



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO

DETECCIÓN DE DESCARGAS PARCIALES
EN EL SISTEMA AISLANTE DE LOS MOTORES
ELÉCTRICOS COMO TÉCNICA DE
MANTENIMIENTO PREDICTIVO

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER
MÁSTER OFICIAL EN INGENIERÍA DEL MANTENIMIENTO

AUTOR: ANA BELÉN FERRER REDONDO
TUTOR: JOSÉ ALFONSO ANTONINO DAVIU

VALENCIA, SEPTIEMBRE DE 2021

Resumen

En el presente trabajo se recoge de manera descriptiva un estudio sobre las descargas parciales en el sistema de aislamiento de los motores eléctricos como método para controlar el estado en el que se encuentra el motor, poder detectar averías y evitar así una posible situación crítica. Para abordar el estudio se desarrolla la definición de descargas parciales, las causas que las provocan, los errores que nos permiten detectar, los métodos de detección y el equipamiento necesario para llevar a cabo un ensayo de descargas parciales. Una vez explicado el procedimiento de ensayo se describe la manera de interpretar los datos para lograr evaluar la actividad de descargas parciales. Finalmente, se incluye un caso práctico extraído de un informe que muestra la aplicación de la técnica en una situación real para reforzar el tema del trabajo.

Se pretende que este estudio pueda servir de referencia a investigadores del área, así como a profesionales interesados en la aplicación de la técnica.

Índice

MEMORIA

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	MOTIVACIÓN	1
1.2.	OBJETIVO DEL TRABAJO	2
1.3.	ANTECEDENTES	2
2.	MARCO TEÓRICO	4
2.1.	TIPOS DE MANTENIMIENTO	4
2.2.	MOTORES ELÉCTRICOS	6
2.2.1.	<i>Partes de un motor de inducción.....</i>	<i>9</i>
2.2.1.1.	Carcasa	10
2.2.1.2.	Estator	10
2.2.1.3.	Rotor	11
2.2.1.4.	Rodamientos	13
2.2.1.5.	Eje	13
2.2.1.6.	Placa de bornes	13
2.2.1.7.	Ventilador	13
2.2.1.8.	Sistema aislante	13
2.3.	FALLOS EN LOS MOTORES ELÉCTRICOS	14
2.3.1.	<i>Fallos mecánicos</i>	<i>14</i>
2.3.2.	<i>Asimetrías rotóricas</i>	<i>14</i>
2.3.3.	<i>Fallos en el paquete magnético</i>	<i>14</i>
2.3.4.	<i>Defectos en el sistema aislante</i>	<i>14</i>
2.3.5.	<i>Clases específicas de fallo</i>	<i>14</i>
2.4.	TÉCNICAS UTILIZADAS PARA LA DETECCIÓN DE AVERÍAS	15
2.4.1.	<i>Análisis de vibraciones</i>	<i>15</i>
2.4.2.	<i>Análisis de corrientes</i>	<i>16</i>
2.4.3.	<i>Termografía infrarroja</i>	<i>17</i>
2.4.4.	<i>Técnicas para la comprobación del aislamiento</i>	<i>17</i>
2.5.	SISTEMA AISLANTE DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS	17
2.5.1.	<i>Descripción del sistema aislante</i>	<i>18</i>
2.5.2.	<i>Mecanismos de degradación del aislamiento</i>	<i>21</i>
2.5.3.	<i>Fallos en el sistema aislante</i>	<i>22</i>
2.5.4.	<i>Técnicas para la comprobación del aislamiento.</i>	<i>23</i>
2.5.4.1.	Prueba de resistencia óhmica	23
2.5.4.2.	Aislamiento a tierra	24
2.5.4.3.	Índice de polarización o adsorción dieléctrica	24
2.5.4.4.	HiPot	24
2.5.4.5.	Surge o impulso	25
3.	DESCARGAS PARCIALES	26
3.1.	FUNDAMENTOS DE LAS DESCARGAS PARCIALES	26
3.2.	TIPOS DE DESCARGAS PARCIALES	28
3.2.1.	<i>Descargas parciales internas.....</i>	<i>29</i>
3.2.2.	<i>Descarga parcial superficial</i>	<i>30</i>
3.2.3.	<i>Descarga parcial externa</i>	<i>31</i>
3.3.	PROCESO DE FORMACIÓN DE LAS DESCARGAS PARCIALES	32
3.4.	PROBLEMAS DETECTADOS MEDIANTE DESCARGAS PARCIALES	34

3.5.	MÉTODOS GENERALES DE DETECCIÓN DE DESCARGAS PARCIALES	35
3.5.1.	<i>Ultrasonidos</i>	35
3.5.2.	<i>Detección visual</i>	35
3.5.3.	<i>Detección química</i>	36
3.5.4.	<i>Medición del factor de potencia</i>	36
3.6.	ENSAYO DE DESCARGAS PARCIALES	37
3.6.1.	<i>Carga aparente</i>	38
3.6.2.	<i>Equipos necesarios para la realización del ensayo</i>	39
3.6.3.	<i>Procedimiento de ensayo</i>	41
3.7.	PERIODICIDAD DEL ANÁLISIS DE DESCARGAS PARCIALES.....	42
4.	DIAGNÓSTICO DEL ESTADO MEDIANTE LA INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	45
5.	CASO PRÁCTICO.....	52
6.	CONCLUSIONES	58
7.	TRABAJOS FUTUROS	59
	REFERENCIAS	60

ASPECTOS ECONÓMICOS

1.	PRESUPUESTOS PARCIALES.....	1
1.1.	FORMACIÓN DEL PERSONAL	1
1.2.	EQUIPOS.....	1
1.3.	COSTES INDIRECTOS	2
2.	PRESUPUESTO GLOBAL.....	2

Índice de figuras

FIGURA 1. ESQUEMA DE LA CLASIFICACIÓN DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS.....	6
FIGURA 2. PARTES DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN. [3].....	9
FIGURA 3. CARCASA DE UN MOTOR. [4].....	10
FIGURA 4. ESTATOR DE UN MOTOR ELÉCTRICO DE INDUCCIÓN. [5].....	11
FIGURA 5. ROTOR DE JAULA DE ARDILLA. [7].....	11
FIGURA 6. ROTOR BOBINADO. [9].....	12
FIGURA 7. CIRCUITO DE LA CONEXIÓN DE UN ROTOR BOBINADO CON RESISTENCIAS ADICIONALES. [8].....	12
FIGURA 8. CAJA DE BORNES DE UN MOTOR ELÉCTRICO. [11].....	13
FIGURA 9. CLASES ESPECÍFICAS DE FALLO. [12].....	15
FIGURA 10. ESTRUCTURA BÁSICA DEL AISLAMIENTO [12].....	18
FIGURA 11. BOBINA DE UN MOTOR: A) CABEZA DE BOBINA, B) ZONA DE RANURA.....	19
FIGURA 12. SECCIÓN SISTEMA AISLANTE MOTOR.....	20
FIGURA 13. CORTOCIRCUITO ENTRE ESPIRAS. [17].....	22
FIGURA 14. CAVIDADES EN EL AISLAMIENTO POR DEFECTOS DURANTE EL PROCESO DE FABRICACIÓN. [20].....	26
FIGURA 15. ESQUEMA FORMACIÓN DE LAS DESCARGAS PARCIALES. [21].....	27
FIGURA 16. RELACIÓN DE LA POLARIDAD Y EL ÁNGULO DE FASE. [22].....	28
FIGURA 17. ESQUEMA FORMACIÓN DESCARGA PARCIAL INTERNA. [1].....	29
FIGURA 18. PATRÓN RESUELTO EN FASE DE DESCARGA PARCIAL INTERNA. [23].....	30
FIGURA 19. ESQUEMA FORMACIÓN DESCARGA PARCIAL SUPERFICIAL. [1].....	30
FIGURA 20. PATRÓN RESUELTO EN FASE DE DESCARGA PARCIAL SUPERFICIAL. [23].....	31
FIGURA 21. ESQUEMA FORMACIÓN DESCARGA PARCIAL EXTERNA. [1].....	31
FIGURA 22. PATRÓN RESUELTO EN FASE DE DESCARGA PARCIAL EXTERNA. [23].....	32
FIGURA 23. PROCESO DE FORMACIÓN DE DESCARGAS PARCIALES EN UNA CAVIDAD.....	33
FIGURA 24. GRIETA EN UN MOTOR ELÉCTRICO. [26].....	34
FIGURA 25. CONDENSADORES DE ACOPLAMIENTO. [29].....	40
FIGURA 26. ESQUEMA BÁSICO DEL ENSAYO DE DESCARGAS PARCIALES. [19].....	41
FIGURA 27. EQUIPOS DE ENSAYO ON-LINE. A) EQUIPO DE MONITORIZACIÓN DE DP. B) CONDENSADORES DE ACOPLAMIENTO. C) CABLE COAXIAL CONECTADO AL EQUIPO DE MONITORIZACIÓN. [12].....	42
FIGURA 28. REPRESENTACIÓN EN BASE ELÍPTICA. [19].....	45
FIGURA 29. REPRESENTACIÓN EN BASE DE TIEMPOS LINEAL. [31].....	46
FIGURA 30. ESQUEMA PATRONES DP. [28].....	47
FIGURA 31. PRPD INTERNA. [28].....	47
FIGURA 32. PRPD DELAMINACIÓN INTERNA. [28].....	48
FIGURA 33. PRPD DESCARGAS EN RANURAS. [28].....	49
FIGURA 34. PRPD EN RANURAS. [28].....	49
FIGURA 35. PRPD ENTRE CONDUCTOR Y AISLAMIENTO. [28].....	50
FIGURA 36. PRPD ENVEJECIMIENTO POR ESTRÉS TÉRMICO. [12].....	50
FIGURA 37. PRPD EN RANURAS. [32].....	53
FIGURA 38. PRPD ZONA SALIDA DE RANURA. [32].....	54
FIGURA 39. PRPD BARRA-BARRA. [32].....	55
FIGURA 40. AISLAMIENTO QUEMADO POR DESCARGA EN LA ZONA DE SALIDA DE LA RANURA. [32].....	56
FIGURA 41. AISLAMIENTO QUEMADO POR DESCARGA BARRA-BARRA. [32].....	56
FIGURA 42. DISTRIBUCIÓN DE LOS PATRONES EN FUNCIÓN DE LA TENSIÓN. [32].....	57

DOCUMENTO I:

MEMORIA

1. Introducción

En este apartado se exponen los motivos que han llevado al tema de este trabajo de fin de máster, así como los objetivos, y las investigaciones y otros trabajos que han sido fuente de referencia para su desarrollo.

1.1. Motivación

Actualmente los motores eléctricos tienen una gran importancia en nuestras vidas, podemos encontrarlos en los aparatos que usamos diariamente en los hogares hasta en las grandes industrias. En cuanto a la industria, los motores eléctricos son imprescindibles para el desarrollo de esta, se estima que aproximadamente el 60% de la demanda de energía eléctrica en la industria proviene de los motores eléctricos. Son los encargados de transformar la energía eléctrica en energía mecánica para lograr el funcionamiento de máquinas y con esta alcanzar la producción objetivo de las fábricas y empresas. Algunas de las ventajas que presentan los motores eléctricos y que los hacen tan comunes en la industria son las siguientes:

- Mayor eficiencia que un motor de combustión, los valores de eficiencia pueden establecerse entre un 75% y 80%, aunque esta se reduce si el motor ha sufrido reparaciones. Actualmente se están desarrollando motores de alta eficiencia que llegan a alcanzar valores de hasta un 95,5%.
- Reducción de la emisión de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono.
- No existe la necesidad de refrigeración exterior, ya que los motores eléctricos están autoventilados.
- Capacidad de construcción de cualquier tamaño en función de las necesidades, siempre y cuando el voltaje lo permita.
- En el caso de los motores asíncronos, se presenta además la ventaja de que necesitan un menor mantenimiento debido a su robustez.

Por tanto, los beneficios de las industrias dependen en gran medida del correcto funcionamiento de estos motores, ya que están implicados en el proceso productivo, es por ello por lo que deben estar en condiciones óptimas de funcionamiento y para ello se debe establecer un plan de mantenimiento. En primer lugar, cabe destacar que se define mantenimiento como *“el conjunto de acciones o técnicas que permiten conservar o restablecer un equipo en un estado específico y asegurar un determinado servicio con*

un coste mínimo y la máxima seguridad” y está considerado como un medio para ayudar a producir.

A lo largo del desarrollo del trabajo se va a hacer referencia al mantenimiento predictivo, dejando a un lado el mantenimiento correctivo, ya que con este último se actúa cuando el fallo ya ha ocurrido. El mantenimiento predictivo es el tipo de mantenimiento que nos permite adelantarnos de forma precoz a la aparición de una avería mediante la monitorización de diversos parámetros indicativos del estado en el que se encuentra una máquina. De este modo se pueden evitar o reducir los costes derivados de las paradas de los activos de producción y por consiguiente reducir los costes de pérdidas de producción y minimizar el deterioro de las máquinas aumentando su durabilidad y asegurando también, la calidad del producto.

Como se ha comentado, debido al funcionamiento de los motores eléctricos pueden surgir diversas averías, entre estas se encuentran las relacionadas con el sistema aislante. La motivación para realizar este trabajo surge de este tipo de fallos en el aislamiento, ya que, uno de los fallos que se dan en el sistema aislante son las descargas parciales. La detección y medida de estas descargas es un indicador del estado en el que se encuentra el aislamiento y puede ayudarnos a detectar fallos y sus consecuencias, que podrían llegar a ser críticas.

1.2. Objetivo del trabajo

Una vez establecidos los motivos que nos han llevado a la selección del tema de este trabajo, podemos establecer el objetivo del trabajo.

El objetivo principal de este trabajo de fin de máster es describir detalladamente las descargas parciales que se producen en el sistema aislante de los motores eléctricos y analizar su aplicación como técnica de diagnóstico de averías como parte del mantenimiento predictivo. Para lograr este objetivo se hace uso de fuentes de recursos contrastadas y se extrae la información necesaria.

Como último objetivo se establece que el presente informe pueda servir de referencia y ayuda a todos aquellos interesados en el tema, como pueden ser personas que se dedican a este ámbito profesionalmente o que quieran ampliar sus conocimientos sobre esta técnica.

1.3. Antecedentes

Este trabajo de fin de máster se puede englobar dentro del ámbito de la investigación, de hecho, desde la segunda mitad del siglo XX se ha tenido un gran interés en medir las descargas parciales, ya que se ha demostrado que se trata de un adecuado

indicador del estado en el que se encuentra el aislamiento del motor y buen determinante de su vida útil. [1]

Actualmente existen muchos laboratorios cuya actividad se basa en la monitorización de descargas parciales. Uno de estos laboratorios es el laboratorio de Alta Tensión del ITE (Instituto Tecnológico de la Energía), dentro de este se encuentra el proyecto DIMER que trata el “*Diagnóstico de máquinas eléctricas rotativas mediante la monitorización de corrientes y descargas parciales*”. El proyecto analiza el comportamiento de las máquinas rotativas de jaula de ardilla con el objetivo de obtener los patrones de fallo más habituales que permitan, a través de técnicas de monitorización y análisis de las corrientes consumidas por la máquina y las posibles descargas parciales, definir nuevas técnicas para la detección precoz de averías y anomalías en campo de este tipo de motores. [2]

Cabe destacar que a lo largo del trabajo se utilizarán las palabras *descargas parciales* y las siglas *DP* indistintamente, significando ambas lo mismo.

2. Marco teórico

En el apartado *1. Introducción* se ha citado la importancia que tiene el mantenimiento en los motores eléctricos, a lo largo de este apartado se va a tratar este tema más en profundidad, incluyendo los fallos más habituales y las técnicas disponibles, profundizando más en el sistema aislante.

2.1. Tipos de mantenimiento

Tal y como ya se ha comentado, las máquinas eléctricas rotativas tienen un papel fundamental en la industria y no están exentas de sufrir problemas, estos problemas pueden traer consigo resultados desastrosos como las paradas de producción no programadas, costes elevados derivados de la reparación y que la imagen de la empresa se vea dañada. Por ello es necesario preservarlos en ciertas condiciones de funcionamiento y seguridad; para lograr mantener estas máquinas en las condiciones específicas que la industria y seguridad requieren es necesario establecer un plan de mantenimiento en el que se revisen y se pongan a punto. Existen tres tipos de mantenimiento que pueden ser aplicados a los motores eléctricos:

- **Mantenimiento correctivo.** El mantenimiento correctivo incluye las acciones que se llevan a cabo una vez ha sucedido la avería y por tanto provoca una interrupción de la maquinaria y del proceso de producción. Se trata del mantenimiento más sencillo de implementar, pues no se requiere una toma de decisiones ni grandes equipos de medición. Conlleva el inconveniente de que puede poner en riesgo el personal que está en contacto con la máquina, además de grandes pérdidas por el paro imprevisto de la producción. Un ejemplo de este tipo de mantenimiento se da en el caso de que se fundan los fusibles, en esta situación las causas del fallo pueden ser varias: un cortocircuito en los conductores de alimentación, un cortocircuito en el estator o la conexión incorrectas de los bornes. El mantenimiento se aplica una vez ha ocurrido la fusión de los fusibles, y para solucionarlo se revisa, repara y se conecta de nuevo correctamente.
- **Mantenimiento preventivo.** El mantenimiento preventivo es un mantenimiento más elaborado, pues incluye un calendario mediante el cual se realizan paradas planificadas, antes de que ocurra la avería, en las que se sustituyen las piezas o componentes más susceptibles de fallo por otros nuevos, para evitar así que se produzca una avería inesperada. Para establecer la periodicidad con la que se cambian las piezas se utilizan leyes estadísticas. Este mantenimiento tiene las ventajas de que evita pérdidas por paradas de producción inesperadas, garantiza la seguridad, aumenta la durabilidad del activo y la posibilidad de realizar algunas operaciones de

mantenimiento con la máquina en funcionamiento. Sin embargo, presenta el inconveniente de que no se aprovecha la vida útil de los componentes al máximo.

Entre las operaciones que se realizan en este tipo de mantenimiento se encuentran las siguientes: la nivelación del motor, engrase de cojinetes, equilibrado del rotor, limpieza de escobillas, inspección de ruidos y vibraciones, etc.

➤ **Mantenimiento predictivo.** El mantenimiento predictivo se basa en conocer las condiciones en las que se encuentra el motor y actuar en base a ello, para ello se establecen una serie de pasos que permiten operar de manera segura y eficiente. Estos pasos son la monitorización, la evaluación, el diagnóstico y por último la acción. Antes de empezar el procedimiento de mantenimiento predictivo es necesario establecer unos parámetros cuantificables que son los indicativos del estado en el que se encuentra la máquina y permite ver si existe una avería; estos parámetros son los denominados síntomas. En primer lugar, en la monitorización se miden los síntomas y, llevando un registro histórico, permiten ver la evolución de este a lo largo de la vida del elemento, alguna de las variables que pueden utilizarse como síntomas en los motores eléctricos son el voltaje, la intensidad o las vibraciones que se producen por su funcionamiento. Para monitorizar estos parámetros y detectar las averías se utilizan técnicas, algunas de ellas se verán en el apartado 2.4. *Técnicas utilizadas para la detección de averías*. En la evaluación se valora el estado en el que se encuentra el elemento teniendo en cuenta los síntomas monitorizados y se establece una escala (como por ejemplo bien, alerta o alarma) a partir de la cual se puede enmarcar el nivel de prestaciones en el que se encuentra el motor. Si en los pasos anteriores se observa una anomalía que puede ser indicativa de una avería, mediante el diagnóstico, se determina la causa y se decide si se es necesario realizar una acción o no, como pudiera ser reemplazar algún componente, reconectar una conexión o realizar una limpieza. Finalmente, en el caso de ser necesaria una acción, esta se llevaría a cabo.

Se trata del tipo de mantenimiento más complejo, ya que se requiere una inversión económica tanto para los equipos necesarios como para formar al personal, ya que este tiene que ser capaz de manejar los equipos, tratar la información de la que se dispone y tomar decisiones. Además, existe una limitación en las técnicas de diagnósticos que son aplicables. Sin embargo, las ventajas que presenta son abundantes: permite realizar un seguimiento de la evolución del estado del elemento que se estudia y esto a su vez permite tener una mayor seguridad, el momento de actuación puede ser planificado, lo que permite que los tiempos de parada y los costes derivados de estos se reduzcan y permite aprovechar al máximo la vida útil de las piezas o componentes.

El mantenimiento correctivo y preventivo son los más utilizados en los motores eléctricos debido a la presencia de puntos sensibles al desgaste, aunque el mantenimiento predictivo no es el más habitual, en la actualidad se está implementando y se están investigando nuevas técnicas que permitan monitorizar los síntomas que permitan realizar el seguimiento del estado del motor. Una vez conocidos todos los tipos de mantenimiento, cabe destacar que este trabajo se centra en el predictivo.

2.2. Motores eléctricos

En primer lugar, dado que el objeto de este trabajo es el estudio de una técnica aplicada a un motor eléctrico es importante dar una visión global de las máquinas eléctricas. A continuación, se incluye un esquema de la clasificación general de las máquinas eléctricas.

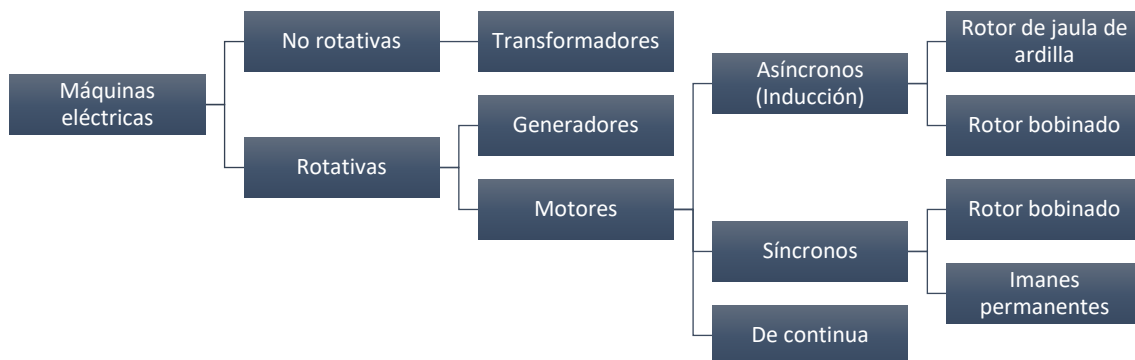


Figura 1. Esquema de la clasificación de las máquinas eléctricas.

La diferencia principal entre las máquinas no rotativas y rotativas es que las primeras transforman energía eléctrica en energía eléctrica, pero con otros valores de voltaje y corriente. Las rotativas transforman la energía eléctrica en energía mecánica en el caso de los motores y viceversa en el caso de los generadores, aunque toda máquina eléctrica rotativa es capaz de funcionar como motor o generador.

Una vez se tienen ubicados donde se encuentran los motores en la clasificación, dentro de estos, el trabajo se centra en los motores asíncronos o de inducción pues son los más utilizados, además presentan las ventajas de ser simples, tener una alta fiabilidad y resistencia, tener un bajo coste y ser los que menos mantenimiento

necesitan por su robustez, sobre todo los de rotor de jaula de ardilla. Los generadores quedan relegados a aplicaciones específicas en las que no se necesita una elevada potencia.

El principio de funcionamiento de los motores asíncronos o de inducción está basado en la inducción electromagnética y se recoge en la Ley de Faraday (ecuación 1). Para que estas máquinas rotativas funcionen como motor se alimenta el estator, de este modo se crea un circuito magnético que induce una pequeña tensión en el rotor. Las barras que componen el rotor crean un circuito cerrado en el que circula la corriente y se forma otro campo magnético. Ambos campos magnéticos se relacionan de forma que el rotor tiende a seguir al campo del estator.[3] El rotor girará siempre a una velocidad inferior a la del campo magnético del estator.

La ley de Faraday determina que en una espira al ser atravesada por un campo magnético que varía con el tiempo aparece una fuerza electromotriz en sus extremos opuesta a su causa [6], que viene dada por la ecuación 1:

$$e = - \frac{d\phi}{dt} \quad (\text{Ec. 1})$$

Siendo e la diferencia de potencial inducida [V], ϕ el flujo magnético [Wb] y t el tiempo [s].

Los motores eléctricos poseen una serie de aspectos y magnitudes características que indican las condiciones a las que pueden funcionar y los parámetros que pueden desarrollar. Estos aspectos se recogen en la placa de características del motor. A continuación, se recogen algunas de las más importantes:

- **Potencia eléctrica [W].** La potencia eléctrica es la potencia que solicita el motor para poder funcionar, se calcula con la ecuación 2:

$$P_{ele} = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos\varphi \quad (\text{Ec. 2})$$

Siendo U_L la tensión de línea[V], I_L la intensidad de línea [A] y $\cos\varphi$ el factor de potencia [-] que indica la medida de reactiva que demanda el motor.

- **Potencia mecánica [W].** La potencia mecánica o potencia en el eje es la potencia que desarrolla el motor en unas condiciones determinadas. Puede calcularse mediante la ecuación 3:

$$P_{mec} = T \cdot \omega_n \quad (\text{Ec. 3})$$

Siendo T el par nominal [N·m] y ω_n la velocidad angular [rad/s].

- **Par nominal [N·m].** El par nominal del motor se define como el momento de fuerza que ejerce un motor sobre el eje que se encarga de transmitir la potencia, puede calcularse con la ecuación 4:

$$T = P_{mec}/\omega_n \quad (\text{Ec. 4})$$

Siendo P_{mec} la potencia mecánica [W] y ω_n la velocidad angular [rad/s].

- **Pérdidas [W].** La potencia perdida es la diferencia entre la potencia eléctrica que demanda el motor y la potencia mecánica que desarrolla el mismo, viene dada por la ecuación 5:

$$P_{pérdidas} = P_{ele} - P_{mec} \quad (\text{Ec. 5})$$

Siendo P_{ele} la potencia eléctrica [W] y P_{mec} la potencia mecánica [W].

- **Rendimiento [-].** El rendimiento es la eficiencia con la que un motor aprovecha la potencia eléctrica que consume para transformarla en potencia mecánica, puede calcularse con la ecuación 6:

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_{ele}} \quad (\text{Ec. 6})$$

Siendo P_{ele} la potencia eléctrica [W] y P_{mec} la potencia mecánica [W].

- **Velocidad nominal [rpm].** La velocidad nominal es la velocidad a la que gira el eje del motor que viene indicada por el fabricante, viene dada por la ecuación 7:

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (\text{Ec. 7})$$

Siendo f la frecuencia de la red de alimentación de la máquina [Hz] y p el número de pares de polos del motor.

- **Deslizamiento [-].** El deslizamiento es la diferencia relativa que existe entre la velocidad de sincronismo y la velocidad real a la que gira el rotor. Puede calcularse con la ecuación 8:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (\text{Ec. 8})$$

Siendo n_s la velocidad de sincronismo [rpm] y n la velocidad real a la que gira el rotor [rpm].

➤ **Clase térmica.** La clase térmica de los motores eléctricos indica la máxima temperatura que soporta el aislamiento del motor y viene dada por tablas extraídas de la literatura.

Las aplicaciones de los motores de inducción abarcan un gran campo, pueden encontrarse en la mayoría de las industrias y se pueden clasificar en función de la tensión a la que trabajan. Se tienen motores de baja tensión para aplicaciones generales como accionamiento de bombas, compresores y máquinas herramientas entre otras, estos motores desarrollan una potencia comprendida entre 1 kW y 500kW. Por otra parte, se tienen los motores de alta tensión que se utilizan en aplicación más específicas y que requieren una mayor potencia, como es el caso de los motores de propulsión marina (alrededor de 6 MW).

2.2.1. Partes de un motor de inducción

Es importante saber las partes en las que se divide el motor, para saber situar donde se encuentra cada elemento a la hora de realizar el mantenimiento. En este apartado se van a mostrar las diferentes partes que componen un motor de inducción, concretamente los de jaula de ardilla. En la *Figura 2. Partes de un motor de inducción* se muestra una sección transversal de un motor de inducción, en la que se pueden ubicar cada una de las partes que lo componen.

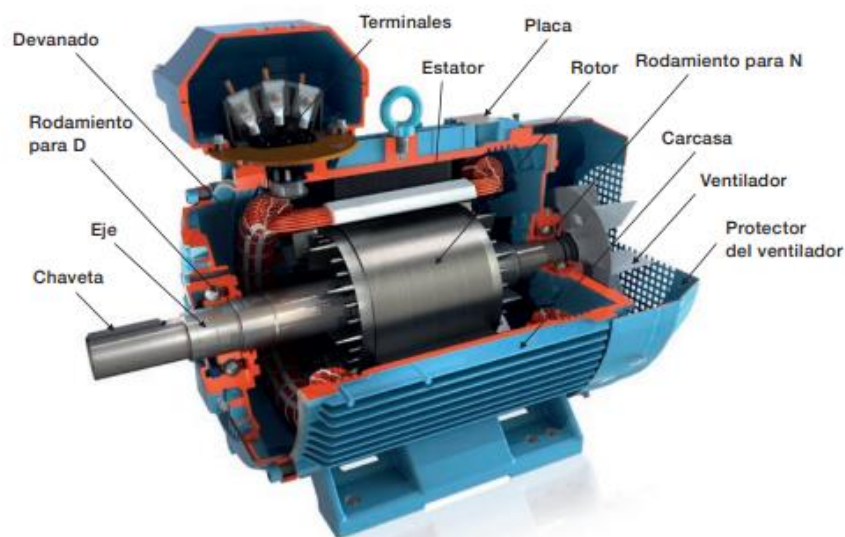


Figura 2. Partes de un motor de inducción. [3]

En los siguientes subapartados se describen las partes del motor más importantes y que son susceptibles de averías.

2.2.1.1. Carcasa.

La carcasa es la parte externa del motor y su función es proteger las partes internas del mismo de factores externos como sólidos, partículas de polvo o líquidos y también al personal que está en contacto con el motor. La carcasa también cumple la función de soporte y unión de todo el conjunto y ayuda a la disipación del calor.



Figura 3. Carcasa de un motor. [4]

La protección que proporciona se indica en la placa de características del motor mediante el grado de protección IP X_1X_2 y dos letras opcionales, en el que X_1 indica la protección frente a sólidos relacionados con el contacto directo y X_2 indica la protección frente a la penetración de líquidos.

Respecto a los aspectos constructivos de la carcasa, estas suelen ser de hierro fundido o de aluminio. El material que se usa en la construcción depende de la aplicación a la que va destinada, por ejemplo, para la industria pesada en la que se requiere una mayor durabilidad se suele realizar con hierro fundido, aplicaciones más ligeras se usa el aluminio.

2.2.1.2. Estator

El estator es la parte fija del motor y rodea el rotor, es la parte que induce el movimiento del rotor, por ello se le conoce también como inductor. Su forma constructiva se basa en una armadura con forma cilíndrica fabricada con una aleación de hierro y silicio y que se encuentra ranurado. Entre estas ranuras se encuentran los devanados (cables de cobre) que se encargan de llevar la corriente de alimentación e inducen el campo magnético que pone en funcionamiento al rotor. [3]



Figura 4. Estator de un motor eléctrico de inducción. [5]

2.2.1.3. Rotor

El rotor es la parte móvil del motor, es conocido también como inducido. Físicamente se trata de un núcleo ranurado que gira de forma solidaria al eje del motor y son coaxiales. El rotor se introduce dentro del estator y entre ambos no existe un contacto, la energía se transfiere mediante la inducción magnética. Las corrientes que circulan por el rotor se ven reflejadas en la Ley de Faraday (ecuación 1).

A la distancia de separación entre el estator y el rotor se le denomina entrehierro y es un aspecto para tener en cuenta en el mantenimiento a la hora de determinar averías. Existen dos tipos de rotor, a continuación, se describen cada uno de ellos:

- **Rotor de jaula de ardilla.** Este es el tipo de rotor más utilizado debido a su simplicidad. Constructivamente se trata de barras macizas, normalmente de cobre, colocadas entre las ranuras del núcleo y que se encuentran unidas en sus extremos por dos anillos cortocircuitados. Las ranuras en las que se insertan las barras son oblicuas respecto al eje evitando así puntos muertos de inducción electromagnética [6]. El desarrollo de este trabajo se centra en este tipo de motores.



Figura 5. Rotor de jaula de ardilla. [7]

➤ **Rotor bobinado.** El rotor bobinado es un tipo de rotor más complejo. Este tipo de rotor consta de unos devanados trifásicos (parecidos a los del estator) situados en las ranuras del rotor. Uno de los extremos de cada devanado se encuentra conectado en estrella y el otro extremo de cada devanado se conecta a 3 anillos con sus correspondientes escobillas que se encuentran sobre el eje del motor. A través de las escobillas de los anillos, los devanados se encuentran cortocircuitados. [8]



Figura 6. Rotor bobinado. [9]

Se ha comentado que este tipo de rotor es complejo, ya que tiene elementos como son las escobillas que presentan bastantes problemas y esto hace que se necesite un mantenimiento mayor. Sin embargo, también presenta una serie de ventajas entre las que se encuentran la posibilidad de medir corrientes de rotor debido a su accesibilidad externa y la posibilidad de añadir resistencias adicionales en serie con el devanado del rotor que permite aumentar el par de arranque.

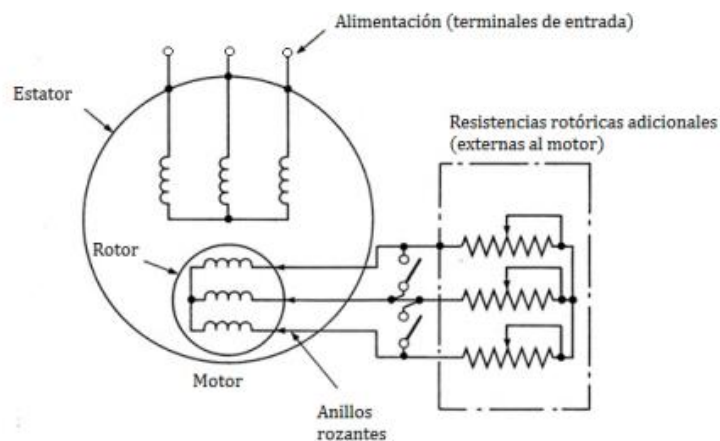


Figura 7. Circuito de la conexión de un rotor bobinado con resistencias adicionales.[8]

2.2.1.4. Rodamientos

Los rodamientos o cojinetes favorecen el movimiento giratorio de los elementos del motor. Los rodamientos son los encargados de sujetar y fijar los ejes y cumplen con la función de reducir la fricción entre los diferentes elementos móviles, ayudando así a un consumo menor de potencia.

2.2.1.5. Eje

El eje es el elemento que se encuentra más al interior del motor, se encarga de transmitir la potencia mecánica que desarrolla el motor a la aplicación que se encuentra anclada al extremo contrario al accionamiento del motor.

2.2.1.6. Placa de bornes

La caja de bornes o caja de conexiones es el elemento donde se alojan los extremos de los devanados del motor y permite conectarlos a la red de alimentación. Como puede observarse en la *Figura 8. Caja de bornes de un motor eléctrico*, la caja cuenta con 6 terminales 3 de ellos se corresponden con el inicio del devanado del estator y los otros 3 se corresponden con el final. Según la norma UNE-EN 60034-8, los devanados del inicio se nombran con los términos U_1 , V_1 y W_1 y los extremos finales con U_2 , V_2 y W_2 . [10]

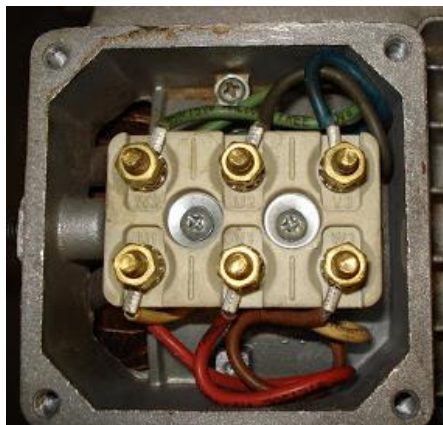


Figura 8. Caja de bornes de un motor eléctrico. [11]

2.2.1.7. Ventilador

El ventilador es la parte que se encarga de la refrigeración por aire del motor. Este elemento suele ir montado en el eje, aunque hay motores que no disponen de ellos y la refrigeración la realizan por medio de la superficie gracias a la convección natural y radiación.

2.2.1.8. Sistema aislante

El sistema aislante o aislamiento es otra de las partes de un motor eléctrico, este trabajo se basa en la detección de descargas parciales como método para detectar

averías en este sistema, por ello se describe más a fondo en el apartado 2.5 *Sistema aislante de los motores eléctricos*.

2.3. Fallos en los motores eléctricos

En este apartado se exponen los fallos más comunes que pueden darse en los motores eléctricos de inducción. Estos fallos pueden clasificarse en 4 grupos:

2.3.1. Fallos mecánicos

Los fallos magnéticos están relacionados con las averías en rodamientos, el aflojamiento de los elementos de sujeción del paquete magnético, la desalineación de los ejes, el desequilibrio del rotor y el nivel anómalo de vibraciones. Para diagnosticar este tipo de fallos se hace uso de la técnica de análisis de vibraciones.

2.3.2. Asimetrías rotóricas

Las asimetrías rotóricas están relacionadas con la rotura o agrietamiento de las barras rotóricas y de los anillos rozantes y con las excentricidades. Las excentricidades se dan en el momento en el que el espacio que separa el rotor y el estator deja de ser uniforme. Estas averías producen alteraciones en el campo magnético y por consiguiente e inducen corrientes en el estator, por ello pueden detectarse haciendo uso de la técnica de análisis de corrientes.

2.3.3. Fallos en el paquete magnético

Los fallos que tienen lugar en el paquete magnéticos se basan en la degradación del aislamiento existente entre las chapas, esto hace que se produzcan puntos en los que circulen corrientes parásitas, produciendo un sobrecalentamiento del núcleo. Para detectar este tipo de fallos se hace uso de la termografía infrarroja.

2.3.4. Defectos en el sistema aislante

Dado que el presente trabajo se centra en el sistema aislante, las averías que tienen lugar en él se describen en el apartado 2.5.2. *Fallos en el sistema aislante*.

2.3.5. Clases específicas de fallo

Una vez se ha establecido la clasificación general de los tipos de averías en los motores eléctricos, en este apartado se muestran las clases específicas de fallo junto a los porcentajes con los que estos ocurren.

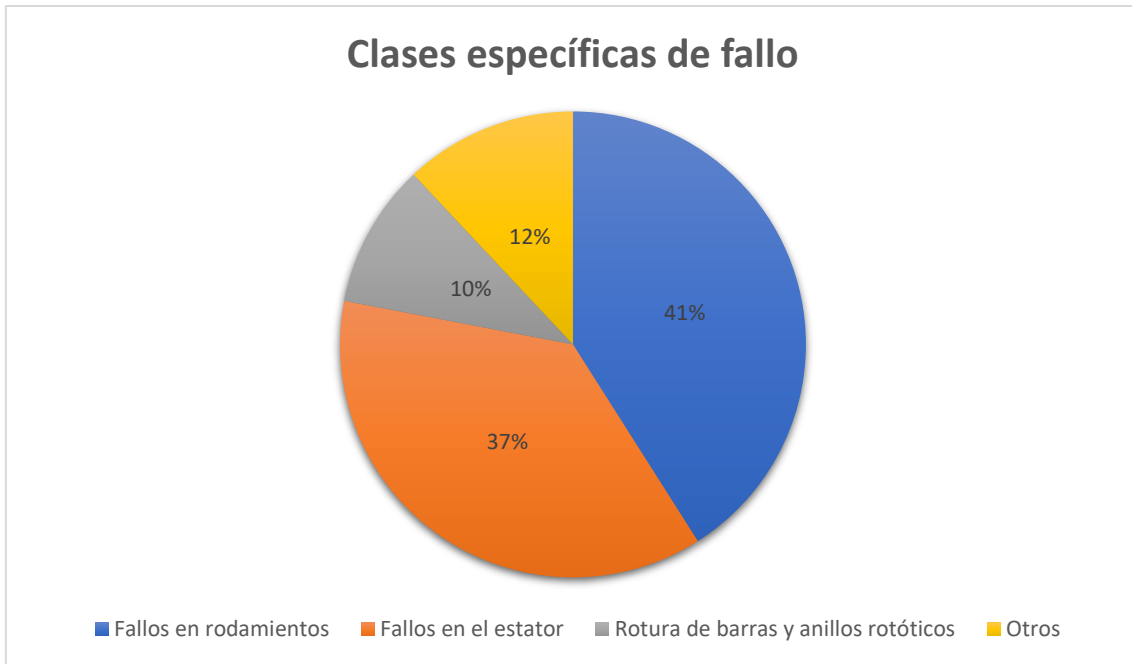


Figura 9. Clases específicas de fallo. [12]

Tal y como puede observarse en la *Figura 9. Clases específicas de fallo*, los fallos que se dan con mayor frecuencia son los relacionados con los rodamientos (41%) debido al desgaste que sufren y con el estator (37%), es en este último donde se tiene en cuenta la degradación del aislamiento. Los porcentajes mostrados pueden variar en función del tamaño del motor, aunque los fallos en el aislamiento en el estator suponen siempre uno de los mayores porcentajes, por ello es importante saber cuándo se producen para poder evitarlos; de este modo se justifica otra vez la realización de este trabajo.

La información utilizada para la redacción de este apartado ha sido extraída de la fuente de referencia [12].

2.4. Técnicas utilizadas para la detección de averías

Una vez se conocen las partes del motor y las averías que pueden surgir en ellas se procede a describir las técnicas que se utilizan actualmente para el monitorizado de síntomas y la detección de fallos.

2.4.1. Análisis de vibraciones

Debido al funcionamiento del motor existen vibraciones, pero un nivel anómalo de estas puede ser indicativo de la existencia de un fallo mecánico, por tanto, la técnica de análisis de vibraciones permite determinar si existe una avería mecánica.

Para lograr detectar si existe una avería mediante el método de análisis de vibraciones, se deben identificar las componentes que conforman la vibración general del motor.

Para realizar un ensayo de análisis de vibraciones es necesario establecer los puntos donde se deben colocar los transductores, concretamente los acelerómetros, este es el paso crítico del ensayo pues deben disminuir los efectos de la impedancia mecánica y para ello deben de cumplir una serie de requisitos. Los puntos de medición deben ser de fácil acceso, proteger la seguridad del operario y cercanos a los rodamientos (la señal va disminuyendo conforme el punto de medida se aleja del rodamiento). Además, se debe tener la precaución de colocar el acelerómetro sobre la carcasa y no sobre cubiertas ni elementos móviles. Una vez seleccionados los puntos, es conveniente indicarlos para que siempre se tomen estos mismos puntos en el resto de los ensayos futuros. Las medidas se toman en las direcciones radiales al eje (horizontal y vertical) y en la dirección axial [13]. La señal que capta el acelerómetro se trata, transforma y digitaliza mediante un sistema de tratamiento de señales para poder observarla en pantalla. En este punto, la señal de la vibración se transforma al dominio en frecuencia y es posible asociar los picos de la señal que se observen con una avería en concreto de la que se conoce con anterioridad la frecuencia que produce la vibración [14].

Esta técnica presenta la gran ventaja de que puede realizarse con el motor en funcionamiento; sin embargo, presenta los inconvenientes de que es necesario personal cualificados y que en algunos casos surge la dificultad de diferenciar los fallos del motor con otros aspectos que no está relacionado con la avería.

2.4.2. Análisis de corrientes

Existen estudios que vinculan la existencia de frecuencias en la corriente de alimentación de los motores con distintos fallos, para conocer si estas frecuencias son características de la existencia de un fallo se hace un análisis de corrientes. Esta técnica es simple, ya que como equipo se utiliza una pinza amperimétrica que se sitúa en la línea de alimentación y el sistema de tratamiento de la señal. Al tratar la señal y visualizarla en una pantalla se posee la capacidad de realizar el análisis espectral de la corriente y relacionar las frecuencias que aparecen con un posible fallo. [14]

Con esta técnica se pueden detectar excentricidades y roturas o agrietamientos de las barras y anillos del rotor. Presenta las ventajas de no ser invasiva, permitir la monitorización de manera remota y de realizar el ensayo con el motor en funcionamiento. Aunque es necesario que el personal esté cualificado para entender los datos obtenidos.

2.4.3. Termografía infrarroja

Un incremento excesivo de la temperatura tiene resultados perjudiciales en el motor eléctrico, ya que reduce su vida útil y limitan su capacidad de trabajo. El inconveniente del aumento de temperatura es que puede pasar desapercibido, por tanto, el momento en el que se detecta podría ser tarde, habiéndose visto comprometidos ya la seguridad y funcionamiento del motor. Para detectar estos aumentos de la temperatura se hace uso de la termografía infrarroja. En esta técnica se utilizan las cámaras termográficas, que poseen una pantalla de visualización que permiten conocer la distribución térmica de la superficie de un elemento, este equipo la ventaja de que puede usarse a distancia, sin necesidad de contacto. El procedimiento es relativamente sencillo: se introduce una bobina alrededor del estator, se incita y con la cámara termográfica se observan los puntos calientes. Mediante la termografía infrarroja se posee la capacidad de detectar averías en el paquete magnético.

La técnica tiene como ventajas la capacidad de ser aplicada con el motor en funcionamiento y la seguridad, ya que es una técnica que como ya se ha comentado no requiere de contacto directo. Sin embargo, presenta la desventaja principal la incapacidad de conocer la temperatura interna del motor, ya que los equipos miden la temperatura superficial externa. [14]

2.4.4. Técnicas para la comprobación del aislamiento

Entre las técnicas utilizadas para comprobar el estado en el que se encuentra el aislamiento se encuentran las descargas parciales, siendo estas el objeto principal del presente trabajo, por ello se dedica el apartado 3. *Descargas parciales* solo para estas. Además de las descargas parciales existen otras pruebas que se utilizan actualmente como método de comprobación del aislamiento: prueba de resistencia óhmica, resistencia del aislamiento a tierra, índice de polarización, HiPot y Surge; todas ellas se recogen en el apartado para tener todo lo relativo al aislamiento agrupado en una única sección.

2.5. Sistema aislante de los motores eléctricos

Tal y como se ha comentado hasta este punto, el sistema aislante es el elemento sobre el que se va a aplicar la técnica de descargas parciales y por tanto sobre el que se va a realizar el mantenimiento predictivo. Por ello se ha decidido recoger en este apartado todo lo relativo a ello como es su descripción y fallos que en él pueden detectarse, dejando las descargas parciales para el apartado siguiente en el que se exponen todos los detalles.

2.5.1. Descripción del sistema aislante

El sistema aislante o aislamiento de los motores eléctricos de inducción se define como el conjunto de materiales que tienen poca capacidad para conducir la electricidad. Su función principal es la seguridad, ya que, separa los conductores entre sí para que no haya riesgo de cortocircuito y mantiene a los operarios alejados de las partes sometidas a tensión que puedan provocarles una descarga. Asimismo, el aislamiento debe ser capaz de aislar con relación a tierra. Además de la función de seguridad, el aislamiento es muy importante ya que, sin él, el paso de la corriente eléctrica por los devanados y la interacción entre los campos electromagnéticos no sería posible y por tanto el motor no podría desarrollar su función.[15]

La estructura básica del aislamiento del estator se muestra en la *Figura 10. Estructura básica del aislamiento.*

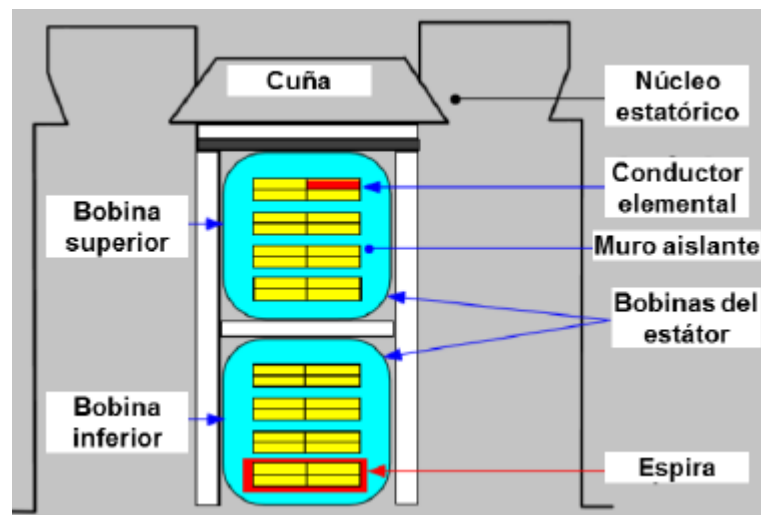


Figura 10. Estructura básica del aislamiento [12].

- **Muro aislante.** La función del muro aislante es evitar cortocircuitos a tierra, es el aislante que posee mayor espesor y separa la bobina del exterior. Debe ser capaz de resistir voltajes del nivel de aislamiento del motor.
- **Aislamiento entre espiras o conductores.** La estructura de las espiras está formada por conductores individuales, se necesita que haya aislamiento entre ellas y entre los conductores. Debe ser capaz de resistir el voltaje entre espiras y su función es evitar los cortocircuitos entre ellas.

La constitución del sistema aislante se divide en tres: material aislante, estructura soporte y aglomerante. El material más utilizado como aislante es la mica, se aplica en forma de láminas o mediante papel formado por partículas de mica. La fibra de vidrio o el poliéster se utilizan como estructura soporte. Finalmente, como elemento aglomerante lo más usual es utilizar resinas sintéticas epoxi.

Con la combinación de los materiales anteriores se constituye el sistema aislante. Para las bobinas individuales, existen distintos tipos de encintado, pero el mejor

resultado se obtiene usando cintas porosas, se envuelve cada bobina con estas cintas y una vez están completamente encintadas se empieza con el proceso de impregnación. Este proceso se basa en eliminar la humedad que contiene la bobina mediante calentamiento, una vez se ha eliminado la humedad se sumerge la bobina en la resina de impregnación en condiciones de vacío, se presuriza y se mantiene durante un tiempo. Aplicar este recubrimiento de resina conlleva una serie de ventajas como es el incremento de la rigidez mecánica de los alambres del bobinado, protección del bobinado contra la humedad y el entorno corrosivo químico y, por último, mejora de las propiedades dieléctricas y de la capacidad de conducción térmica [16]. La siguiente etapa en la fabricación es el curado que consiste en mantener la temperatura del devanado constante con la ayuda de estufas.

Es bastante usual que junto con el sistema aislante descrito se recubran las barras y bobinas en las zonas de ranura con cintas, de este modo se consigue proteger al muro aislante de sufrir deterioros físicos. Además, este encintado impide que entre la bobina y la ranura haya huecos que contengan gas (aire) y se produzcan las descargas parciales. Otra de las zonas de la bobina en la que es frecuente que se den las descargas parciales es la zona de salida de ranura, para evitar que se produzca la aparición de DP se realiza el recubrimiento de reparto.

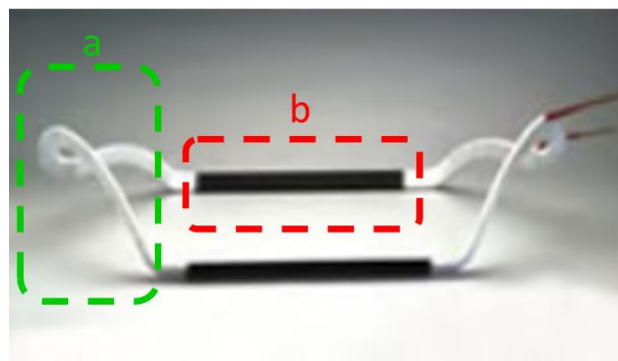


Figura 11. Bobina de un motor: a) cabeza de bobina, b) zona de ranura.

Para colocar las bobinas en el estator se suelen utilizar semiconductores o goma vulcanizada. Finalmente, para fijar las bobinas se usan cuñas de apriete de fibra de vidrio y para las cabezas de bobina se usan cintas de fibra de vidrio impregnadas con resina. [19]

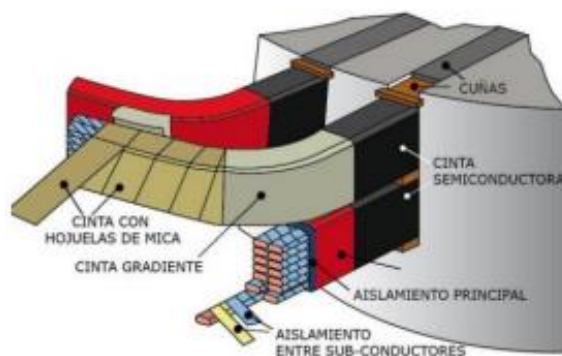


Figura 12. Sección sistema aislante motor.

Es muy importante seleccionar bien el aislamiento y aplicarlo de la manera correcta ya que tiene un efecto directo sobre la vida útil del motor, a medida que el aislamiento se degrade, la vida del motor disminuye. A la hora de seleccionar correctamente el aislamiento, teniendo en cuenta sus propiedades, se debe contar con los siguientes aspectos:

- **Eléctrico.** La función eléctrica es evitar cortocircuitos tanto entre los elementos que conducen la electricidad con respecto a tierra. Para ello, el aislante ha de poseer una elevada resistencia, sabiendo que resistirá las tensiones en condiciones de funcionamiento del motor y tensiones superiores a estas que se darán en caso de ensayos.
- **Mecánica.** El aislante debe ser capaz de soportar los impactos mecánicos durante el funcionamiento de la máquina rotativa.
- **Térmico.** El aislante debe ser capaz de soportar altas temperaturas y de transportar el calor, que se genera a causa de las pérdidas, hacia el ventilador que actúa como sistema de refrigeración. En este punto se tiene en cuenta la clase térmica del aislante. Según la norma UNE 21-304 se tienen las clases de aislamiento que se encuentran reflejadas en la *tabla 1. Clase térmica* junto con las temperaturas límite que puede soportar:

Clase de aislamiento	Temperatura límite [°C]
Y	90
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180
C	Superior a 180

Tabla 1. Clase térmica del aislamiento.

Las temperaturas máximas que se alcanzan en los devanados deben ser entre 5 °C y 10 °C inferiores a las temperaturas límite que marca la norma, si esta es un valor medio. En el caso de usar termopares para la medida de temperatura, estas pueden ser superiores a este valor. Si el motor trabaja por debajo de la temperatura límite que indica su clase de aislamiento, la vida útil de este no se ve afectada. Sin embargo, si la temperatura límite que indica la norma se sobrepasa, por cada 10 °C que supere la temperatura límite, la vida del aislante se reduce a la mitad.

2.5.2. Mecanismos de degradación del aislamiento

Existen ciertos mecanismos que afectan al aislamiento y reducen sus propiedades como su resistencia mecánica y eléctrica. Al verse las propiedades reducidas el proceso de envejecimiento se acelera y la vida útil disminuye, A continuación, se explican los más frecuentes:

- **Térmico.** Durante el funcionamiento del motor se pueden llegar a alcanzar altas temperaturas a causa de las corrientes de Foucault, como ya se ha expuesto, si se supera la temperatura que soporta el aislante el deterioro puede acelerarse.
- **Eléctrico.** El principal fenómeno que causa el envejecimiento eléctrico son las descargas parciales, al aumentar la tensión la actividad de las DP se ve incrementada lo que conlleva a que se formen defectos en el aislamiento y se vea reducida su vida
- **Mecánico.** Durante su vida, el aislamiento se ve sometido a estrés mecánico a causa del funcionamiento del motor, este estrés está causado por: la fuerza centrífuga a la que se somete el rotor, la vibración de las bobinas en las ranuras a causa de los campos magnéticos que se generan y los transitorios, que terminan por variar el sincronismo del motor creando corrientes mayores a la nominal creando un sobreesfuerzo.
- **Ambiental.** Existen una serie de fenómenos que se relacionan con el ambiente en el que se encuentra la máquina trabajando que pueden llegar a dañar el aislamiento. Entre estos fenómenos se encuentran: humedad en los devanados, temperaturas ambientes extremas para las que el motor no ha sido diseñado, partículas de polvo, partículas abrasivas, polvo o residuos generados por el roce de elementos móviles.

2.5.3. Fallos en el sistema aislante

El aislamiento es la parte más delicada del motor, como se ha visto con anterioridad en la *Figura 9. Clases específicas de fallo*, las averías del estator suponen aproximadamente más del 37% de los fallos en los motores llegando incluso a ser el 50% en grandes motores, debiéndose estas a la degradación del aislamiento. Se establece que el aislamiento falla cuando es incapaz de evitar que la corriente circule por los elementos por los que no debe circular. En el apartado anterior se ha visto que la temperatura es un factor muy importante a la hora de preservar el estado del aislamiento, pero también hay otros factores que pueden influir en su degradación. Estos factores se deben al esfuerzo mecánico, eléctrico y condiciones ambientales a las que se encuentra sometida la máquina. Entre los fallos que se pueden dar en el sistema aislante se encuentran los siguientes:

- **Contaminación y humedad.** La presencia de contaminación y de humedad en el aislamiento se debe a las condiciones ambientales del lugar en el que se encuentra trabajando el motor. Las partículas de polvo, agua o aceite son algunas de las causas de este tipo de fallo.
- **Defectos en las cabezas de bobinas.** Este fallo se debe a que estas zonas están sometidas a elevados esfuerzos mecánicos y eléctricos. En el caso de los esfuerzos mecánicos los defectos podrías estar provocados por arranques frecuentes o inadecuada fijación de las cabezas; en el caso de los esfuerzos eléctricos por sobretensiones ocasionadas por perturbaciones en la red de alimentación.
- **Cortocircuito entre espiras.** Este fallo es el más común y para solventarlo se necesita rebobinar o sustituir el motor. Las causas de este fallo son la contaminación interna del motor, fallo en el barniz aislante del hilo y rápidas variaciones en la tensión de alimentación. [17]



Figura 13. Cortocircuito entre espiras. [17]

2.5.4. Técnicas para la comprobación del aislamiento.

Llegados a este punto, ya se ha comprobado la importancia del óptimo estado del aislamiento, ya que si está en mal estado se puede producir un cortocircuito teniendo consecuencias muy graves que afectan a la seguridad y que puede conllevar un reemplazo del motor con los costes que esto implica. De ahí la importancia de técnicas que permita ver su degradación y, aunque como se verá en el apartado 3. *Descargas parciales* actualmente se está trabajando para desarrollar las PD como única técnica, esta no está justificada aún en la mayoría de los motores. A causa de lo anterior, se tienen otras pruebas que, aunque no son capaces de determinar de forma clara el estado del aislamiento, se suelen utilizar varias pruebas en conjunto para obtener más datos y una mayor fiabilidad, las pruebas se describen a continuación:

2.5.4.1. Prueba de resistencia óhmica.

Esta prueba consiste en medir la resistencia de las tres bobinas del estator. Teóricamente para que esté todo correcto las tres resistencias deben ser iguales. En la realidad las resistencias no son iguales, pero existe una tolerancia, el parámetro Delta R, que nos indica si los valores obtenidos se encuentran dentro de valores aceptables. El parámetro Delta R o desequilibrio resistivo mide la diferencia entre la resistencia entre fases y se calcula haciendo uso de la ecuación 9:

$$\text{Delta R} = \frac{\text{Máxima desviación sobre el valor promedio de las 3 resistencias}}{\text{Valor promedio de las 3 resistencias}} \cdot 100 \text{ (Ec. 9)}$$

Tanto la máxima desviación como el valor promedio de las 3 resistencias se miden en ohm [Ω].

Según el IEEE Std. 1068 2015 se establece que los valores máximos aceptados de Delta R son 1% en el caso de devanados preformados y de 2% en el caso de devanados aleatorios. Si se diese el caso de que los valores estuvieran fuera de la tolerancia que marca Delta R, esto podría deberse a que la conexión con la caja de bornes se encuentra mal, a la presencia de espiras quebradas, a una deficiente soldadura entre las bobinas de una misma fase o a la distinta sección de hilos para cada fase.

Esta prueba se realiza en paradas programadas y requiere de un equipo de alta precisión, concretamente se usan micrómetros capaces de medir resistencias de hasta 0.01Ω y, por tanto, conlleva el inconveniente de ser muy costosos económicamente. Para poder obtener unos resultados fiables es necesario llevar a cabo una tendencia del comportamiento.

2.5.4.2. Aislamiento a tierra

En este test se comprueba el correcto estado del aislamiento a tierra, que tiene como función aislar las bobinas de la masa del motor. Para la realización de la prueba se hace uso de un Megger o Meghómetro que aplica una tensión continua que suele estar entre los 500V y 1000V, dependiendo de la tensión nominal del motor. El Megger se conecta, habiendo desconectado las fases previamente, a un terminal de fase y a un tornillo de la carcasa del motor y mide la corriente que se deriva a tierra a través del aislamiento a partir de 1 minuto desde que se empezó a aplicar la tensión continua, haciendo uso de la ecuación 10, se calcula la resistencia del aislamiento:

$$R_{aisl/1min} = \frac{V_{DC}}{I} \quad (Ec. 10)$$

Siendo V_{DC} la tensión aplicada por el Megger [V], I la corriente medida por el Megger [A] y $R_{aisl/1min}$ la resistencia del aislamiento a tierra [Ω].

Según el IEE Std. 43-2000 se establece que el valor mínimo de resistencia del aislamiento a tierra para que esté en buen estado debe ser 1 M Ω por cada KV de tensión nominal más 1 M Ω por la corrección de la temperatura ambiente.

Es importante realizar la prueba en un motor limpio y seco, para ello se pasa primero la prueba del índice de polarización. Además, se recomienda realizar el test de aislamiento a tierra periódicamente monitorizando la resistencia para poder observar cambios en la tendencia si los hubiese.

2.5.4.3. Índice de polarización o adsorción dieléctrica.

El índice de polarización (IP) indica el nivel de humedad y limpieza del aislamiento, para ello como en la prueba anterior, se hace uso del Megger. El Megger aplica una corriente continua y se obtienen la resistencia al minuto de empezar a aplicar la tensión y a los 10 minutos. Con ayuda de la ecuación 11 se calcula el índice de polarización:

$$IP = \frac{R_{aisl/10min}}{R_{aisl/1min}} \quad (Ec. 11)$$

Un IP elevado indica que el motor se encuentra limpio y seco, sin embargo, si se tiene un IP cercano a 1 es indicativo de que el motor está sucio y húmedo. El valor de la resistencia a $R_{aisl/1min}$ puede ser aprovechado para la prueba del aislamiento a tierra y se recomienda realizar ambas pruebas.

2.5.4.4. HiPot

Esta prueba se aplica en el proceso de fabricación de los motores y pretende comprobar la rigidez dieléctrica del aislamiento, esto es la tensión máxima que puede soportar. Para ello se somete al aislamiento a una tensión muy superior a la tensión nominal. Esta técnica presenta el inconveniente de que puede llegar a ser destructiva y dañar el aislamiento.

2.5.4.5. *Surge o impulso*

Surge o impulso es la única técnica que permite detectar cortocircuitos entre espiras de la misma fase. Se basa en aplicar un pico de tensión en cada bobina y monitorizar la caída de tensión. Si las caídas de tensión en cada bobina son iguales, el aislamiento se encuentra en buen estado. Del mismo modo que ocurre con la técnica anterior, HiPot, conlleva el inconveniente de poder ser una técnica destructiva.

3. Descargas parciales

Una vez se ha expuesto de forma general los fundamentos de los motores eléctricos y se ha enmarcado el ámbito del trabajo, en este tercer apartado se va a tratar todo lo relacionado con la técnica de descargas parciales, empezando por los conceptos básicos hasta llegar a su desarrollo.

3.1. Fundamentos de las descargas parciales

Según la norma UNE-EN 60270:2002/A1:2016, las descargas parciales se definen como *“una descarga eléctrica localizada que cortocircuita parcialmente el aislamiento entre dos conductores que están a distinto potencial”*. Las DP pueden suceder en el interior de aislantes sólidos, líquidos o gaseosos, causando el deterioro del aislamiento de la zona en la que se producen, el grado de deterioro causado se relaciona con la naturaleza del material aislante utilizado. Si se trata de un material inorgánico sufrirá menores consecuencias derivadas de la actividad de las DP que si se trata de un material orgánico. El concepto parcial implica que el resto del aislamiento que no se ve afectado por la descarga es capaz de seguir cumpliendo su función.

El origen de las descargas parciales es debido principalmente a defectos en el aislamiento; la causa de estos defectos reside en diversos factores, entre los que se encuentra el proceso de fabricación del aislamiento como pueden observarse en la *Figura 14. Cavidades en el aislamiento por defectos durante el proceso de fabricación*. Durante el proceso de fabricación cabe la posibilidad de que quede gas y forme cavidades, huecos o burbujas en el interior, es en estas cavidades en las que existe gas donde se producen las descargas [18]. Por tanto, las DP se consideran un fenómeno de ionización gaseosa transitorio que se genera en el gas existente en el interior del aislamiento donde la tensión aplicada supera un valor crítico, al superarse este valor el gas se ioniza y es cuando tiene lugar la descarga [19]. Otros de los factores que favorecen la presencia de descargas parciales son la presencia de impurezas, contaminación cuerpos extraños, humedad y los esfuerzos mecánicos, como las vibraciones o impactos.

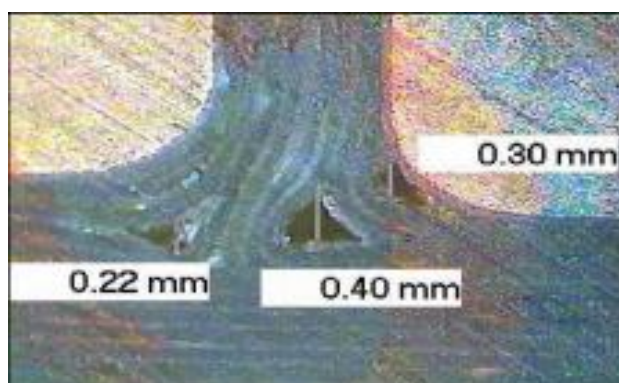


Figura 14. Cavidades en el aislamiento por defectos durante el proceso de fabricación. [20]

Se debe tener en cuenta que es necesario un espacio gaseoso para que las DP se produzcan. La constante dieléctrica del gas, (3kV/mm) es pequeña en comparación con la del aislante (100kV/mm), por ello se genera un aumento del campo eléctrico en el espacio ocupado por el gas superior al que es capaz de resistir el aislamiento, que produce a descarga eléctrica. En la *Figura 15. Esquema formación de las descargas parciales*, se observa un esquema de la formación de las DP en el interior del aislamiento:

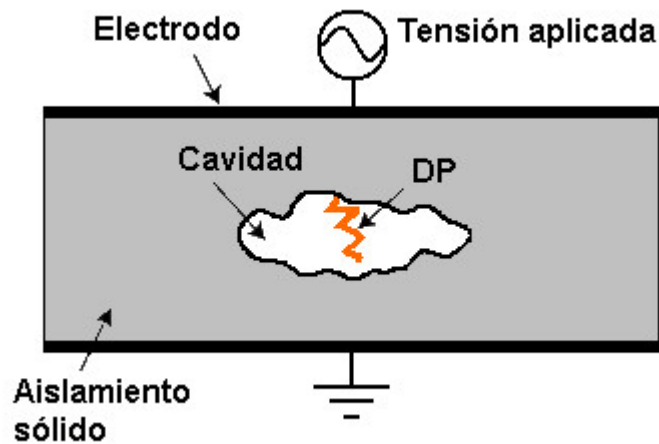


Figura 15. Esquema formación de las descargas parciales. [21]

Las descargas parciales producen degradación del aislamiento, esta degradación puede ser causada por distintos procesos entre los que se encuentran los siguientes. El envejecimiento químico y térmico, causado por la erosión y el aumento de la temperatura de la zona a causa del impacto de electrones de alta energía. La creación de puntos débiles a causa de la incidencia de radiación ultravioleta. El ataque químico a causa del ozono que se genera.

Se consideran descargas parciales a las descargas que se autoextinguen, si no lo hiciesen el sistema aislante se deterioraría llegando a su fractura. Para que ocurra el fenómeno de autoextinción el campo eléctrico, aunque superior al que puede soportar el medio aislante, debe ser lo suficientemente pequeño para que no sea capaz de mantener las descargas parciales de este modo el campo disminuye y no llegan a producirse descargas mayores y por tanto rupturas totales del aislamiento. Por ello se dice que las descargas parciales ocasionan pulsos de corriente transitorios en el aislamiento.

Se estima que la actividad de descargas parciales en un aislamiento degradado es 30 veces superior a la actividad de DP en un aislamiento en condiciones adecuadas. Cabe destacar que todas las máquinas sufren descargas parciales incluidas las nuevas.

Tal y como ya se ha citado, las descargas parciales están estrechamente vinculadas con las cavidades, por tanto, a la hora de conocer los daños causados por las descargas parciales se tienen en cuenta una serie de parámetros como son la magnitud, los pulsos

por segundo [pps] y la polaridad y el ángulo de fase, que ayudan a relacionar las DP con los huecos de gas y los daños causados.

La magnitud de las DP está estrechamente relacionada con el tamaño de la cavidad en la que se producen, esto a su vez está relacionado con la gravedad del daño causado; cuanto mayor sea la dimensión del hueco mayor será la gravedad de los daños. Para cuantificar la magnitud se hace uso de las siguientes unidades de medida:

- **Milivoltios [mV].** Utilizados en objetos inductivos, es una medida directa.
- **Picoculombios [pC].** Se aplica a objetos capacitivos. Presentan el inconveniente de necesitar calibración para cada objeto que se mida y representa la carga aparente de las DP. Suele utilizarse en los ensayos.
- **Miliamperios [mA].** Se utilizan al usar transformadores de corriente cuando se realiza la medición.
- **Decibelios [dB].** Se utilizan cuando se usan analizadores de espectros.

Del mismo modo que la magnitud de las DP se relaciona con la gravedad de los daños causados, los pulsos por segundo [pps] se relacionan con el número de cavidades existentes en el interior del aislamiento y por tanto ayudan a hacerse una idea de la difusión del daño causado en el aislamiento. La relación es directamente proporcional, a mayor número de huecos habrá un mayor número de descargas.

La polaridad y el ángulo de fase respecto a la frecuencia de red que son útiles ya que con ellos localizar las burbujas de aire en el aislamiento y permitir ver el tipo de descargas producidas. [22]

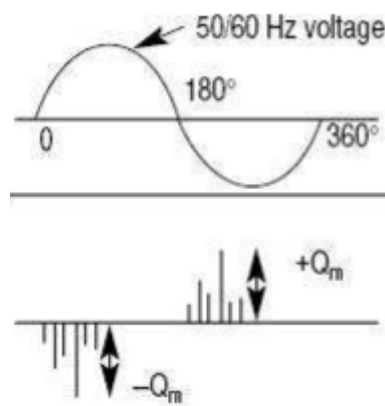


Figura 16. Relación de la polaridad y el ángulo de fase. [22]

3.2. Tipos de descargas parciales

La existencia de las descargas parciales depende de una serie de factores, entre los que se encuentran: el voltaje que hay en el hueco en el que se forman, la resistencia que tiene este a romperse y la carga residual que queda a causa de la DP previa. A su vez el voltaje existente en la cavidad es dependiente de la geometría de esta.

En líneas generales las descargas parciales se pueden clasificar en tres tipos en función de las características del lugar en el que se producen, del medio que existe entre los electrodos y de su geometría. A la hora de diferenciar cada tipo se tienen patrones resueltos en fase de descarga parcial (PRPD) característicos de cada uno, en los que se representan la amplitud de las descargas superpuestas a la tensión de red.

3.2.1. Descargas parciales internas

Las descargas parciales internas se originan en las cavidades de gas existentes en el interior del material aislante o entre un aislante y un electrodo. Están ligadas a los defectos que originan burbujas de gas durante el proceso de fabricación. Al haber una cavidad ya formada, si el proceso de las DP se produce repetidamente puede dar lugar a su erosión. Al efecto causado por la erosión suele añadirse el aumento localizado de temperatura en el punto en el que ocurre la descarga, este aumento trae consigo dos consecuencias: algunos materiales pueden llegar a fusionarse y pueden darse lugar reacciones químicas. Todo ello conlleva a un deterioro del aislamiento y a un aumento de las dimensiones del hueco que a su vez reduce la superficie activa del aislamiento pudiendo llegar a producirse la ruptura del aislamiento.

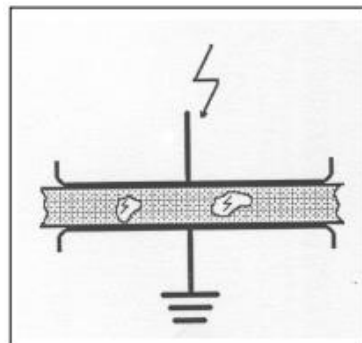


Figura 17. Esquema formación descarga parcial interna. [1]

En la *Figura 18. Patrón resuelto en fase de descarga parcial interna* se muestra el patrón característico de las descargas parciales internas. En ella puede observarse como se representan la amplitud de las descargas parciales en V frente a la fase de la tensión de la red de alimentación, todas las amplitudes de las descargas parciales que ocurren durante el ciclo se agrupan y se superponen al ciclo del voltaje de la red. De este modo puede verse como las descargas parciales se agrupan en los puntos en el que la tensión de red cambia de polaridad (0° y 180°), manteniéndose aproximadamente 50° , hasta 50° - 60° en su etapa positiva y hasta 230° - 240° en su etapa negativa.

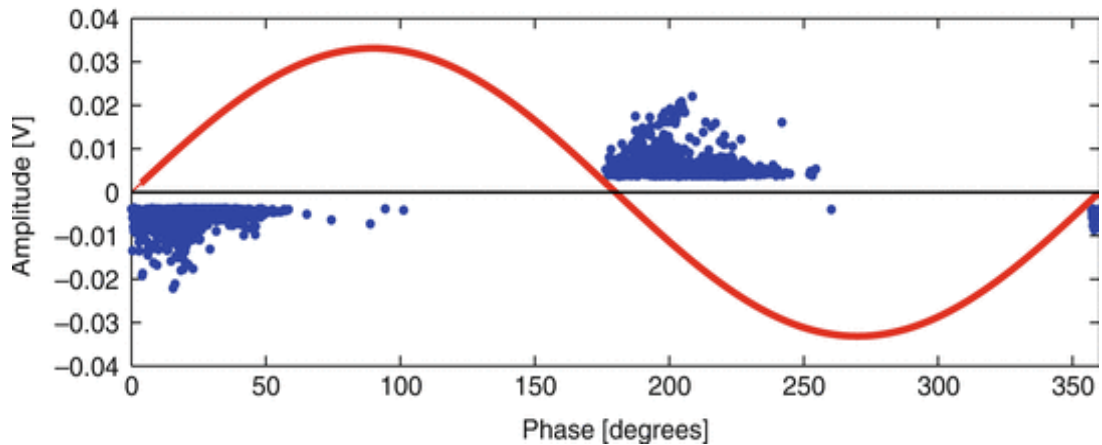


Figura 18. Patrón resuelto en fase de descarga parcial interna.[23]

3.2.2. Descarga parcial superficial

Las descargas parciales superficiales se producen entre el área de contacto de dos aislantes distintos [1]. Se producen a causa de imperfecciones en una de las superficies que están en contacto. Las tensiones con las que se inician las DP superficiales son menores que las de inicio de las internas. En este tipo de descargas la contaminación influye mucho, el hecho de que existan partículas contaminantes o humedad aumenta las probabilidades de DP superficial. Del mismo modo que ocurre con las DP internas una vez que se ha iniciado la descarga sus consecuencias pueden propagarse a un área mayor.

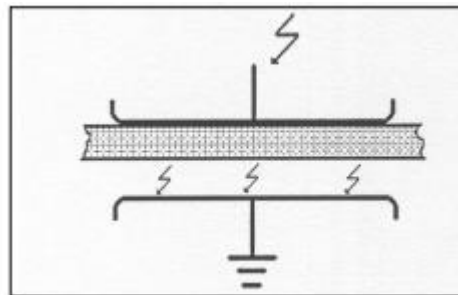


Figura 19. Esquema formación descarga parcial superficial. [1]

En la Figura 20. Patrón resuelto en fase de descarga parcial superficial, se muestra el PRPD de las descargas superficiales, en el gráfico se continúan enfrentando la amplitud de las descargas frente a la tensión de red, y en él puede observarse como en este caso las descargas se agrupan alrededor de los picos de la tensión de red.

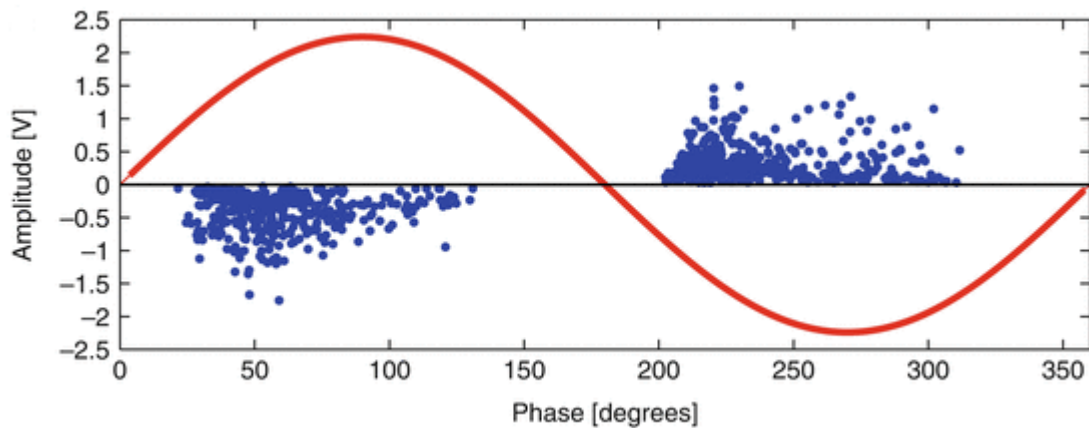


Figura 20. Patrón resuelto en fase de descarga parcial superficial.[23]

3.2.3. Descarga parcial externa

Las descargas parciales externas son aquellas que se originan por “el proceso de ionización del aire contenido entre los electrodos, cuando el proceso empieza a ser visible y a producirse únicamente en el medio gaseoso (normalmente aire) se le llama efecto corona” [1]. Se producen en una geometría particular punta-gas-plano. Este tipo de descargas no suele darse en motores eléctricos y aunque se sabe que no es causante inmediato del envejecimiento del sistema aislante, el hecho de que se produzcan puede enmascarar la presencia de otro tipo de descargas. Las consecuencias de la aparición de DP externas se ven en la pérdida de potencia activa y perturbaciones radioeléctricas; además este tipo de descargas es precursor de la corrosión de los conductores [23].

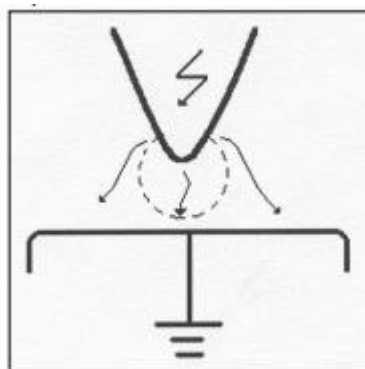


Figura 21. Esquema formación descarga parcial externa. [1]

En la Figura 22. Patrón resuelto en fase de descarga parcial externa puede observarse el PRPD de las descargas externas, en ella se muestra como estas descargas quedan agrupadas en el semiciclo negativo de la frecuencia de red.

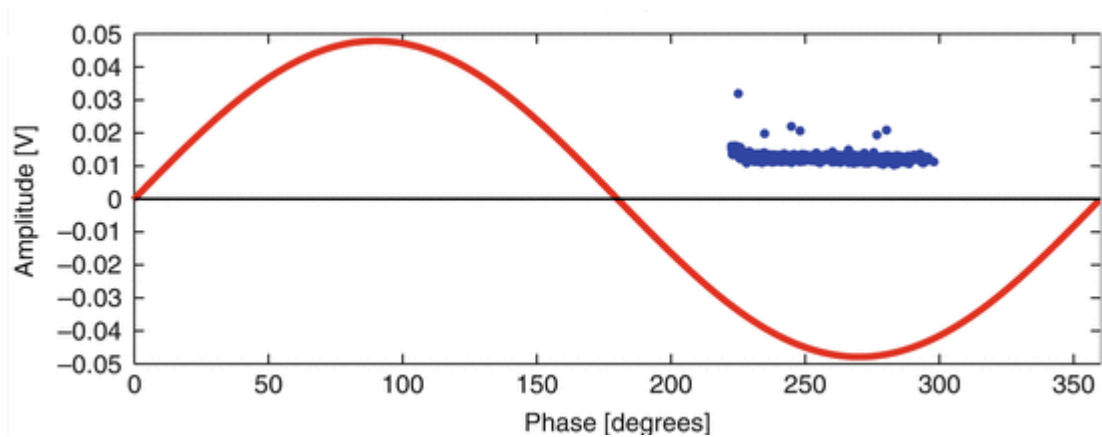


Figura 22. Patrón resuelto en fase de descarga parcial externa.[23]

De los tres tipos de descarga vistos, las descargas parciales internas son las más críticas. Esto es debido a que las descargas se manifiestan en puntos débiles del material mientras que en el resto de los tipos de DP las descargas se reparten por una mayor extensión de superficie del dieléctrico. [19]

3.3. Proceso de formación de las descargas parciales

La formación de las descargas parciales es un proceso sencillo, se inicia en el momento en el que la tensión que está siendo aplicada sobre un defecto, cavidad o hueco del aislante sobrepasa la tensión de ruptura (tensión a partir de la que se inicia el proceso de descarga), en este momento se produce la descarga. Es en este instante donde se produce una caída de tensión en la zona de fallo que tiende a 0, sin embargo, esta caída de tensión se detiene cuando llega al valor de la tensión de extinción (tensión a la que cesa la descarga). Durante esta parte del proceso se genera un pulso de corriente superpuesto a la onda de tensión.

Cuando la descarga ha terminado, cabe la posibilidad de que se produzcan nuevas descargas, esto se debe a que la tensión inducida en la zona de la cavidad tiende a incrementarse, siguiendo la evolución de la tensión de red aplicada. Al incrementarse el valor de la tensión, es capaz de llegar al valor de la tensión de ruptura y volver a iniciar el proceso de descargas otra vez.

El proceso se repite de forma cíclica y las descargas se producen en las zonas de mayor pendiente de la onda de tensión aplicada.

Cuando se trata con valores negativos de la tensión aplicada, debido al cambio de polaridad, el proceso de iniciación y desarrollo de la descarga es equivalente, simplemente hay que tener en cuenta que tiene polaridad opuesta.

El proceso de formación de las descargas parciales es muy rápido del orden de microsegundos (μs), sin embargo, el tiempo que pasa entre que aparece la descarga y la

ruptura del aislamiento puede variar entre minutos y años, dependiendo este tiempo del material del aislante y de los esfuerzos a los que está sometido. [19]

Las descargas producen desplazamiento de corriente de corta duración en el aislante, para representar estos pulsos se hace uso de los patrones PRPD, ya mencionados.

Todo el proceso explicado en los párrafos previos puede verse gráficamente en la Figura 23. Proceso de formación de descargas parciales en una cavidad, en la que se representan la evolución de 3 tensiones: la tensión aplicada (línea naranja de la figura 23), la tensión en la cavidad debida a la aparición de descargas parciales (línea verde de la figura 23) y la tensión en la cavidad en el caso que no hubiera DP (línea azul discontinua de la figura 23). Los términos U_i y U_e se corresponden a las tensiones de ruptura y de extinción respectivamente.

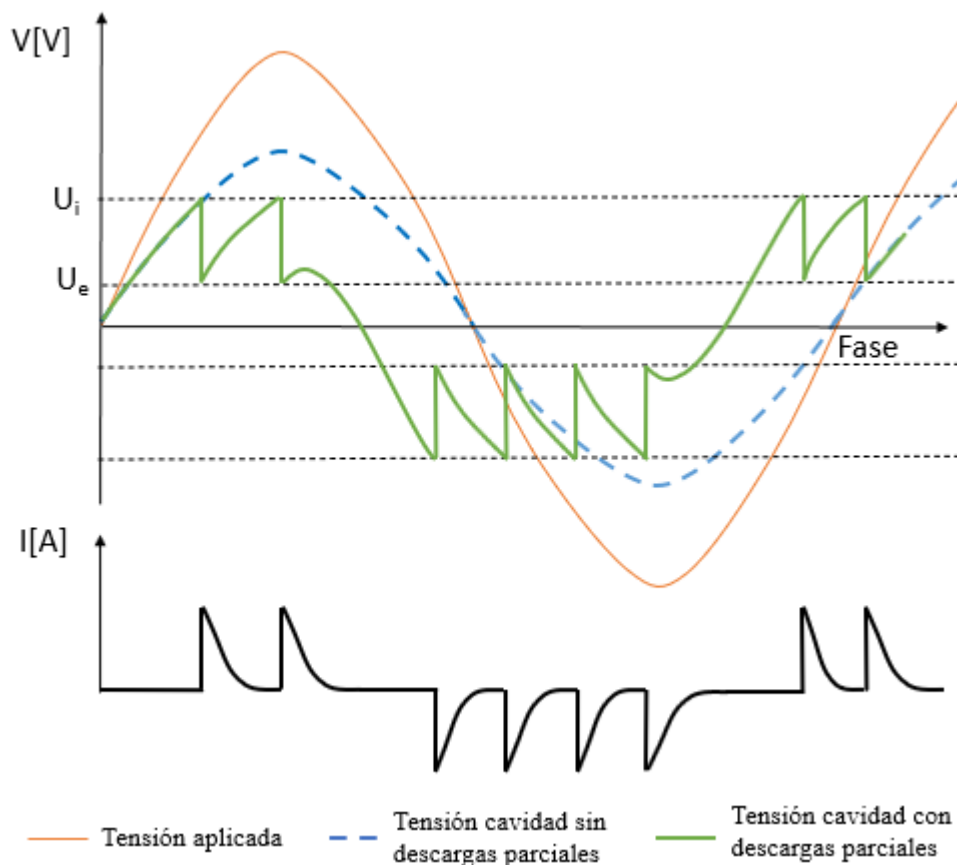


Figura 23. Proceso de formación de descargas parciales en una cavidad.

Una vez observados los patrones de las figuras 18,20,22 y la figura 23, se puede extraer que la zona más probable para que se dé el fenómeno de las descargas parciales, es en los tramos de subida en los semiciclos positivos y en los tramos de bajada en los negativos. [19]

Finalmente, cabe destacar que las DP producidas en el sistema aislante de los motores eléctricos presentan menor gravedad que las de equipos de alta tensión. Esto se debe a que en el sistema aislante se suele utilizar mica como material y esta tiene

unas cualidades tanto térmicas, eléctricas como mecánicas que soporta niveles de descargas más altos que los otros equipos.

3.4. Problemas detectados mediante descargas parciales

Como ya se ha comentado en los apartados anteriores, las descargas parciales son causantes de la degradación progresiva del aislamiento, aunque, gracias a las propiedades de la mica como aislante, es difícil que el aislamiento falle únicamente debido a las DP y es más probable que falle por otras causas o por la combinación de otras averías y las consecuencias de las DP. Sin embargo, las descargas parciales son un buen indicador de otros fallos del motor, esto resulta ventajoso desde el punto de vista del mantenimiento, ya que si se detectan DP pueden estar indicando averías que no habían sido detectadas por otros métodos. Los errores más comunes detectados a través de la medida de actividad de las descargas parciales son los siguientes:

- **Aflojamiento de cuñas.** Este tipo de problema suele tener un origen mecánico, que ocasiona erosión de las capas semiconductoras en el bobinado del estator y causa DP en las ranuras, si no se detecta, esta avería puede originar un fallo del tipo fase a tierra o fase a fase [25].
- **Contaminación.** La presencia de actividad de descargas parciales puede ser un indicador de presencia de partículas, suciedad, aceite o humedad en el bobinado del estator.
- **Descargas entre fases o ranuras.**
- **Grietas.**



Figura 24. Grieta en un motor eléctrico. [26]

- **Fallos en laminaciones internas.**
- **Defectos en los conductores.**

Una vez detectados los problemas, para solventarlos y evitar que se produzcan fallos mayores, es necesario realizar operaciones de mantenimiento como pueden ser la limpieza, sustitución o recalibración.

3.5. Métodos generales de detección de descargas parciales

Como consecuencia de las descargas parciales se suelen producir una serie de sucesos que sirven de ayuda para poder detectarlas. Entre los sucesos mencionados se encuentran la emisión acústica, la emisión de radiación lumínica, las reacciones químicas y pérdidas de potencia a causa del aumento de la temperatura.

Una vez se reconocen cuáles son las consecuencias de las descargas parciales y cómo se manifiestan, se tienen distintos métodos para poder detectarlas en función de los sucesos que las acompañan.

3.5.1. Ultrasonidos

Como consecuencia de las descargas parciales se produce en algunos casos emisión acústica debido a la expansión de los gases cerca de la zona donde se produce la descarga, para detectar este ruido se hace uso de la técnica de ultrasonidos. Cabe destacar que esta técnica solo permite detectar descargas parciales del tipo corona.

En primer lugar, se debe tener presente que es una técnica de detección, pero no permite ni cuantificar ni medir las descargas, simplemente permite localizarlas. El equipo que se utiliza para detectar las descargas corona es un detector acústico direccional, basado en un micrófono sintonizado en una frecuencia alrededor de los 40kHz. El fundamento de su funcionamiento es básicamente el mismo que el de un ruidómetro: a mayor ruido mayor es la descarga o más cerca se encuentra. Los detectores acústicos funcionan con unidades de dB μ V y no pueden calibrarse para que proporcionen magnitudes normalizadas de descargas parciales como los pC. Además, no es posible establecer una correlación entre dB μ V y pC. [24]

Este método, además de ser no invasivo, presenta la ventaja de que es inmune a las interferencias electromagnéticas, es decir, si existe ruido no afecta a la detección de las descargas.

3.5.2. Detección visual

Al producirse la descarga eléctrica se libera energía produciendo luz, ya sea en el espectro visible o en el ultravioleta. Si se trata de radiación lumínica visible, se realiza un ensayo cuyas condiciones se basan en la oscuridad total, de esta forma se ve el lugar

donde se produce. Si se trata de radiación en el espectro no visible, con la ayuda de cámaras de radiación ultravioleta de alta sensibilidad es posible captar esta radiación UV que se produce. Una vez se tiene captada la radiación, las imágenes se procesan, de esta manera es posible detectar la ubicación y obtener la intensidad de las DP. Este método es útil para detectar la existencia de descargas superficiales o descargas en las ranuras y para encontrar grietas.

3.5.3. Detección química

Cuando se producen las descargas parciales se originan reacciones químicas y se liberan subproductos como ozono, ácido nítrico, monóxido de carbono, dióxido de carbono o metano que además de causar el ataque químico de material, producen alteraciones en las cavidades en las que se originan las DP afectando finalmente el comportamiento de la descarga. Para medir los niveles los subproductos citados, principalmente el ozono, existe el denominado análisis de gases, que consiste en analizar los gases presentes, bien realizando la medida con tubos químicos o con sensores. Los niveles de concentración de los gases pueden ser indicativos indirectos de la presencia de descargas parciales. A la hora de analizar los resultados y tomar decisiones se debe tomar en consideración que los niveles de ozono se ven modificados por otros factores como la humedad, el grado de carga con el que opera la máquina, el factor de potencia o la temperatura.

3.5.4. Medición del factor de potencia

La aparición de DP en motores eléctricos lleva consigo el aumento de la temperatura de la zona, este incremento de temperatura puede verse reflejado en el crecimiento de las pérdidas de potencia eléctrica. Estas pérdidas de potencia se relacionan con el factor de potencia o $\cos\phi$, por ello para relacionar las pérdidas con la existencia de descargas parciales se calcula el $\cos\phi$ del aislamiento en dos condiciones diferentes de tensión: tensión inferior a la nominal y tensión a la que se inicia la descarga. Una vez se obtienen ambos valores se comparan de manera que cuanto mayor es la diferencia de las medidas mayor es el número de descargas parciales que se producen. Cuando se realiza este método se debe tener en cuenta que tiene poca sensibilidad a la hora de detectar descargas parciales, ya que se basa en la medición general de la actividad de estas, pero no posibilita el poder localizarlas exactamente.

3.6. Ensayo de descargas parciales

Las descargas eléctricas son una medida que indica el nivel de estrés eléctrico al que se somete el sistema aislante y por tanto es un parámetro que permite ver la degradación del aislamiento. Para ver la evolución de la degradación es necesario realizar un ensayo, el ensayo de descargas parciales es el único existente actualmente que permite ver mientras el motor está trabajando como va degradándose el aislamiento. En este apartado se muestran los equipos y aparatos necesarios para la realización de estos ensayos.

Tal y como ya se ha expuesto, los ensayos de DP son útiles porque permiten la anticipación al fallo, además de esto cuentan con algunas ventajas:

- **Ensayo no destructivo.** Aunque se trata de un ensayo no destructivo se debe tener en cuenta que su realización puede tener consecuencias en la vida del aislamiento, ya que al estar sometido a un estrés eléctrico sus propiedades pueden verse mermadas. [27]
- **Posibilidad de realización *on-line* y *off-line*.** El ensayo de descargas parciales permite que sea realizado cuando el motor está en marcha en condiciones de funcionamiento (*on-line*) o cuando se encuentra parado usando una fuente de tensión externa (*off-line*). En función del objetivo con el que se realiza el test se efectúa de un modo u otro.

En los ensayos *on-line*, la prueba de descargas parciales se realiza con el motor puesto en marcha usando sensores previamente instalados, de este modo se puede estudiar cómo se comporta el motor bajo las condiciones de funcionamiento y bajo la variación de estas como la variación de carga o temperatura, simulando varios escenarios. El ensayo *on-line* presenta la principal ventaja de permitir la monitorización continua que proporciona información actualizada sobre el estado del aislamiento y permite obtener la tendencia de degradación de este. Además, contribuye a decidir cuando es necesario parar para realizar una prueba con el motor parado. Desde el punto de vista de mantenimiento, esto favorece a conseguir un coste y un tiempo de parada mínimo.

Sin embargo, el ensayo *off-line* se realiza con el motor parado, de forma que es necesario una fuente de alimentación externa que energice todo el devanado a la misma tensión lo que permite descubrir problemas en un punto delimitado. Presenta una serie de ventajas: permite obtener las tensiones de ruptura y extinción de las descargas; permite detectar las DP con cierta facilidad; usando un equipo especializado es posible identificar la fuente de descargas parciales y permite energizarlas 3 fases a la vez o solo una fase conectando el resto a tierra, de esta manera es posible identificar la

fase concreta en la que se produce la descarga. Otra ventaja notable es que permite eliminar las fuentes de ruido mientras se realiza el test, ya que se puede aislar el resto del motor. En contraposición el método también presenta ciertas desventajas: para realizarlo es necesario tener la máquina parada, lo que incrementa las horas de parada de la máquina y por tanto los costes derivados; es necesaria una fuente de alimentación externa de alta tensión que energice los devanados, de este modo la probabilidad de que se produzcan DP se ve incrementada; al realizar la prueba con el motor parado no hay una manifestación 100% real del comportamiento del motor, esto se ve en que las temperaturas alcanzadas son bajas y que no hay presencia de esfuerzos electromecánicos. Teniendo en cuenta tanto las ventajas como los inconvenientes, el método *off-line* está justificado principalmente en tres momentos: fabricación, antes de la puesta en marcha y mantenimiento, en este último punto se incluye realizar esta prueba en el momento en que en el método *on-line* se muestren indicios de problemas. [28]

- **Indicativo del estado del aislamiento.** Los datos obtenidos de las DP son parámetro que indica el estado de degradación que tiene el aislamiento.
- **Parámetro predictivo.** Los datos obtenidos en el ensayo permiten estudiar la evolución de las DP y obtener la tendencia de degradación para tener una idea de cuándo se va a producir el fallo.
- **Posibilidad de monitorización continua.**

3.6.1. Carga aparente

El ensayo presenta la limitación de no poder medir las descargas parciales en el lugar exacto en el que se producen. Las DP causan oscilaciones de voltaje de corta duración que se ven compensadas por la introducción de pulsos de corriente en la red. Son estos últimos pulsos los que son accesibles desde el exterior para la realización de la medida. Para lograr medir la actividad de descargas se utiliza como magnitud la carga aparente.

La carga aparente es definida como *“aquella carga que, inyectada instantáneamente en bornes del objeto de ensayo, produciría y un cambio momentáneo de tensión entre sus terminales en la misma medida que la propia descarga parcial”*. Las unidades de la carga aparente son los pC. El hecho de elegir este parámetro presenta la ventaja de que su medida no se ve afectada por las condiciones del ensayo, sin embargo, si se midiesen directamente los pulsos de las descargas, estos podrían verse alterados a causa de la configuración de los instrumentos de ensayo utilizados.

Finalmente, otro de los motivos para utilizar la carga aparente es que el detector de descargas común aporta la información de lo que se denomina carga aparente. [19]

3.6.2. Equipos necesarios para la realización del ensayo

Para la realización del ensayo es necesario contar con una serie de equipos, para realizar una correcta elección de los equipos se deben tener en cuenta una serie de factores que pueden llegar a alterar los resultados. Estos factores son el ruido, el ancho de banda del equipo y la atenuación.

- Ruido. Los equipos deben tener la capacidad de reducir el ruido para que las medidas obtenidas sean aceptadas, existen dos tipos de ruido, el eléctrico que no puede eliminarse al completo y el externo, que puede ser ambiental o producido por un mal funcionamiento de algunos elementos.
- Ancho de banda. No se deben utilizar equipos que tengan un ancho de banda limitado porque no son capaces de mostrar totalmente la actividad de las descargas, ya que las componentes en frecuencia del pulso de las DP varían en función de donde se encuentran.
- Atenuación. Se debe tener en cuenta que al pasar los pulsos de las DP a través de los devanados se distorsionan y se atenúan, por ello los equipos deben tener una buena respuesta en frecuencia. [28]

Los equipos utilizados para el ensayo clásico son los siguientes:

- **Fuente de alta tensión.** Esta fuente de tensión debe ser capaz de suministrar la tensión nominal del motor cuando se trata de ensayo *on-line* y la tensión de fase +10% de esta cuando se realizan ensayos *off-line*, según IEC60037-27 (2006).
- **Condensador de acoplamiento.** Se trata de un sensor capacitivo. Detecta la actividad de descargas parciales. La función principal es permitir la circulación de las señales producidas por los pulsos de corriente de las descargas parciales. Debe tener unas características determinadas: impedancia muy baja a las señales de alta frecuencia, de este modo las señales de alta frecuencia pasan sin dificultades, y debe resistir el máximo voltaje de ensayo sin que se produzcan DP. Se comporta básicamente como un filtro de paso alto, es decir, deja pasar las componentes de alta frecuencia del espectro de las DP hacia el equipo de medida. Suelen utilizarse condensadores de 80 pF, ya que están especialmente diseñados para medir descargas parciales. El material más empleado para su fabricación es la mica, ya que es fiable y su instalación no resulta demasiado complicada. Su instalación se realiza en los terminales o cerca de ellos.



Figura 25. Condensadores de acoplamiento. [29]

- **Detector de descargas.** Este elemento puede ser denominado también impedancia de detección y cumple con la misión de introducir en el equipo de medida las señales derivadas de las DP. Se sitúa cerca del elemento ensayado o junto al condensador de acoplamiento. Suele ser una resistencia de 100Ω y normalmente, en paralelo, se conecta una protección contra sobretensiones para proteger el equipo de medida y una inductancia que se usa para filtrar la componente de 50Hz.
- **Impedancia de bloqueo.** La función de este elemento es evitar que la fuente de alimentación utilizada introduzca interferencias causadas por ella misma.

Se debe tener en cuenta que los instrumentos citados hasta este punto deben ir apantallados de forma que se eviten las interferencias electromagnéticas.

- **Equipos de visualización y tratamiento de datos.** Estos equipos se sitúan fuera del área de ensayo y se utilizan con los mencionados anteriormente para incorporar al ensayo el tratamiento digital de la señal detectada. Entre estos equipos los más utilizados son los siguientes:
 - Osciloscopio. El osciloscopio es un equipo que permite representar las señales provocadas por las descargas en el dominio temporal. Actualmente, el osciloscopio se incluye en los detectores de descargas parciales que se encuentran en el mercado.
 - Detector de pico. Este detector se utiliza para medir el pulso de mayor magnitud de las descargas parciales, como los que se dan en grandes cavidades del aislamiento.
 - Analizadores de altura del pulso. Este instrumento es el encargado de medir la magnitud de los pulsos que se generan por la actividad de DP, al analizar esta magnitud es posible identificar las singularidades de las descargas.

Además de todas las herramientas citadas, es importante que el equipo de tratamiento de datos cuente con una memoria y un software.

- Memoria. Permite guardar los datos obtenidos para poder tratarlos posteriormente.
- Software. El software incluye todos aquellos programas que permiten establecer determinados parámetros, como por ejemplo el tiempo que dura el ensayo y permiten obtener resultados numéricos y representaciones gráficas.

A continuación, en la *Figura 26. Esquema básico del ensayo de descargas parciales*, puede observarse un sencillo esquema del ensayo de descargas parciales en el que se muestran los instrumentos mencionados anteriormente.

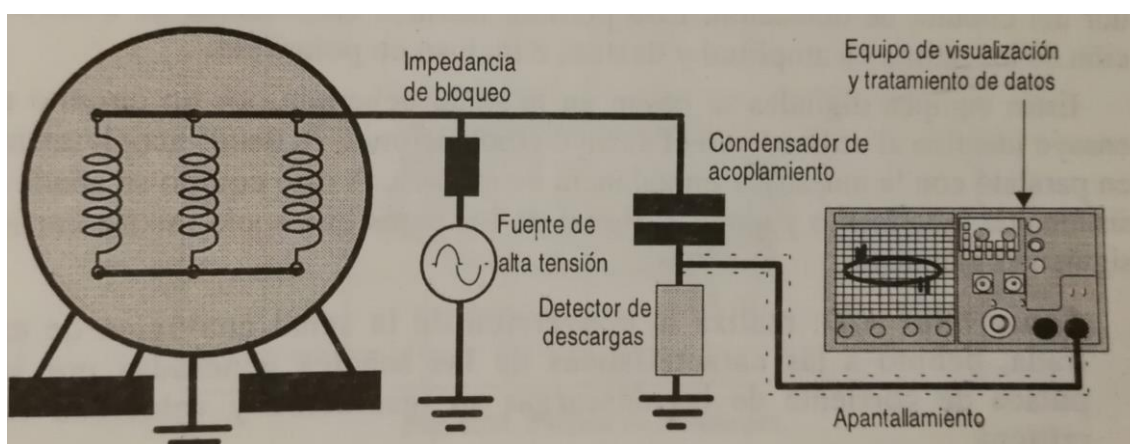


Figura 26. Esquema básico del ensayo de descargas parciales. [19]

3.6.3. Procedimiento de ensayo

Antes de empezar a realizar la prueba es importante chequear los parámetros característicos del motor, estos vienen dados por el fabricante y pueden encontrarse en la placa de características del motor ubicada en la carcasa. Entre los parámetros mencionados se encuentran la tensión e intensidad nominales, la potencia, la velocidad nominal, la frecuencia, etc. Es importante registrar también otras variables como las horas de servicio, la temperatura en el estator, el número de arranque de la máquina, etc. Finalmente, se anotan variables que tienen que ver con las condiciones ambientales, de este modo se tienen registrados y para ensayos posteriores resultan útiles para poder llevarlos a cabo en condiciones parecidas, para poder realizar una posterior comparación de los distintos ensayos, ya que si se comparan ensayos realizados en distintas condiciones los resultados pueden no ser concluyentes.

Si se realiza la prueba *off-line*, el primer paso es comprobar que el motor está desconectado de cualquier elemento auxiliar, transformadores, etc. El ensayo se realiza en vacío. El procedimiento de ensayo es relativamente simple, se basa en ir aumentando

la tensión de la fuente de forma progresiva hasta que se sobrepase la tensión de ruptura, el momento en que se visualizan en la pantalla los pulsos de las descargas. El pulso más alto se registra cuando la tensión que se aplica llega al valor de la tensión fase-neutro nominal. Llegados a este punto, la tensión aplicada se va disminuyendo hasta llegar a la tensión de extinción en la que las descargas cesan. De este punto se pueden extraer las tensiones de ruptura y de extinción. Los pulsos de corriente que se generan tienen una duración del orden de nanosegundos (ns) y su magnitud es reducida, del orden de microamperios (μA). [28] El procedimiento de ensayo viene dado por la norma *IEC 60034-27: 2006 Rotating electrical machines - Part 27: Off-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines*.

Para realizar el ensayo *on-line* se instalan sensores en el motor, de forma que se registre la actividad de descargas parciales mientras este está en funcionamiento.

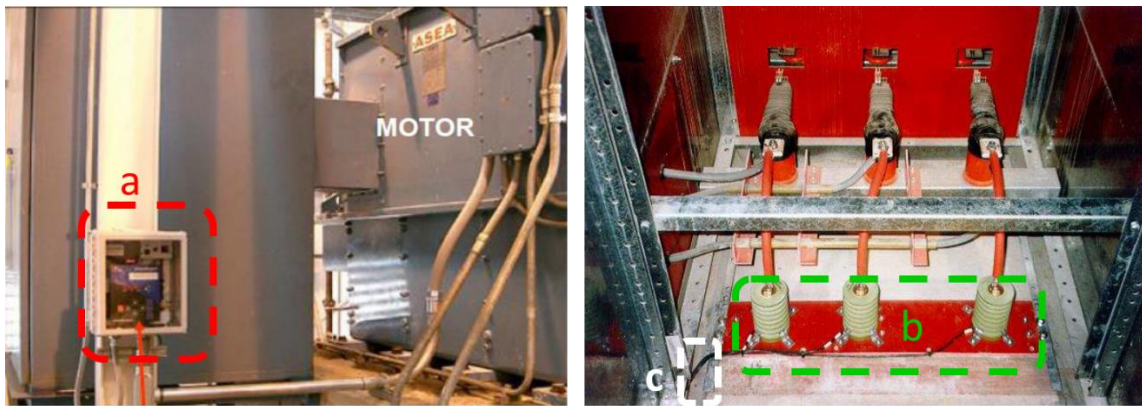


Figura 27. Equipos de ensayo *on-line*. a) Equipo de monitorización de DP. b) Condensadores de acoplamiento. c) Cable coaxial conectado al equipo de monitorización. [12]

Cada descarga parcial produce un pulso propio, que quedan recogidos en los patrones, con cuya interpretación y análisis se pueden localizar diferentes fuentes de descargas parciales.

3.7. Periodicidad del análisis de descargas parciales en motores

Cuando se tienen claro los procedimientos de ensayo y el material necesario es importante establecer la periodicidad con la que se va a realizar el ensayo de descargas parciales para poder recogerlo en el plan de mantenimiento del motor.

Es necesario tener en cuenta que durante la fase de fabricación del aislamiento surgen defectos que aumentan las probabilidades de que aparezcan descargas parciales, por este motivo durante los 3 primeros años de vida en funcionamiento de los motores se detecta un elevado porcentaje de fallos en comparación con el resto de vida de la máquina rotativa. Por este motivo, la primera prueba de DP que se realiza se trata de una prueba rutinaria bajo los criterios de aceptación en fábrica con el objetivo de

localizar problemas de calidad en el proceso de fabricación. Además, de este modo se tienen datos de referencia para poder comparar en futuras mediciones.

Una vez el motor ha sido fabricado y ha superado las pruebas iniciales en fábrica, empieza el proceso de transporte hacia su emplazamiento permanente en alguna empresa. Durante esta etapa es posible que sufra impactos que puedan ocasionar deterioros internos. Por ello antes de la puesta en marcha se realiza una medición de las descargas parciales *off-line*, en la que se realiza la verificación final de la calidad.

Después de comprobar que la calidad es la adecuada se realiza la puesta en servicio del motor, en este punto es necesario la toma de decisiones para establecer un plan de mantenimiento, en el que se incluya el análisis de las DP, que conlleve la máxima disponibilidad, durabilidad y seguridad y la reducción de costes innecesarios por averías y paradas imprevistas. Con la prueba incluida en el plan de mantenimiento se pretende trazar la tendencia de fallo y envejecimiento del aislamiento. Las paradas del motor que se planeen para realizar el ensayo *off-line* deben coincidir con las paradas ya establecidas para la realización de las operaciones incluidas en el plan, de este modo se pretende que los costes derivados por la parada del motor no se vean incrementados innecesariamente.

El plan de mantenimiento citado, además del procedimiento, debe incluir la periodicidad con la que se realizará el análisis de descargas parciales. Esta periodicidad depende de diversos factores como es la importancia que tiene el motor en la empresa, es decir, qué porcentaje de la producción de la empresa está estrechamente relacionado con el funcionamiento del motor y por tanto se vería comprometido si se ocasionase un fallo. Otro factor para tener en cuenta es la experiencia que tiene el equipo de mantenimiento con la detección de descargas parciales, un equipo que esté familiarizado con las DP es capaz de evaluar el desarrollo de las descargas y tomar decisiones más precisas, alargando o acortando el periodo de ensayo en función de cómo lo vean necesario. Finalmente, la tensión a la que trabaja el motor es de los factores que afectan a la periodicidad del registro de datos de las DP. [30]

Generalmente, considerando el resto de los factores, se establece como criterio de periodicidad la tensión nominal a la que trabaja el motor y se determinan las siguientes recomendaciones:

- **Motores cuya tensión nominal es menor que 6kV.** En este tipo de motores se realiza una monitorización continua, ya que en estos motores la calidad y el espesor del aislante es inferior a la de motores que trabajan a tensiones nominales superiores, hecho que favorece que la aparición del fallo sea más rápida. Mediante la monitorización continua se puede ver la evolución constantemente y actuar en el momento en que se vea indicio de fallo. [12]
- **Motores cuya tensión nominal es mayor que 6kV.** En este tipo de motores, los materiales utilizados son de mayor calidad y la progresión del fallo es más lenta, por ello se realiza la toma de datos de descargas parciales y se analizan

cada 6 meses, teniendo en cuenta que con esta periodicidad si se detectase un fallo habría suficiente tiempo antes de que pasase a ser un fallo crítico y generase un peligro. [12]

4. Diagnóstico del estado mediante la interpretación de resultados

Una vez se ha realizado el ensayo y se ha detectado la existencia de actividad de descargas parciales, lo siguiente es evaluar el estado del aislamiento estableciendo un diagnóstico a partir de los datos obtenidos para dictaminar si la actividad de DP es perjudicial.

La lectura que muestra el valor de la cantidad de descargas que se han detectado durante el ensayo, normalmente en unidades de pC, no es un resultado indicativo que permita concluir y elaborar un diagnóstico, simplemente se trata un valor que puede tomarse como referencia. Para elaborar un diagnóstico es necesario contar con la visualización de un gráfico, los denominados patrones, que contengan toda la información necesaria.

Las descargas parciales se muestran gráficamente en la pantalla de visualización del equipo sobre una base de tiempos de la misma frecuencia que el voltaje que se aplica, en España corresponde con 50Hz. Las descargas se muestran como una nube de segmentos verticales a causa de la corta duración y repetición de estas, los segmentos se superponen a la onda de tensión, esto facilita conocer el momento en el que se sobrevienen las descargas con relación a la fase de la onda de la tensión aplicada.

Existen dos maneras de visualizar la actividad de las descargas parciales: representación en base elíptica y la representación en base de tiempos lineal, siendo esta última la más usual.

En la *Figura 28. Representación en base elíptica*, se muestra la representación en base elíptica. La elipse se puede dividir en dos partes: superior e inferior, correspondiendo la parte superior con el semiperiodo positivo y la parte inferior con el semiperiodo de la tensión que se aplica. Los pasos por cero de la onda de la tensión se sitúan en los extremos derecho e izquierdo.

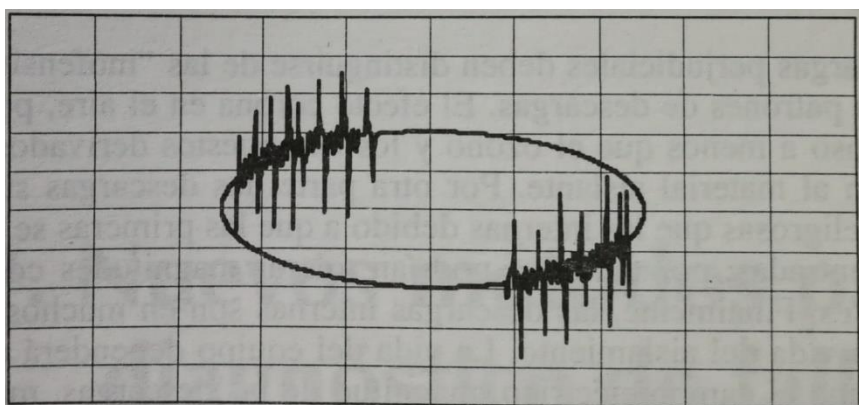


Figura 28. representación en base elíptica. [19]

La representación lineal corresponde con el patrón mostrado en la *Figura 29. Representación en base de tiempos lineal*. En este tipo de representación se utiliza un gráfico 2D, en la que los ejes x e y corresponden con la fase en que se produce la

descarga y con la amplitud de la descarga medida en pC. En el patrón puede verse una variación de color, esta está relacionada con la cantidad de descargas que se producen.

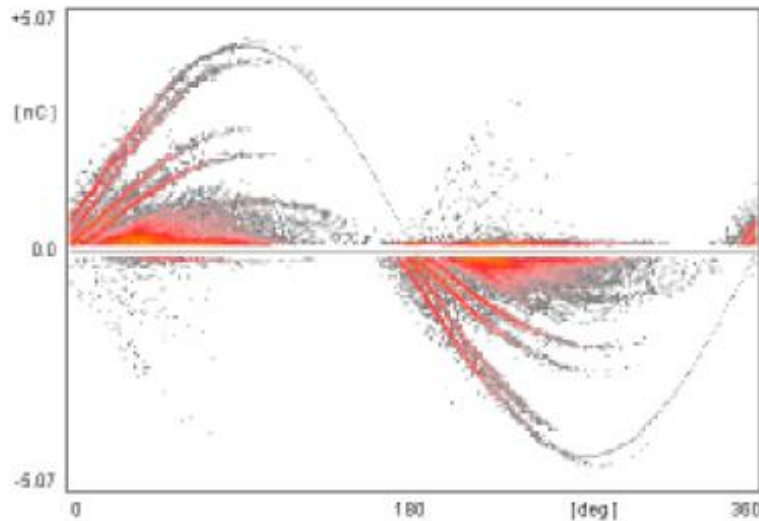


Figura 29. Representación en base de tiempos lineal. [31]

Antes de ponerse a analizar e interpretar los resultados se debe tener en cuenta que la medida de descargas parciales muestra la existencia de varias fuentes que provocan la degradación del aislamiento. De este hecho surge la dificultad de localizar cual es cada una de las fuentes, ya que todas muestran una figura patrón, pero superpuestas de modo que cada fuente queda oculta tras otra haciendo más compleja la identificación. Por ello es necesario que el técnico que elabora el diagnóstico tenga formación en este ámbito y establecerlo en función de la normativa vigente, si no, no sería capaz de llegar a diagnosticar los problemas que existen.

Para poder establecer un diagnóstico fiable es importante que el patrón sea en fase resuelta, ya que la información que se muestra en el osciloscopio es puntual y las descargas son variables. Los patrones en fase resuelta (PRPD) contienen los parámetros: ángulo de fase $[\varphi]$, cantidad y frecuencia de repetición de las DP. La fase resuelta ayuda a visualizar el fenómeno de las DP completamente, realizando mediciones cada 30 segundos y clasificando las descargas que se encuentran en función de la fase y la amplitud.

La frecuencia de repetición de las descargas es más significativa que la magnitud medida en pC, ya que la persistencia de las DP indica el nivel de gravedad de los defectos.

Teniendo en cuenta que el patrón de descargas debe estar en fase resuelta y que en un mismo patrón pueden verse distintas fuentes de DP enmascaradas, a continuación, se muestran una serie de patrones de acuerdo con la normativa IEC y se pretende identificar algunas de las fuentes que provocan la actividad de DP.

En primer lugar, antes de mostrar los patrones según la normativa, en la *Figura 30. Esquema patrones DP* se muestra un esquema simple con las formas características de varios patrones en función de sus causas que sirven de ayuda a la hora de identificar la

fuente que está generando las descargas parciales, aunque no se debe perder de vista que las diferentes fuentes aparecen juntas y por tanto la forma del patrón puede variar.

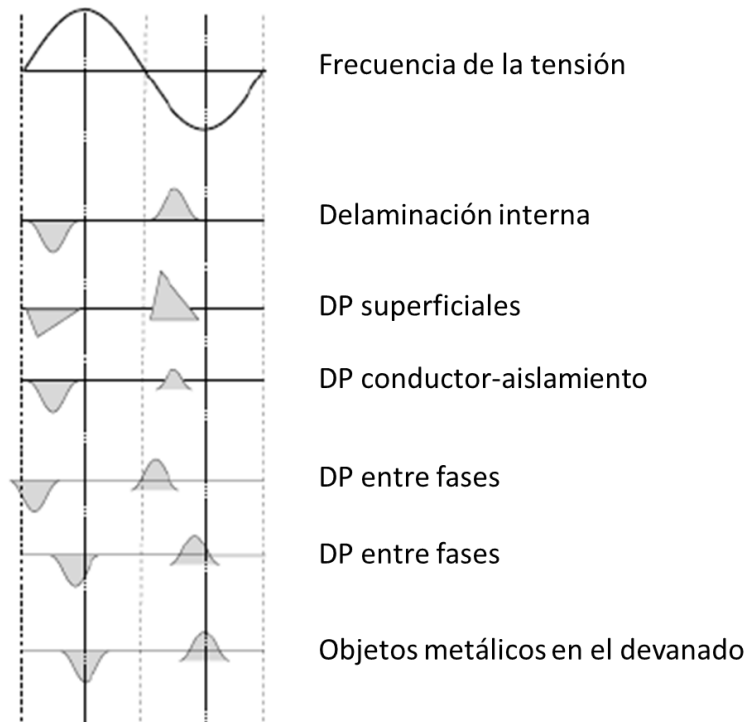


Figura 30. Esquema patrones DP. [28]

En la Figura 31. PRPD interna se muestra el patrón de descargas parciales internas, estos indican la presencia de cavidades, por tanto, de defectos en el aislamiento. Este patrón de descargas parciales se caracteriza por ser simétricos en ambos semiciclos y por su forma senoidal. Cabe destacar que este tipo de descargas no es indicativo del grado de envejecimiento del aislamiento sino de los defectos interiores que tiene.

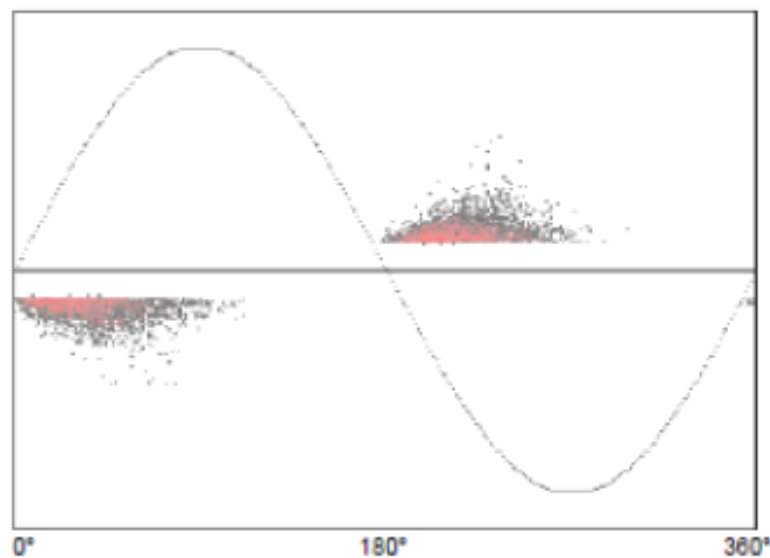


Figura 31. PRPD interna. [28]

Otro tipo de problema que puede detectarse a partir del análisis de patrones es la delaminación interna, tal y como se muestra en la *Figura 32. PRPD delaminación interna*. Los patrones típicos de este fenómeno se caracterizan por tener una forma casi triangular y ser simétrica en los dos semiciclos. Si se compara con el patrón característico de las DP internas, pueden observarse ciertas diferencias. La primera diferencia es la forma, las DP internas generan una forma redondeada (senoidal) frente a la forma aproximada a un triángulo de las que se están analizando. La segunda diferencia es la repetición, puede observarse en el color de los patrones que estas descargas se producen más veces que las internas.

Este tipo de descargas suele darse en motores antiguos y principalmente se generan a causa de esfuerzos mecánicos o sobrecalentamientos.

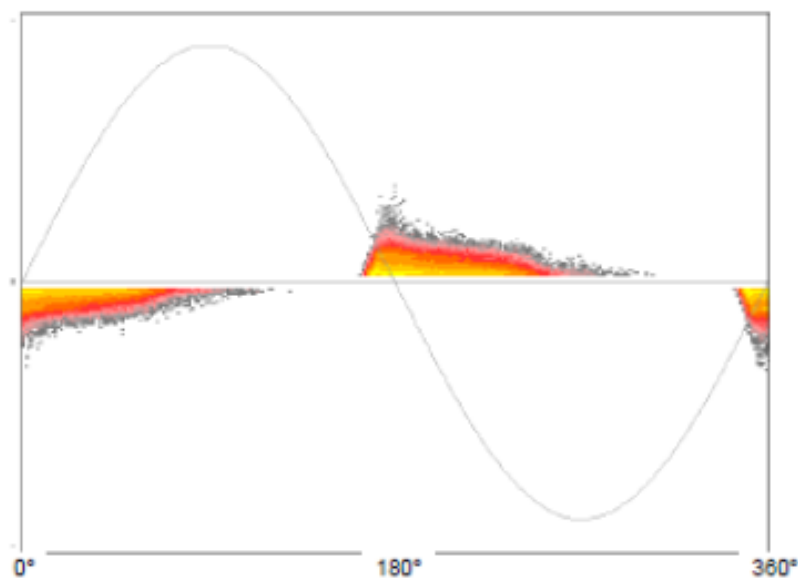


Figura 32. PRPD delaminación interna. [28]

Otro fenómeno que puede detectarse con ayuda de los patrones son las descargas en ranuras, tal y como se muestra en la *Figura 33. PRPD descargas en ranura*. La forma que describe el patrón puede ser variable dependiendo de la forma de la ranura, sin embargo, puede caracterizarse por ser principalmente asimétrico en los dos semiciclos, debido a que en el semiciclo negativo la magnitud y la repetición de las descargas es superior. Estas descargas suelen ocasionarse en cavidades en el interior del núcleo del estator o entre la superficie de una bobina o una barra y el núcleo del estator. Si se detectan este tipo de descargas es un indicativo de que el revestimiento semiconductor de una barra se ha dañado y ya no cumple su función.

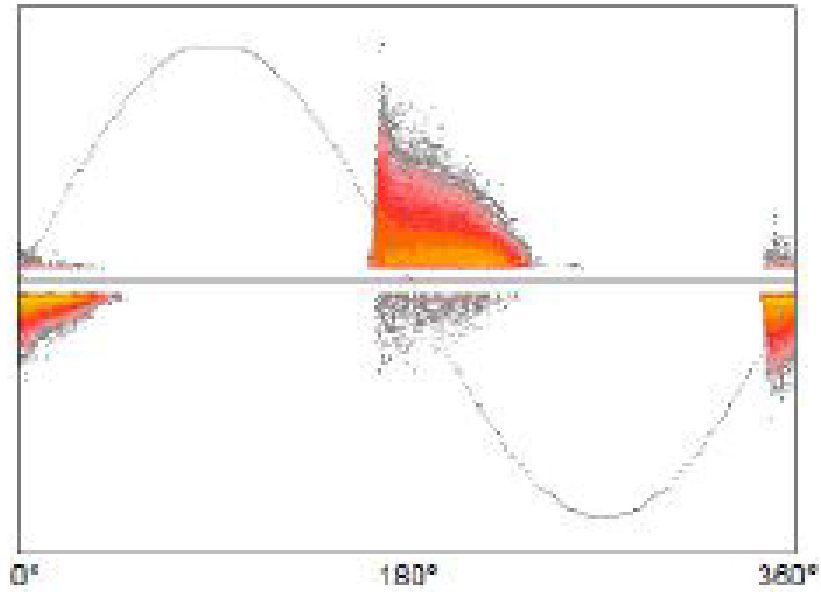


Figura 33. PRPD descargas en ranuras. [28]

En el apartado 2.5.1. *Descripción del sistema aislante*, se ha comentado que una zona donde suelen darse con frecuencia las DP es en la zona de salida de ranura de las barras, en la Figura 34. PRPD en ranuras puede verse el patrón típico de estas descargas. Se caracteriza por ser un cúmulo vertical estrecho en el semiciclo positivo, por el color que presenta (grisáceo) indica que su tasa de ocurrencia es pequeña.

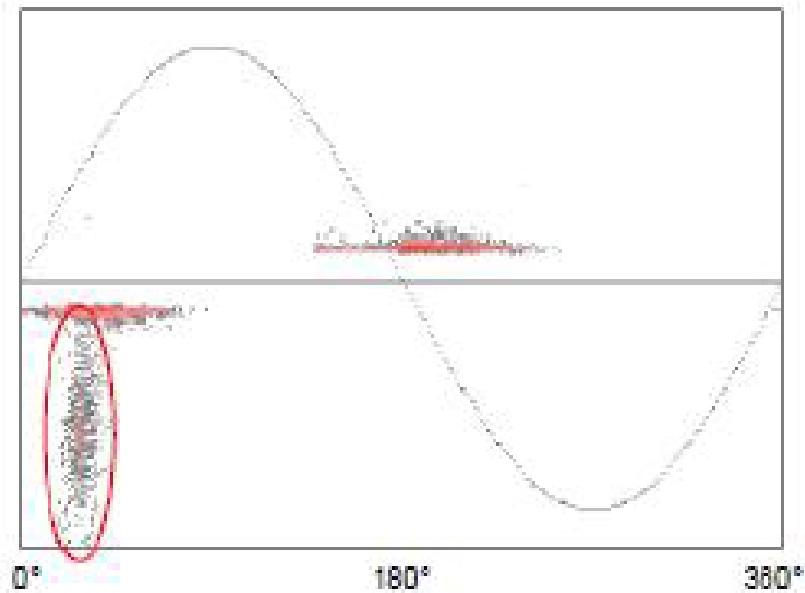


Figura 34. PRPD en ranuras. [28]

En la *Figura 35. PRPD entre conductor y aislamiento* se muestra el patrón característico de las descargas que se dan entre el conductor y el aislamiento a causa de aire existente entre ellos, estas descargas provocan la delaminación. El patrón tiene una forma peculiar, tiene forma redondeada siendo asimétrico: en el semiciclo positivo las descargas presentan mayor magnitud. La causa de que se originen estas descargas son el sobrecalentamiento y los esfuerzos mecánicos a los que se somete el aislamiento.

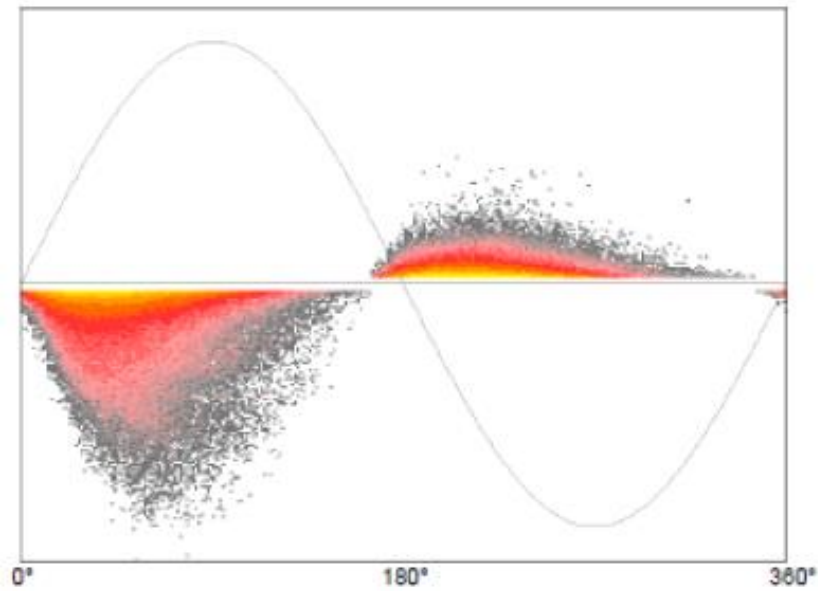


Figura 35. PRPD entre conductor y aislamiento. [28]

En la *Figura 36. PRPD envejecimiento por estrés térmico* se muestra un ejemplo de envejecimiento por estrés térmico. Los patrones que son indicativos de este tipo de deterioro se caracterizan por ser simétricos, el patrón tiene forma triangular, en la zona de paso por cero de la tensión se encuentra la máxima pendiente a causa de DP en capas internas del aislamiento.

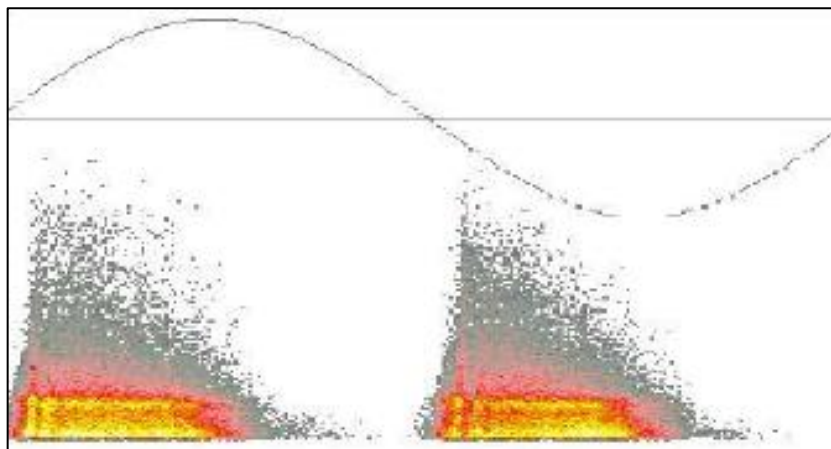


Figura 36. PRPD envejecimiento por estrés térmico. [12]

Una vez se interpretan los patrones obtenidos de los ensayos y se obtiene la causa de las descargas, surge la necesidad de diferenciar las descargas parciales que son peligrosas para la vida del aislamiento de las que no, las que se podrían considerar que son inofensivas. El daño que pueden causarle al aislamiento viene dado por una serie de factores: tipo de descarga y magnitud, material aislante utilizado...Por ejemplo, las descargas parciales internas deben considerarse más perjudiciales que las descargas externas o superficiales ya que las primeras se hallan más concentradas. Un aislamiento es capaz de admitir magnitudes mayores de descargas superficiales o corona que de descargas internas. De hecho, las descargas corona pueden considerarse inofensivas siempre y cuando el ozono que se genera no afecte al aislamiento. Otro ejemplo relacionándolo con el material que se utiliza como aislante, es el aislamiento fabricado con mica, este es capaz de admitir valores de DP más altos que los fabricados a partir de otros materiales.

Aunque se ha comentado que relacionar de manera aislada el valor de la magnitud de la descarga medida en pC con el daño causado no es un dato indicativo, después de analizar los patrones e identificar las fuentes de descargas se puede establecer una correlación entre la magnitud de las descargas y el daño que causan en el aislamiento. De este modo se puede tener un valor que establezca un límite para la vida del aislamiento e informe de si es necesario reemplazarlo. En la *tabla 2* se muestra esta correlación obtenida de la literatura.

Magnitud de la descarga medida [pC]	Valoración
1.000	Permisible
10.000	Afecta a la vida del aislamiento limitándola. Se recomienda sustituir la barra del motor en la próxima revisión.
100.000	Se prevé que ocurra un fallo a corto plazo. Se recomienda sustituir la barra inmediatamente

Tabla 2. Nivel de descargas y estado del aislante para gradientes de tensión de entre 3 kV/mm y 5kV/mm. [19]

Teniendo en cuenta los patrones, que contribuyen a identificar las fuentes de DP, y los límites de la magnitud de descargas establecidos puede realizarse el diagnóstico, en el que se describan las fuentes de descargas parciales detectadas, el tipo de DP, su magnitud y la valoración.

5. Caso práctico

En el presente apartado se expone un caso real de una prueba de descargas parciales off-line que se realizó en un motor eléctrico de inducción de 10kV en el taller de reparación de motores. Para ello se indujeron 3 tipos de descargas: descargas en la ranura, descargas corona en la zona de salida de ranura y barra-barra. Debe quedar constancia de que esta prueba no ha sido realizada para este trabajo de fin de máster, si no que se ha extraído de una fuente de referencia [32] para justificar la aplicación de las DP como un método de mantenimiento en motores reales.

Para la realización de la prueba se dispuso de un estator real cuyas bobinas habían sufrido daños a causa de las descargas parciales y se sustituyeron las bobinas. Las características del estator ensayado se recogen en la tabla en la *tabla 3*:

Material aislante	Mica epoxi
Clase térmica del aislamiento	F (Tª limite 155 °C)
Potencia	1400kW
Tensión nominal	10kV
Espesor aislamiento	2.04mm

Tabla 3. Características estator ensayado.

Para simular los daños que se produjeron en el motor real y provocaron las DP, se actúa del siguiente modo. Las DP que se produjeron en las ranuras surgieron a causa del desgaste del revestimiento semiconductor a causa de las vibraciones de la bobina en la ranura, para reproducir este daño, se lima del revestimiento hasta conseguir un espesor de abrasión de 0.2mm. En el caso de las descargas corona en la zona de salida de la ranura, las bobinas se dispusieron de tal forma que la zona de unión estuviese alejada, de este modo se consigue el efecto de crear un campo eléctrico en la zona de salida. Finalmente, para inducir las descargas entre las barras, las bobinas en la ranura adyacente se fijan de tal forma que exista poca distancia y se induzca la descarga.

El ensayo fue realizado en unas condiciones en el que el ruido era mínimo, para que no interfiriese en la medición. Antes de realizar la prueba se realiza una inspección visual para ver que no haya cuerpos extraños en el área del aislamiento, ya que esto intensifica el campo eléctrico produciendo DP. El siguiente paso es fijar las bobinas en las ranuras del núcleo del estator por profesionales cualificados para evitar dañarlas.

Una vez el montaje experimental estuvo preparado se elevó el voltaje gradualmente hasta 15 kV. A partir de este punto se obtuvieron los patrones característicos de cada tipo de descarga, estos se muestran en las siguientes figuras:

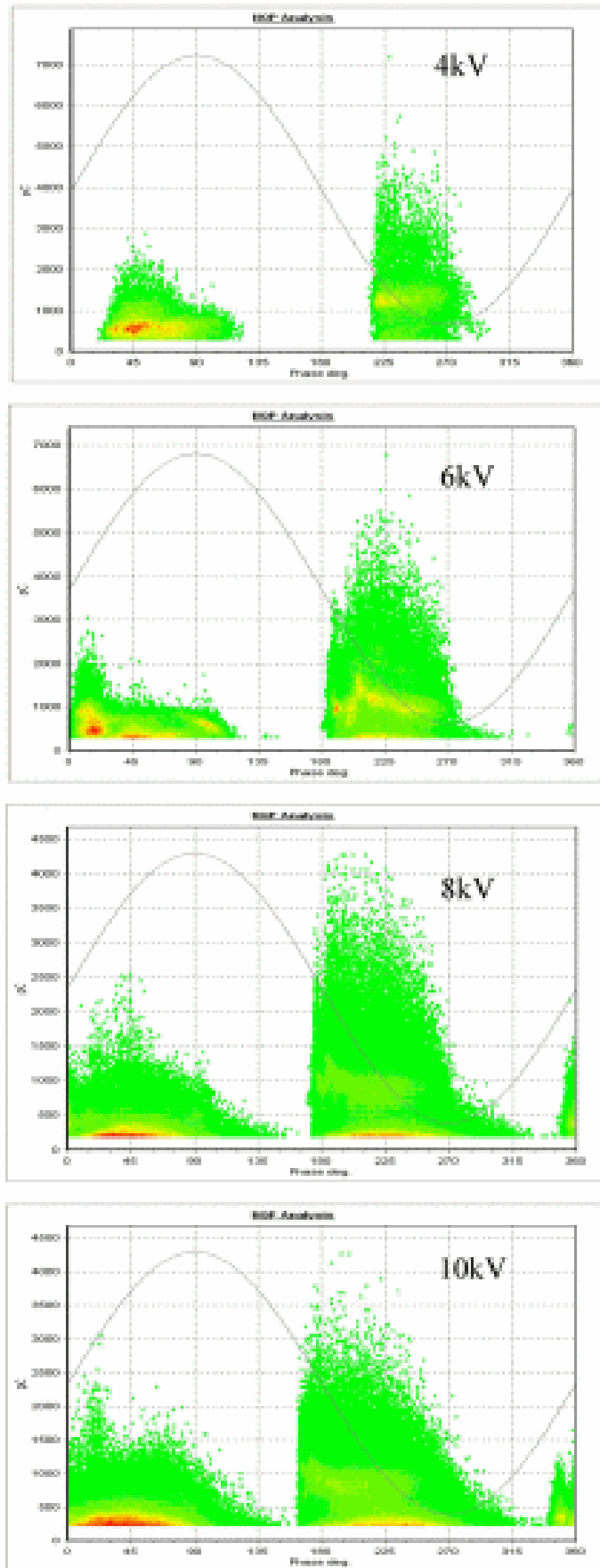


Figura 37. PRPD en ranuras caso práctico. [32]

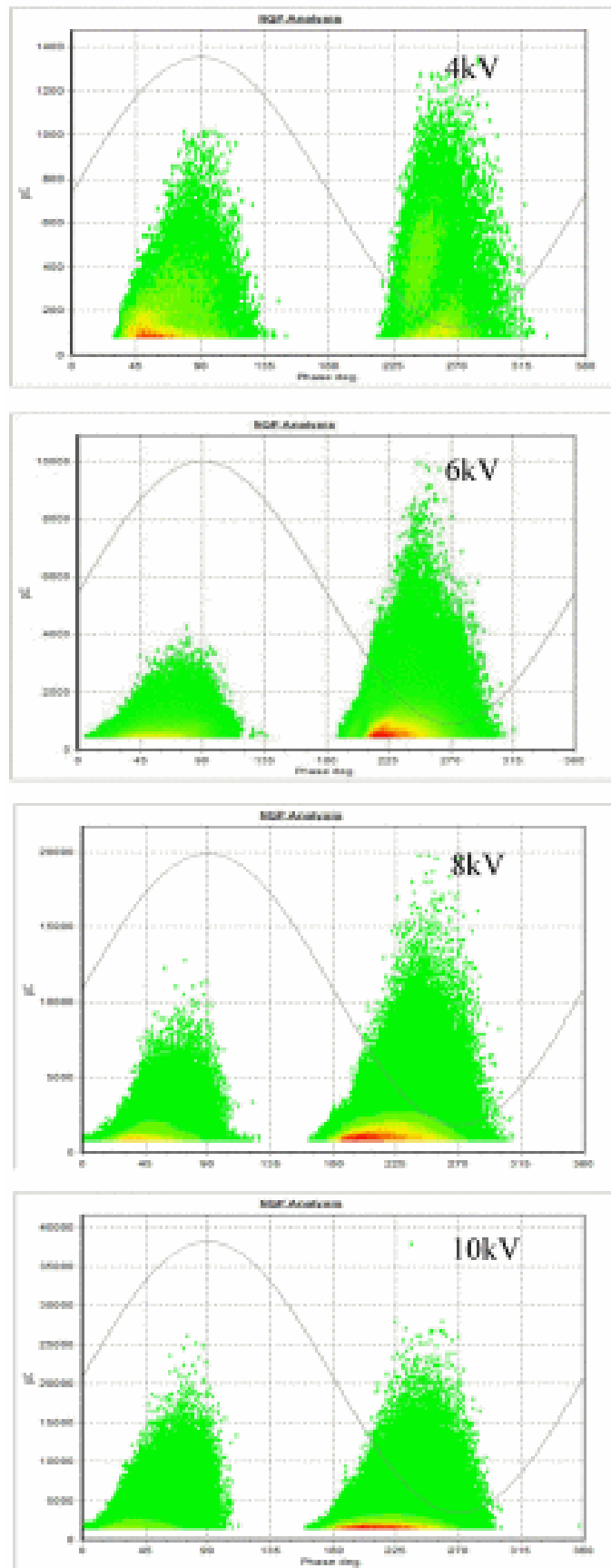


Figura 38. PRPD zona salida de ranura caso práctico. [32]

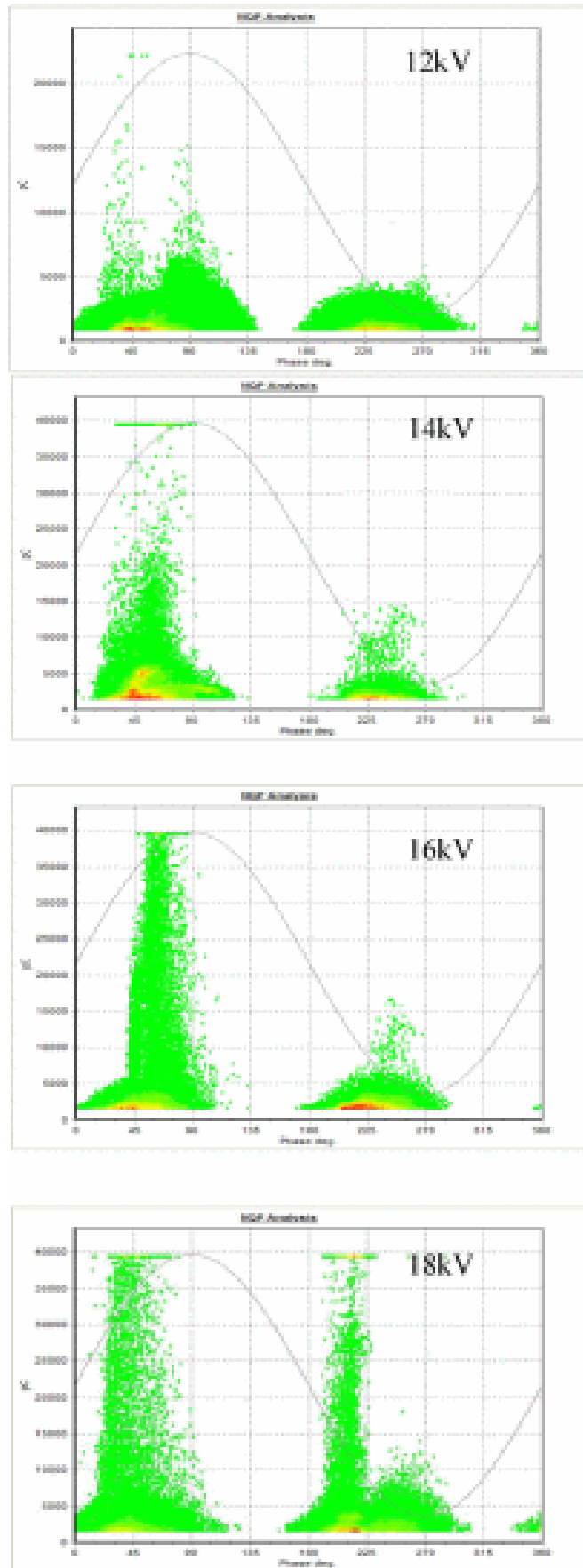


Figura 39. PRPD barra-barra caso práctico. [32]

Una vez extraído los patrones pudo observarse que tal y como se ha reflejado a lo largo del trabajo, cada tipo de descarga parcial produce su patrón característico que ayuda a la interpretación e identificación. Además, se extrajo como conclusión que no se pueden deducir la peligrosidad de las DP sólo por su amplitud, sino que hay que también se debe tener en cuenta la distribución del patrón y la tasa de repetición. Además, en los patrones mostrados en las figuras anteriores puede observarse como la distribución del patrón varía en función del voltaje aplicado.

Puede confirmarse como la detección de las descargas parciales es un método que se puede aplicar como parte del mantenimiento, ya que, a partir de la interpretación de los resultados obtenidos se es capaz de identificar defectos que pueden desencadenar en averías fatales. En las figuras que se muestran a continuación puede observarse el deterioro del sistema cuando ocurren las descargas.



Figura 40. Aislamiento quemado por descarga en la zona de salida de la ranura caso práctico. [32]



Figura 41. Aislamiento quemado por descarga barra-barra caso práctico. [32]

Si no se realizasen pruebas off-line o monitorización continua no sería posible identificar las fuentes que las producen, el aislamiento seguiría deteriorándose y podrían producirse fallos mayores que podrían llegar a inutilizar el motor.

Finalmente, de este caso práctico se extrae que existe una variación de la distribución de los PRPD en función de la tensión aplicada. En la *figura 40* queda reflejada esta variación. El fin con el que se realizó esta prueba experimental fue que la información extraída fuese útil para la monitorización en línea y la interpretación de patrones en motores de alta tensión.

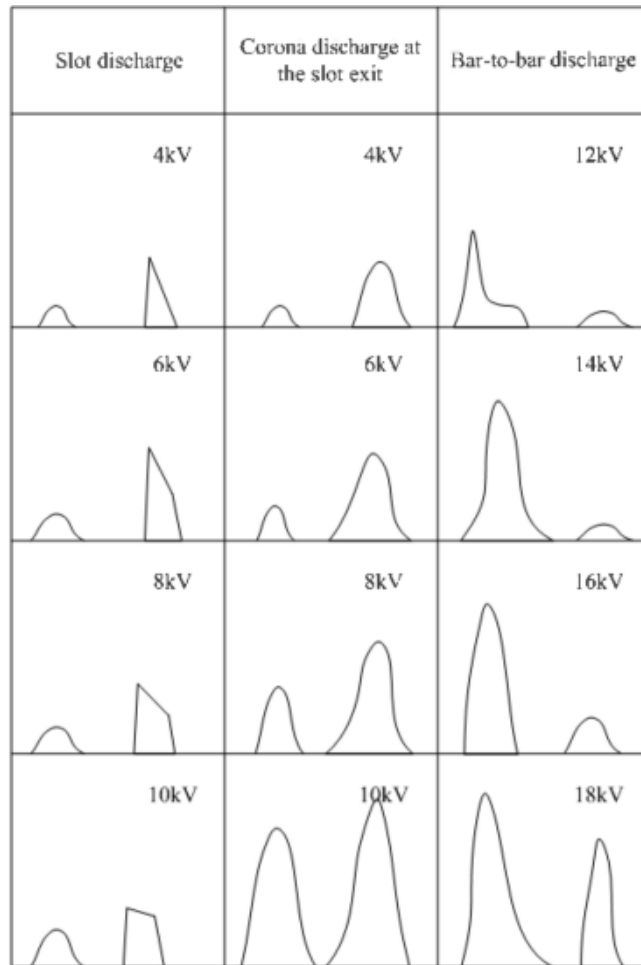


Figura 42. Distribución de los patrones en función de la tensión. [32]

6. Conclusiones

Una vez ha sido obtenida la información necesaria, del presente trabajo se pueden extraer una serie de conclusiones que se exponen a continuación.

El mantenimiento es una actividad crucial a la hora de preservar un activo, en este caso los motores eléctricos, en las condiciones específicas que cumplan con los objetivos de la empresa de la que forman parte.

Los fallos relacionados con el aislamiento del estator suponen aproximadamente un 37% del total de los fallos de un motor, siendo la segunda causa más común, por este motivo se justifica una vez más la necesidad del mantenimiento.

El daño producido por las descargas parciales depende del material aislante que se utiliza, está comprobado que la mica es capaz de resistir magnitudes mayores de descargas.

Existen multitud de técnicas que permiten comprobar el estado del aislamiento, aunque cada una por separado no permite establecer un diagnóstico completo y normalmente se usan una combinación de ellas complementando una con otra. Los ensayos de descargas parciales son los únicos que permiten evaluar cómo se va degradando el motor mientras está en funcionamiento. Ante esta principal ventaja, en oposición se encuentran los inconvenientes de resultar una técnica que necesita inversión, tanto para los equipos necesarios como para la formación del personal, y de la dificultad de la interpretación de los resultados que se obtienen, ya que se detectan varios fenómenos que se ocultan entre sí.

Además de permitir ver la evolución del deterioro del aislamiento, la técnica de descargas parciales permite identificar otros problemas. Para ello es necesario el uso de patrones normalizados. El diagnóstico del estado del aislamiento a partir de los ensayos de descargas parciales es fiable siempre y cuando se realice por personal cualificado en base a la normativa vigente.

Durante la realización del curso del máster no se tuvo la oportunidad de dar este tema, personalmente ha sido un reto interesante, ya que me ha ayudado a conocer una nueva técnica aplicada al mantenimiento de motores eléctricos que era totalmente desconocida. Además, realizando el trabajo uno se percata una vez más de la importancia que tienen las técnicas de mantenimiento en la predicción y prevención de fallos y que estas permiten darse cuenta de averías que se presentan enmascaradas con otros fallos.

7. Trabajos futuros

Una vez finalizado este trabajo de fin de máster se pretende proponer algunos trabajos futuros relacionados con el tema.

Este trabajo ha sido meramente académico e informativo, por lo que en primer lugar se propone seguir investigando sobre el tema de las descargas parciales ya que la información que existe actualmente es reducida en el campo de los motores eléctricos. Para compensar toda la parte teórica se propone realizar ensayos de descargas parciales en motores eléctricos de laboratorio si se tiene la oportunidad.

Si se dispone de varios motores que trabajen a diferente tensión se sugiere ensayar varios para comparar el efecto que tiene el voltaje de alimentación en la actividad de DP. Para realizar los ensayos se propone realizar tanto la modalidad *on-line*, de forma que pueda verse la tendencia de degradación del aislamiento, como la modalidad *off-line* cuando la situación lo requiera. Además, se propone en el caso de la monitorización *on-line* ir variando las condiciones de funcionamiento como el grado de carga de la máquina rotativa.

Finalmente, se plantea incluir este tipo de ensayos en un plan de mantenimiento, de modo que en un futuro este pueda incorporarse en las empresas reales que lo requieran.

Referencias

- [1] <https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/624/Cap1y2.pdf> (02/05/2021)
- [2] <http://www.ite.es/project/dimer/> (04/05/2021)
- [3] Motores de baja tensión. La guía del motor.
<https://library.e.abb.com/public/60c66ea11b71473099ee019f266ddc77/GUIA%20MOTOR%20COLOR%20BAJA.pdf> (16/05/2021)
- [4] <https://silo.tips/download/w50-motor-eletrico-trifasico> (16/05/2021)
- [5] <https://www.distrimotor.es/2019/08/12/qu%C3%A9-es-el-bobinado-de-motores/> (18/06/2021)
- [6] http://platea.pntic.mec.es/~jgarrigo/SAP/archivos/1eva/introduccion_motores_ca.pdf (19/06/2021)
- [7] <https://electrohomepro.com/es/main/school/1237-korotkozamknuty-i-faznyy-rotor-v-chem-razlichie.html> (19/06/2021)
- [8] http://www3.fi.mdp.edu.ar/electrica/maquinasyaccionamientos/subir/1.Teoria_apuntes_de_catedra/mae_2019_apunte_catedra6_introduccion_motor_trifasico_de_induccion.pdf (19/06/2021)
- [9] <https://www.juntadeandalucia.es/averroes/centros-tic/21700290/helvia/aula/archivos/repositorio/0/29/html/Motores%20de%20corriente%20alterna.htm> (23/06/2021)
- [10] <http://ingenieriaelectricafravedsa.blogspot.com/2014/12/caja-de-bornes--maquina-induccion.html> (23/06/2021)
- [11] <https://electricidad-viatger.blogspot.com/2008/05/los-motores-elctricos-en-corriente.html> (24/06/2021)
- [12] Mantenimiento de Máquinas e Instalaciones Eléctricas. *Mantenimiento predictivo de motores eléctricos de inducción: Análisis de corrientes*, Universitat Politècnica de València: Máster Universitario en Ingeniería del Mantenimiento, 2020-2021
- [13] <https://power-mi.com/es/content/an%C3%A1lisis-de-vibraciones-en-motores-el%C3%A9ctricos-de-inducci%C3%B3n> (26/06/2021)

- [14] María José Picazo Ródenas, Tesis doctoral: *Diagnóstico de máquinas eléctricas mediante técnicas de termografía infrarroja*, 2016.
<http://hdl.handle.net/10251/62317> (28/06/2021)
- [15] <https://www.weg.net/institutional/CL/es/news/productos-y-soluciones/sistemas-de-aislamiento-en-motores-de-induccion-tipo-jaula>
(17/08/2021)
- [16] <https://motoresygeneradores.com/barnices-de-aislamiento/> (03/07/2021)
- [17] <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h64/h9b/WEG-danos-en-los-bobinados-motores-trifasicos-50036032-brochure-spanish-web.pdf> (09/07/2021)
- [18] Servicios especializados para máquinas rotativas.
<https://electromotores.com/content/engineering-articles/20170825-monitoreo-en-linea-de-descargas-parciales-en-generadores-de-alta-tension/em-articulo-02-agosto2017.pdf> (13/07/2021)
- [19] M. Fernández Cabanas, M. García Melero, G. Alonso Orcajo, J.M. Cano Rodríguez, J. Solares Sariago. *Técnicas para el Mantenimiento y Diagnóstico de Máquinas Eléctricas Rotativas*. Ed. Marcombo.
- [20] <https://docplayer.es/97236723-Facultad-de-ingenieria-electrica-y-electronica.html> (17/07/2021)
- [21] <https://es.linkedin.com/pulse/medici%C3%B3n-y-an%C3%A1lisis-de-descargas-parciales-en-el-del-torres-medina> (17/07/2021)
- [22] Álvaro Sancho Blázquez, *Monitorización continua de Descargas Parciales para caracterización de sistemas de aislamiento en máquinas eléctricas*.
<http://hdl.handle.net/10016/10594>
- [23] Zhi Ning Chen, Duixian Liu, Hisamatsu Nakano, Xianming Qing, Thomas Zwick. *Handbook of Antenna Technologies*, 2016.
- [24] Medición y análisis de descargas parciales. Los detectores acústicos por ultrasonidos y radiofrecuencias.
<https://www.inducor.com.ar/articulos-tecnicos/medicion-y-analisis-de-descargas-parciales-los-detectores-acusticos-por-ultrasonidos-y-radiofrecuencias.pdf>
(29/07/2021)
- [25] <https://motoresygeneradores.com/descargas-parciales-como-detectarlas/>
(03/08/2021)

- [26] Cal Fritz. GE Motors Technical & Application Seminar. Improving Motor Reliability. Condition and Predictive Monitoring.
- [27] Armando Rodrigo Mor, *Nueva metodología de la medida de descargas en cables de alta tensión. Desarrollo de un sensor capacitivo de gran ancho de banda*, 2012, <http://hdl.handle.net/10251/16271> (05/08/2021)
- [28] Jorge Picazo Rivero, Revisión de normativas sobre la detección de descargas parciales en máquinas eléctricas rotativas: comparativa y alcance, 2015 <http://hdl.handle.net/10016/23550> (23/08/2021)
- [29] <https://www.directindustry.es/prod/iris-power/product-12521-812243.html> (14/08/2021)
- [30] OMICRON, Por qué tiene sentido realizar pruebas de descargas parciales. <https://www.omicronenergy.com/> (15/08/2021)
- [31] *Diagnóstico por descargas parciales en generadores y motores dirigido a supervisores y dueños de grandes máquinas. La realidad y el oportunismo*. Inducor Ingeniería S.A. www.inducor.com.ar (23/08/2021)
- [32] Chuanyang Li, Jiancheng Song, Ailiang Kang, Lingyan Lin, Wen Su and Zhipeng Lei, "PD patterns of stator windings by in-factory experiment on a 10kV motor," *Proceedings of 2014 International Symposium on Electrical Insulating Materials, 2014*, pp. 168-171, doi: 10.1109/ISEIM.2014.6870745. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6870745&isnumber=6870702> (04/09/2021)

DOCUMENTO II:
ASPECTOS ECONÓMICOS

En este segundo documento del trabajo de fin de máster se van a tratar los aspectos económicos relacionados la inversión inicial que es necesaria para aplicar la técnica de descargas parciales como parte del mantenimiento. Para lograr aplicar la técnica adecuadamente es necesaria una inversión en formación del personal y equipos, el presupuesto global se desglosa en función de los aspectos nombrados.

1. Presupuestos parciales

1.1. Formación del personal

Como ya se ha visto en el apartado 4. *Diagnóstico del estado mediante la interpretación de resultados* del trabajo la dificultad de utilizar la detección de descargas parciales como técnica de mantenimiento reside en la interpretación de los resultados para establecer un diagnóstico preciso sobre el estado del aislamiento. Por ello es necesaria una inversión en la formación del personal, para que estos tengan los conocimientos imprescindibles para la interpretación de los patrones y no haya errores en el diagnóstico.

Se establece necesario que al menos haya dos personas del equipo de mantenimiento que tenga conocimientos en descargas parciales por ello se forman 2 personas. Con esta formación se pretende que los técnicos adquieran los conocimientos necesarios que les permitan realizar ensayos *on-line* y *off-line*, tomar decisiones cuando sea necesario y analizar los datos obtenidos para concluir finalmente con el diagnóstico.

Concepto	Cantidad	Coste unitario [€/persona]	Coste [€]
Curso de descargas parciales en máquinas rotativas	2	850	1700
COSTE TOTAL DE FORMACIÓN DEL PERSONAL			1700

1.2. Equipos

En este apartado se incluye los costes derivados de la inversión en equipos, los instrumentos necesarios tanto para la realización del ensayo como el análisis y elaboración del informe final. Se adquiere un ordenador en el que se guardan los datos extraídos de los análisis, junto con una licencia de Microsoft para la redacción de informes y tratamiento de datos en procesadores de cálculo. Respecto al equipo de ensayo de descargas parciales se debe tener en cuenta que el coste de los equipos se establece en función de las necesidades del cliente, pero actualmente existen equipos

portátiles que son útiles y cumplen con esta función. Por ello se ha escogido un equipo portátil y se establece un coste medio extraído de una horquilla de precios.

Concepto	Unidad	Cantidad	Coste unitario [€/ud]	Coste [€]
Ordenador	ud.	1	750	750
Licencia Microsoft Office 2016	ud.	1	181,7	181,7
Equipo ensayo	ud.	1	47525	47525
COSTE TOTAL ADQUISICIÓN EQUIPOS				48456,7

1.3. Costes indirectos

Hasta este punto se han calculado los costes directos de la compra de equipos y de formar a los técnicos, pero es necesario añadir los costes indirectos calculados como un porcentaje del sumatorio de los costes obtenidos hasta ahora. Este porcentaje se establece en un 15%.

COSTE TOTAL DE FORMACIÓN DEL PERSONAL	1.700,00 €
COSTE TOTAL ADQUISICIÓN EQUIPOS	48.456,70 €
COSTE TOTAL FORMACIÓN Y EQUIPOS	50.156,70 €

	Coste total formación y equipos [€]	Coste [€]
COSTES INDIRECTOS 15%	50156,7	7523,505

2. Presupuesto global

Finalmente, la inversión inicial necesaria se obtiene teniendo en cuenta los costes parciales calculados. Cabe destacar que estos han sido calculados sin tener en cuenta el Impuesto sobre el Valor Añadido, por lo que a continuación se incluye.

COSTE TOTAL DE FORMACIÓN DEL PERSONAL	1.700,00 €
COSTE TOTAL ADQUISICIÓN EQUIPOS	48.456,70 €
COSTES INDIRECTOS	7.523,51 €
SUBTOTAL	57.680,21 €
21%IVA	12.112,84 €
COSTE GLOBAL	69.793,05 €

La inversión inicial necesaria para incluir la detección de descargas como técnica de mantenimiento predictivo asciende a SESENTA Y NUEVE MIL SETECIENTO NOVENTA Y TRES EUROS CON 5 CÉNTIMOS