{f_2}$$

Independientemente de  $f_2$ ,  $t_r$  será inferior a 60 ns, en cualquier caso. Para pulsos repetitivos unipolares, el tiempo de decaimiento de los impulsos de tensión debe ser grande en comparación con el tiempo de subida o  $1 / f_1$ , donde  $f_1$  es la frecuencia inferior de corte del sistema de medición. La respuesta de este sistema de detección de DP en la máquina es en gran medida una función del ancho de banda del sistema y de la ubicación de la DP en el devanado.

#### **-Aplicación de tensiones de prueba**

En el caso de mediciones de DP hechas con un condensador de acoplamiento en los terminales de la máquina, es común proceder de la siguiente manera:

- Aumentar la tensión a una velocidad reducida de acuerdo con las recomendaciones del IEEE Std 4-1995, y determinar PDIV.
- Medir la máxima magnitud de los pulsos de DP y el nivel tensión de ignición, y registrar cualquier cambio en estas magnitudes a medida que aumenta la tensión. Se suele hacer la prueba a tensión nominal fase-neutro o incluso algo superior si se acuerda con el cliente.
- Seguir realizando mediciones después de haber alcanzado la tensión máxima del ensayo.
- Determinar el PDEV reduciendo poco a poco la tensión aplicada.

Las mediciones deben hacerse con la suficiente frecuencia para que el deterioro significativo de la máquina sea detectado antes de que se hayan producido daños. Los

intervalos de medida dependerán las paradas programadas que tenga la máquina, su ciclo de operación conocido, experiencia previa sobre su sistema de aislamiento y de si ha habido medida previa de DPs con la máquina en servicio.

-Procedimientos para pruebas de DP en las bobinas y barras individuales:

Muchos de los requisitos utilizados en las pruebas de DPs en bobinas y barras individuales son muy similares a los empleados en pruebas de DPs en devanados.

Una ranura ficticia fabricada con dos electrodos metálicos continuos con la misma longitud que la real debe estar unida a los lados de una barra o bobina mediante abrazaderas.

Los detectores mencionados en la tabla anterior (3.4.4) en los rangos de 10-300 kHz son capaces de medir todo tipo de descargas. Sin embargo, los detectores ( $< 8\text{MHz}$ ) son menos sensibles a DPs externas y más a deslaminaciones y descargas en vacuolas.

Cuando la barra o bobina ha sido estresada por la actividad de DP el recubrimiento de la barra o bobina debe seguir siendo funcional.

Se puede completar las medidas con detectores RF, ultrasónicos o ensayos en la oscuridad.

### [3.9.-Interpretación de las pruebas de descargas parciales](#)

La interpretación de los resultados de las pruebas es el paso final y a veces el más importante en la toma de mediciones de las DP. Hay que averiguar si existen indicios de posibles defectos o fallos.

#### [3.9.1.-Magnitud máxima del pulso y polaridad.](#)

Es difícil definir los niveles máximos de DP apropiadas porque esto depende de las características del sistema de aislamiento y los revestimientos externos. Sin embargo, mediante el establecimiento de registros de muchas pruebas, el tipo de aislamiento y las configuraciones de devanado y por medio de un sistema de detección común, las magnitudes inusualmente altas de DP pueden ser detectadas, aunque se requieren otras pruebas e inspecciones para determinar el significado de estos niveles de DP.

Para las máquinas rotativas, los siguientes tipos de actividad DP son interesantes:

- a) Las descargas en las deslaminaciones del aislamiento, incluyendo las adyacentes al conductor de alta tensión.
- b) Las descargas que se producen entre la superficie de la bobina / barra y el núcleo del estator, conocidos comúnmente como descarga de ranura.

Es difícil definir los niveles máximo de DP apropiadas porque esto es con frecuencia una característica del sistema de aislamiento en particular y los revestimientos externos.

Se pueden hacer dos observaciones en general:

1. Los pulsos de DP de polaridad positiva se suelen dar principalmente durante el semiciclo negativo de la onda de tensión y la fuente de la DP es normalmente el recubrimiento semiconductor externo en la ranura o el recubrimiento de la bobina. Si se afloja el bobinado del estator se puede esperar que los pulsos de DP de polaridad positiva tendrán el doble de magnitud y una tasa de repetición diez veces mayor que los pulsos de DP de polaridad negativa.
2. Los pulsos de polaridad negativa se producen principalmente durante el semiciclo positivo de la onda de tensión del sistema. La fuente de la PD esta cerca de los hilos de cobre y puede indicarnos que existe una mala adhesión entre el aislamiento y el cobre.

### 3.9.2.-Lecturas de la sonda electromagnética

La sonda electromagnética se utiliza para realizar mediciones de las DP en ranuras individuales. Estas mediciones no se ven muy afectadas por la configuración del devanado, pero sí se debe tener en cuenta el tipo de aislamiento y revestimiento utilizado.

Aunque la comparación de resultados de diferentes máquinas a las que se les ha realizado la misma prueba es la mejor forma de establecer los valores límites apropiados de DP, con la experiencia de los usuarios sobre las bobinas que están en peligro, se puede indicar que las lecturas del pulso en miliamperios no deben superar los siguientes valores:

- a) Para aislamiento-Asphalt mica: 100 mA
- b) Polyester mica: 30 mA
- c) -Epoxy mica: 20 mA

Estos límites se aplican a sondas del tipo ferrita y medidores de valores de cresta, donde la sonda de ferrita se mantiene en contacto con el núcleo del estator, a través de la ranura en la que está instalada la bobina o barra en cuestión.

### 3.9.3.-Registro de descargas parciales

El uso de cantidades integradas es un intento de representar todos los pulsos de DP por unidad de tiempo. Para ello se utilizan parámetros como NQN ("Normalized Quantity Number". Es el área normalizada debajo de una línea que representa el número de pulsos frente a magnitud de las descargas, donde el número de pulsos está representado mediante escala logarítmica y la escala de la magnitud de las descargas está representada de forma lineal) y tasa cuadrática (la suma de los cuadrados de las magnitudes de descarga individuales durante un cierto intervalo de tiempo dividido por el intervalo de tiempo).

### 3.9.4.-Los cambios en la magnitud de DP

En el caso de las mediciones con la maquina en servicio, los cambios de magnitud de las DPs pueden ayudar a identificar la causa de las descargas y su gravedad. Las causas más usuales que producen variaciones en la magnitud de las DP son:

1. Al variar la carga: Si la temperatura y la tensión se mantienen constantes, los cambios de magnitud en los pulsos de polaridad positiva cuando se trabaja a plena carga y por debajo de ella, pueden ser provocados por tener devanados sueltos en las ranuras. Esto requiere una detección temprana ya que puede provocar la erosión del aislamiento.
2. Cambios en la temperatura: Cuando la carga y la tensión se mantienen constantes, un cambio en la temperatura de la máquina puede ser causante de la variación de la magnitud en las descargas. Esto es debido a que existen descargas internas (por deslaminación, por ejemplo) en el aislamiento.
3. Humedad: Cuanto más baja sea la humedad del aire en las cabezas de bobina, de mayor magnitud serán la magnitud las descargas y su tasa de repetición.
4. Tipo de gas y su presión: En máquinas no refrigeradas por aire. Cuanto más baja sea la presión del gas, la probabilidad de que se produzca una descarga es mayor, especialmente para descargas superficiales.
5. La edad de la máquina: El envejecimiento de la máquina puede ser la causa de la variación de la magnitud de los pulsos de DP.

#### **-Dificultades en la interpretación objetiva de los datos DP**

Algunas de las dificultades encontradas a la hora de interpretar las mediciones en máquinas rotativas son:

1. Tipo de aislamiento: Los niveles aceptables de las descargas parciales varían según el tipo de aislamiento. Por ejemplo, un nivel determinado de DP podría ser soportado por asfalto consolidado pero peligroso para epoxy mica.
2. Tipo de sensor. Cada sensor tiene su sensibilidad y ancho de banda, lo que dificulta comparar medidas incluso en una misma máquina.
3. Mediciones en línea: Cuando existen fuentes de ruidos, se complica las lecturas de los ensayos de las máquinas, lo que a veces requiere de la presencia de expertos. En los casos en los que el sistema de medición funciona en un rango de altas frecuencias (> 50 MHz), para eliminar el ruido, la medición de las DP está restringida a una pequeña parte del devanado adyacente al sensor (las ondas más atenuadas, tienen componentes de menor frecuencia).
4. Mediciones fuera de línea: Los diferentes ensayos que se realicen solo se pueden comparar con otras máquinas con el mismo diseño de bobinado y en el que el ancho de banda del sistema de medición de DP sea el mismo. Las lecturas de la sonda electromagnética no diferencian entre descargas con polaridad positiva o

negativa y por lo tanto, no se puede determinar si son descargas de ranura o internas en el aislamiento.

## Capítulo 4. La guía IEEE 1434 de 2014. Comparación con la versión de 2000.

Esta guía trata desde la naturaleza de las descargas parciales como las mediciones de las mismas en barras , bobinas y en ensayos con la máquina "on-line" y "off-line" . También describe los diferentes sensores y sistemas de medición de descargas parciales así como el procesamiento e interpretación de los datos obtenidos, siendo a su vez muy similar a la norma anterior del año 2000. Todas las mediciones que se describen en esta guía pueden ser de gran utilidad para el proceso de fabricación, instalación, operación y mantenimiento de los bobinados de las máquinas eléctricas rotativas.

A continuación se expondrán los nuevos aspectos, incluidos en la guía 1434 de 2014.

### 4.1.- Descargas parciales con tiempos de subida cortos e impulsos de tensión repetitivos.

Los impulsos de tensión repetitivos y con tiempo de subida corto provocan una tensión (debido a que provocan que exista diferencias de potencial en una misma bobina ) mucho mayor, lo que es soportado por el sistema de aislamiento, especialmente el espira-espira. Este fenómeno se ha hecho cada vez más importante por la implantación generalizada de reguladores de velocidad basados en inversores PWM con transistores IGBT de bajo tiempo de conmutación.

### 4.2.- Chispas provocadas por vibración.

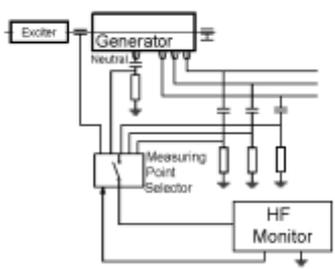
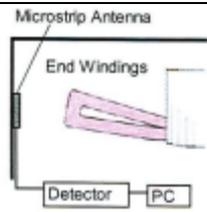
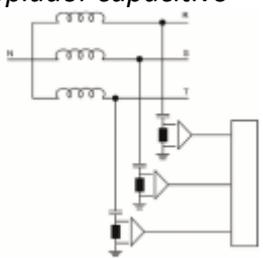
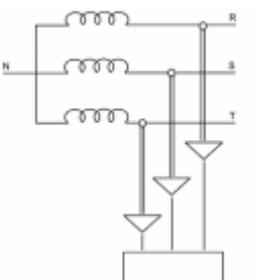
Debido al campo magnético en el núcleo del estator, existen unas corrientes superficiales a lo largo del revestimiento semiconductor que está situado en cada ranura donde hay una bobina. En caso de que la bobina vibre, las corrientes pueden ser interrumpidas lo que puede provocar un arco de corriente entre esa capa y el núcleo. Si la resistencia de la capa semiconductora es baja (la corriente superficial es alta), el arco podría dañar de manera importante el sistema de aislamiento. Este fenómeno se puede producir en cualquier punto de la máquina, incluso en las partes del bobinado más cercanas al neutro, siendo un mecanismo de degradación bastante rápido.

### 4.3.- Instrumentos de detección de corona.

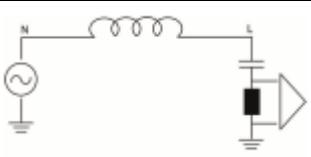
Una alternativa a la prueba de apagón (ver sección 3.3) para observar la luz emitida por las DP's es utilizar un instrumento de detección de radiación ultravioleta para medir efecto corona (ionización en aire abierto). La ventaja es que se puede utilizar bajo condiciones normales de iluminación lo que permite acortar la duración de la prueba y hace más fácil localizar el sitio donde se producen las DP's. Además, al realizar la prueba con más luminosidad es más segura, por lo que es más recomendable. También se puede aplicar esta técnica a bobinas, barras o modelos de máquinas.

4.4.- Los sistemas de detección de radiación de impulsos eléctricos y RF.

-Sistemas de detección para ensayos en línea

Sensor	Características	Rango de frecuencia
	<p>Condensadores de protección contra sobretensiones conectados a tierra a través de resistencias de alta frecuencia. Hay sensores en el neutro del generador y en la conexión a tierra del eje. La detección de DP y ruido se basa en el tiempo de llegada de los impulsos a los sensores.</p> <p>Aplicado en turbogeneradores.</p>	<p>30 kHz a 10 MHz</p>
	<p>Antena microstrip (es capaz de detectar actividad de DP en una zona amplia) instalada dentro o fuera de la carcasa de la máquina. La instalación del sensor es sencilla y no es necesario extraer el rotor. Es sensible a las DP que se producen en las cabezas de bobina.</p>	<p>Banda estrecha</p> <p>1.8 GHz ±0.2GHz</p>
<p>Acopladores</p>	<p>Se utilizan acopladores de 1 nF a 9 nF acabados en 50 Ω. Se instalan en el neutro o en la propia línea.</p> <p>El rango de bajas frecuencias permite la detección de la actividad PD producida zonas más internas de los devanados. El ruido puede ser identificado por un usuario experimentado.</p>	<p>100 kHz a 20 MHz</p>
<p>Acoplador capacitivo</p>  <p>HFCT Alrededor del conductor</p> 	<p>Los acopladores son de 80 pF a 10 nF.</p> <p>El rechazo de ruido se realiza mediante el procesamiento digital de los impulsos.</p> <p>Los HFCT alrededor del conductor solamente se han empleado en motores.</p>	<p>0 kHz a 35 MHz</p>

### -Sistemas de detección para ensayos sin funcionamiento

Sensor	Características	Rango de frecuencia
	<p>El rechazo de ruido se realiza mediante el procesamiento digital de las señales de los impulsos.</p> <p>La combinación de varios métodos para medir los impulsos lo convierte en un sistema bastante fiable.</p>	<p>10 kHz a <math>\geq 30</math> MHz</p>

### -Transformadores de intensidad

Los transformadores de intensidad se pueden instalar alrededor del cable de tierra al condensador de sobretensión, en los terminales del motor y en las cubiertas de los cables a tierra. Cuando trabajamos entre 50 y 60 Hz debe existir un espacio en el circuito magnético del transformador de corriente para evitar que se sature.

### -Detectores de resistencia de temperatura

Los detectores de resistencia de temperatura y el cableado asociado a estos detectores se utilizan para detectar las DP. Aunque una vez detectada, no se puede atribuir la descarga a ninguna ranura en particular, Estos sensores se utilizan en conjunto con sensores capacitivos o de radiofrecuencia.

### -Antenas de ultra alta frecuencia

Las antenas de ultra alta frecuencia con banda estrecha no necesitan ningún tipo de filtro pero con antenas de banda súper ancha es necesario un sistema de filtrado para suprimir el ruido en el interior del sistema de adquisición. Con las antenas de Micro-tira podemos detectar las DP con gran sensibilidad.

### -Analizador de pulsos

En un analizador de pulsos se realiza un registro de la posición de la fase con respecto a la tensión alterna a la cual ocurre cada DP. Se puede realizar un diagrama de tres dimensiones, la magnitud del pulso frente a la tasa de repetición de impulsos en comparación con la posición de fase de la tensión, a veces llamado gráfico de determinación de fase, Este tipo de diagramas tridimensionales pueden ser difíciles de interpretar, es por eso que muchos gráficos de determinación de fase se muestran en dos dimensiones en el eje vertical la magnitud de pulso, la posición de la fase en el eje horizontal y la tasa de repetición de impulsos en color. Estos gráficos permiten conocer si los impulsos detectados son producidos por una DP y no debido al ruido eléctrico.

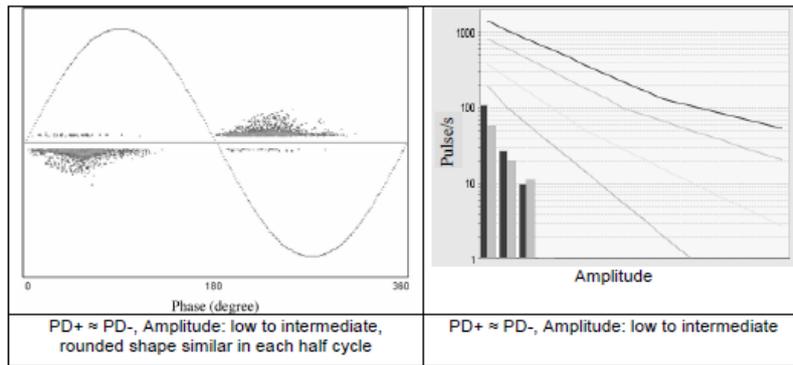


Imagen 4.1.- Descarga parcial en hueco interno.

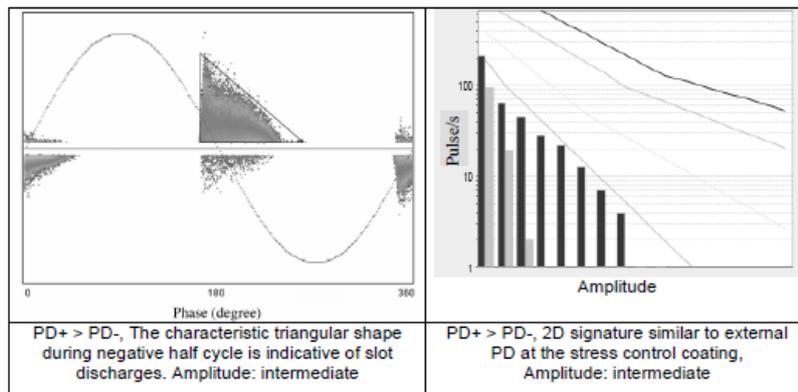


Imagen 4.2.- Descarga parcial en ranura.

#### 4.5.- Analizadores y clasificadores de DP en tiempo y frecuencia.

Los analizadores y clasificadores de DP's en tiempo y en frecuencia se encargan de digitalizar cada forma de pulso. Los datos se muestran en términos de ancho de pulso (duración) y ancho de banda con el propósito de separar las diferentes fuentes de DP del sistema de aislamiento y eliminar las fuentes de ruido externo.

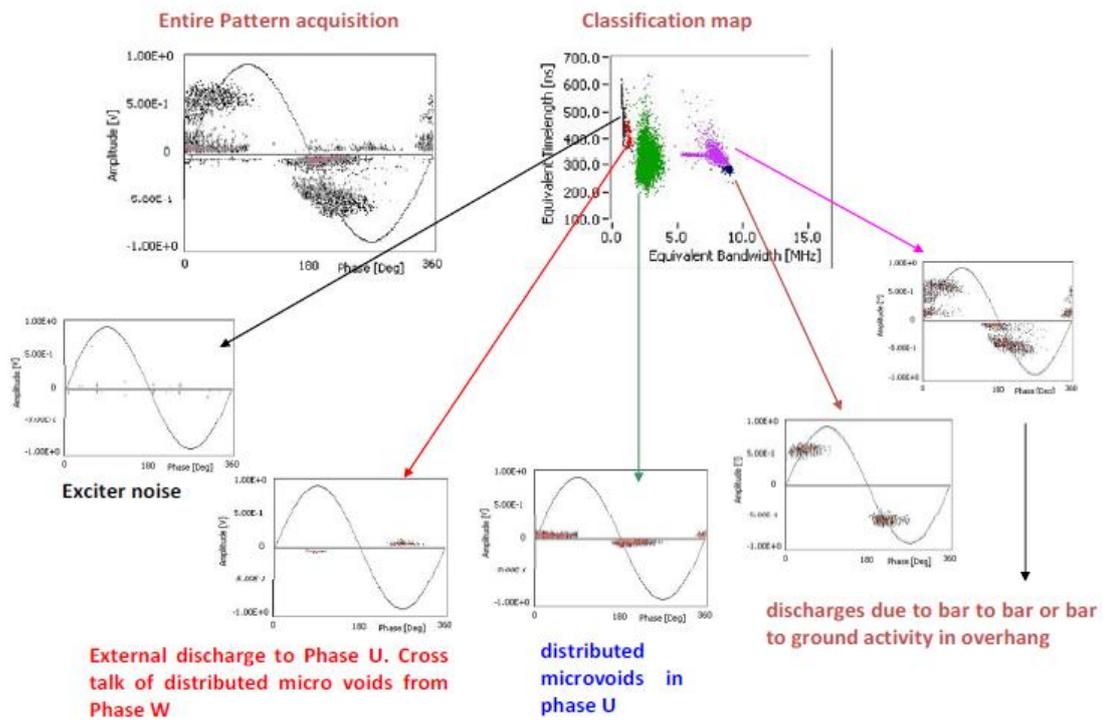


Imagen 4.3.- Analizador de pulso y clasificación de descarga parcial.

#### 4.7.- Sistema multi-espectral sincrónico.

El sistema implica el procesamiento sincrónico de las señales de los sensores de DP en tres fases. Las mediciones de DP's multi-espectrales se basan en la correlación de las mediciones de los espectros mediante la aplicación simultánea de tres filtros de paso de banda diferentes. Indica nubes de descargas parciales en cada fase.

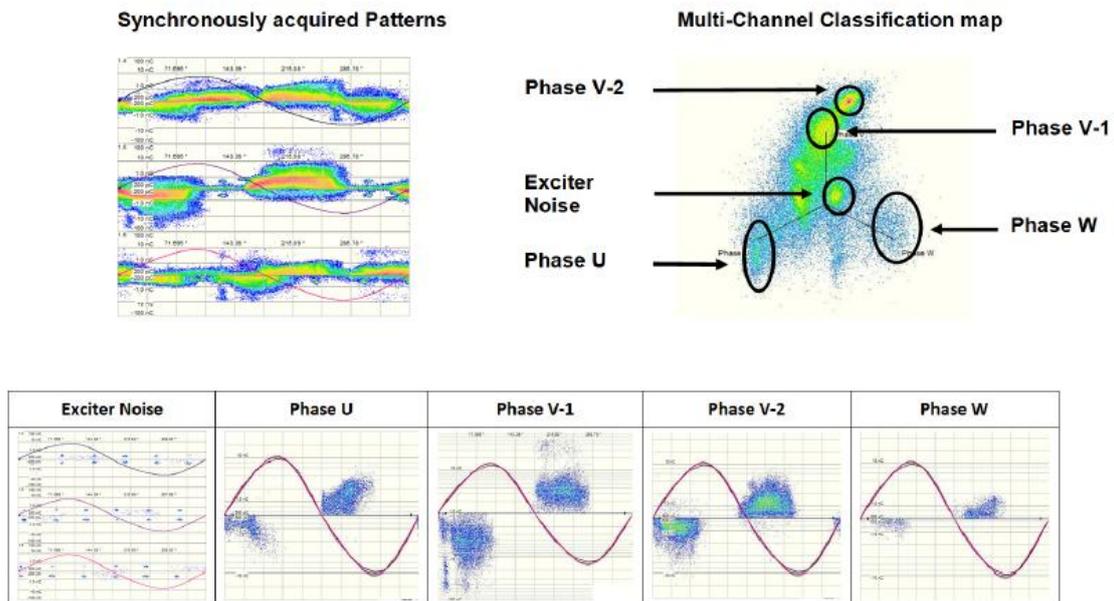


Imagen 4.4.- Sistema multi-espectral sincrónico.

#### 4.8.-Ensayos off-line.

Para las pruebas fuera de línea en los devanados, los niveles de ruido son generalmente bajos, y por lo tanto, es preferible que tales mediciones puedan hacerse a frecuencias inferiores a 500 kHz para mejorar la respuesta del sistema de detección de DP. La principal desventaja de las mediciones de DP sobre devanados a estas frecuencias, aparte de los problemas de resonancia se señaló, es la de superposición del pulso, la actividad de niveles altos de DP se podrá medir si la tasa de repetición de impulsos es comparable al ancho de banda del detector.

#### 4.9.- Ensayos on-line.

Si se pretende comparar los datos de DP para determinar la tendencia de la actividad de DP, las condiciones de funcionamiento necesitan estar dentro de los límites siguientes:

- Tensión  $\pm 1,5\%$  (por ejemplo,  $\pm 200$  V en el caso de una tensión nominal de 13,8 kV)
- Temperatura del devanado  $\pm 5$  °C
- Carga  $\pm 10\%$

#### 4.10.-Aplicación de la tensión de prueba en medidas "on.line".

Las mediciones de descargas parciales se puede realizar en una fase con todos los demás circuitos conectados a tierra. Alternativamente todas las fases pueden ser energizadas a la vez con el fin de eliminar el aislamiento de fase a fase. En el caso de mediciones de DP elaboradas a partir de un condensador de acoplamiento es común proceder mediante dos métodos:

##### *Método A :*

- a) Elevar la tensión a una velocidad de acuerdo con las recomendaciones del IEEE y determinar PDIV.
- b) Poner el devanado durante al menos un minuto a una tensión de 65% de 1000 V más dos veces la tensión fase a fase.
- c) Medición de la magnitud de los pulsos a diferentes tensiones.
- d) determinar PDEV.

##### *Método B:*

- a) Acondicionar el bobinado durante 5 o 15 minutos con la tensión máxima que será utilizada para las mediciones descargas parciales ( esta tensión puede ser la nominal de fase a tierra del devanado o la tensión nominal de fase a fase ) Tras el acondicionamiento se baja el voltaje a cero y se comienza a realizar las mediciones de DP.
- b) Aumentar la tensión a una velocidad de acuerdo con las recomendaciones del IEEE.
- c) Medir la magnitud de las DP a medida que se aumenta la tensión hasta la tensión nominal.
- d) Determinar PDEV.

## Capítulo 5.- Revisión de la guía IEC de 2012-2013.

### 5.1.- Naturaleza de las descargas parciales en máquinas rotativas.

Generalmente, las descargas parciales (DP) pueden desarrollarse en lugares donde las propiedades dieléctricas de los materiales aislantes no sean homogéneas. En esos lugares, la intensidad de campo eléctrico puede ser bastante alta. Las DP, en general, requieren un volumen de gas mínimo para que se produzcan, por ejemplo, en los huecos rellenos de gas existentes en el aislamiento.

Los sistemas de aislamiento de componentes de mica inorgánicos de los bobinados del estator, soportan bien la actividad de las DP. Sin embargo, dependiendo de la actividad de DP, también pueden dañar directamente otros sistemas de aislamiento y por lo tanto influir en el proceso de envejecimiento de la máquina. El tiempo hasta que se produzca un fallo no siempre está relacionado con los niveles de DP, sino que depende en gran medida de otros factores, por ejemplo la temperatura de funcionamiento, las vibraciones de barras, el grado de contaminación, etc.

La medición y el análisis del comportamiento de la máquina frente a las DP se puede utilizar de manera eficiente para el control de calidad de los nuevos devanados, los componentes del bobinado y para la detección precoz de las deficiencias del aislamiento. Las principales diferencias entre las mediciones on-line y off-line son debidas a una distribución de tensión diferente a lo largo del devanado y diversos efectos térmicos y mecánicos relacionados con la operación, como la vibración de bobinas.

Aunque los procesos de fabricación están diseñados para minimizar los huecos internos, inevitablemente, existen. Por ejemplo, en un sistema de aislamiento de cinta de mica impregnado en resina, que se utiliza comúnmente en las máquinas rotativas de alta tensión, la mica en el sistema de aislamiento evita que las descargas parciales causen el fallo de la máquina. Mientras los huecos internos sean pequeños no se pone en peligro la fiabilidad de operación. La deslaminación del aislamiento puede ser debida a fallos en los procesos de fabricación o por problemas mecánicos o térmicos y reducirá la conductividad térmica del aislamiento, lo que podría conducir a un envejecimiento acelerado. El ciclaje térmico puede causar deslaminación en la interfaz del conductor con el aislamiento principal. Este desgaste puede provocar descargas parciales que pueden producir fallos en bobinas multi-vueltas.

La arborescencia eléctrica (conocido en la bibliografía como “treeing”, fenómeno eléctrico previo a la ruptura dieléctrica de un materia aislante) puede comenzar localmente en cualquier punto dentro del aislamiento, como, por ejemplo, en estructuras ásperas del conductor interno, impurezas de aislamiento, huecos o deslaminaciones llenas de gas en el aislamiento.

Las descargas de ranura de alta tensión se dan cuando el revestimiento del conductor de una ranura se daña debido a las vibraciones, por ejemplo por una pérdida de presión del acañamiento debido al asentamiento, la erosión del material...

El arco eléctrico puede ocurrir debido a la interrupción de las corrientes resultantes de flujo magnético dentro del núcleo del estator. Para que se dé este arco eléctrico debe existir un campo eléctrico y unas temperaturas altas, lo que conduce a una degradación más rápida de los materiales de aislamiento. Los conductores rotos, resultantes de las vibraciones mecánicas, pueden dar lugar a contactos intermitentes y por consiguiente a la formación de un arco. Debido al campo magnético en el núcleo del estator, existen corrientes superficiales parásitas que fluyen axialmente a lo largo del revestimiento conductor de la barra de la ranura. En caso de que la barra vibre, estas corrientes cercanas al núcleo de la máquina pueden interrumpirse, de forma que se puede producir un arco hasta el mismo.

Existen otro tipo de descargas como las provocadas por la deslaminación interna, entre el conductor y el aislamiento, en cabeza de bobina o en huecos... Este tipos de descargas se explicarán más adelante ( apartado 5.8).

## 5.2.- El ruido y la perturbación.

El gran reto en las mediciones on-line es saber distinguir entre una DP y el ruido eléctrico. Para ello es necesario poder suprimir las fuentes de ruido o contar con un técnico especializado, ya que en caso contrario, la prueba perdería validez.

El ruido eléctrico es todo tipo de evento que provoca interferencias a la señal de los pulsos de DP procedentes del estator de la máquina. El ruido puede deberse a dispositivos electrónicos, transmisores de radio, teléfonos móviles... Estas fuentes de ruido se pueden separar fácilmente de señales de DP ya sea visualmente en una pantalla oscilográfica o con el uso de filtros.

Las perturbaciones son impulsos eléctricos de duración relativamente corta que pueden tener muchas de las características de los impulsos de DP del bobinado del estator, pero en realidad no son del estator. Algunas de estas perturbaciones están sincronizados con el ciclo de corriente alterna, y otras no lo están.

Ejemplos de perturbaciones sincronizadas:

- Los transitorios causados por equipos de electrónica de potencia.
- Conexiones eléctricas deficientes.
- Descargas parciales en otros aparatos conectados al motor/generador.
- Las chispas o arcos eléctricos en el motor/generador.

Ejemplos de perturbaciones no sincronizadas:

- El funcionamiento del colector de chispas en el rotor y la soldadura de arco.
- Provocadas por la barra de alimentación.
- Los transitorios causados por la electrónica de potencia.

### 5.2.1.- Separación de ruido en el dominio de la frecuencia.

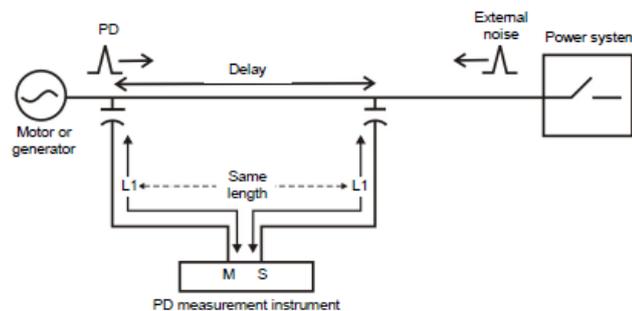
Las perturbaciones producen pulsos, y cada tipo se produce a una frecuencia determinada. Por ejemplo, las DP causados por contactos eléctricos deficientes o las DP en otros aparatos producen frecuencias de hasta unos pocos megahercios. Por lo tanto un método de separación de DP de las perturbaciones es utilizar electrónica analógica o filtros digitales que responden preferentemente a pulsos en rangos de frecuencia específicos. El sistema de medición de DP (sensor y la electrónica de detección) tiene una frecuencia de corte inferior y una frecuencia de corte superior. Los rangos de frecuencia típicos en ensayos en línea son alta frecuencia (“High-frequency”, HF: 3 MHz a 30 MHz), rango de frecuencia muy alta (“Very High Frequency”, VHF: 30 MHz a 300 MHz), o en el rango de frecuencia ultra alta (“Ultra High Frequency”, UHF: 300 MHz a 3 GHz). Generalmente, cuanto mayor es la frecuencia de corte superior del sistema de detección DP, mayor será la relación señal -ruido ( SNR = "signal to noise" ratio, es el cociente entre la amplitud de las señales a detectar y las de ruido), y por lo tanto menor será el riesgo de falsas indicaciones. Sin embargo, cuanto mayor es la frecuencia de corte inferior, entonces es menor la probabilidad de ser detectada la DP, especialmente si su fuente está lejos del sensor.

### 5.2.2.- Técnicas de separación del ruido

El ruido eléctrico se puede separar de las DP mediante técnicas basadas en el análisis de pulsos en el dominio del tiempo, para lo cual hay dos estrategias:

1. Análisis de la forma de los impulsos. Se basa en las características del pulso de dominio de tiempo específicos tales como el tiempo de subida (“rise time”) y tiempo de decaimiento (“decay-time”).
2. Tiempo de llegada de los impulsos. Se basa en los tiempos de llegada de los impulsos a los sensores colocados por fase, según el tiempo de llegada podremos distinguir si se trata de ruido eléctrico o de DP ( ver figura 5.1).

Ambos tipos sólo se pueden utilizar con un sistema de detección de gran ancho de banda.



**Imagen 5.1.- Análisis del tiempo de llegada de los impulsos.**

Se puede distinguir el ruido eléctrico combinando los dominios de tiempo y frecuencia o reconocimiento de patrones. En ambos dominios podemos separar los pulsos por su forma,

lo que puede quedar reflejado en los mapas "TF", donde se representa el tiempo equivalente de los pulsos frente su contenido en frecuencia equivalente, esto también es mencionado en la norma IEEE 1434, 2014.

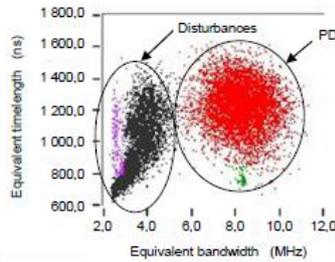


Imagen 5.2- Mapa tiempo- frecuencia.

### 5.3.- Técnicas e instrumentos de medición

Esta norma se ocupa de la medición de DPs para evaluar el estado del devanado de las máquinas rotativas de alta tensión. Estas mediciones pueden llevarse a cabo mediante el uso de sensores de detección de DPs.

Los fenómenos de propagación de impulsos de DP deben ser considerados. Debido a la atenuación, distorsión, la reflexión y el acoplamiento cruzado de señales de ondas que viajan por el estator, la forma y la magnitud de la señal DP que queda registrada en el sensor de DP instalado difiere de las que tendría en aquellos puntos donde se originan. Con esto en mente, los siguientes puntos son muy importantes para la medición y la posterior interpretación de las mediciones DP tomadas en máquinas rotativas:

- La función de transmisión de la fuente de DP para el sensor de detección de DP es desconocida y depende del diseño específico de la máquina que determina la respuesta en frecuencia del devanado del estator.
- Los componentes de muy alta frecuencia de las señales de DP están sujetos a una considerable atenuación cuando viajan a través del devanado y, dependiendo del origen de la DP, podrían no ser detectables en ciertas ubicaciones del sensor de DP.

La siguiente Figura muestra gráficamente la respuesta en frecuencia de un pulso DP ideal generado originalmente en el devanado (fuPDo frecuencia superior de corte) y la respuesta en frecuencia ideal del mismo pulso medido en los terminales de la máquina (fuPDt frecuencia superior de corte) después de viajar desde la fuente de DP a través del devanado hacia sus terminales. Debido a la considerable atenuación de los componentes de muy alta frecuencia, la frecuencia de corte superior de la señal de DP que llega a los terminales (fuPDt) será significativamente menor que la del pulso original de DP (fuPDo). El sistema de medición de DP, incluyendo el sensor, cables de medición y el instrumento de medición, tiene un filtro

que tiene frecuencias de corte inferior y superior específicas, dependiendo principalmente del diseño del sensor de DP y la impedancia de entrada del dispositivo de medición. En la Figura hay tres ejemplos a), b) y c) que muestran diferentes respuestas en frecuencia de los sistemas de medición DP. Para los sistemas disponibles en el mercado, el ancho de banda de medición puede variar en un amplio rango de frecuencias. Es importante recalcar que las curvas que aparecen en las figuras son ideales ya que se podrían ver alteradas según el tipo de devanado y su disposición, los cables de conexión ...

a) En la baja frecuencia (LF) cubre un ancho de banda típico de aproximadamente 1 MHz, se utiliza con frecuencias de corte inferiores normalmente por encima de 100 kHz y frecuencias superiores de corte por debajo de 3 MHz. La medición en ese rango de frecuencia asegura buena sensibilidad no sólo para descargas parciales en barras / bobinas cerca del sensor de DP sino también para aquellas que se originan más lejos, en el bobinado. Sin embargo, se necesitan procedimientos especiales para la separación del ruido. Al abarcarse el espectro de la señal a medir, existe, en principio, una relación de proporcionalidad directa entre carga aparente y magnitud medida; esto podría permitir, en principio, comparar magnitudes de medida de DP de máquinas similares.

b) En la alta frecuencia (HF) el ancho de banda varía de 3 MHz a 30 MHz. Las frecuencias de corte más bajas se pueden situar por debajo de 1 MHz para asegurar una buena sensibilidad en todo el bobinado. Es menos susceptible al ruido que el anterior. Estos sistemas ya no proporcionan proporcionalidad directa entre carga aparente y magnitud medida.

c) En la muy alta frecuencia (VHF) cubre un ancho de banda típico de unos pocos cientos de MHz, utilizando frecuencias de corte más bajas de 30 MHz y frecuencias de corte superiores hasta el rango de los 300 MHz. Asegura una buena sensibilidad a señales que se originan más cerca del sensor DP. El sensor de DP se debe instalar en los terminales de alta tensión y por lo tanto cerca de las bobinas / barras que experimentan la tensión eléctrica más alta dentro de la bobina. Generalmente ofrecen mejor relación señal-ruido. Al ofrecer una mejor resolución temporal, permiten poder aplicar mejor técnicas de separación de ruido como las explicadas en las secciones 5.2.1-5.2.2.

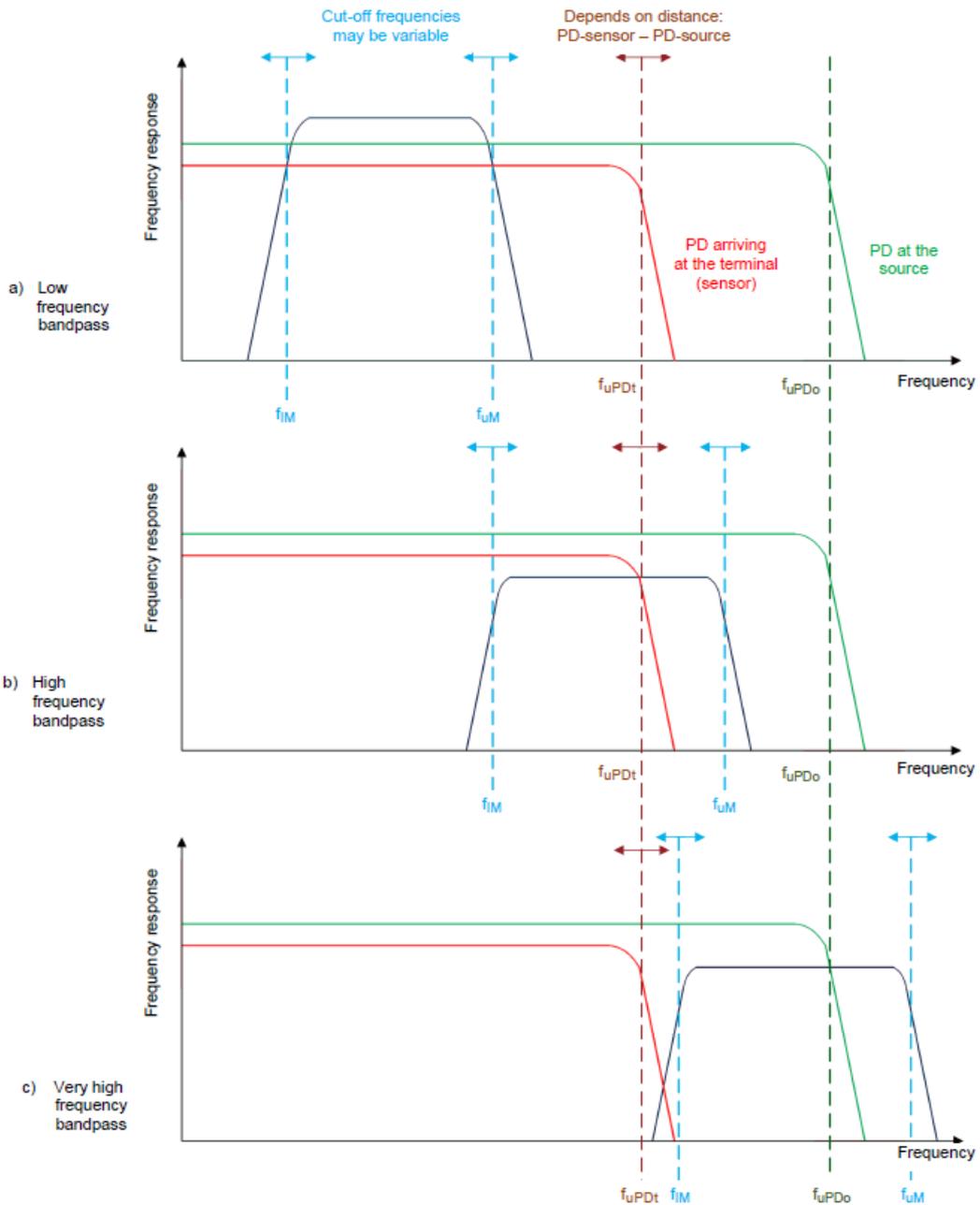


Imagen 5.3.- Respuesta en frecuencia de un pulso de DP.

### 5.3.1.- Sensores

Las DP también pueden ser detectadas por las señales de pulso electromagnéticamente emitidas desde la fuente de DP. Dicha señal de pulso se atenúa debido a diversos efectos de los componentes de la máquina, por lo que la ubicación de la antena, la distancia a la fuente de DP y el ancho de banda del sistema de detección son parámetros muy importantes para la detección de DP.

Muchos de los sensores poseen un condensador en alta tensión ( como un condensador de acoplamiento o de aumento) y un dispositivo de acoplamiento de baja tensión en serie (como un transformador de corriente). Los sensores de DP que actúan como antenas generalmente están diseñados para trabajar en los rangos muy altos de frecuencia ver capítulo 3. Estos sensores deben ser instalados lo más cerca posible del devanado, que es la zona más expuesta a la actividad de las DP.

Los sensores de DP se instalan, generalmente, de forma permanente en la máquina. Es importante que ningún sensor cause problemas en el estator. Los sensores inductivos no suponen ningún riesgo ya que están conectados en los cables de alimentación o en los condensadores de sobretensión; lo mismo ocurre con las antenas ( conectados en la carcasa de la máquina) tampoco los acopladores de ranura (SSC) (ver capítulo 3 ) del estator suponen peligro al estator. Sin embargo, los condensadores conectados al lado de alta tensión del devanado sí pueden ocasionar algún problema, por lo que los sensores capacitivos deben:

- Tener una PDEV superior dos veces a la tensión de la fase de servicio.
- Soportar las pruebas de sobretensión que se realizan, como mínimo, a la tensión del estator.
- Haber sido sometidos a la prueba de tensión soportada de 2,17 veces la de línea nominal de la máquina y no fallar en 400 horas.
- Tener un bajo factor de disipación con temperaturas hasta la máxima de funcionamiento del estator, verificado por las pruebas pertinentes.

Las señales eléctricas de los sensores descritos anteriormente pueden medirse y registrarse utilizando diversos dispositivos de medición. Se recomienda la utilización de dispositivos que nos proporcionen la variación de la magnitud del pulso, de la fase y su patrón. Estos dispositivos de medición de DP están compuestos:

- Un amplificador de entrada y un filtro de frecuencia.
- Unidad de procesamiento de señal.
- Supresión del ruido.
- Visualización y sincronización de fase.

### 5.3.2.- Parámetros de medición de DP.

Varios parámetros de medición DP se pueden utilizar para la visualización, el análisis y la interpretación de las mediciones en línea. Con el fin de ser capaz de evaluar el estado actual del aislamiento del devanado del estator.

Para evaluar el comportamiento de las DP se debe medir la magnitud de las DP. La magnitud de un pulso de DP puede ser expresada en términos de voltaje [mV] o en términos de carga [nC], dependiendo del rango de frecuencia característica del sistema de medición DP. La conversión directa de una a otra no es posible debido a la deformación de cada pulso a través de los posibles diferentes caminos que hay entre emplazamiento de la DP y sensor. La magnitud de un pulso de DP depende de las características del instrumento de medición:

- En la mayoría de los instrumentos digitales de DP, cuando se detecta el pulso, hay un "tiempo muerto" durante el cual el instrumento no responderá a nuevos impulsos que aparezcan en la entrada. Se necesita el tiempo muerto para digitalizar el pulso y determinar sus características. Los Pulsos que aparezcan durante este intervalo, no serán registrados, aunque fueran de gran magnitud.
- En la mayoría de los instrumentos de DP digitales hay un umbral por debajo del cual no se detectarán pulsos. Esto es normalmente para evitar la activación del instrumento innecesariamente. Si el umbral inferior es demasiado bajo, el instrumento de DP se activará de manera casi continua, y el tiempo muerto asociado evitará el registro de los datos de las DP. Por el contrario, el establecimiento del umbral inferior demasiado alto significa que las DP por debajo del umbral inferior no serán detectadas.
- Los instrumentos que operan en rangos de baja y alta frecuencia pueden captar una magnitud de DP superior a la real. Esto se debe a que se pueden producir dos pulsos de DP en un tiempo lo suficiente corto para que el primer pulso no haya decaído a cero. Esto puede conducir a la superposición de los dos pulsos.
- El rango de magnitud de los equipos digitales de grabación de DP, se segmenta en ventanas. Por ejemplo, si el instrumento puede medir en el rango de 0 a 1 000 mV, y hay 100 ventanas de magnitud, cada ventana corresponde a una magnitud de 10 mV.

### 5.3.3.-Instalación

Los componentes para la medición de DP en línea pueden ser instalados en diferentes puntos. Dependiendo de la extensión de la instalación se pueden realizar mediciones periódicas o continuas de DP.

Para la instalación, puesta en servicio, operación y mantenimiento de los sensores de DP y su conexión, el proveedor del sensor debe proporcionar la documentación adecuada. La Instalación y puesta en marcha deben ser realizados por personas expertas únicamente.

Si un componente adicional está conectado entre la alta tensión y tierra se debe tomar las máximas medidas de seguridad para que no se produzca ningún fallo eléctrico. Los sensores de DP deben soportar las condiciones normales de funcionamiento en su lugar de instalación. Las partes metálicas deben ser de material no magnético para evitar el calentamiento por los efectos del campo magnético.

Para cada fase de la máquina, se recomienda instalar, al menos, un sensor DP, que debe ser colocado lo más cerca posible del estator. Opcionalmente un sensor DP puede ser conectado al neutro de la máquina. En cada fase puede haber un segundo sensor DP que puede ser instalado a cierta distancia de los terminales para recopilar información de los pulsos.

Para la posición, el montaje y la conexión de los Sensores de DP las siguientes consideraciones son importantes:

- El sensor de DP y sus cables de conexión no deberán comprometer la fiabilidad del aislamiento de la máquina.

- EL sensor debe soportar todas las condiciones operativas, como la temperatura, las vibraciones y los transitorios de corto circuito.
- Los sensores que están conectados directamente a alta tensión no se deben ubicar en un medioambiente con contaminación y humedad excesiva.
- Los sensores y sus cables de conexión no deben producir descargas parciales.
- Las conexiones con el potencial de alta tensión y al potencial de tierra deben ser lo más cortas posible y de baja inductancia parásita. A veces conviene blindar electromagnéticamente estos cables. La estabilidad mecánica de las conexiones se debe mantener.

Los lugares donde están instalados los sensores tienen numerosas restricciones de acceso debido a las medidas de seguridad y salud, por lo que es necesario tener un acceso exterior (con una tensión reducida y segura de acuerdo con las normas y reglamentaciones técnicas) a los sensores de DP donde un operario pueda conectar y desconectar el sensor cuando la máquina este en funcionamiento sin ningún riesgo para el equipo y el personal (para ello se requiere el uso de protectores de sobretensión). Cuando la máquina esté o no funcionando es fundamental que se pueda tener acceso a los sensores para realizar actividades de mantenimiento o de reemplazo del dispositivo. Además, una conexión de comunicación puede ser necesaria entre el dispositivo de medición DP y un ordenador que transfiere información de control, así como datos de DP. Por ejemplo, varios dispositivos de medición de DP en una planta de energía, uno para cada máquina, podrían estar conectados a través de una red de datos a un ordenador central que permite la observación y el análisis de la actividad de las DP's en todas las máquinas del lugar.

Además de los datos de la DP, los datos operativos de la máquina deben ser adquiridos y almacenados. Los datos operacionales, tales como la potencia activa, potencia reactiva, temperaturas, tensión del estator y la humedad del gas de refrigeración son de importancia para la evaluación del sistema de devanado del estator basado en la interpretación de datos de las descargas.

#### [5.4.- Normalización de las mediciones y evaluación de la sensibilidad del sistema.](#)

La calibración de medidas no es posible debido a la propagación del pulso, la resonancia y el acoplamiento cruzado mutuo en devanados de la máquina... No obstante, en los sistemas de baja frecuencia, se ha detectado que las amplitudes de DP tienen rangos similares para máquinas de igual tensión nominal y tecnología de aislamiento. Debido a la amplia variedad de rangos de frecuencia utilizados por los sistemas de medición de DP, se necesitan dos procedimientos de normalización para diferentes sistemas.

##### [5.4.1.- Sistemas de baja frecuencia](#)

La normalización del circuito de prueba puede facilitar las comparaciones entre mediciones de máquinas con diseño similar. La normalización del circuito de prueba debe

realizarse mediante la inyección de pulsos de corriente de magnitud conocida y corta duración por medio de un generador de impulsos de referencia. El procedimiento de normalización sólo puede llevarse a cabo fuera de línea.

Este proceso tiene las siguientes limitaciones:

- La normalización no define la función de transferencia de la descarga, ya que ésta depende, del diseño del bobinado y de donde estén los sensores instalados y las fuentes de descarga.
- La normalización en los terminales de la máquina no representa adecuadamente los impulsos de DP que se producen en lugares desconocidos en el devanado del estator. Por tanto, el proceso no aporta datos absolutos sobre la calidad del aislante.
- La normalización no proporciona un punto de referencia absoluto para comparar directamente diferentes máquinas. Sin embargo, la normalización aumenta la comparabilidad de los resultados de las DP's entre las máquinas, al menos, en términos de órdenes de magnitud.
- El generador de impulsos debe crear un espectro en frecuencia constante para todo el rango de medición de la instrumentación.

El procedimiento de normalización se debe realizar de la siguiente manera:

a) Todas las conexiones entre la máquina y el transformador,( Elevador y/reductor de tensiones) se cerrarán.

b) Los terminales de la máquina no deberán estar conectados a tierra.

c) la conexión del neutro deberá estar cerrada y conectada a tierra a través de un enlace directo o impedancia de puesta a tierra (igual que durante la operación).

d) Si los condensadores de sobretensión se instalan en la máquina, éstos deberán permanecer conectados.

e) El generador de impulsos de referencia debe ser conectado lo más cerca posible a los terminales.

f) Realizar la medición de normalización.

g) Se recomienda llevar a cabo, al menos, una medición con el generador de impulsos desconectado para verificar la normalización y para verificar el ruido base que pueda haber.

h) Para verificar la simetría de todas las fases y los sensores instalados DP, se recomienda realizar una normalización en todas las fases por separado. Se debe grabar el cociente entre mV detectados y pC inyectados.

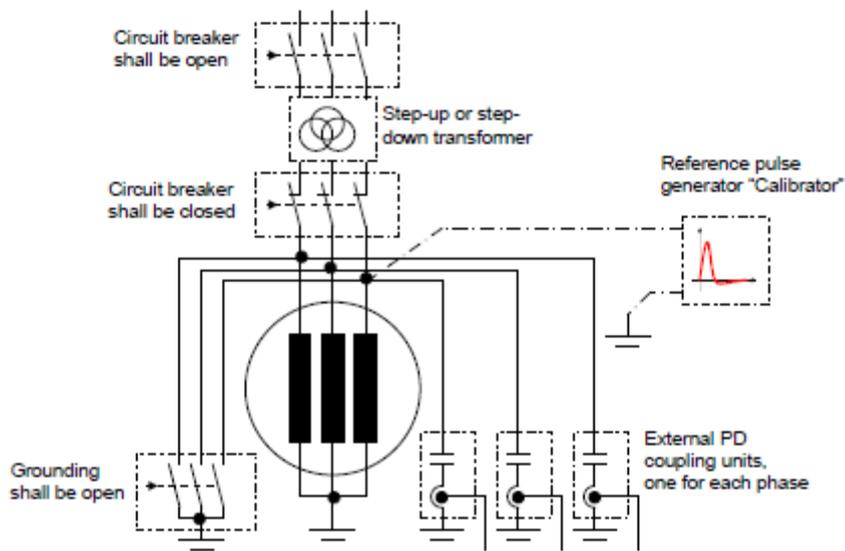


Imagen 5.4.- Circuito de prueba para normalización en baja frecuencia

#### 5.4.2. Sistemas de alta frecuencia (HF/VHF)

La sensibilidad se comprueba realizando inyecciones de impulsos de tensión al punto más próximo del aislamiento, que suele ser el terminal accesible.

El generador de impulsos genera un impulso de tensión rectangular que tiene una tensión de pico de  $V_g$  y una resistencia interna de  $R_g$  en serie. El tiempo de subida de este generador debe ser inferior a  $1/f$ , donde  $f$  es la frecuencia superior de corte del sistema de detección.  $C_w$  representado, en la figura 5.5, es la capacidad equivalente del devanado. El tiempo de frente de onda del pulso ( $t_R$  "rise time") deberá ser más largo que el tiempo de respuesta del sistema de detección (el tiempo necesario para que el sistema recupere su estado inicial después de haber sido excitado por un impulso).

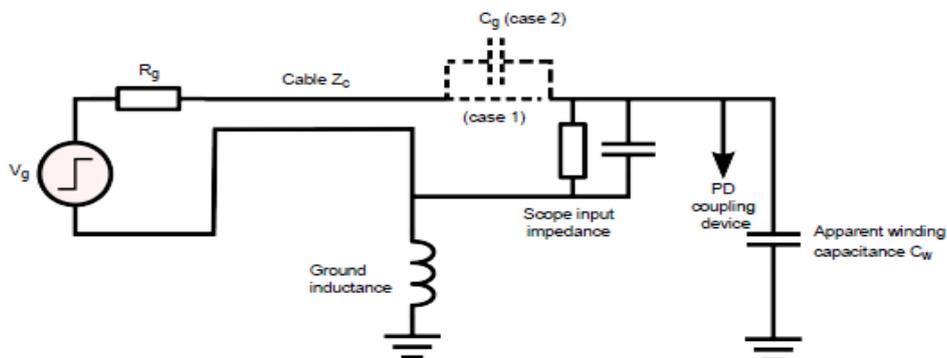


Imagen 5.5.- Sistema de medición de HF

Existen dos condiciones de ensayo:

Caso 1) La constante de tiempo  $R_g C_w$  es inferior a  $t_R / 3$ : la salida del generador de impulsos está conectado directamente al terminal.

Caso 2) La constante de tiempo  $R_g C_w$  es más que  $t_R / 3$ : un condensador  $C_G$  se conecta directamente en el terminal en serie con el generador de impulsos. Este condensador se elegirá para obtener una constante de tiempo resultante de menos de  $TR / 3$ . La constante de tiempo resultante es  $R_g \cdot \frac{C_g \cdot C_v}{C_g + C_v}$ .

El procedimiento de verificación de la sensibilidad sólo se puede realizar fuera de línea, a menos que se utiliza un condensador especial de inyección de alta tensión. El pulso de voltaje tiene que ser medido directamente en el terminal usando un osciloscopio.

El nivel de sensibilidad (mV) del sistema, es el mínimo voltaje de cresta del generador que sea detectable por encima del límite del ruido eléctrico. El límite de ruido verdadero puede ser difícil de determinar ya que es producido mientras el generador opera. Para verificar la simetría de todas las fases instaladas y dispositivos de acoplamiento, se recomienda realizar una comprobación de la sensibilidad en todas las fases por separado, especialmente en las máquinas de gran tamaño.

### 5.5.- Procedimientos de medición

Las mediciones On-line de DP en máquinas rotativas se puede hacer de forma periódica durante el funcionamiento normal de la máquina, con un dispositivo de medición DP conectado temporalmente a los sensores a través de un punto de acceso adecuado. Como alternativa, la monitorización continua con la máquina en línea también se puede realizar con un dispositivo medidor de DP permanentemente instalado y las conexiones de comunicación apropiadas para ambos métodos. En ambos casos, se recomienda llevar a cabo una medida de referencia inicial que puede ser utilizada como referencia para mediciones futuras y para el análisis de tendencias.

Uno de los aspectos más importantes de todos los procedimientos en línea de medición es el registro de las condiciones de funcionamiento de la máquina mientras se detectan los datos DP. Tal y como ya se explicó en el capítulo 3 ([IEEE 1434, 2000]), la influencia de las condiciones de funcionamiento de la máquina en los resultados de medición es a menudo crítico en el análisis posterior de los datos y la determinación de fuentes de DP. Por lo tanto, se recomienda grabar, en especial, los siguientes parámetros de funcionamiento durante cada prueba de DP en línea:

- Corriente del estator y la tensión.
- Activa y potencia reactiva.
- Temperatura del bobinado medida en las ranuras con RTDs.
- Temperatura y presión del gas refrigerante.

- La temperatura del agua de refrigeración para estatores con refrigeración directa de agua.
- La humedad.

Los parámetros de funcionamiento se deben registrar de forma simultánea a los datos de la DP y se almacenan con la misma escala de tiempo en el mismo dispositivo de grabación para asegurar la correlación correcta de los datos y por lo tanto una interpretación correcta del comportamiento de las DP'S.

En primer lugar, se realiza medidas básicas de la actividad de las DP con el fin de poder comparar futuras mediciones. Esta primera medida es mejor realizarla cuando el estator es nuevo, en cambio, es a las 5000 o 10000 horas de funcionamiento de un devanado nuevo cuando se normaliza la actividad de las DP, ya que por un efecto de condicionamiento, ésta actividad baja durante esas primeras horas de operación.

Las lecturas obtenidas de las DP deben ser tomadas bajo unos niveles de carga y temperaturas distintos. La variación de carga proporciona datos importantes para el análisis de la actividad de las DP. Las condiciones de carga y temperatura deben irse modificando de acuerdo con la siguiente figura. Dependiendo de la máquina, se puede iniciar con un aumento de carga en el punto 1 o con un decremento en el punto 3. Las medidas tras variación de carga (estado 2 y 5) se deben tomar de forma inmediata, mientras que las que caracterizan el cambio de la temperatura (1, 3 y 4) no, ya que se requiere que ésta se estabilice para poder estudiar la actividad de las DP.

Para tener estimaciones lo más realistas posible, los cambios de carga deben ser de, al menos, el 50% de la nominal. Este ciclo completo solamente debe cubrirse si en la máquina se han detectado niveles anómalos de DP. Si no se pudiera cambiar la potencia activa generada, al menos se debería poder medir con cambios en la reactiva.

Si se pudieran hacer medidas previas a la sincronización de un alternador a red, podrían ser muy relevantes para detectar mecanismos de degradación.

La comparación con medidas en fechas anteriores, se debe hacer para cargas y temperaturas que no cambien en más de un 10%.

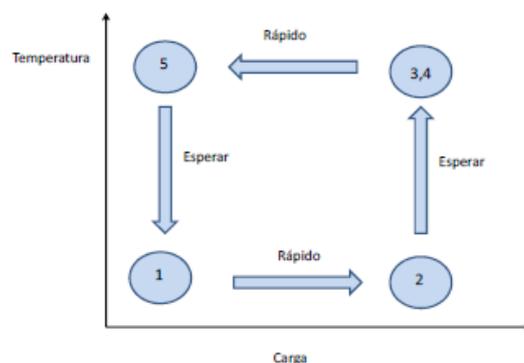


Imagen 5.6- Análisis de mediciones

En el caso de las mediciones periódicas, la frecuencia de éstas dependerá del estado de la máquina, antigüedad, si ha tenido a lo largo de su vida muchos fallos... aunque la frecuencia suele ser de una o dos veces al año.

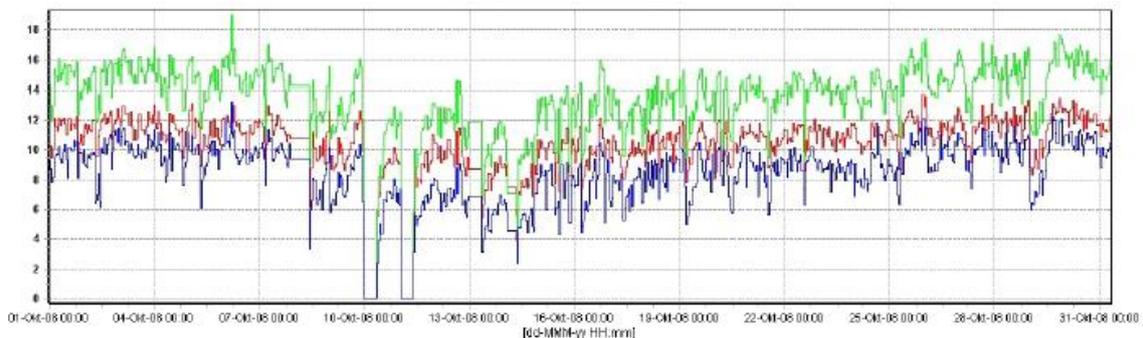
Las medidas de monitorización continua son capaces de detectar tendencias anómalas mejor que las periódicas, pero su análisis requiere del tratamiento de grandes cantidades de datos que deben ser filtrados adecuadamente.

## 5.6.- Visualización de mediciones.

Es normal que a lo largo de la vida de una máquina rotativa se vayan produciendo daños en el sistema de aislamiento y por lo tanto aumente el riesgo de que se produzca algún fallo. Para evitarlo, es importante localizar e interpretar el tipo de fuente de DP, para lo que existen varios tipos de procesos de visualización.

### 5.6.1.- Medidas de tendencia.

En el caso de las mediciones con la máquina en funcionamiento es de utilidad visualizar el comportamiento de las DP durante un periodo de tiempo largo y así poder determinar parámetros característicos de la DP, como su magnitud, número de descargas por ciclo, NQN....



**Imagen 5.7.- DP a lo largo del tiempo.**

Al utilizar dispositivos digitales para la medición de las DP podemos visualizar los resultados a posteriori y poder sacar conclusiones más certeras. El número de DP que se podrán detectar dependerá, tal y como se ha comentado anteriormente, de la configuración de los dispositivos digitales (ancho de banda, nivel de disparo....).

Es importante poder interpretar las tendencias con el tiempo de la actividad de las DP en la máquina, para lo cual, hay que tener claros cambios en otros parámetros como la temperatura del devanado, la humedad del ambiente, la corriente de excitación, la corriente del estator, el factor de potencia... Todos estos parámetros pueden proporcionarnos información sobre algún fallo en el futuro o sobre la magnitud de las DP.

### 5.6.2.- La visualización de los patrones de las DP.

Es otra herramienta de importancia, ya que permiten obtener información sobre las fuentes de las DP.

Una forma que se recomienda para caracterizar la actividad de descargas parciales es la representación  $\Phi$ -q-n en el que la magnitud de la DP está en el eje de de ordenadas y la fase  $\Phi$  en el eje de abscisas. La frecuencia de ocurrencia de cada magnitud y fase (n) debe ser visualizada mediante el código de colores (cuya escala está situada a la derecha de la figura siguiente).

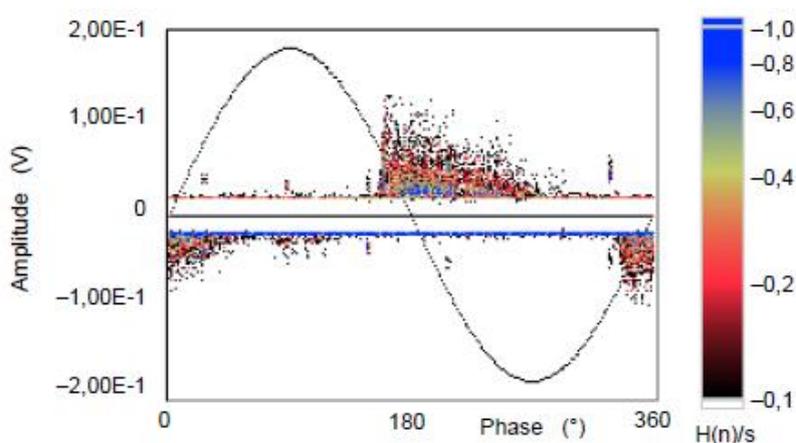


Imagen 5.8.-modelo  $\Phi$ -q-n

También se pueden visualizar, simultáneamente, las tres fases desplazadas, para poder identificar de manera eficiente las descargas parciales fase a fase del devanado (descargas en cabeza de bobina), y el efecto de señales de acoplamiento cruzado entre las diferentes fases.

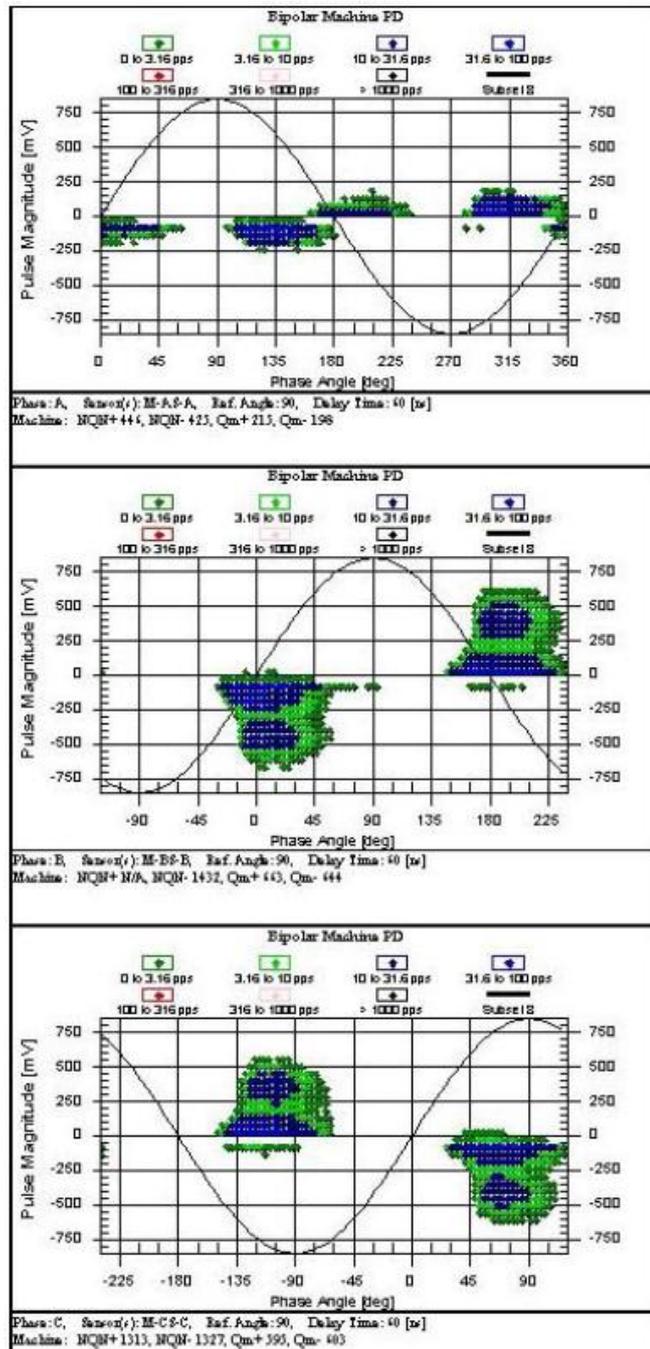


Imagen 5.9- Visualización de la actividad de DP en las tres fases

## 5.7.- Interpretación de las mediciones en línea

La interpretación de los resultados de los ensayos en línea para caracterizar la actividad de las DP se realiza siempre comparando con una medida antigua.

Generalmente no es posible especificar un nivel de DP a partir el cual exista el riesgo de fallo del sistema de aislamiento.

La interpretación de los resultados es posible mediante el uso de diversas fuentes de información, que no sólo contemplan los resultados de las DP en línea, sino también conocimientos de diseño de la máquina, el historial de mantenimiento, inspecciones visuales, diferentes pruebas fuera de línea, condiciones de funcionamiento y conocimientos técnicos adecuados.

Es fundamental para la planificación del mantenimiento saber si hay problemas de aislamiento, esto se sabe, controlando la actividad de las DP. Si es así, entonces la fuente específica de la actividad de DP necesita ser localizada. Dado que el deterioro, y por lo tanto el riesgo de fallo de aislamiento, depende del tipo de descargas parciales, es fundamental contar con una buena información sobre el tipo y ubicación de la fuente de DP.

### 5.7.1.- Interpretación de tendencias.

Como se ha indicado anteriormente, es posible detectar fallos incipientes a través de un análisis preliminar de ciertos parámetros básicos con respecto al tiempo de operación.

En las máquinas nuevas es esencial guardar una primera medición de la actividad DP para utilizarla para la comparación con el control regular o continuo de DP.

Por ejemplo si el parámetro a estudiar fuera la magnitud, se obtendrían datos interesantes para:

- La tendencia del cambio de magnitud en la misma máquina y con el mismo sistema de medición.
- Comparar la magnitud entre las diferentes fases de la máquina utilizando el mismo sistema de medición.
- Comparar la tendencia de la magnitud de las DP con una máquina del mismo tipo y mismo diseño y con el mismo sistema de medición.

Se estima que si la máxima descarga detectada ( $Q_m$ ) se dobla entre varias medidas (en un año), se ha producido un deterioro importante de la máquina, y son necesarias más medidas para establecer el alcance del daño.

En general, es más significativo estudiar la tendencia de varios parámetros de las descargas al mismo tiempo para obtener información adicional del comportamiento de las DP's.

Se debe tener en cuenta algunos factores a la hora de estudiar la tendencia de las DP a lo largo del tiempo:

- Un estator nuevo puede tener DP relativamente altas pero que van disminuyendo después de 5000 a 10000 horas de funcionamiento.
- En el caso de que la medida de referencia en un bobinado sea relativamente más alta en comparación con otras máquinas, el usuario puede reclamárselo al fabricante.
- El comportamiento DP puede verse afectado por las condiciones de funcionamiento de la máquina, como, por ejemplo, el bobinado y la temperatura central, la carga, la temperatura del gas de refrigeración o de las condiciones ambientales. Las variaciones en la DP como resultado de las condiciones de funcionamiento se deben considerar y habrá que diferenciarlas de las causadas por el envejecimiento progresivo del sistema de aislamiento, para establecer una evaluación precisa de la tendencia de PD.
- La identificación de fuentes de DP se hará con los patrones PRPD.
- El análisis de tendencia más fiable, se hace sobre fuentes individuales de DP, por lo que la identificación previa de fuentes es necesaria.
- Una reducción en el estudio de tendencia no indica ningún tipo de regeneración del aislamiento.

#### 5.7.2.- Interpretación de patrones de descargas.

Con el fin de evaluar el estado del devanado del estator durante la monitorización continua o mediciones periódicas se debe identificar la actividad de las DP, para lo cual se utilizan los diagramas  $\phi -q-n$ . Esto permite estudiar por separado cada fuente de DP ( su ubicación, tipo...) además de ser capaces de evaluar el riesgo que supone cada una de las DP para el sistema de aislamiento.

Poder separar las diferentes fuentes de toda aquella señal que dificulte la lectura de los pulsos de DP nos permite:

- Identificar la fuente predominante de DP.
- Observar el comportamiento (tendencia) de cada fuente de DP.
- Proporcionar información de la ubicación de las distintas fuentes de DP.
- Con los datos anteriores, evaluar o predecir cómo va a soportar el sistema de aislamiento la actividad de DP.

Con estos patrones se pueden realizar las comparaciones mencionadas anteriormente:

- La tendencia en la misma máquina y con el mismo sistema de medición.
- Comparar entre las diferentes fases de la máquina utilizando el mismo sistema de medición.

- Comparar la tendencia de las DP con una máquina del mismo tipo y mismo diseño y con el mismo sistema de medición.

### 5.7.3.- Efecto de las condiciones de operación de la máquina.

Tal y como se ha explicado anteriormente, existen diferentes factores de funcionamiento de la máquina que influyen en el comportamiento de las DP:

a) las condiciones de carga: El grado de carga de la máquina viene determinado por la potencia activa y reactiva que dependen de la corriente del estator, la tensión del estator y el factor de potencia. Estos parámetros determinarán el estado del bobinado y su temperatura, así como los esfuerzos eléctricos y mecánicos en el sistema de aislamiento.

b) El modo de funcionamiento de la máquina: El modo de funcionamiento de una máquina puede influir en el envejecimiento del sistema de aislamiento debido a los esfuerzos mecánicos y las altas temperaturas.

c) Sistema de refrigeración: Dependiendo de la potencia nominal de la máquina se utilizan diferentes sistemas de refrigeración. El devanado del estator puede ser refrigerado por aire, hidrógeno o agua.

d) Condiciones ambientales: Los principales factores ambientales que influyen en el comportamiento de DP de la máquina son la humedad y la contaminación.

Las variaciones que sufren las DP con respecto a estos parámetros operativos pueden ayudar a identificar la fuente de DP y la gravedad que pueda ocasionar.

- Cambiar con la carga: Cuando la temperatura y la tensión se mantienen constantes, pero se modifica la carga y aumenta la magnitud de las DP, esto indica que se ha soltado parte del bobinado debido a las fuerzas electrodinámicas, lo que debe ser subsanado rápidamente para evitar el deterioro del aislamiento.

-Cambie con factor de potencia: Cuando la temperatura y la tensión se mantienen constantes, un cambio en el factor de potencia permite distinguir entre DP causadas por altos campos eléctricos o producidas por arcos eléctricos debido a fuerzas electrodinámicas. Estos últimos producen descargas parciales desfasadas en el patrón PRPD.

-Cambie con la temperatura: Cuando la carga y la tensión se mantienen constantes, un cambio en la magnitud de las DP se puede producir al aumentar y disminuir la temperatura. Esto puede ser una señal de que se hayan producido deslaminaciones en el aislamiento o descargas de ranura.

- Cambiar la presión de gas: En el caso de las máquinas refrigeradas por hidrógeno podemos realizar mediciones a diferentes presiones para poder identificar las fuentes de DP. Si hay un aumento de la actividad de DP cuando la presión cae, significa que la DP se está produciendo dentro del generador (siguiendo la Ley de Paschen, la rigidez dieléctrica baja). Las

descargas superficiales serán especialmente sensibles a este cambio. El ensayo puede dar problemas a máquinas muy envejecidas.

- Cambiar con la humedad: La humedad del gas de refrigeración que rodea al estator influirá en el comportamiento de descargas superficiales.

### 5.8.- Ensayos de las PRPDs.

Todas estas mediciones se realizaron en el laboratorio por lo que las condiciones en las cuales se realizaron las mediciones están bien claras. Se tomaron medidas para que existiese el menor ruido posible. Estos patrones se muestran por ser las fuentes de DP's más habituales en grandes máquinas rotativas de Alta Tensión, pero puede haber otras y estos patrones no siempre son tan claros como se destaca aquí, entre otras cosas, porque el ruido y varias fuentes simultáneas, pueden superponerse.

Las siguientes figuras muestran algunos ejemplos de patrones de DP, que por lo general se pueden dar en los defectos del bobinado. Estos patrones, en la práctica pueden verse diferentes, ya que, pueden verse alterados por otros factores.

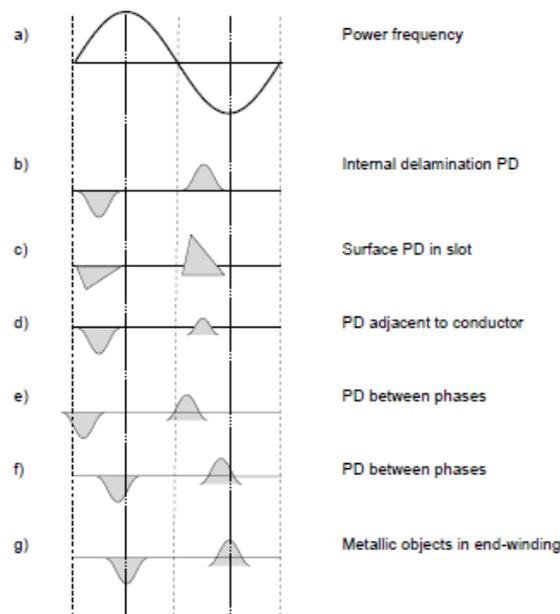


Imagen 5.10.- Ejemplo de algunos patrones de DP.

### 5.8.1.- Descargas internas:

Este tipo de descargas se generan en pequeños huecos de aire dentro del aislamiento. En la figura 5.11 podemos ver que la principal característica del patrón resultante es la simetría entre los PDs positivos y negativos, combinado con una forma redondeada. Estas descargas no indican envejecimiento.

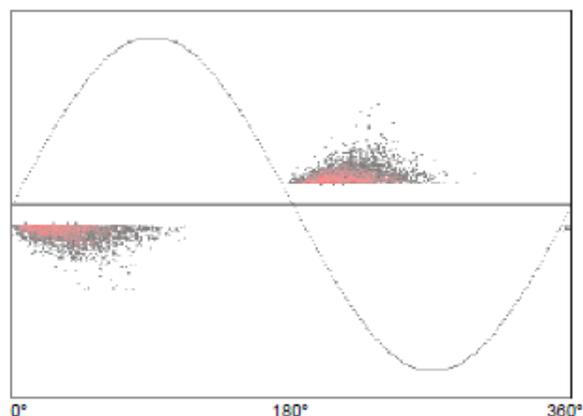


Imagen 5.11.- Ejemplo de patrón PRPD de una descarga de un hueco interno.

### 5.8.2.- Deslaminación interna:

Este tipo de descargas se generan en huecos de aire alargados longitudinalmente en el aislamiento principal que suelen ser provocados por sobrecalentamiento o por los esfuerzos mecánicos. Es más habitual en estatores antiguos.

En la figura podemos observar que tiene una forma menos redondeada que en el anterior caso pudiendo llegar a una forma similar a la triangular. La aparición es simétrica para ambos semicírculos. La tasa de repetición de las descargas es superior que para descargas internas.

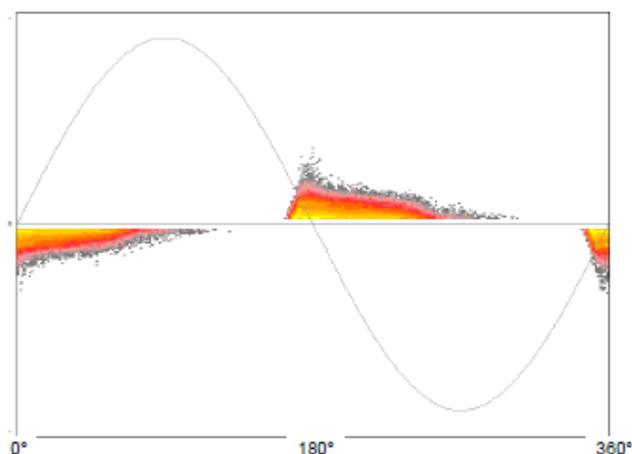


Imagen 5.12.- Ejemplo de patrón PRPD de una descarga de deslaminación interna.

### 5.8.3.- Deslaminación entre el conductor y el aislamiento.

Estas descargas se generan en una bolsa de aire longitudinal entre el conductor de cobre y el aislamiento principal, lo que provocará que tenga una forma atípica (redondeada), con descargas de mayor magnitud y número en el semiciclo positivo. Suele ser fruto de sobrecalentamientos y/o fuerzas mecánicas.

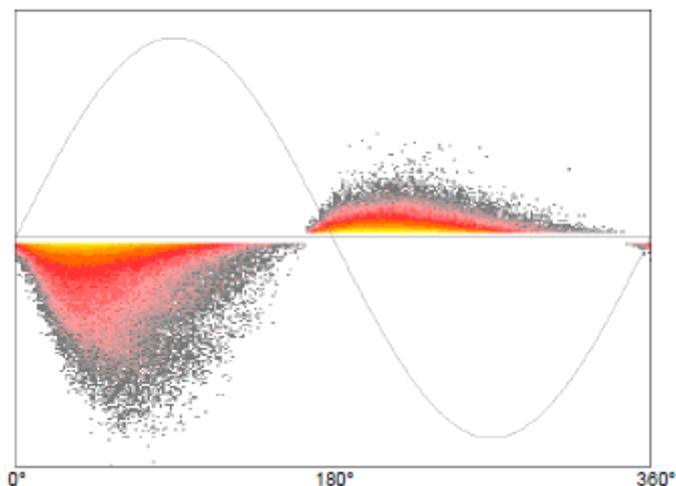


Imagen 5.13.- Ejemplo de patrón PRPD de una descarga entre el conductor y el aislamiento.

### 5.8.4.- Descargas en ranuras

Se generan en huecos con aire o gas en el interior del núcleo del estator, entre la superficie de una barra o bobina y el núcleo (ver figura 5.14, izquierda). Se producirán cuando no exista contacto eléctrico entre el revestimiento semiconductor de la barra y la ranura, porque aquel se ha roto. La forma de la descarga dependerá de la forma de la ranura, aunque suele ser asimétrico, con mayor número y magnitud de descargas en el semiciclo negativo y forma más escarpada.

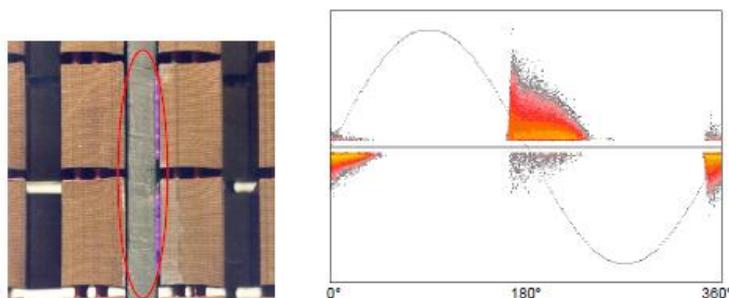


Imagen 5.14.- Núcleo y ejemplo de patrón PRPD de una descarga en ranura.

### 5.8.5.- Descargas en el revestimiento semiconductor y cubierta de graduación de campo del estator.

Se producen en entre el recubrimiento semiconductor del estator y el de graduación de campo cuando se alcanza una tensión eléctrica demasiada alta. Esta figura se caracteriza por una asimetría. Esta actividad se producirá directamente en la unión de la S/C y el recubrimiento graduación de campo cuando éste no es el adecuado, lo que resulta en una alta tensión local. Se caracteriza por una asimetría con mayores valores y tasas de descargas en los semiciclos negativos, y unas formas redondeadas.

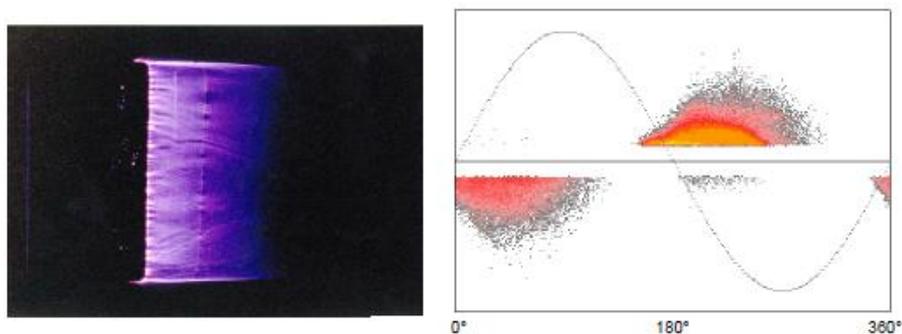


Imagen 5.15.- Ejemplo de patrón PRPD de una descarga en el revestimiento del conductor.

### 5.8.6.-Descargas superficiales por contorno (“tracking”)

Este tipo de descargas se producirá en las salidas de las barras debido a la contaminación del aire y/o aislamiento.

La principal característica de estas descargas es una nube vertical (centrada en un intervalo de fases estrecho), con baja tasa de ocurrencia.

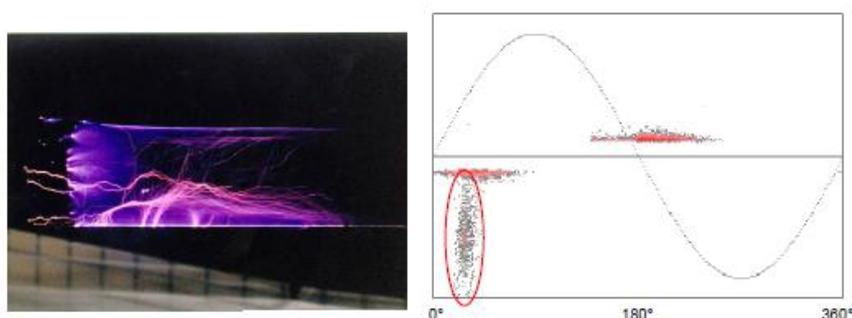


Imagen 5.16.- Ejemplo de patrón PRPD de una descarga por contorno.

### 5.8.7. Descargas de hueco

Este tipo de actividad se producirá entre dos barras en la salida del bobinado de las ranuras, o entre una barra y el núcleo del estator. Se ilustran dos ensayos. El de arriba representa una actividad PD entre dos barras, mientras que el inferior muestra una actividad de DP entre un barra y el núcleo del estator. La principal característica de una actividad de descarga de este tipo es una nube horizontal de PDs (margen de fases amplio) de amplitud relativamente constante, presente en ambas polaridades de la tensión.

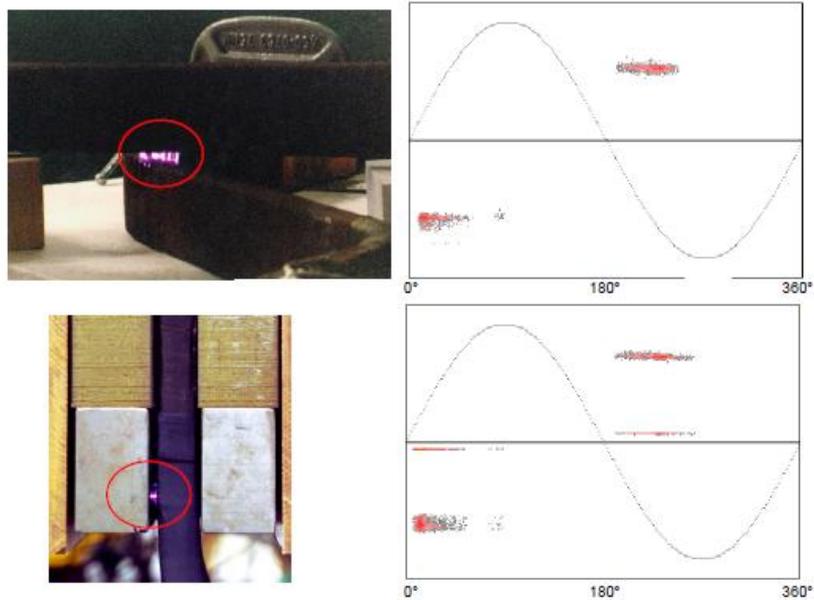


Imagen 5.17.- Ejemplo de patrón PRPD de un descarga en el hueco entre dos

## Capítulo 6. Comparación de la norma IEEE 1434 2014 con la norma IEC 60034 27-2.

En este capítulo se compara la norma IEEE y la norma IEC.

En este caso, la norma IEC es una especificación técnica en donde se recoge información para conocer la actividad de las DP en máquinas rotativas on-line de alta tensión abordando diversos aspectos esenciales sobre las mismas como las técnicas e instrumentos de medición, la normalización de las mediciones, reducción de ruido, los procedimientos de medición y la documentación e interpretación de resultados. Los mismos métodos de medición, procedimientos y dispositivos pueden ser utilizados para detectar chispas eléctricas y arcos eléctricos. Cabe destacar que, la norma IEEE tiene mayor bibliografía que la norma IEC.

La norma IEEE habla de la naturaleza de las descargas parciales y las mediciones de ellas en las bobinas y barras, tanto con la máquina en funcionamiento o desconectada. En esta norma podemos encontrar de forma más detallada los sensores y diferentes sistemas de medición de descargas parciales. También se incluyen el procesamiento e interpretación de la información recogida en los diferentes ensayos.

### 6.1.-Detección de DP y del ruido eléctrico

Las DP vienen acompañadas por pulsos eléctricos y pulsos de la radiofrecuencia. En la norma IEEE aparecen numerosos sistemas de detección de DP, que miden el pulso de la tensión que se crea a través del sistema de aislamiento. Además en cada sistema de detección se detalla cómo se rechaza el ruido eléctrico. En esta norma aparecen detalladamente los diferentes sensores que se pueden emplear (los condensadores de acoplamiento, los transformadores de intensidad, los tipos de sondas...).

En cambio la norma IEC no presta demasiada atención a los diferentes sistemas de detección de DP ni a los sensores. En cambio dedica todo un apartado a las fuentes de ruido, haciendo una distinción entre las fuentes de ruido sincronizadas con el ciclo de corriente alterna y las que no.

Ambas normas proponen separar el ruido eléctrico de las descargas parciales mediante un análisis en el dominio del tiempo (de dos formas, analizando la forma de onda de los pulsos y el tiempo de llegada a los sensores) o mezclando el dominio del tiempo y frecuencia con los llamados mapas TF.

## 6.2.- Instrumentos y técnicas de medida

En la norma IEEE se explican los diferentes sensores y circuitos de ensayos que existen para ensayos en línea, para ensayos fuera de línea y para mediciones en bobinas y barras individuales. Además, explica detalladamente en qué consiste un condensador de acoplamiento, los transformadores de intensidad, los acopladores de las ranuras del estator (SSC) y sondas capacitivas. Esta norma contempla como métodos de detección de DP, el nivel de ozono alrededor de la máquina y la detección (con micrófonos direccionales) del ruido característico que provocan las DP.

En cambio en la norma IEC aparecen los sensores pero de una forma más genérica, sin tanto detalle. Sobre los sistemas de medición comenta que sus características son primordiales para poder determinar la magnitud de las descargas. En este sentido, se muestran las respuestas en frecuencia (baja, alta y muy alta) frente a los impulsos de los sistemas de detección, comentando las ventajas y desventajas de que un sensor tenga un ancho de banda grande (detectará más descargas parciales con mayor energía espectral, pero permitirá el paso de más ruido eléctrico) y ancho de banda pequeño (sucederá lo contrario).

## 6.3.- Normalización en las mediciones y procedimientos de medición.

En la norma IEC trata dos procedimientos de normalización para diferentes sistemas: sistemas de baja frecuencia y sistemas de alta frecuencia con el fin de poder facilitar las comparaciones entre mediciones en diferentes máquinas.

En ambas normas la normalización se realiza en términos de carga aparente en donde los sensores están instalados y se comentan problemas relacionados con la atenuación y la resonancia. Para comparar medidas entre sí, ambos estándares establecen que se debe de realizar en las mismas condiciones y con la misma máquina y sistemas de detección (o lo más parecidos posibles). Además establece márgenes de cambio idénticos ambas normas en carga ( $\pm 10\%$ ), en tensión ( $\pm 1,5\%$ ), pero en temperatura la norma IEC defiende una variación de  $\pm 10\%$  y la IEEE una variación de  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ . También en los dos estándares se dice que no es posible calibrar en pC, pero si se puede normalizar. En la norma IEC se especifica cómo se debe inyectar la carga (circuito de conexión) en función del tiempo de conmutación del calibrador.

Respecto a los procedimientos de medición, la norma IEC contempla únicamente las mediciones “on-line” (las medidas “off line” se contemplan en la IEC TS 60034 27:2006) donde se apuesta por dos métodos: la monitorización continua de la máquina o la realización de mediciones periódicas.

En cambio, la norma IEEE es más general, y contempla los procedimientos de medición “on line” y “off line”. También hace mención a las ventajas e inconvenientes de ambos ensayos (on-line y off-line ) y a los ensayos en bobinas, barras y arrollamientos.

En ambas normas se hace referencia a la importancia de tomar unas primeras medidas como referencia para próximos ensayos y cómo ir variando la carga y la temperatura. En la

norma IEEE se explica de una forma menos detallada (aplicado a hidrogenadores), la norma IEC explica la importancia de ir variando la carga según la temperatura de la máquina, entre otros factores.

#### 6.4.- Visualización de mediciones

En la norma IEEE hace referencia a los analizadores de señales, analizadores de altura del pulso y los medidores cuasi-pico y de interferencias en radiofrecuencia para visualizar las DP y la IEC no.

Ambas normas prestan importancia a visualizar el comportamiento de las DP durante un periodo de tiempo largo y así poder determinar parámetros característicos de las DP como su magnitud, número de descargas por ciclo, NQN... Algunos de estos parámetros como el NQN o PDEV no son descritos (sí mencionados) en la norma IEC y sí en la norma IEEE.

La norma IEEE muestra ejemplos sobre separación multicanal en diferentes fases y la IEC no.

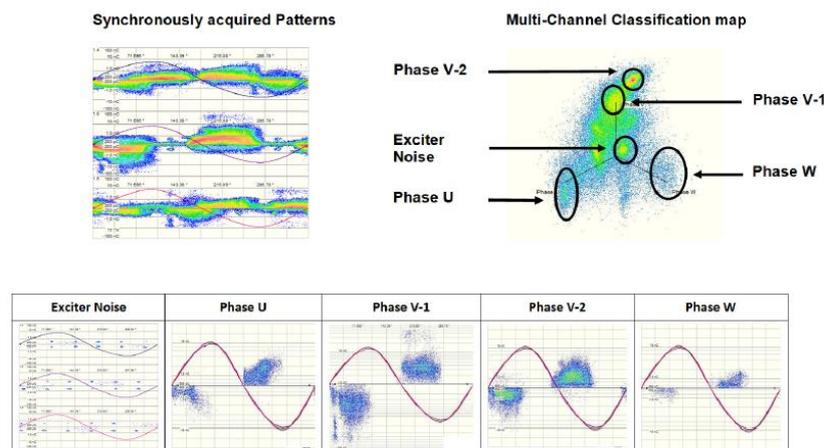


Figure E.1—Typical multi-spectral classification map (three channels)

#### Imagen 6.1.- Sistema multi-espectral sincrónico.

Ambas normas hacen hincapié en la importancia de la magnitud del pulso fase, tasa de aparición (esta depende de las condiciones de carga, sistema de refrigeración, condiciones ambientales, edad de la máquina... etc.)

En los dos estándares se consideran los PRPDs como una herramienta de gran importancia para obtener información sobre las fuentes de descargas parciales.

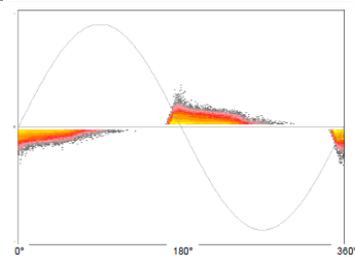
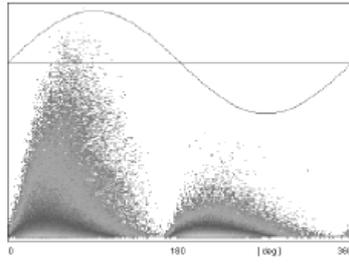
En la norma IEC se menciona que variaciones de  $Q_m$  (magnitud asociada a una repetición de pulsos de diez veces por segundo) inferiores a 25% puede no indicar nada, mientras que la norma IEEE no lo contempla.

## 6.5.- Tipos de descargas parciales

En la norma IEC aparece una clasificación de los tipos de descargas parciales, relacionado con sus PRPDs asociados. Aunque ambas normas llegan al mismo nivel de detalle.

Tipo de descarga parcial (PRPDs)	Norma IEEE	Norma IEC	Comentarios
Descarga en hueco interno.			No se observan diferencias reseñables.
Descarga en ranura.			No se observan importantes diferencias .
Descarga entre el conductor y el aislamiento.			Se puede observar como la polaridad esta invertida. También lo están los semiciclos donde se produce.
Descarga en huecos.			La diferencia es que aparecen dos nubes de DPs con amplitudes diferentes en las mismas fases.
Descargas superficiales por contorno.			En ambas imágenes el patrón es básicamente el mismo, destacar que la nube de DPs cuando la onda de tensión pasa por cero.

Descarga por  
deslaminación  
interna.



Las nubes de DPs  
no se parecen.  
Es una diferencia  
muy importante.

## Capítulo 7.- Conclusión.

Este trabajo se centró en revisar y comparar las normas IEEE 1434 (en sus versiones de 2000 y 2014) e IEC 60034 27-2 dedicadas a aportar indicaciones técnicas claras para medir descargas parciales en máquinas rotativas.

Para lograr el objetivo del proyecto, primero se definieron aspectos constructivos de las máquinas eléctricas de alta tensión, los principales fenómenos de degradación de sus sistemas de aislamiento y se describió la fenomenología y técnicas de medidas de descargas parciales. Después se revisaron y compararon las tres normas.

Los principales aspectos que cubre la actualización de la norma IEEE de 2014 respecto a su versión anterior son aquellos relacionados con las DP con tiempo de subida cortos y repetitivos, instrumentos de detección de corona, algunos sistemas de medición, analizadores y clasificadores de DP en tiempo y frecuencia, los sistemas multi-espectrales sincrónicos y establece una serie de condiciones de funcionamiento en los ensayos "on-line". Por otro lado, comparando las normas IEEE e IEC, existen algunas diferencias como el grado de detalle que llega una y otra en describir los sensores o los sistemas de medición, en métodos de visualización de mediciones, contemplar los ensayos " off-line" ...etc.

A lo largo del grado no pude cursar ninguna asignatura específica de alta tensión, por lo que realizar este trabajo me suponía un reto, pero a la vez me pareció que podía adquirir importantes conocimientos sobre la ingeniería de alta tensión. Además a lo largo del grado he trabajado con normativas en contadas ocasiones por lo que me ha ayudado a comprenderlas e implementarlas. Por estos motivos, la realización del trabajo me ha obligado a comprender la naturaleza de las descargas parciales, sus sistemas de detección, procedimientos de medidas y tipos de ensayos; también aspectos constructivos de las máquinas rotativas de alta tensión, sus sistemas de aislamiento...

Ha sido a partir de la realización de este proyecto cuando me he dado cuenta de que las labores de predicción de fallos y correctivas son fundamentales para alargar la vida útil de estos equipos. Igualmente, he comprendido la importancia que tienen las descargas parciales en un equipo tan costoso y complejo como las máquinas eléctricas de alta tensión. Más importante aún es saber y poder interpretar las mediciones de las descargas parciales para saber realmente lo que está ocurriendo en las máquinas.

Finalmente quería indicar que este proyecto ha requerido un gran trabajo de documentación que, además, se encontraba en inglés, por lo que he podido ampliar mi vocabulario en inglés técnico.

## Capítulo 8.-Bibliografía.

- [Stone, 2004] "Electrical insulation for rotating machines - design, evaluation, aging, testing, and repair"; IEEE Press, Greg C.Stone., Edward a. Boulter., Ian Culbert., Hussein Dhirani; 2004.
- "High-voltage test techniques – Partial discharge measurements. IEC-60270," IEC (International Electrotechnical Commission), 2000.
- R.E. James, Q. Su; "Condition assessment of High Voltage Insulation in Power System Equipment"; The Institution of Engineering and Technology; 2008.
- Kreuger F.H.; "Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment"; Butterworth & Co.; Kent; 1989;
- E. Kuffel, W.S. Zaengl, and J. Kuffel; "High Voltage Engineering: Fundamentals", 2nd ed.; Butterworth-Heinemann; 2000.
- "On-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines". IEC/TS 60034-27-2.
- "IEEE Trial-Use Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery". IEEE Std 1434-2000.
- "IEEE Guide for the Measurement of Partial Discharges in AC Electric Machinery". IEEE Std 1434-2014 (Revision of IEEE Std 1434-2000).
- "Rotating electrical machines - Part 27: Off-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines". IEC TS 60034-27:2006.
- [ Juan Manuel Martínez Tarifa, 2012] "Apuntes de Ingeniería de Alta Tensión".
- [ Jesús Fraile Mora, Quinta Edición, 2003] "Máquinas eléctricas".