

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño



Trabajo Fin De Máster

**APLICACIÓN DE ENSAYOS OFF LINE PARA
EL DIAGNÓSTICO DEL ESTADO DEL
AISLAMIENTO EN MÁQUINAS ELÉCTRICAS
ROTATIVAS A NIVEL INDUSTRIAL.**

Presentado por: Dna. Johana Renata Hualpa Molina

Dirigido por: Dr. José Alfonso Antonino Daviu

Valencia, noviembre de 2018

ÍNDICE

CAPÍTULO I.....	1
1. GENERALIDADES	1
1.1. Introducción	1
1.2. Antecedentes	2
1.3. Objetivo General	2
1.4. Objetivos Específicos	3
CAPITULO II.....	4
2. MOTOR ELÉCTRICO.....	4
2.1. Definición	4
2.2. Estructura general	5
3. SISTEMA DE AISLAMIENTO	6
3.1. Funciones	7
3.2. Clasificación	8
3.3. Pérdidas y calentamiento	8
3.4. Causas para la degradación del sistema aislante.....	11
3.5. Ensayos para el mantenimiento del sistema aislante	12
3.5.1. Resistencia de aislamiento (IR).....	13
3.5.2. Resistencia de aislamiento temporizada (IR _t):	15
3.5.3. Índice de Polarización (PI).....	15
3.5.4. Relación de absorción dieléctrica (DAR).....	16
3.5.5. Descarga dieléctrica (DD).....	18
3.5.6. Voltaje escalonado (SV).....	18
3.5.7. Prueba de rampa	19

CAPÍTULO III	20
3. MARCO METODOLÓGICO	20
3.1. Características del equipo y software utilizado	20
3.1.1. Megger MIT 1025	20
3.1.1.1. Características del equipo	22
3.1.2. Software Power DB.....	23
3.2. Norma referente a los ensayos realizados	25
3.2.1. Generalidades	25
3.2.2. Lecturas de resistencia de aislamiento	25
3.2.3. Lecturas del índice de polarización	26
3.2.4. Efecto de la temperatura en la medición de resistencia de aislamiento	27
3.2.5. Corrección del Índice de Polarización	29
3.2.6. Limitaciones de la norma	29
3.2.7. Valores mínimos del Índice de Polarización.....	30
3.2.8. Valores mínimos de resistencia de aislamiento.....	31
3.2.9. Estado del aislante respecto a los resultados de PI, resistencia de aislamiento y DAR.....	32
3.3. Motores ensayados.....	33
3.3.1. Motores Nuevos	34
- Motor trifásico WEG.....	34
- Motor Trifásico Multimontaje WEG.....	35
3.3.2. Motores Industriales	36
3.3.3. Motores Inoperativos.....	38
- Motores trifásicos SIEMENS	38
3.4. Ensayos realizados	40
3.4.1. Procedimiento para la prueba de índice de polarización.....	40
3.5. Monitorización del estado de aislamiento de motores eléctricos.....	42

CAPÍTULO IV	47
4. RESULTADOS	47
4.1. Motores Nuevos	47
4.2. Motores Industriales	49
4.3. Motores Inoperativos	52
4.4. Comparación con resultados anteriores	53
CAPÍTULO V	57
5. CONCLUSIONES	57
BIBLIOGRAFÍA	59
ANEXO 1: FALLOS EN EL SISTEMA AISLANTE.....	61

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Conversión de energía	4
Figura 2. Motor eléctrico.....	5
Figura 3. Partes constitutivas de un motor eléctrico	5
Figura 4. Sistema de aislamiento.....	6
Figura 5. Incidencia de la temperatura en los diferentes materiales aislantes.....	10
Figura 6. Tipos de pruebas para medición de la resistencia de aislamiento.....	13
Figura 7. Tipos de corrientes para un aislamiento de epoxi-mica con una corriente relativamente baja [12].....	14
Figura 8. Curvas típicas que muestran el efecto de absorción dieléctrica en una prueba "tiempo-resistencia", realizada en un equipo capacitivo tal como el bobinado de un motor [5].....	16
Figura 9. Equipo Megger MIT 1025	21
Figura 10. Instrumento de prueba Megger conectado para medir resistencia de aislamiento.....	21
Figura 11. Dial de modo de prueba y de configuración equipo Megger MIT 1025.....	22
Figura 12. Ventanas de trabajo del software Power DB.	23
Figura 13. Ventana de funciones software Power DB.	24
Figura 14. Curvas de PI: a) Buen aislamiento; b) Contaminación [8].	26
Figura 15. a) Curva de PI correcta o; b) Curva de PI defectuosa [9].	27
Figura 16. Factores de corrección de temperatura para sistemas de aislamiento "TERMOPLÁSTICO" (asfáltico) y "TERMOESTABLE" (epoxi o poliéster).....	28
Figura 17. Conexiones para prueba de PI, de un motor eléctrico.....	41
Figura 18. Medición de PI en un motor eléctrico.....	42
Figura 19. Fallas en máquinas de inducción – IEEE [3].....	43
Figura 20. Variables a medir y ensayos recomendados para la monitorización del estado del sistema aislante.....	44
Figura 21. Curva del índice de polarización en motores nuevos.....	47
Figura 22. Curva de resistencia de aislamiento en motores nuevos, corregida a 40°C.	47
Figura 23. Curva del índice de polarización en motores industriales.....	49
Figura 24. Curva del índice de polarización comparativa del motor asíncrono UNELEC.	51
Figura 25. Curva del índice de polarización en motores inoperativos.	52
Figura 26. Curva de resistencia de aislamiento en motores inoperativos.....	52
Figura 27. Curvas de índice de polarización comparativas entre motores.....	54
Figura 28. Fallos en los bobinados de motores trifásicos [7].....	62

RESUMEN

El presente trabajo fin de máster se enfoca en la aplicación de ensayos off line para la evaluación del estado de aislamiento de una serie de motores tanto a nivel industrial y de laboratorio, de diferentes características técnicas y fabricantes, que, a excepción del generador del sector de la tracción, todos los motores ensayados son de baja tensión.

Este estudio, fundamenta la teoría técnica, así como el procedimiento a seguir y las interpretaciones de los ensayos de medición de la resistencia de aislamiento global a tierra, en la normativa vigente IEEE 43-2013, adicional a las recomendaciones de los fabricantes de motores y equipos de medición.

Para la consecución de este trabajo, se parte de una descripción general de la concepción y estructura de un motor eléctrico y se enfatiza por otro lado, el estudio de un sistema aislante, clasificación, funciones, causas de degradación y ensayos para evaluar su estado. Posteriormente, se describe el procedimiento a seguir para la realización de los ensayos a los diferentes grupos de motores, con la utilización del equipo Megger MIT 1025 para la medición de: Resistencia de aislamiento puntual, índice de polarización y relación de absorción dieléctrica. Para ello, se realizan tablas técnicas de los motores ensayados, se puntualizan las recomendaciones de la norma y de los fabricantes de motores y equipo de medición y se elabora un modelo de orden predictiva para la ejecución de la prueba de índice de polarización de uno de los motores ensayados.

Finalmente, la evaluación del estado de aislamiento de los motores ensayados se fundamenta en las recomendaciones y valores mínimos y aceptables que establecen la norma IEEE 43-2013, los fabricantes de motores y de equipos de medición, aunque un aporte adicional a este trabajo es realizar la discusión de resultados obtenidos en una tesis de fin de master anterior, mediante la comparación del comportamiento de los perfiles de resistencia de aislamiento que pueden presentar una gama de motores, siempre y cuando las características y clases térmicas del aislamiento sean similares.

Palabras claves: motor eléctrico, ensayos off line, índice de polarización, resistencia de aislamiento, relación de absorción dieléctrica.

CAPÍTULO I

1. GENERALIDADES

1.1.Introducción

En la actualidad, el concepto de productividad va relacionado con una mayor permanencia de los tiempos de buen funcionamiento de las máquinas, por lo que, mantener al equipo en buenas condiciones de operación resulta ser un aspecto prioritario. Para la consecución de tal propósito, la aplicación de varias técnicas y ensayos deben conjugarse de tal forma que, permitan una evaluación más real del estado de la máquina.

En el caso de estudio, se realiza la aplicación de técnicas off-line para la evaluación del estado de una de las partes más vulnerables y delicadas de una máquina: el aislamiento, el cual, conforme a estudios realizados por organizaciones especializadas, evidencian que la causa más frecuente de fallo en un motor de inducción se debe a problemas en el aislamiento del estator.

La medición de la resistencia de aislamiento es una técnica off line, con ventajas y desventajas como cualquier otra técnica, pero que, durante más de medio siglo, ha sido la más recomendada y utilizada para evaluar el estado de una máquina y más aún con el desarrollo de materiales que dota al sistema aislante de nuevas características y por lo tanto nuevas tendencias de comportamiento ante la aplicación de las técnicas tradicionales.

En este sentido, se realiza el siguiente trabajo de tesis, con la finalidad de evidenciar la validez de diferentes ensayos off-line para una cierta gama de motores reales de diferentes características y fabricantes, observar el comportamiento de la resistencia de aislamiento durante el tiempo y en base a las recomendaciones de la normativa vigente IEEE 43-2013 o de las recomendaciones de los fabricantes de motores y equipos de medición, evaluar el estado del aislamiento de los motores ensayados, tomando en cuenta que la mejor evaluación se obtiene del análisis de tendencias establecidas a lo largo de los años de servicio de una máquina.

1.2. Antecedentes

Nos situamos en el siglo XIX conocido como el siglo de la industrialización, en el año 1821 con las investigaciones de Michael Faraday en el campo del electromagnetismo, el posterior desarrollo y evolución de los motores eléctricos encaminados a su uso a nivel industrial y así en el año 1866 cuando Werner Von Siemens descubrió el principio de la dínamo eléctrica, creando la base para la ingeniería y el éxito de los motores eléctricos, hasta la actualidad, donde se habla ya de motores micro-tecnológicos para utilización militar y aeroespacial.

Si se toma en cuenta que, con frecuencia los motores eléctricos se encuentran en puntos vitales de sistemas de una gran complejidad, y que los criterios industriales actuales tienden hacia una producción de elevada calidad y sin interrupciones, se hace cada vez más necesario el control de su funcionamiento para detectar los indicios de alguna posible avería.

En este sentido, el estado de funcionamiento de un sistema de aislación es el indicativo más idóneo para controlar el desempeño óptimo de un motor eléctrico. Lamentablemente, en la literatura existe una carencia de información sobre métodos que permitan diagnosticar de forma fiable la condición del aislamiento del motor. Se trata ésta de una de las partes más delicadas de la máquina y una de los componentes en los que ocurre mayor cantidad de fallos. Esto es debido, en parte, a las solicitaciones de índole térmica, eléctrica, mecánica y ambiental a la que este elemento está sometido. A pesar de su importancia, los ensayos más utilizados para determinar su condición son ensayos off-line que se desarrollan con el motor parado, durante paradas de mantenimiento del motor. Muchas particularidades de estos ensayos son desconocidas por muchos usuarios industriales y es objeto de este trabajo poner de relevancia estas particularidades y comprobar la validez de estos ensayos para una cierta gama de motores reales.

1.3. Objetivo General

El objetivo general del presente Trabajo fin de Master es aplicar diferentes ensayos offline para el diagnóstico del estado del aislamiento en máquinas eléctricas rotativas a nivel industrial.

1.4.Objetivos Específicos

- Comprobar la validez de diferentes ensayos off-line para una cierta gama de motores reales de diferentes características y fabricantes.
- Determinar si los motores ensayados cumplen con los valores mínimos aceptables determinados en la norma.
- Deducir posibles relaciones de dependencia en los resultados obtenidos de varios ensayos offline.
- Comparar los resultados de los ensayos realizados a un motor de uso industrial con datos obtenidos en investigaciones anteriores a motores de laboratorio.
- Establecer un procedimiento de monitorización de ensayos offline a motores eléctricos.
- Advertir acerca de los fallos que conlleva un mal estado del aislamiento.

CAPITULO II

2. MOTOR ELÉCTRICO

2.1. Definición

Las máquinas eléctricas realizan una conversión de energía de una forma a otra, una de las cuales, al menos, es eléctrica [1].

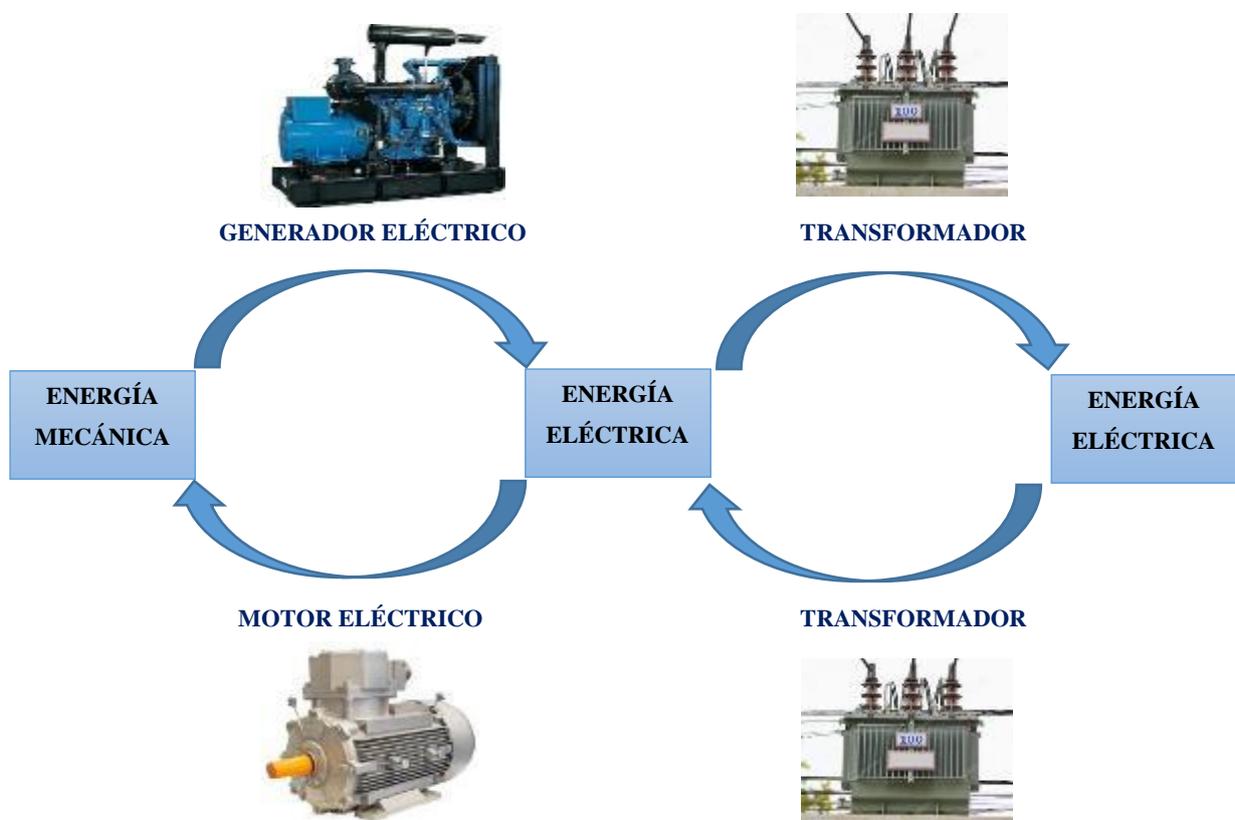


Figura 1. Conversión de energía

En base a este punto de vista, estrictamente energético, es posible clasificarlas en tres tipos fundamentales:

- Generador.
- Motor
- Transformador.

De los cuales el motor al ser el caso de estudio se lo define como:

MOTOR: que transforma la energía eléctrica en mecánica. La acción se desarrolla introduciendo una corriente en la máquina por medio de una fuente externa, que interacciona con el campo produciendo un movimiento de la máquina; aparece entonces una f.e.m (fuerza electromotriz) inducida que se opone a la corriente y que por ello se denomina fuerza contraelectromotriz. En consecuencia, el motor necesita una energía eléctrica de entrada para producir la energía mecánica correspondiente. [1]



Figura 2. Motor eléctrico

Los motores tienen un acceso mecánico y por ello son máquinas dotadas de movimiento, que normalmente es de rotación.

Cada máquina en particular cumple el principio de reciprocidad electromagnética, lo cual quiere decir que es reversible, pudiendo funcionar como generador o como motor. [1]

2.2.Estructura general

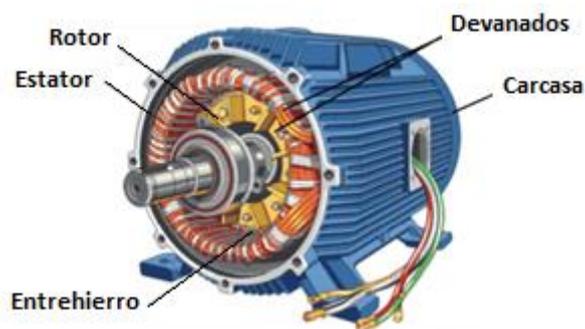


Figura 3. Partes constitutivas de un motor eléctrico

En términos generales, las máquinas eléctricas rotativas se componen de dos partes. Una parte fija denominada **estator** dentro de la cual se coloca el **rotor**, que, como su nombre

indica, es la parte giratoria de la máquina. El espacio entre estos dos elementos será el *entrehierro*.

Normalmente, tanto en el estator como en el rotor existen *devanados* hechos con conductores de cobre por lo que circulan corrientes suministradas o cedidas a un circuito exterior que constituye el sistema eléctrico.

Uno de los devanados tiene por misión crear un flujo en el entrehierro por lo que toma el nombre de *devanado inductor*. El otro devanado recibe el flujo del primero y se inducen en él corrientes que se cierran por el circuito exterior y se denomina *inducido*. Es indistinto que a los devanados del estator o del rotor se los designe ser inductor o inducido, lo primordial es el movimiento relativo entre ambos devanados. En la práctica su situación la determinan las condiciones de construcción, aislamiento, refrigeración, etc.

3. SISTEMA DE AISLAMIENTO

Por definición, una combinación de dos o más materiales aislantes, usados en un equipo eléctrico, se denomina sistema aislante. Esa combinación en un motor eléctrico consiste en el esmalte de aislamiento del alambre, aislamiento de fondo de ranura, aislamiento de cierre de ranura, aislamiento entre fases, barniz y/ o resina de impregnación, aislamiento del cable de conexión, aislamiento de soldadura.

La resistividad, entendida como la condición intrínseca de cada material para oponerse al paso de una corriente eléctrica, en un material aislante está en un rango superior a $10^{10} \Omega\text{m}$. Esto significa que son malos conductores eléctricos. Como comparación, un material conductor tiene una resistividad de $10^{-5} \Omega\text{m}$, o $0.00001 \Omega\text{m}$. [10]

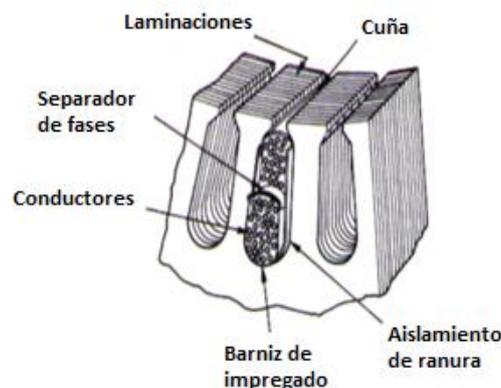


Figura 4. Sistema de aislamiento.

3.1.Funciones

El material aislante impide, limita y direcciona el flujo de las corrientes eléctricas. A pesar de que la principal función del material aislante sea la de impedir el flujo de corriente de un conductor para tierra o para un potencial más bajo, el mismo sirve también para dar soporte mecánico, proteger el conductor de degradación provocada por el medio ambiente y transferir calor para el ambiente externo el sistema de aislamiento.

El papel de un sistema aislante dentro del motor, permite un buen desempeño térmico y eléctrico principalmente. La elección de un buen aislamiento tiene una importancia capital para el buen funcionamiento de la máquina, puesto que es la calidad del aislamiento lo que determina esencialmente la fiabilidad de servicio de una máquina eléctrica. No obstante, esta tarea no resulta sencilla debido a la multiplicidad de aislantes que ofrece el mercado y a la innovación en la química de los plásticos, a cuyo desarrollo está íntimamente ligada.

Para satisfacer lo anterior, es necesario que un sistema de aislamiento sea proyectado teniendo en cuenta su desempeño:

Eléctrico: Principalmente evitar corto-circuitos entre los elementos conductores y con respecto a tierra, esto es, tener una elevada rigidez dieléctrica y resistividad, puesto que los aislantes deben soportar no sólo las tensiones en condiciones nominales de servicio, sino también las de ensayo previstas por las normas, que son claramente superiores a las nominales, por ejemplo, la Norma UNE-EN 60034-1.

Térmico: Conducir el calor generado por las pérdidas por efecto joule (ri) adecuadamente hacia el sistema de refrigeración. Esta característica está marcada por la Clase Térmica del aislante, que determina la máxima temperatura que éste soporta en su punto más caliente.

Mecánico: Soportar los esfuerzos a que son sometidos durante el proceso de fabricación de la máquina y durante su funcionamiento posterior (por ejemplo, fuerzas centrífugas, tensiones mecánicas de dilatación y contracción, vibraciones mecánicas que se presentan debido a la atracción magnética entre conductores y con respecto a los núcleos).

Aunque estos requisitos son inherentes al buen desempeño de un aislante, se cita los siguientes como complementarios, pero no menos importantes a su funcionamiento:

Fisicoquímicos: La humedad disminuye mucho la rigidez dieléctrica y la resistividad, por lo que en casos especiales se puede dotar a la máquina de aislamientos particularmente resistentes a la humedad es decir con propiedad higroscópica.

Ambientales: Las agresiones del medio ambiente pueden ser muy diversas según la aplicación y el emplazamiento de la máquina. Pueden citarse entre otras: Polución atmosférica, polvo, suciedad, agua, agentes químicos corrosivos, por ejemplo, en la utilización en petroquímicas, ambientes marinos, etc.

Esta notable multiplicidad y diversidad de requisitos determina que no exista un aislante óptimo desde todos los puntos de vista, por ejemplo, requerir a la vez buena conductividad térmica y mala conductividad eléctrica, cuando ambas cualidades suelen ir juntas en los materiales.

3.2. Clasificación

Dada la gran variedad de materiales aislantes existentes y utilizados, se precisa su clasificación. De acuerdo con la norma EN 60034-18-1:2010, se pueden clasificar los aislantes según su “clase térmica” en los siguientes tipos:

Clase de aislamiento	Y	A	E	B	F	H	C
Temperatura límite °C	90	105	120	130	155	180	>180

Tabla 1: Clasificación de los elementos aislantes según la clase térmica [11].

3.3. Pérdidas y calentamiento

El estudio de las pérdidas presentes tanto en los devanados del inductor e inducido conocidas como *pérdidas en el cobre*, así como las originadas en los campos magnéticos variables denominadas *pérdidas en el hierro*, es de gran interés porque influyen en el rendimiento y calentamiento de una máquina eléctrica, puesto que, todas las pérdidas son transformadas en calor. Una parte de este calor se transmite al ambiente y otra es absorbida por la estructura de la máquina, elevando su temperatura. Cuando la cantidad de calor producida, correspondiente a las pérdidas, se iguala con la cantidad de calor cedida al ambiente, la temperatura permanece constante, entonces se dice que la máquina ha alcanzado la *temperatura de régimen*.

La temperatura de régimen es un factor clave para determinar si los materiales aislantes con los que está construida la máquina van a trabajar correctamente, puesto que un incremento en la temperatura incide en un deterioro más rápido del aislante, dando lugar a que la máquina no trabaje en buenas condiciones y termine averiándose al producirse cortocircuitos entre espiras o defectos a tierra.

Debido a lo anterior y tal como se indicó en el apartado de clasificación de aislantes, se han establecido normas, que especifican aquellas temperaturas máximas que no se deben sobrepasar en los devanados y en las diferentes partes de una máquina. Específicamente en España, las normas UNE 21-305, UNE EN 60034-1-2005, fijan una temperatura ambiente convencional y determinan la máxima temperatura que pueden soportar los aislantes, en función de ésta, se clasifican en:

CLASE DEFINICIONES Y EJEMPLOS ILUSTRATIVOS

A	Son aislamientos constituidos por materiales fibrosos a base de celulosa o seda, impregnados con líquidos aislantes; la temperatura máxima, que en ningún caso debe sobrepasarse en este tipo de aislantes, es de 105°C.
E	Son aislamientos a base de fibras orgánicas sintéticas; la temperatura máxima que en ningún caso debe sobrepasarse en este tipo de aislantes, es de 120°C.
B	Son aislamientos formados por materiales a base de poliéster y poliímidos aglutinados con materiales orgánicos o impregnados con estos; la temperatura máxima, que en ningún caso debe sobrepasarse en este tipo de aislantes, es de 130°C.
F	Son aislamientos formados por materiales a base de fibra de mica, amianto y fibra de vidrio aglutinados con materiales sintéticos, como siliconas, poliésteres o epóxidos; la temperatura máxima, que en ningún caso debe sobrepasarse en este tipo de aislantes, es de 155°C.

H	Son aislamientos formados por materiales a base de mica, amianto o fibra de vidrio aglutinados con siliconas de alta estabilidad térmica; la temperatura máxima, que en ningún caso debe sobrepasarse en este tipo de aislantes, es de 180°C.
200	Son aislamientos formados por materiales a base de mica, vidrio, cerámica, etc.; la temperatura máxima, que en ningún caso debe sobrepasarse en este tipo de aislantes, es de 200°C.
220	Son aislamientos formados por materiales a base de mica, vidrio, cerámica, etc., poliimidas tipo Kapton; la temperatura máxima, que en ningún caso debe sobrepasarse en este tipo de aislantes, es de 220°C.
250	Son aislamientos formados por materiales a base de mica, vidrio, cerámica., poliimidas tipo Kapton;

Tabla 2: Clases térmicas para un aislante según norma EN 60034-18-1-2010.

La temperatura ambiente del fluido refrigerante, se toma de acuerdo con la misma norma, como 40°C (para menos de 1000m de altitud).

La temperatura máxima permanente admisible (TMPA) de los diferentes materiales aislantes se compone, como queda representado en la siguiente figura, de: *la temperatura del medio refrigerante (TMR), de la sobre temperatura límite (STL) y de un suplemento de seguridad.* Este último se introduce porque al aplicar el método de la medida usual es decir la elevación de la resistencia del devanado, no se determina la temperatura en el punto más caliente, sino que se mide el valor medio del calentamiento.

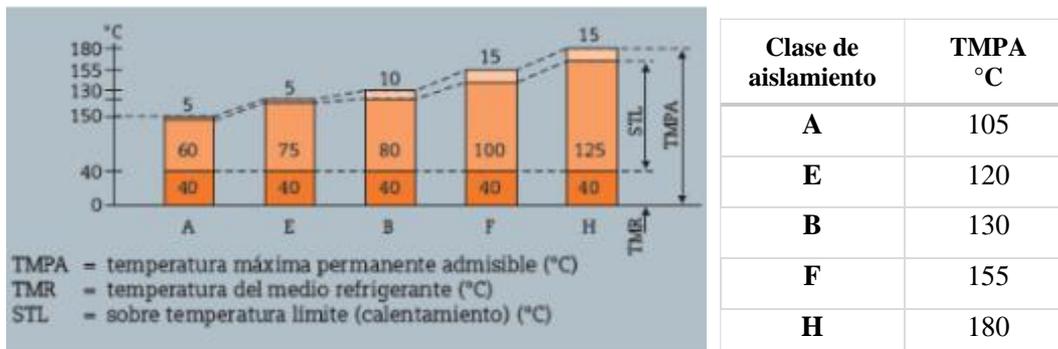


Figura 5. Incidencia de la temperatura en los diferentes materiales aislantes.

En este sentido se tiene la siguiente consideración práctica:

La T_{max} de los devanados debe estar entre 5 y 15° por debajo de la T límite que asigna la norma a la clase de aislamiento empleada si la T que se mide en el devanado es un valor medio. Cuando se usan termopares o termómetros, se mide en puntos concretos y el aislante puede estar por encima de dicho valor medio.

Finalmente, es necesario recalcar que a grandes alturas la evacuación del calor de la máquina, disminuye por ser menor la densidad del aire. Los datos expuestos se refieren a altitudes inferiores a 1000m. Para altitudes superiores se deben consultar las normas (se establecen reducciones en los calentamientos que oscilan entre un 2 y un 5 por ciento por cada 500m que sobrepasen los 1000m).

El hecho de que las normas prescriban una temperatura límite para cada aislante (por ejemplo 155°C para los de clase F) *no significa que ese aislante pueda soportar indefinidamente su temperatura límite*. Lo que significa es que, si una máquina dotada de este aislamiento clase F trabaja en las condiciones límite permitidas (en cuanto a temperatura del medio ambiente, refrigeración, altitud, carga, etc.) y especificadas en las normas, sin que la temperatura de sus aislantes supere los 155°C, entonces dicha máquina podría seguir funcionando *ininterrumpidamente* en esas condiciones especificadas un mínimo de horas determinado (para máquinas de baja tensión, preferentemente entre 20 000 y 60 000) [11], durante las cuales la vida térmica del aislante está garantizada, es decir, el aislante, pese al inevitable deterioro, todavía puede cumplir con su función sin provocar el fallo del sistema. Por el contrario, si el aislante trabaja de forma continuada por encima de su temperatura máxima, sus propiedades se degradarán más rápidamente y su vida se acortará. Se suele asumir que por cada 10°C que el aislamiento supere su temperatura máxima (dada por su clase térmica), su vida se acorta a la mitad.

3.4. Causas para la degradación del sistema aislante

Respecto a lo señalado en el apartado anterior, se puede establecer que, el funcionamiento de una máquina cuando la temperatura de sus aislantes está por encima del máximo señalado en la norma conduce a un deterioro del equipo, tanto más rápido cuanto mayor es el exceso de temperatura.

No obstante, adicional a estos efectos térmicos, el sistema aislante de una máquina, durante su funcionamiento, está sujeto a esfuerzos mecánicos, eléctricos y de entorno ambiental de diversa magnitud. Estos esfuerzos son el origen de su degradación gradual y están motivados por las siguientes causas:

- **Mecánicas:** Se producen como consecuencia de cortocircuitos o arranques frecuentes, circunstancias en las que las altas corrientes circulantes determinan importantes esfuerzos electromecánicos. Una fijación insuficiente de las cabezas de bobina, un acuñado incorrecto en el estator o estar sometida a vibraciones por operar la máquina fuera de balance son las principales fuentes de degradación.
- **Eléctricas:** Se producen normalmente por efecto de las elevadas tensiones ocasionadas por perturbaciones de la red y maniobras con interruptores. Tanto las sobretensiones y las bajas tensiones ocasionan una fatiga anormal dentro de la aislación que puede conducir a agrietamientos y laminación de la propia aislación.
- **Entorno ambiental:** Abarca una multitud de agentes que van desde la humedad por procesos hasta ambientes húmedos y calurosos, como también aceite, ácido, polvo con partículas conductoras o la entrada de cuerpos extraños que a su camino dañan la aislación.

Se considera que el aislamiento ha fallado si no evita adecuadamente que la corriente eléctrica fluya por trayectorias indeseadas. Esto incluye el flujo de corriente a través de las superficies exteriores o interiores del aislamiento (*corriente de fuga superficial*), a través del cuerpo del aislamiento (*corriente de conducción*) o por otras razones distintas; por ejemplo, agujeros pequeños o grietas que pueden aparecer en el aislamiento y materiales extraños que pueden penetrar la superficie.

3.5. Ensayos para el mantenimiento del sistema aislante

La vida útil durante la cual una máquina eléctrica prestará servicio será, por tanto, muy dependiente de lo capaz que sea su sistema aislante de seguir realizando sus funciones. De ahí que sea conveniente la realización de programas de monitorización con ensayos que aseguren que el sistema se mantiene en condiciones satisfactorias

Ahora bien, el hecho de que existan varios tipos de ensayos y que no todos coincidan en sus objetivos, es indicativo de que ninguno es capaz de determinar, de una forma clara,

el estado del sistema aislante de los devanados. La evaluación de este estado se suele realizar a partir de los datos de más de un ensayo y, aun así, puede no resultar plenamente fiable.

En el caso de estudio, se hace referencia a las pruebas que realiza el comprobador de resistencia de aislamiento Megger MIT1025; las pruebas de diagnóstico preconfiguradas son: Resistencia de Aislamiento básica y temporizada (Insulation Resistance →IR), Índice de Polarización (Polarization Index →PI), relación de absorción dieléctrica (Dielectric Absorption Ratio →DAR), Voltaje Escalonado (Step Voltage →SV) y Prueba de Rampa. Para cada prueba, el equipo presenta cinco medidas de voltaje programadas y una con bloqueo configurable por el usuario.

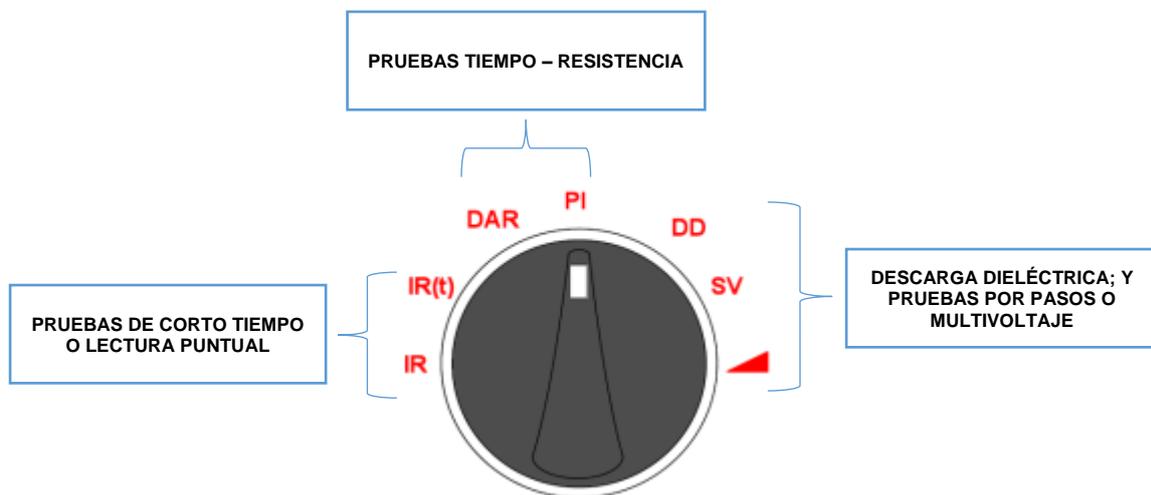


Figura 6. Tipos de pruebas para medición de la resistencia de aislamiento

3.5.1. Resistencia de aislamiento (IR)

La resistencia de aislamiento (IR) se define como el voltaje de prueba de CC dividido entre la corriente total que fluye a través del aislamiento de la máquina, corregida a 40°C. El valor de IR a tomar se considera como el obtenido a 1 minuto desde que se empezó a aplicar el voltaje considerado. La corriente total tiene tres componentes: corriente capacitiva, corriente de absorción (o de polarización) y corriente de conducción (o corriente de fuga). En general, la resistencia de aislamiento varía proporcionalmente con el espesor del aislamiento e inversamente proporcional al área de superficie del conductor.

- **Corriente capacitiva (I_C)**, corriente reversible, de magnitud comparativamente alta y corta duración, que decae exponencialmente con el tiempo de aplicación de la tensión, y que depende de la resistencia interna del instrumento de medida y la capacitancia geométrica del bobinado [12].
- **Corriente de absorción (I_A)**, corriente resultante de la polarización molecular y el flujo de electrones, que disminuye con el tiempo de aplicación de la tensión, a una velocidad decreciente, desde un valor inicial comparativamente alto hasta casi cero, y depende del tipo y condición del sistema de aislamiento [12].
Es una medida de la cantidad de impurezas presentes en el interior del dieléctrico y por ello, la intensidad de absorción puede resultar útil como indicador de la evolución de la degradación interna del dieléctrico.
- **Corriente de fuga (conducción) (I_L)**, corriente que es constante con el tiempo y que generalmente existe sobre la superficie de las espiras extremas del devanado del estator o entre los conductores expuestos y el cuerpo del rotor en los devanados del rotor aislado. La magnitud de la corriente de fuga superficial depende de la temperatura y la cantidad de material conductor, por ejemplo, humedad o contaminación en la superficie del aislamiento.

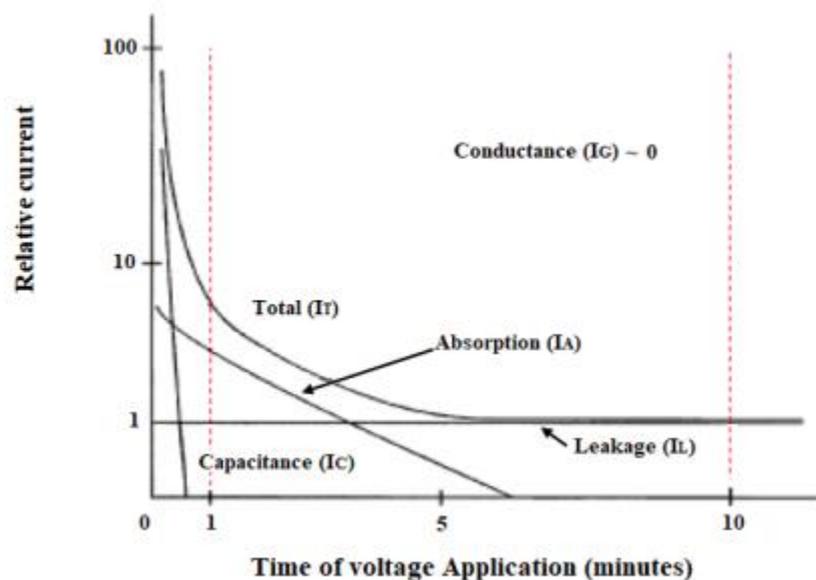


Figura 7. Tipos de corrientes para un aislamiento de epoxi-mica con una corriente relativamente baja [12].

Como se muestra en la figura 7, la corriente total es la suma de las tres componentes y es la corriente que puede medirse directamente por un microamperímetro, o en términos de megaohms con un voltaje particular por medio de un instrumento MEGGER (megóhmetro).

Comparar el cambio en la resistencia de aislamiento, o la corriente total con la duración de la aplicación del voltaje de prueba, puede ser útil para evaluar la limpieza y la sequedad de un bobinado. Si los devanados están contaminados con material parcialmente conductor o están mojados, la corriente total (I_T) será aproximadamente constante con el tiempo, ya que I_L será mucho más grande que la corriente de absorción (I_A). Si los devanados están limpios y secos, la corriente total (I_T) normalmente disminuirá con el tiempo (consulte la Figura 7), ya que la corriente total está dominada por la corriente de absorción, es decir, por una corriente de polarización (I_A) [12].

3.5.2. Resistencia de aislamiento temporizada (IR_t):

Este modo de prueba permite medir la resistencia de aislamiento con la ventaja de temporizar la prueba para finalizarla automáticamente después de un tiempo predeterminado. El temporizador predeterminado se establece en 1 minuto y puede ajustarse dentro de la función de configuración. Esta es una característica útil que le ahorra al usuario tener que mirar la pantalla durante toda la duración de la prueba y la posibilidad de pasar por alto la lectura de 1 minuto [13].

3.5.3. Índice de Polarización (PI)

Es la variación del valor de la resistencia de aislamiento con el tiempo, se expresa como una proporción de la resistencia en un tiempo t_2 dividida por la resistencia en un tiempo t_1 , después de aplicada una tensión continua de prueba. Normalmente estos tiempos t_2 y t_1 se establecen en 10 min y 1 min, respectivamente, e incluso si los tiempos t_2 y t_1 no se especifican, se supone que son 10 min y 1 min, respectivamente. Durante esos 10 minutos, el nivel de tensión deberá ser estable.

Prácticamente, el índice de polarización es indicativo de la pendiente de la curva característica (ver Figura 7) y puede usarse para evaluar la condición de aislamiento. Si un aislamiento está en buen estado, se tiene un incremento continuo de resistencia (menos corriente - ver curva A, Figura 8) en un periodo de tiempo (del orden de 5 a 10

minutos), e inversamente, si el aislamiento contiene mucha humedad o contaminantes, el efecto de absorción se enmascara por una corriente de fuga alta que permanece en un valor casi constante (curva B, Figura 8). Por este motivo el PI, es un valor que nos informa sobre el estado de humedad y limpieza de los bobinados de la máquina. [5]

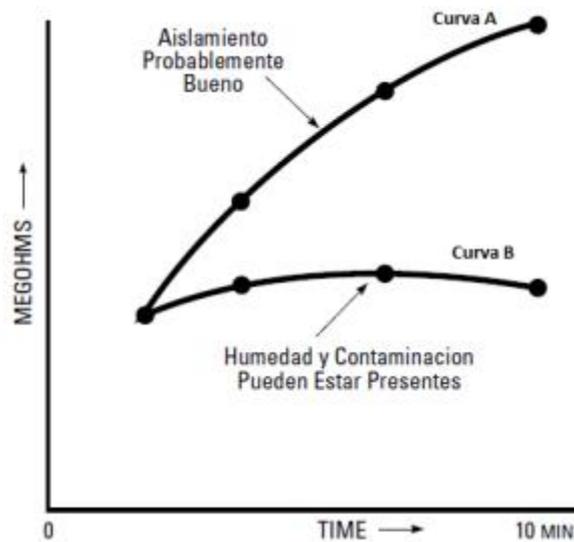


Figura 8. Curvas típicas que muestran el efecto de absorción dieléctrica en una prueba "tiempo-resistencia", realizada en un equipo capacitivo tal como el bobinado de un motor [5].

El PI se puede considerar casi independiente de la temperatura siempre y cuando la temperatura de la máquina no cambia apreciablemente entre las lecturas de 1 minuto y 10 minutos, donde el efecto de la temperatura suele ser pequeño. Caso contrario, cuando la temperatura inicial del devanado es alta, una reducción en la temperatura del sistema de aislamiento durante el tiempo de prueba puede resultar en un incremento sustancial en la resistencia de aislamiento entre las lecturas de 1 minuto y 10 minutos debido al efecto de temperatura.

3.5.4. Relación de absorción dieléctrica (DAR)

La prueba es útil para mostrar humedad o aislamiento contaminado. Es una medición de resistencia a través del tiempo que se expresa como una proporción de la resistencia en el tiempo t_2 dividida por la resistencia en el tiempo t_1 .

Para la prueba del DAR los dos puntos pueden ser definidos por el usuario, normalmente se define como la relación de la resistencia de aislamiento a 1 minuto,

dividida por la resistencia de aislamiento a 30 segundos, aunque un DAR de 1 minuto, 15 segundos también es muy popular.

$$DAR = \frac{IR_{60seg}}{IR_{30seg}} \quad (1)$$

Las pruebas PI y DAR son consideradas pruebas tiempo – resistencia con las siguientes características:

- Se expresan como una proporción de la resistencia en el tiempo t_2 dividida por la resistencia en el tiempo t_1 .
- Se consideran independientes de la temperatura. Las pruebas se deben realizar a una temperatura igual o inferior a 40 °C, 104 °F para mantener este supuesto.
- Son independientes del tamaño del equipo, siempre y cuando se tenga claro las características y la clase térmica del aislamiento, ya que el incremento de resistencia para aislamiento limpio y seco, puede o no ocurrir de la misma manera para un motor grande o pequeño. Actualmente, debido al desarrollo de nuevos materiales aislantes y por experiencia se sabe que los motores pequeños (baja potencia) tienden a estabilizar su curva de PI en pocos minutos (es decir, la IR no se incrementa en el tiempo) y aun así el valor de DAR es aceptable, siempre y cuando la $IR_{1min}@40^{\circ}C > 5000M\Omega$. Por tanto, tomando en cuenta esta consideración, es posible comparar cualitativamente varios motores y establecer las normas para motores nuevos, independientemente de sus capacidades de potencia.
- Son llamadas también pruebas de doble lectura, porque proporciona una mayor información, aun cuando una lectura puntual diga que el aislamiento está bien. Por ejemplo, la lectura puntual en un motor es de 10 megaohms. Con las pruebas de doble - lectura se puede determinar que el aislamiento está sucio o con humedad, si a un tiempo t_2 el valor de la resistencia de aislamiento se mantiene estable en 10 megaohms, o caso contrario, si existe un incremento gradual entre las verificaciones entre un tiempo t_1 y t_2 , entonces razonablemente se puede asegurar que los bobinados están en buenas condiciones [5].

3.5.5. Descarga dieléctrica (DD)

También llamada corriente de reabsorción, opera durante la descarga del dieléctrico bajo prueba. Es una prueba de aislamiento de diagnóstico que permite la evaluación del envejecimiento, el deterioro y los vacíos en el aislamiento [13], así como, identificar el exceso de corrientes de descarga que surgen cuando una capa de aislamiento de múltiples capas está dañada o contaminada, una condición que tanto la prueba de IR como el PI pueden pasar por alto. La corriente de descarga será mayor, para un valor determinado de voltaje y capacitancia, si una capa interna está dañada.

La duración predeterminada de la prueba de DD (t_1) es de 30 minutos de prueba de aislamiento seguidos por una descarga fija de 1 minuto. El periodo inicial de 30 minutos se puede ajustar, pero se debe tener cuidado para asegurarse de que la absorción completa se llevará a cabo en el periodo de prueba de aislamiento.

La DD puede expresarse como:

$$DD = \frac{I_{1min}}{V \times C} \quad (2)$$

donde:

I_{1min} es la corriente de descarga en mA un minuto después de eliminar el voltaje de prueba.

V en el voltaje en voltios y

C es la capacitancia en faradios.

3.5.6. Voltaje escalonado (SV)

Es una prueba controlada de sobrevoltaje (sobretensión) que se puede aplicar a los bobinados del estator y del rotor de los motores de CA síncronos y asíncronos y a los bobinados de la armadura y de campo de motores de CC. Es aconsejable realizar una prueba de PI antes que una prueba de SV para determinar si el aislamiento es adecuado para la prueba de sobrevoltaje.

La prueba de SV se basa en el principio de que un aislante ideal producirá lecturas idénticas en todos los voltajes, mientras que un aislante que está sobre-estresado, mostrará valores más bajos de aislamiento en voltajes más altos.

Durante la prueba se aplica un voltaje por pasos en incrementos progresivos de una quinta parte del voltaje de prueba final cada minuto durante 5 minutos, tomando mediciones sucesivas. La duración de la prueba de SV se puede ajustar si se desea, a partir del valor predeterminado de 5 minutos, pero si esta duración es modificada las cuatro primeras lecturas no mostrarán los indicadores '1m' a '4m' respectivos.

El temporizador de pasos siempre se establecerá en el tiempo total de la prueba dividido entre cinco. Un paso de tiempo demasiado corto puede resultar en lecturas incorrectas y demasiado tiempo puede estresar demasiado a un motor [13].

3.5.7. Prueba de rampa

Es una prueba de sobrevoltaje similar a la prueba de SV, pero con un mejor control y alerta de falla potencial en el aislamiento. Es menos probable que la rampa de voltaje continuo y lento resulte en daños imprevisibles en el aislamiento que los aumentos de paso rápido empleados en la prueba de SV.

La rampa de voltaje normal (dV/dt) es de $1\text{ kV}/\text{min}$, que es el predeterminado para equipo Megger MIT1025, aunque el usuario puede ajustar este valor. La prueba aumentará gradualmente el voltaje hasta que éste alcanza el voltaje de prueba seleccionado a menos que se detecte una falla o un aumento repentino en la corriente. El resultado que se muestra al concluir la prueba es la resistencia final de aislamiento, el voltaje y la corriente. Si se guarda el resultado, se registra una curva completa de corriente (μA) y el voltaje (kV) que se puede convertir a una hoja de cálculo para que las curvas de corriente vs. Voltaje puedan compararse con las curvas publicadas en IEEE 95 -2002 [13].

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Características del equipo y software utilizado

La medición directa de la resistencia de aislamiento se puede hacer con los siguientes instrumentos:

- Megóhmetro de indicación directa con generador autopropulsado o eléctrico.
- Megóhmetro de indicación directa con batería autónoma
- Puente de resistencia con galvanómetro y baterías independientes.

La resistencia del aislamiento también se puede calcular a partir de las lecturas de un voltímetro y un microamperímetro utilizando un suministro de voltaje externo (bien regulado).

La resistencia se calcula a partir de la siguiente ecuación [12]:

$$IR_t = E_{(t)}/I_{(t)} \quad (3)$$

donde

$IR_{(t)}$ es la resistencia de aislamiento en megohms,

$E_{(t)}$ es el voltaje aplicado en voltios,

$I_{(t)}$ es la lectura del amperímetro en microamperios

(t) segundos después de la aplicación del voltaje de prueba.

A continuación, se describe el equipo utilizado para los ensayos realizados.

3.1.1. Megger MIT 1025

El comprobador de aislamiento MEGGER es un instrumento portátil que permite una lectura directa de la resistencia de aislamiento en Ohms si se trata de un aislamiento en mal estado, o megaohms, si se tiene un aislamiento en buen estado [5].



Figura 9. Equipo Megger MIT 1025

El probador de aislamiento MEGGER es esencialmente un medidor de resistencia de alto rango (megóhmetro) con un generador de corriente directa interconstruido. Este medidor es de construcción especial con bobinas de corriente y bobinas de voltaje que permiten que los ohms verdaderos se puedan leer directamente, independientemente del voltaje aplicado. Este método no es destructivo; es decir, no ocasiona deterioro del aislamiento [5].

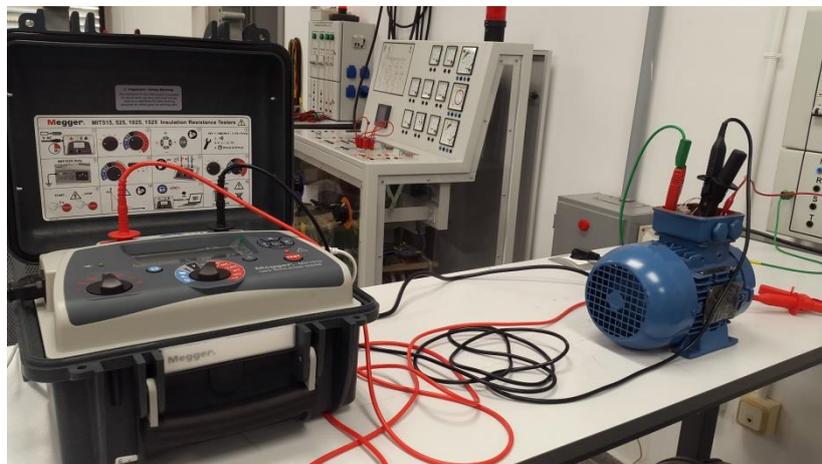
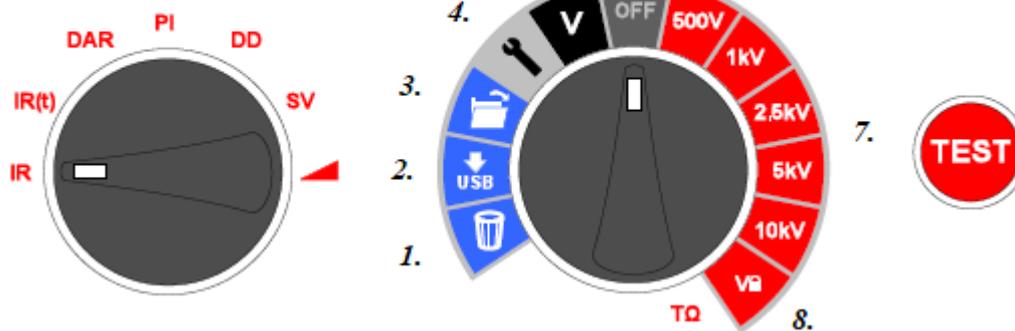


Figura 10. Instrumento de prueba Megger conectado para medir resistencia de aislamiento.

La simplicidad de operación se consigue con dos diales; el central incorpora la posición OFF, mediante el cual se selecciona el rango de voltaje de prueba, mientras que el dial izquierdo selecciona el tipo de prueba de aislamiento. El botón TEST inicia y detiene una prueba.

Dial izquierdo o dial de modo de prueba

Dial central



- | | |
|---|---------------------------------|
| 1. Eliminación de registros. | 5. Voltímetro. |
| 2. Descarga de datos vía USB. | 6. Botón de apagado. |
| 3. Abrir registros previamente guardados. | 7. Rango de voltajes. |
| 4. Configuración del equipo. | 8. Rango de voltaje de bloqueo. |

Figura 11. Dial de modo de prueba y de configuración equipo Megger MIT 1025

3.1.1.1. Características del equipo

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

ESPECIFICACIONES ELÉCTRICAS

Rango de voltaje de entrada:	de 85 a 265 V rms, 50/60 Hz, 100 VA
Vida de batería:	Capacidad típica es de 4.5 horas continuas @ 10 kV con una carga de 100 MΩ
Voltajes de prueba	500 V, 1000 V, 2500 V, 5000 V, 10000 V
Voltaje de prueba definido por el usuario	5 kV a 10 kV en pasos de 25 V
Precisión (23 °C):	±5% a 2 TΩ, ±20% a 20 TΩ
Rango del voltímetro:	30 V a 660 V CA o CC, 50/60 Hz
Precisión del voltímetro:	±3%, ±3 V
Rango del temporizador:	Hasta 99 minutos, configuración mínima de 15 segundos

CONDICIONES AMBIENTALES

Temperatura de funcionamiento:	de -20 °C a 50 °C
Temperatura de almacenamiento:	de -25 °C a 65 °C

Humedad:	90% de humedad relativa sin condensación a 40 °C
Protección de entrada:	IP65 (con tapa cerrada), IP40 (con tapa abierta)
ESPECIFICACIONES GENERALES	
Seguridad:	Cumple con los requerimientos de IEC 61010-1, CATIV 600 V a 3000 m. Hacer funcionar el aparato con todos los cables de prueba conectados por encima de 2.000 m.
EMC Compatibilidad electromagnética	Cumple con los requerimientos de IEC61326-1 (Electrical equipment for measurement, control and laboratory use – EMC requirements)
Dimensiones:	315 mm de largo x 285 mm de ancho x 181 mm de alto.
Peso:	4.5 kg

Tabla 3. Especificaciones técnicas del equipo Megger [13].

3.1.2. Software Power DB



Es el software utilizado para recopilar y reportar los datos obtenidos a partir de las actividades de mantenimiento e inspección que se lleven a cabo en el equipo eléctrico utilizado para la generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica.

El software incluye interfaces para muchos instrumentos de prueba, permite realizar pruebas automatizadas y adquirir datos, así como importar diversos formatos de archivo. Se pueden generar fácilmente informes de resultados y resúmenes [13].

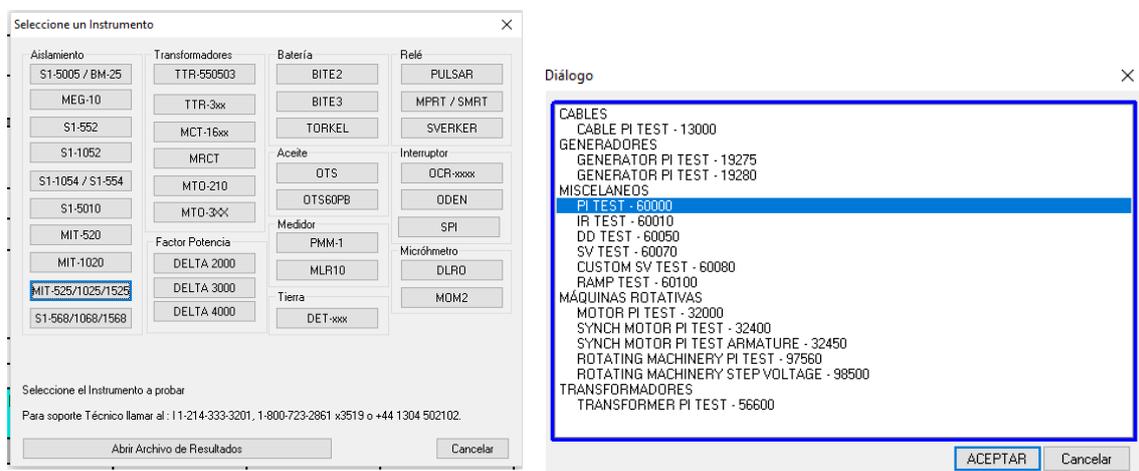


Figura 12. Ventanas de trabajo del software Power DB.

De las ediciones disponibles del software se ha utilizado el Power DB Lite, el cual se interconecta entre el equipo y el PC, mediante cable USB, previa instalación del controlador correspondiente, una vez habilitado el controlador y la conexión entre el MIT a un PC sea satisfactoria, se selecciona el instrumento y la prueba a realizar en las ventanas mostradas en la figura 12. Posteriormente, se cargará el formulario correspondiente a la prueba seleccionada, al desplazarse hacia abajo se muestran tablas con encabezados de color cian; al hacer clic derecho sobre una de ellos se abrirá una ventana para ejecutar, principalmente, las funciones mostradas en la figura 13, y que se detallan a continuación:

1. Opción *Start New Live Stream*: permite capturar directamente la transmisión de los datos en vivo, los resultados se registran una vez por segundo durante una prueba y simultáneamente, grafica en tiempo real las curvas de interés, por ejemplo, tiempo – resistencia o tiempo – corriente.
2. Opción *Start Importing Results*: permite descargar los resultados de pruebas realizadas en el equipo.
3. Opción *Copy Results to Clipboard*: esta función genera una copia de todos los datos en Excel, y otros programas de software de uso habitual.

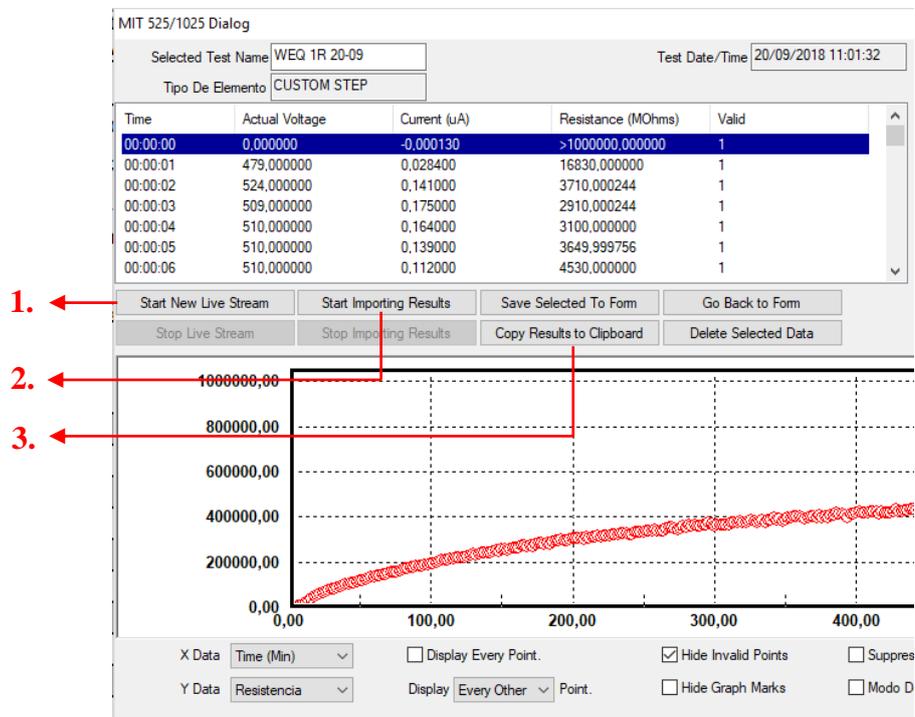


Figura 13. Ventana de funciones software Power DB.

3.2. Norma referente a los ensayos realizados

3.2.1. Generalidades

El Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (conocido por sus siglas en inglés IEEE), es una asociación mundial de ingenieros dedicada a la estandarización y el desarrollo en áreas técnicas. Mediante sus actividades de publicación técnica, conferencias y estándares basados en consenso, el IEEE produce más del 30 % de la literatura publicada en el mundo sobre ramas derivadas y correspondientes a la Ingeniería Eléctrica; en este sentido con el estándar IEEE 43-2013, como una práctica recomendada, el IEEE presenta y recomienda la medición de la resistencia de aislamiento eléctrico como un factor importante en la supervisión del estado del aislamiento eléctrico en maquinaria rotativa.

La norma describe un procedimiento recomendado para medir la resistencia de aislamiento de la armadura y bobinados de campo en máquinas rotativas de 750 W o más. Se aplica a máquinas síncronas, máquinas de inducción, máquinas de corriente continua y compensadores síncronos. No se aplica a máquinas de potencia fraccionaria.

El documento también describe las características típicas de resistencia de aislamiento, define la resistencia de aislamiento y la prueba del índice de polarización y presenta los valores de resistencia de aislamiento mínimos aceptables recomendados y los índices de polarización para varios tipos de máquinas rotativas [12].

3.2.2. Lecturas de resistencia de aislamiento

La medición de la resistencia de aislamiento constituye una prueba de voltaje directo y la tensión de prueba debe restringirse a un valor apropiado; esto es particularmente importante en el caso de máquinas pequeñas de baja tensión o devanados húmedos. Si el voltaje de prueba es demasiado alto, la tensión de prueba aplicada puede sobrecargar el aislamiento, lo que puede llevar a una falla de aislamiento.

Las pautas para los voltajes de prueba se presentan en la Tabla 4. Las lecturas de la resistencia de aislamiento se toman después de aplicar la tensión de prueba durante 1 minuto [12].

Voltaje nominal del bobinado (V) ^a	Voltaje en cc de prueba de resistencia de aislamiento (V)
<1000	500
1000 – 2500	500 – 1000
2501 – 5000	1000 – 2500
5001 – 12000	2500 – 5000
>12000	2500 – 5000

^a Voltaje nominal de línea a línea para máquinas trifásicas de CA, voltaje de línea a tierra para máquinas monofásicas y voltaje directo nominal para máquinas de CC o bobinados de campo.

Tabla 4. Voltajes de prueba en cc recomendados por IEEE 43-2013 para la prueba de resistencia de aislamiento [12].

3.2.3. Lecturas del índice de polarización

Esta prueba se aplica a los devanados de CA y CC nuevos y en servicio. El índice de polarización se define normalmente como la relación entre el valor de resistencia de 10 min (IR_{10}) y el valor de resistencia de 1 min (IR_1). El índice de polarización es indicativo de la pendiente de la curva característica (ver Figura 7) y puede usarse para evaluar la condición de aislamiento. Para proporcionar una mayor precisión alrededor del punto de 1 minuto y para permitir que los datos se tracen en papel de registro, también es común tomar lecturas en otros intervalos como 15 s, 30 s, 45 s, 1 min, 1.5 min, 2 min, 3 min, 4 min, ..., y 10 min [12].

Aunque la normativa no ilustra curvas modelo indicativas de un buen o mal estado del aislamiento, a continuación, se muestran varias curvas que en base a su perfil de IR denotan un buen estado aislamiento o presencia de contaminación.

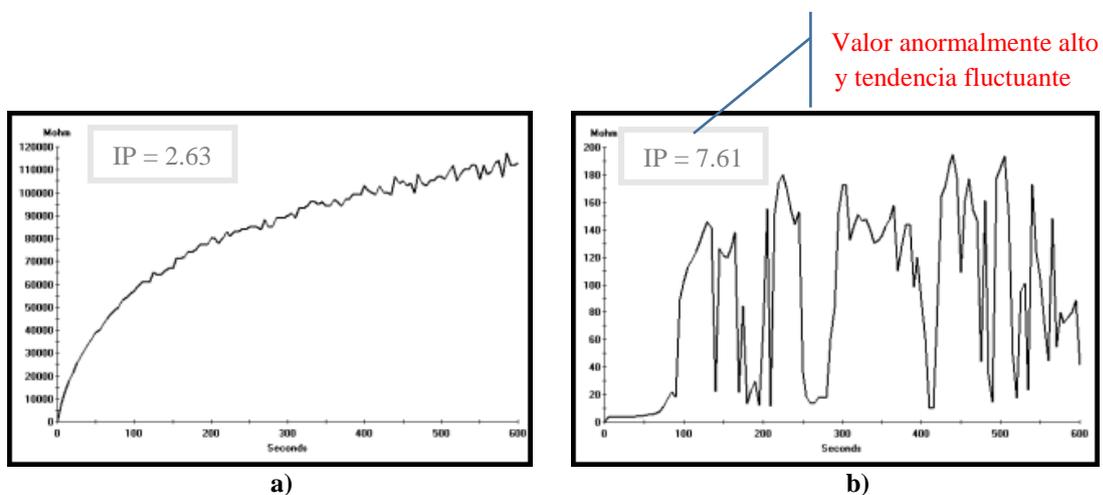


Figura 14. Curvas de PI: a) Buen aislamiento; b) Contaminación [8].

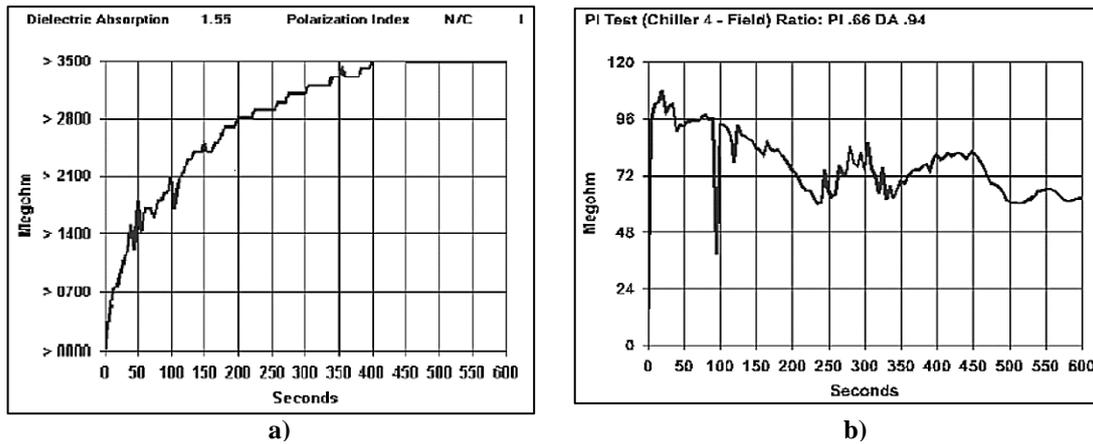


Figura 15. a) Curva de PI correcta o; b) Curva de PI defectuosa [9].

3.2.4. Efecto de la temperatura en la medición de resistencia de aislamiento

El valor de resistencia de aislamiento de un devanado depende de la temperatura del devanado y del tiempo transcurrido desde la aplicación de la tensión. Por ejemplo, cuando la máquina acaba de detenerse y la temperatura de funcionamiento es del orden de 90 ° C - 100 ° C, la temperatura puede disminuir significativamente durante 10 minutos y esto puede afectar al PI. Para evitar los efectos de la temperatura en el análisis de tendencias, se deben realizar pruebas posteriores cuando el devanado esté cerca de la misma temperatura que la prueba anterior. Sin embargo, si la temperatura del bobinado no puede controlarse desde un tiempo de prueba a otro, se recomienda que todos los valores de la prueba de aislamiento se corrijan a una temperatura base común de 40 ° C usando la siguiente ecuación. Aunque el valor corregido es una aproximación, esto permite una comparación más significativa de los valores de resistencia de aislamiento obtenidos a diferentes temperaturas [12].

$$R_C = K_T * R_T \quad (4)$$

donde

R_C es la resistencia de aislamiento (en megohms) corregida a 40 ° C,

K_T es el coeficiente de temperatura de resistencia de aislamiento a temperatura T °C

R_T es resistencia de aislamiento medida (en megohms) a temperatura T °C.

Aproximaciones de K_T [12]

Durante la década de 1970, se realizaron varios cambios en los tipos de aislamiento utilizados en las máquinas rotativas eléctricas. Las características de resistencia de aislamiento de estos sistemas de aislamiento son diferentes de los sistemas TERMOPLÁSTICOS anteriores, y por lo tanto la norma presenta los factores de corrección (K_T) para dos familias diferentes de sistemas de aislamiento: "TERMOPLÁSTICO" y "TERMOESTABLE". "TERMOPLÁSTICO" se aplica, por ejemplo, a sistemas asfálticos y otros sistemas que estaban en uso antes de principios de los años sesenta. "TERMOESTABLE" se aplica a aislamientos más nuevos que aparecieron a principios de la década de 1960. Incluyen sistemas basados en epoxi y poliéster. Ambos se presentan en la Figura 16.

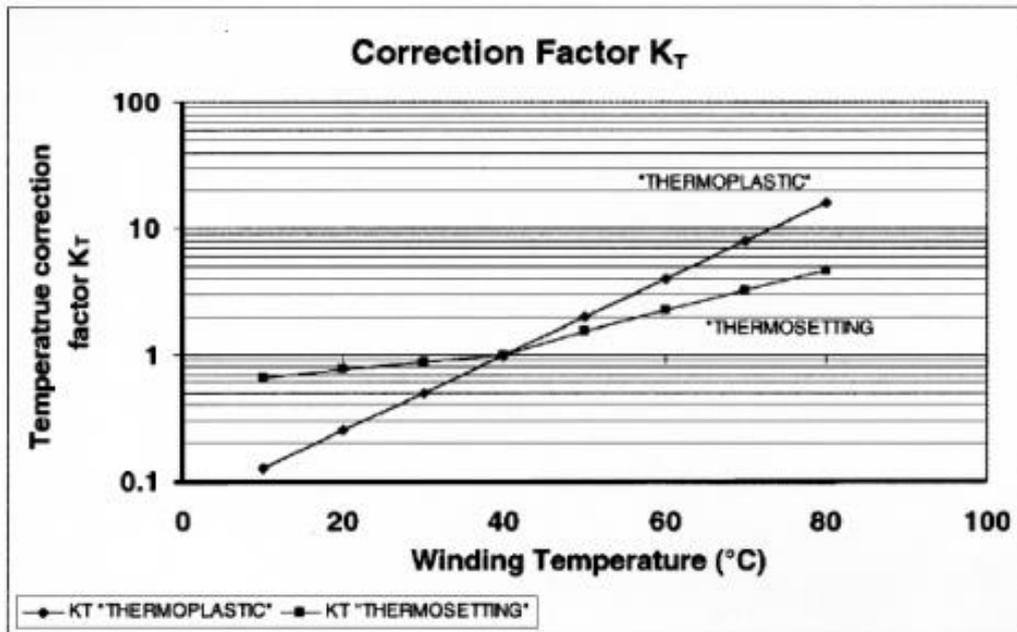


Figura 16. Factores de corrección de temperatura para sistemas de aislamiento "TERMOPLÁSTICO" (asfáltico) y "TERMOESTABLE" (epoxi o poliéster).

Ecuación para sistemas de aislamiento "TERMOPLÁSTICO" [12]

Para esta familia, K_T puede aproximarse mediante la ecuación (3).

$$K_T = (0,5)^{(40-T)/10} \quad (5)$$

donde

T = Temperatura en °C

Ecuación para sistemas de aislamiento "TERMOESTABLE" [12]

El factor de corrección para el rango de temperaturas entre $10\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, se ilustra en la siguiente ecuación:

$$K_T(T) = \exp \left[-1245 \left(\frac{1}{T + 273} - \frac{1}{313} \right) \right] \quad (6)$$

donde:

T = Temperatura en $^{\circ}\text{C}$

3.2.5. Corrección del Índice de Polarización

Cuando el índice de polarización se usa con la resistencia de aislamiento, para determinar la condición de aislamiento, no es necesario realizar una corrección de temperatura en el PI. Cuando la temperatura de la máquina no cambia apreciablemente entre las lecturas de 1 minuto y 10 minutos, el efecto de la temperatura en el índice de polarización suele ser pequeño. Sin embargo, cuando la temperatura inicial del devanado es alta, una reducción en la temperatura del sistema de aislamiento durante el tiempo de prueba puede resultar en un incremento sustancial en la resistencia de aislamiento entre las lecturas de 1 minuto y 10 minutos debido al efecto de temperatura. El índice de polarización resultante puede ser anormalmente alto, en cuyo caso se recomienda repetir la medición a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ o por debajo de este valor, como un control del PI [12].

3.2.6. Limitaciones de la norma

Los datos de prueba de resistencia de aislamiento son útiles para evaluar la presencia de algunos problemas de aislamiento, como contaminación, humedad absorbida o grietas graves; Sin embargo, algunas limitaciones son las siguientes [12]:

- Los ensayos de aislamiento en corriente continua no están directamente relacionados con la medición de la Rigidez Dieléctrica, a menos que el daño sea muy avanzado; es imposible identificar un nivel de aislamiento en que el sistema fallará.
- Algunas máquinas grandes pueden tener valores bajos; en casos así, las tendencias a lo largo del tiempo es la mejor herramienta para la toma de decisiones.

- Una medición de resistencia de aislamiento individual a una tensión particular no aporta mayor información como si se establecen tendencias.
- Las mediciones de voltaje directo (en cc), tales como las pruebas IR y PI pueden no detectar los vacíos de aislamiento interno causados por impregnación incorrecta, deterioro térmico o ciclos térmicos en las bobinas del estator.
- Estas pruebas son realizadas con la máquina apagada (OFF LINE), por lo tanto, el ensayo no detecta problemas propios de la rotación, como son: bobinas sueltas o vibraciones que originan desalineamiento.

3.2.7. Valores mínimos del Índice de Polarización

Los valores mínimos recomendados de PI^a, para máquinas rotativas de CA y CC se indican en la Tabla 5, la cual se basa en la clase térmica de los materiales aislantes y, con la excepción de bobinados de campo no aislados, se aplica a todos los materiales aislantes independientemente de la aplicación [12].

Clase térmica ^{b, c, d}	PI mínimo
Clase 105 (A)	1,5
Clase 130 (B) y superior	2,0

^a La prueba PI, no es aplicable al campo no aislado
^b IEC 60085-01
^c IEEE Std 1
^d NEMA MG-1

Tabla 5. Valores mínimos recomendados del índice de polarización

Se debe tomar en cuenta que si la lectura de la resistencia de aislamiento obtenida después de aplicar la tensión durante 1 minuto (IR₁) es superior a 5000 MΩ, según la magnitud del voltaje directo aplicado, la corriente medida total (I_T) puede estar en el rango de submicroamperios. En este nivel de sensibilidad requerida del instrumento de prueba, pequeños cambios en el voltaje de suministro, humedad ambiental, conexiones de prueba y otros componentes no relacionados, pueden afectar en gran medida la corriente total medida durante el intervalo de 1 min -10 min requerido para un PI.

Debido a estos fenómenos, cuando el IR₁ es superior a 5000 MΩ, el PI puede o no ser una indicación de la condición de aislamiento, por lo tanto, no se recomienda como una herramienta de evaluación.

Se ha detectado, por otro lado, que existen materiales aislantes de polarización ‘rápida’ en los que, a pesar de estar el aislamiento limpio y seco, sus valores de índices de polarización son cercanos a 1. Ello es debido al hecho de que la corriente de absorción, en tales materiales, se atenúa muy rápido y apenas influye en la corriente total. En tales devanados, la corriente total se estabiliza rápidamente en un valor muy bajo. Equivalentemente, la resistencia de aislamiento se estabiliza rápidamente en un valor muy alto, lo cual lleva a valores de PI cercanos a 1. Debido también a este hecho, se suele aceptar que si la IR es suficientemente grande (superior a 5000 MΩ), el índice de polarización deja de ser significativo. Esto suele darse con más frecuencia en motores de menor potencia con aislamientos de rápida polarización.

3.2.8. Valores mínimos de resistencia de aislamiento

La resistencia de aislamiento del devanado real que se utilizará para la comparación con $IR_1 \text{ min}$ es la resistencia de aislamiento observada, corregida a 40 ° C, obtenida aplicando una tensión continua constante a todo el devanado durante 1 minuto [12].

Resistencia de aislamiento mínima (megohms)	Máquina bajo prueba
$IR_1 \text{ min} = kV + 1$	Para la mayoría de los bobinados fabricados antes de 1970 y no descritos abajo.
$IR_1 \text{ min} = 100$	Para la mayoría de los bobinados preformados de CA construidos después de 1970
$IR_1 \text{ min} = 5$	Para la mayoría de las máquinas de bobinado aleatorio y preformado por debajo de 1 kV y armaduras de CC.

Tabla 6. Valores mínimos recomendados de resistencia de aislamiento a 40 ° C (todos los valores en MΩ).

NOTA 1— $IR_1 \text{ min}$ es la resistencia de aislamiento mínima recomendada, en megohms, a 40 ° C de todo el devanado de la máquina (todas las fases).

NOTA 2— kV es: La tensión nominal de línea en valor eficaz para máquinas trifásicas de CA, la tensión línea a tierra para máquinas monofásicas y la tensión nominal directa para máquinas de corriente continua o bobinados de campo.

NOTA 3— El término “devanado preformado” se refiere a aquellos construidos con alambre rectangular o cuadrado, colocados de manera ordenada. Por el contrario, el “devanado aleatorio” se construye con alambres redondos, y su ubicación es aleatoria.

3.2.9. Estado del aislante respecto a los resultados de PI, resistencia de aislamiento y DAR.

El establecimiento de la evaluación del sistema aislante con respecto a valores de IR, PI o DAR no se encuentran definidos por la norma IEEE-43-2013, no obstante, se enlista algunas fuentes como guía para la evaluación de resultados:

- Norma IEC60085-01:1984 considera como aceptables los resultados de PI > 1.5 para la clasificación de la clase térmica A, y los resultados de PI > 2.0 para la clasificación de las clases térmicas B, F y H,
- Manual de instalación, operación y mantenimiento de motores eléctricos trifásicos para atmósferas explosivas, de los motores marca WEG, utilizados para el análisis:

Resistencia de aislamiento^a	
Valores de resistencia de aislamiento	Evaluación
< 2MΩ	Insatisfactorio
5 – 100 MΩ	Regular
100 – 500 MΩ	Satisfactorio
500 – 1000 MΩ	Bueno
>1000 MΩ	Excelente
^a Valores de resistencia medidos en la práctica	

Tabla 7. Estado del aislamiento respecto al IR; establecido por el fabricante WEG.

Índice polarización (entre 1 y 10 min)^a	
Índice de Polarización	Evaluación
< 1,5	Insatisfactorio
1,5 a 2,0	Regular
>2	Satisfactorio
^a Valores de resistencia medidos en la práctica	

Tabla 8. Estado del aislamiento respecto al PI; establecido por el fabricante WEG.

- Manual del usuario Megger MIT 1025, el cual establece los siguientes criterios de evaluación para la condición del aislamiento respecto al PI:

Resultado de PI	Condición del aislamiento
< 1	Deficiente
De 1 a 2	Cuestionable
De 2 a 4	Aceptable
>4	Bueno

Tabla 9. Estado del aislamiento respecto al PI, indicado por Megger.

- Manual del usuario Megger MIT 1025, el cual establece los siguientes criterios de evaluación para la condición del aislamiento respecto al DAR:

Resultado de DAR (IR_{60s} / IR_{30s})	Condición del aislamiento
De 1 a 1,25	Cuestionable
De 1,4 a 1,6	Aceptable
>1,6	Excelente

Tabla 10. Estado del aislamiento respecto a DAR indicado por Megger.

- Guía para la prueba resistencia de aislamiento del Grupo Chauvin Arnoux el cual establece los siguientes criterios de evaluación para la condición del aislamiento respecto al DAR:

Resultado de DAR (IR_{60s} / IR_{30s})	Condición del aislamiento
< 1,25	Cuestionable
<1,6	Aceptable
>1,6	Excelente

Tabla 11. Estado del aislamiento respecto a DAR indicado por Chauvin.

3.3.Motores ensayados

La realización de los ensayos se enfoca hacia grupos de motores que simulan en cierta parte, el escenario del tiempo de vida de un motor en la industria, es decir, se realizan pruebas en motores nuevos y en motores almacenados durante un tiempo, en motores con un cierto tipo de régimen de servicio y motores que han sido dados de baja por sendas causas.

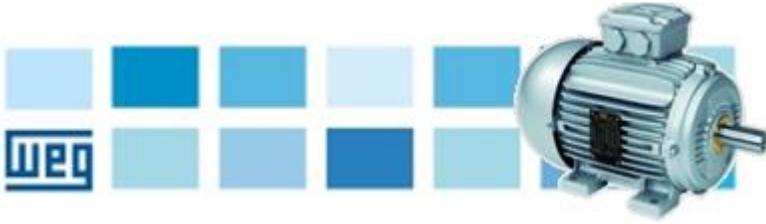
A continuación, se enlista los motores ensayados y para una mejor ilustración de las características de funcionamiento, se realiza una ficha técnica con información relacionada a la selección del voltaje de prueba, así como el tipo de conexionado y clase de aislamiento, para la correcta realización de la prueba y posterior evaluación de los resultados.

3.3.1. Motores Nuevos

- Motor trifásico WEG.

Son 4 motores nuevos del fabricante WEG que fueron ensayados; los cuales se encuentran por el momento no operativos, no obstante, la primera medición de la resistencia de aislamiento permitirá constatar el estado del sistema de aislamiento, puesto que, el estatus de nuevo no significa necesariamente en buenas condiciones y este concepto justamente es muy importante que sea tomado en cuenta por el responsable del mantenimiento, previamente a la puesta en marcha del equipo, pues, incluso el fabricante del motor recomienda la medición de la resistencia de aislamiento antes de la primera operación del motor, así como después de largos periodos de almacenamiento y mucho tiempo desconectado.

MOTOR INDUSTRIAL TRIFÁSICO

		# DE SERIE	
		1005621335	
		FECHA FABRICACIÓN	
		28 – SEP – 09	
RÉGIMEN DE SERVICIO		IP	
S1 – 40°C / S2 - 400°C - 2h		55	
		PARES DE POLOS	
		4	
Voltaje estator Δ / Y (V)	INS. CL	Material aislante	
220 / 380	H	Tejidos de fibra de vidrio, amianto, mica, impregnados con silicona.	
Intensidad estator Δ / Y (A)			Impregnante o barniz
2,38 / 1,38			Resinas de silicona
Velocidad (rmp)			
1420			

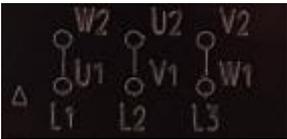
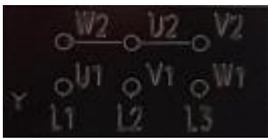
Potencia (kW)	0,55	Fibras de vidrio y caucho, silicona.
Frecuencia (Hz)	50	Esmaltes de silicona, poliéster, poliuretano, poliesterimida.
Cos φ	0,81	TEMPERATURA MÁXIMA 180 C°
CONEXIONES ELÉCTRICAS		
TRIÁNGULO	ESTRELLA	BORNAS
		

Tabla 12. Ficha técnica motor industrial trifásico.

- Motor Trifásico Multimontaje WEG

Este motor se encuentra por el momento no operativo, tiene cierto tiempo de almacenamiento, por ende, el ensayo a realizar tiene el mismo objetivo de los motores del punto 3.3.1. Los motores de aluminio WEG multimontaje con pies removibles, presenta flexibilidad en el montaje, puesto que, permite cambios en la forma constructiva, sin la necesidad de mecanizado o modificaciones en la base del motor. La caja de conexiones también puede ser girada 90° permitiendo la conexión de los cables del motor en cualquier lado.

MOTOR INDUSTRIAL TRIFÁSICO – MULTIMONTAJE



DE SERIE

1010560631

FECHA FABRICACIÓN

28 – ENE – 11

RÉGIMEN DE SERVICIO	FACTOR DE SERVICIO	IP	PARES DE POLOS
S1	1,00 AMB 40°C	55	2

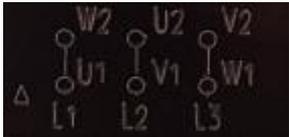
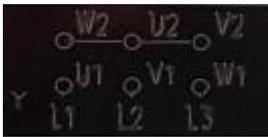
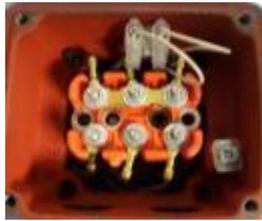
Voltaje estator Δ / Y (V)	INS. CL	Material aislante	Impregnante o barniz
220 / 380			
Intensidad estator Δ / Y (A)		Tejidos de fibra de vidrio barnizados.	
2,33 / 1,35		Papeles de mica y amianto. Compuestos a base poliamida	
Velocidad (rmp)			
2670			
Potencia (kW)	F		Barnices y resina a base de: poliéster, poliuretano, epóxicas.
0,55		Esmaltes y barnices a base de: poliéster modificado, polietileno, poliuretano, poliamida.	
Frecuencia (Hz)		Resinas epoxi.	
50			
Cos ϕ			
0,90		TEMPERATURA MÁXIMA	155 C°
CONEXIONES ELÉCTRICAS			
TRIÁNGULO	ESTRELLA	BORNAS	
			

Tabla 13. Ficha técnica motor industrial trifásico – multimontaje.

3.3.2. Motores Industriales

En este grupo se incluyen a los motores designados como Motor 1 y Motor 2 y al generador, de los cuales se realiza una breve descripción de sus características, por temas de confidencialidad con las empresas colaboradoras.

Dos motores designados como Motor 1 y Motor 2 pertenecen al sector ferroviario, cuya información básica es similar para los dos motores y se detalla en la siguiente tabla.

MOTOR INDUSTRIAL 1 - 2		
POTENCIA	CORRIENTE	VOLTAJE
140kW	221,90 A	424V

FRECUENCIA	VELOCIDAD	PARES DE POLOS
87,72 Hz	2600rpm	2

Tabla 14. Características técnicas motor 1 y 2.

Otra de las máquinas ensayadas corresponde a un generador del sector de la tracción eléctrica. La medición de la resistencia de aislamiento en esta máquina es parte del proceso de verificación que debe realizarse en cada equipo nuevo al momento de la recepción y antes de la puesta en marcha. Las características básicas e importantes para la selección del voltaje de prueba se detallan en la siguiente tabla.

GENERADOR

POTENCIA	CORRIENTE	VOLTAJE
3000kW	745 A	1300V

FRECUENCIA	VELOCIDAD	PARES DE POLOS
86,64 Hz	1740rpm	3

Tabla 15. Características técnicas Generador.

Finalmente, el motor asíncrono UNELEC F132MX/4, corresponde al laboratorio de Máquinas Eléctricas y Tecnología Eléctrica E.T.S.I.I., del cual conforme a lo expuesto en una tesis anterior [4], se conoce que: “...este motor ha permanecido en este departamento aproximadamente por un periodo de 30 años dentro de los cuales no se le ha proporcionado ningún tipo de mantenimiento. Este motor ha permanecido en funcionamiento por cortos lapsos de tiempo, con la mayor parte de su vida útil fuera de funcionamiento, su principal utilización ha sido en la formación y capacitación de nuevos profesionales...”

Resulta de interés realizar la medición de este motor para comparar los datos recientes con los ya medidos hace dos años, puesto que el análisis por tendencias es lo más idóneo para la evaluación del estado del aislamiento.



MOTOR ASÍNCRONO UNELEC F 132MX/4

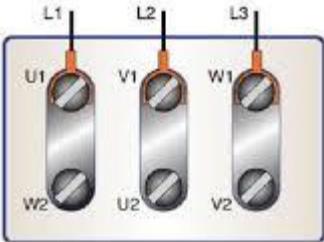
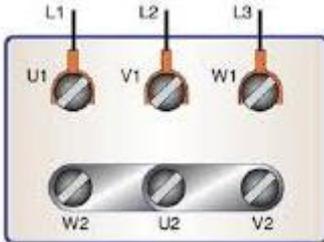
Voltaje Δ (V)	AISL.CL.	Material aislante	Impregnante o barniz
380			
Intensidad (A)			
15,2A			
Velocidad (rpm)			
1435	E	Fibras orgánicas sintéticas. Ej. Esmaltes de acetato de olivinilo.	Barnices de resinas alquídicas.
Potencia (kW)			
7,5			
Frecuencia (Hz)			
50	TEMPERATURA MÁXIMA °C		120
CONEXIONES ELÉCTRICAS			
TRIÁNGULO	ESTRELLA	BORNAS	
			

Tabla 16. Ficha técnica motor asíncrono UNELEC.

3.3.3. Motores Inoperativos

- Motores trifásicos SIEMENS

Se ensayan también 4 motores de la marca SIEMENS, los cuales se encuentran fuera de funcionamiento por sendas razones, no obstante, el objetivo del ensayo es notar el estado del aislamiento cuando las condiciones mecánicas y térmicas principalmente, son desfavorables para continuar con la operatividad del motor, y de esta manera convalidar los resultados con las recomendaciones que establece la norma.

MOTOR TRIFÁSICO BT CON ROTOR DE JAULA

SIEMENS



REFERENCIA

1LA7106-4AA10

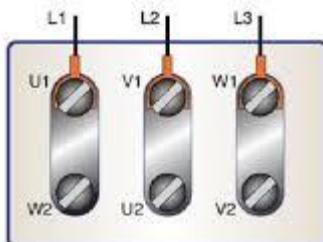
FECHA FABRICACIÓN

ENE – 10

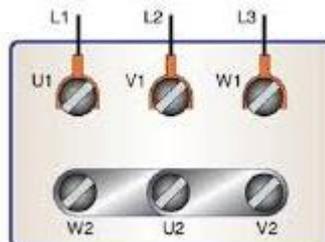
RÉGIMEN DE SERVICIO	CLASE DE EFICIENCIA	IP	PARES DE POLOS
S1	EFF2	55	4
Voltaje estator Δ / Y (V)	Th. CL.	Material aislante	Impregnante o barniz
230 / 400			
Intensidad estator Δ / Y (A)		Tejidos de fibra de vidrio barnizados. Papeles de mica y amianto. Compuestos a base poliamida	
8,5 / 4,9			
Velocidad (rpm)			
1420			
Potencia (kW)	F		Barnices y resina a base de: poliéster, poliuretano, epóxicas.
2,2		Esmaltes y barnices a base de: poliéster modificado, polietileno, poliuretano, poliamida. Resinas epoxi.	
Frecuencia (Hz)			
50			
Cos φ			
0,82			
		TEMPERATURA MÁXIMA	155 C°

CONEXIONES ELÉCTRICAS

TRIÁNGULO



ESTRELLA



BORNAS



Tabla 17. Ficha técnica motor trifásico BT con rotor de jaula.

3.4. Ensayos realizados

El ensayo común para evaluar la condición de los motores eléctricos es la prueba de resistencia de aislamiento. Los métodos más comunes de prueba IR son resumidos en el Estándar de IEEE 43-2013 e incluyen la prueba de los 60 segundos, la prueba dieléctrica de absorción y la de Índice de Polarización.

Se debe tomar en cuenta que, lo ideal para realizar la prueba de medida de resistencia de aislamiento a tierra es contar con el puente desconectado en la caja de bornes (sea una conexión en Δ o Y). Por lo general esta situación no es asequible, ya que el puente puede estar conectado internamente o simplemente no se puede acceder a la caja de bornes. En estos casos, cuando se tiene conectado el puente, es posible realizar la prueba, pero la medición del aislamiento será global; en el caso de existir valores bajos de resistencia, se desconocerá cuál es la fase que presenta el fallo, por lo tanto, si se desea conocer la fase con aislamiento defectuoso se deberá desconectar el puente y realizar la medición de fase a fase.

El equipo de medición Megger registra valores de resistencia de aislamiento, durante la prueba de índice de polarización, en un lapso de 15 segundos a 10 minutos, entonces, al realizar esta prueba se abarca la medición de la resistencia de aislamiento a 1 minuto, así como, la prueba de absorción dieléctrica, entendida como la relación entre la $IR_{60 \text{ seg}}$ / $IR_{30 \text{ seg}}$.

Por lo tanto, a continuación, se describe el procedimiento a seguir para la realización de la prueba de Índice de Polarización.

3.4.1. Procedimiento para la prueba de índice de polarización

- *Selección del voltaje de prueba.* Todos los motores que se han ensayado en este trabajo son de baja tensión, es decir el voltaje nominal del bobinado es <1000V, y de acuerdo a la tabla 4, el voltaje de prueba correspondiente es de 500V en corriente continua.
- *Revisión de conexiones.* Todos los motores se encuentran en conexión estrella, por lo tanto, se realiza una medición global de la resistencia de aislamiento, sin que esto repercuta en la interpretación de los resultados.

- *Conexiones para la prueba de PI.* Por lo general, el cable rojo (positivo) va conectado a la masa del equipo, el cable negro (negativo) a una de las fases de entrada, por ejemplo, V1, y un cable exterior para conexión a tierra, (consultar figura 17). Al tratarse de ensayos OFF LINE, se entiende que los motores se encuentran sin tensión, tal es el caso de los motores ensayados que se encuentran almacenados, así como para los motores que fueron dados de baja. Para el caso de los motores de servicio intermitente e industriales se tomó en cuenta esta consideración (SIN TENSIÓN).

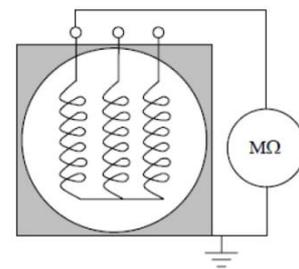


Figura 17. Conexiones para prueba de PI, de un motor eléctrico.

- *Selección de parámetros.* La opción de prueba PI se selecciona con el dial izquierdo del equipo Megger (ver figura 11), los temporizadores, t_1 y t_2 requeridos para la prueba, ya se encuentran predeterminados en el equipo y corresponden a valores de 1min y 10 min respectivamente. El voltaje de prueba se selecciona con el dial derecho, el cual corresponde a 500V.
- *Medición en tiempo real.* Una vez configurado el software Power DB para la medición en tiempo real, al presionar el botón TEST se inicia la prueba. Una vez finalizada la prueba, se guarda los datos a través de la opción *Save selected to form* del software Power DB.
- *Corrección de la temperatura.* Previa interpretación de resultados se debe realizar la corrección de temperatura, en el caso del valor de resistencia a 1minuto $\rightarrow IR_{1min}$. Para los valores de PI se toma en cuenta que la prueba se realiza a una temperatura inferior a los 40°C, por tal razón, la medición del PI se puede considerar independiente de la temperatura e inclusive los motores operativos no presentan variaciones de temperatura significativas durante el ensayo.



Figura 18. Medición de PI en un motor eléctrico.

Recomendaciones antes y durante el ensayo

- El ensayo debe efectuarse en una instalación SIN TENSIÓN y desconectada para asegurarse que la tensión de ensayo no se aplicará a otros equipos que podrían estar conectados eléctricamente al circuito que se va a examinar.
- Antes y después de realizar cualquier prueba, el aislamiento del devanado debe ser descargado. La corriente de descarga debe ser casi cero y no debe existir un voltaje de retorno discernible (aproximadamente menor a 20V). En general, el devanado no se debe dejar sin conexión a tierra. Se recomienda un tiempo de descarga mínimo, igual a cuatro veces la duración del tiempo de aplicación del voltaje [12].
- La totalidad del voltaje de prueba debe aplicarse lo más rápido posible y mantenerse constante durante toda la prueba.
- Convenciones de unidades: en los valores de subíndices de una prueba de PI de 1 a 10 se sobreentiende que son minutos, para los valores de subíndices de 15 y mayores en cambio se suponen en segundos, por ejemplo:

$$P.I.(60/15) \text{ se refiere a } IR_{60seg} / IR_{15seg}$$

3.5. Monitorización del estado de aislamiento de motores eléctricos.

De los distintos componentes que constituyen una máquina eléctrica rotativa, los estudios realizados por organizaciones especializadas, evidencian que la causa más frecuente de fallo en un motor de inducción se debe a problemas en el aislamiento del estator (Figura 19). De forma similar, en la referencia [2] se establece que, de los

distintos componentes que constituyen una máquina, el sistema aislante es el que presenta mayor susceptibilidad al envejecimiento.

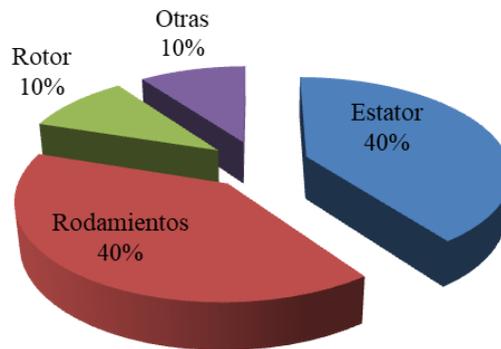


Figura 19. Fallas en máquinas de inducción – IEEE [3]

Por estos motivos, a continuación, se presenta una tabla sintetizada, de las variables a medir y ensayos que se recomienda realizar para el monitorizado OFF LINE u ON LINE del sistema aislante:

VARIABLES	ENSAYOS
Humedad y Contaminación → Estado del aislamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Ensayos con CC: <ul style="list-style-type: none"> - Medición del PI. - Medición de IR. - Medición del DAR.
Rigidez dieléctrica.	<ul style="list-style-type: none"> • Ensayos de sobretensión (High potencial o Hi – Pot) con CC o CA.
Cortocircuitos entre espiras → Integridad del aislamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Ensayos de ondas de choque.
Pérdidas dieléctricas.	<ul style="list-style-type: none"> • Ensayos de tangente de delta (Tanδ o Factor de potencia) con C.A.
Carga aparente (de una descarga parcial)	<ul style="list-style-type: none"> • Ensayos de descargas parciales.
Cortocircuitos entre espiras → Estado del aislamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Ensayos de flujo axial de dispersión.

Cortocircuitos entre espiras
→ Estado del aislamiento



- Ensayos de par electromagnético.

Figura 20. Variables a medir y ensayos recomendados para la monitorización del estado del sistema aislante.

En un principio, serán muchas las variables que se deban tomar en consideración a la hora de establecer la monitorización de una máquina, pero es necesario tomar en cuenta si:

- El tipo de inspección implica un monitorizado sin interrupción de la operación de la máquina o un monitorizado con parada del equipo; es decir fuera de las condiciones normales de funcionamiento.
- Los tipos de ensayo serán destructivos o no destructivos.

Aunque estos parámetros especifican más las variables a monitorizar y los ensayos a realizar, se debe tomar en cuenta que, la consecución de un buen monitorizado implica la utilización de varias técnicas, puesto que no existe aún una sola técnica que diagnostique todos los fallos del equipo a partir de los síntomas que presente.

En este sentido, se han seleccionado los ensayos con CC por ser los más aplicados a nivel industrial para la valoración del estado del aislamiento, a través de la indicación de presencia o ausencia de humedad y contaminación en los devanados, que, si bien presentan sus limitaciones como toda técnica, no son ensayos destructivos. Integrados con otras técnicas, como análisis de corrientes o análisis de vibraciones, permiten conocer la condición de la maquinaria, realizar un seguimiento de su estado a lo largo del tiempo y de esta forma planificar y programar posibles reparaciones de la máquina. Otros ensayos, como los ensayos con ondas de choque o ensayos de sobretensión, no se han aplicado en este trabajo por ser empleados en el ámbito de motores de gran potencia. Además, se trata de ensayos de naturaleza destructiva que pueden acarrear la puesta fuera de funcionamiento del motor por perforación del sistema aislante.

Finalmente, en la tabla 18, se presenta un modelo de orden de trabajo predictivo para la realización de ensayos con CC, de tal forma que los datos obtenidos se registren adecuadamente y de esta forma disponer de un historial de medidas de resistencia de aislamiento para establecer tendencias de la condición del aislamiento en función del tiempo, puesto que es más certero comparar los valores actuales con los anteriores que

son inherentes de esa máquina en específico. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la comparación de los resultados se debe hacer en condiciones similares, es decir, se debe mantener en lo posible, similares condiciones de: temperatura del bobinado, magnitud del voltaje, duración del voltaje, etc.

Logo de la empresa

ORDEN DE TRABAJO PREDICTIVA

N° Orden 001

	Programada	Inicio	Fin	Frecuencia
Fecha	2018-12-02			Semestral
Hora	16:00			

DATOS GENERALES

DATOS ELÉCTRICOS

Equipo	Motor trifásico - WEG	Conex. bobinas	Y
Serie	1005621335	Voltaje Y	380
Ubicación	Ventilación	Ins. Cl.	F

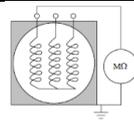


EPP REQUERIDOS

EQUIPO UTILIZADO

Casco	<input type="checkbox"/>	Guantes de cuero	<input type="checkbox"/>	Probador de aislamiento MEGGER MT1025
Gafas de seguridad	<input type="checkbox"/>	Protector facial	<input type="checkbox"/>	Multímetro digital con medidor de °T
Guantes aislantes	<input type="checkbox"/>	Botas de seguridad	<input type="checkbox"/>	Computador portátil

MEDICIÓN DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO

Parámetros	Resultado	Rango normal
Ausencia de tensión en bornes de la máquina.	<input type="checkbox"/>	< 20V
Conexiones para prueba y conexión a tierra.	<input type="checkbox"/>	
Voltaje de prueba.	V:	$V_{prueba} \rightarrow 500V$
Temperatura ambiente	$^{\circ}T_{amb}$:	$10^{\circ}C < T < 40^{\circ}C$
Temperatura de bobinados	T_{bob} :	
Resistencia de aislamiento	IR_{30seg} :	$M\Omega$
	IR_{1min} :	$M\Omega$
	IR_{10min} :	$M\Omega$
Índice de Polarización	PI:	PI: $>2 \rightarrow$ Satisfactorio
Relación de absorción dieléctrica	D.A.R:	D.A.R: 1 - 1,4 \rightarrow Aceptable

ACCIONES A TOMAR:

Tabla 18. Orden de trabajo predictiva para medición de IR.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS

4.1. Motores Nuevos

Este grupo de motores está formado por los descritos en el apartado 3.3.1, es decir, 5 motores trifásicos de la marca WEG, a los cuales se realizó la prueba de PI y a partir de estos resultados se obtienen los datos de resistencia de aislamiento global a tierra ($IR_{1min}@40^{\circ}C$), y el cálculo del DAR.

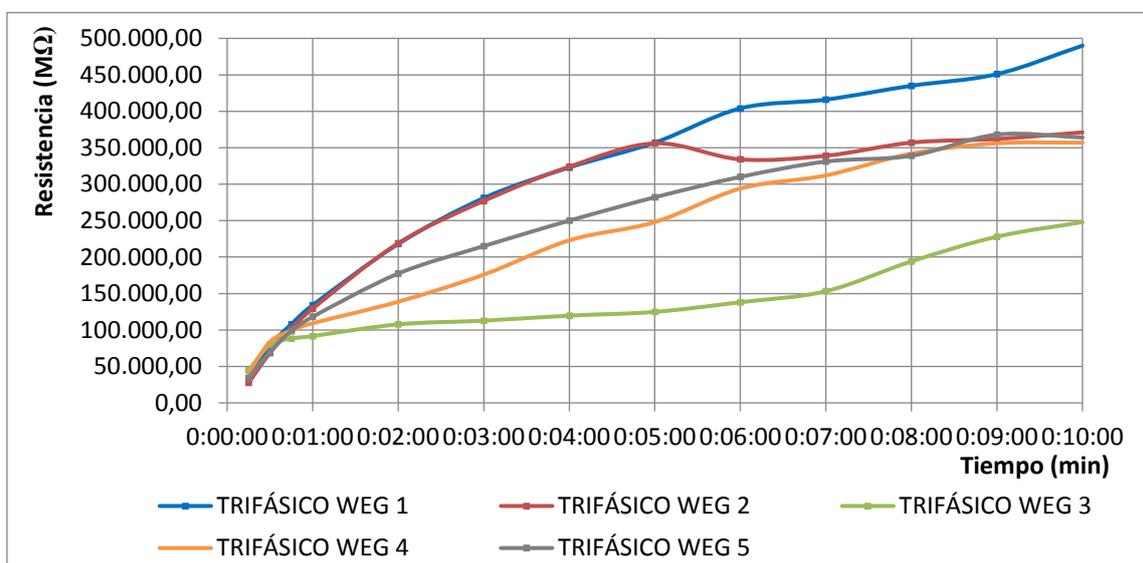


Figura 21. Curva del índice de polarización en motores nuevos.

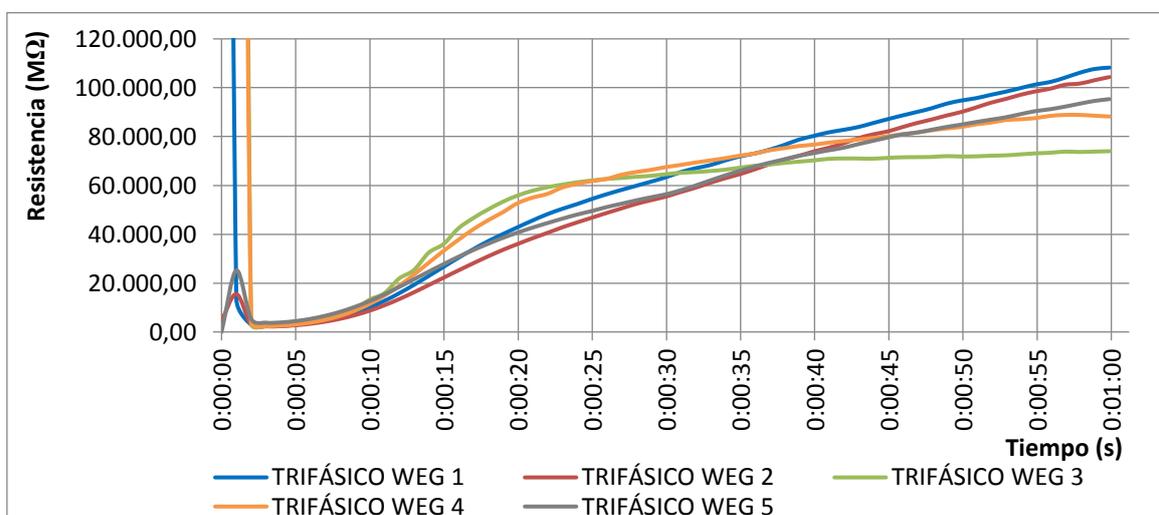


Figura 22. Curva de resistencia de aislamiento en motores nuevos, corregida a $40^{\circ}C$.

MÁQUINA	IR_{30seg} (M Ω)	IR_{1min}^1 (M Ω)	IR_{1min} (M Ω)	IR_{10min} (M Ω)	PI	DAR
Trifásico WEG 1	78.399,99	108.234,74	134.100,00	490.000,00	3,65	1,71
Trifásico WEG 2	68.600,00	104.360,57	129.300,00	370.999,90	2,87	1,88
Trifásico WEG 3	80.000,00	74.012,87	91.700,00	248.000,00	2,70	1,15
Trifásico WEG 4	83.600,00	88.218,17	109.300,00	357.000,00	3,27	1,31
Trifásico WEG 5	69.800,00	95.320,83	118.100,00	364.000,00	3,08	1,69
Nota¹	Resistencia de aislamiento corregida a 40°C, utilizando la fórmula [6].					

Tabla 19. Resultados medición de IR en motores nuevos.

En la figura 22, se observa un rápido incremento de la resistencia de aislamiento durante los primeros 15 segundos, por lo cual, al llegar a los 60 segundos, todos los motores superan el valor mínimo de $IR_{1min} = 100M\Omega$, según la norma ([ver tabla 6](#)). Este rápido incremento puede ser propio de aislamientos nuevos o alguna razón que esté relacionada con la clase de aislamiento que tenga el motor.

Por este fenómeno observado e inclusive tal como expresa la norma, cuando la $IR_{1min}@40^{\circ}C$ supera los $5000M\Omega$, el índice de polarización pueda ser ambiguo y por lo tanto puede descartarse. Lo recomendable en estos casos, es acortar los tiempos de la relación de PI, por ejemplo, IR_1/IR_{30} o IR_5/IR_1 , el primer ejemplo, prácticamente es la relación de absorción dieléctrica abreviada como DAR.

De acuerdo a los resultados, todos los motores ensayados cumplen con el valor de $IR_{mínima}$ y según sus valores de DAR se encuentran en un nivel Excelente para los motores 1, 2 y 5, en un nivel Aceptable para el motor 4 y en un nivel Cuestionable para el motor 3 ([ver tabla 11](#)). Por tanto, todos los motores a excepción del motor 3, denotan que las condiciones de almacenamiento no han influenciado negativamente para la acumulación de polvo o condensaciones de agua en el interior del motor. En el caso del motor 3, al cumplir con un valor de $IR_{mínima}$ y presentar un valor de DAR Cuestionable, que inclusive es la curva más baja de la medición de PI el motor podría ponerse en funcionamiento, pero, se debería prestar atención a la tendencia de las futuras mediciones, puesto que, si en los resultados posteriores se evidencia un decremento de la resistencia de aislamiento en el tiempo, con seguridad se podría sospechar de presencia de humedad/polvo en el aislamiento.

En cuanto a la curva de PI observada en la figura 21, esta puede resultar útil como establecimiento de perfiles de resistencia de aislamiento. Al medir el PI en motores nuevos se establece un primer referente para posteriores comparaciones del estado de aislamiento cuando el motor se encuentre operativo.

4.2.Motores Industriales

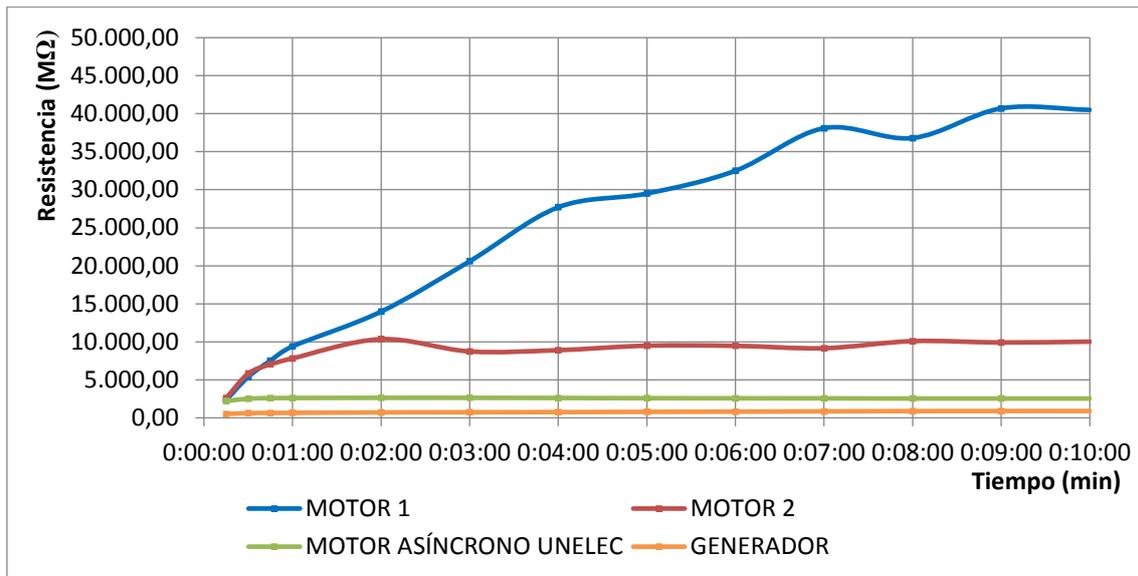


Figura 23. Curva del índice de polarización en motores industriales.

MÁQUINA	IR _{30seg} (MΩ)	IR _{1min} ¹ (MΩ)	IR _{1min} (MΩ)	IR _{10min} (MΩ)	PI	DAR
Motor 1	5.390,00	7.694,40	9.400,00	40.500,00	4,31	1,74
Motor 2	5.820,00	6.401,09	7.820,00	10.020,00	1,28	1,34
Generador	618,00	656,00	656,00	903,00	1,38	1,06
Motor Asín. UNILEC	2.520,00	860,98	2610,00	2.540,00	0,97	1,04
Nota¹	Motores 1 y 2, IR 1 min corregida a 40°C, utilizando la fórmula [6]. Generador, no es necesario corregir la IR1min puesto que la °T durante la medición fue de 40°C. Motor Asín. UNELEC, IR1min corregida a 40°C, utilizando la fórmula [5].					

Tabla 20. Resultados medición de IR en motores industriales.

En la figura 23, las curvas de PI de los motores 1 y 2 son similares hasta 1min, a partir del cual la curva del motor 1 supera notoriamente a la del motor 2, a pesar de que estos motores son de idénticas características, pueda ser que, los factores mecánicos y térmicos, especialmente, estén influenciando de diversa forma a cada uno de los

motores. No obstante, los dos presentan un valor de IR_{1min} superior a lo establecido en la norma de IR_{1min} mínima ([ver tabla 6](#)) y según sus valores de DAR se encuentran en un nivel Excelente para el motor 1 y Aceptable para el motor 2 ([ver tabla 11](#)).

De forma similar en la figura 23, se puede observar que el motor 1 presenta un incremento de la resistencia hasta los 10 min, muy por el contrario del motor 2 que tiende a estabilizarse a partir del minuto 3. Este comportamiento se puede reflejar en los valores obtenidos de PI, donde el perfil creciente de la curva del motor 1 representa un valor de PI más alto que el del motor 2, justamente por el comportamiento lineal de su curva de PI, pero esta evaluación se descarta para el análisis del estado del aislamiento ya que el valor de $IR_{1min}@40^{\circ}C$ es mayor a $5000M\Omega$, sin embargo el perfil de la curva de PI se podría utilizar para observar el comportamiento de la IR en el tiempo.

En cuanto al generador, se puede denotar que, si bien su IR_{1min} es superior a lo establecido en la norma ([ver tabla 6](#)), es necesario evaluar el valor de DAR y PI, puesto que, en este caso la $IR_{1min}@40^{\circ}C$ no supera los $5000M\Omega$. Para el caso del DAR, este valor indicaría un estado Cuestionable en cuanto a humedad/suciedad (por debajo de 1,25) ([ver tabla 11](#)). En el caso del PI, su valor denota un estado de aislamiento Cuestionable ([ver tabla 9](#)) y por tanto guardaría cierta relación con las demás variables analizadas.

En este sentido, el estado de aislamiento del generador no parece resultar adecuado, al tratarse de un equipo nuevo, por tanto, se denota que probablemente la máquina no estuvo almacenada en algún lugar seco con humedad relativa y temperatura ambiente idóneas, libre de polvo, gases, agentes corrosivos, etc., que garanticen un estado óptimo del aislamiento.

Para el caso del motor asíncrono UNELEC, la curva del PI se compara con la obtenida en ensayos anteriores [4] en la siguiente gráfica:

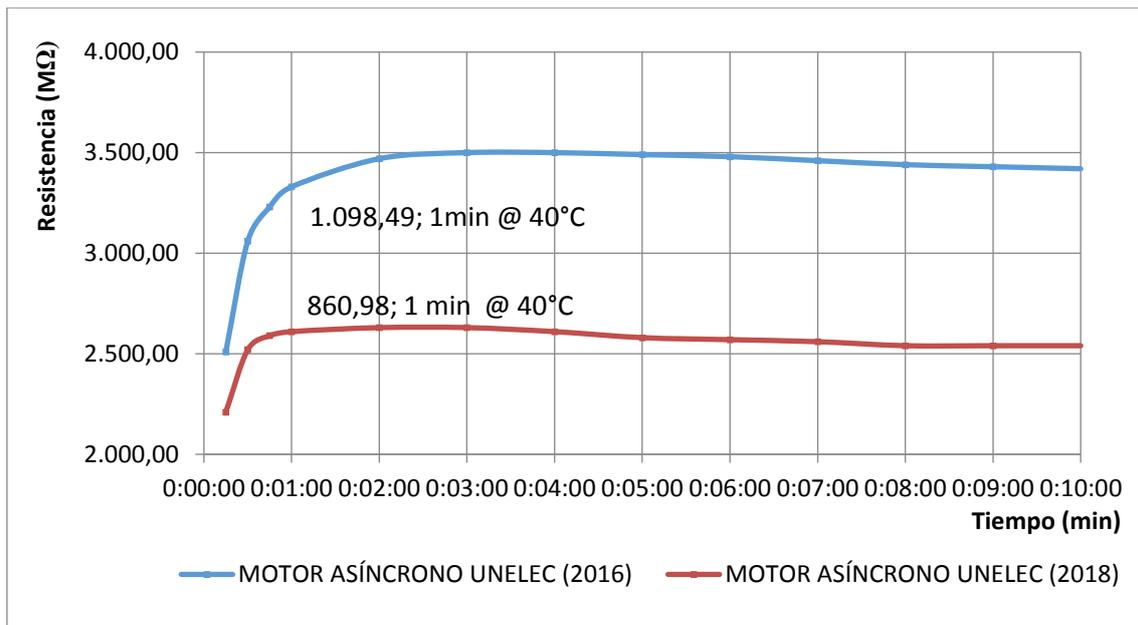


Figura 24. Curva del índice de polarización comparativa del motor asíncrono UNELEC.

A simple vista, es notorio que el perfil de resistencia de aislamiento, en la primera medición, tiene una mayor pendiente que la curva actual, inclusive esta última tiende a estabilizarse mucho más antes que en la primera medición. Adicional, el valor de IR_{1min} en dos años aproximadamente, ha decrecido un 20%.

A pesar que, los valores de IR_{1min} son superiores a los establecidos en la norma ([ver tabla 6](#)), donde IR_{1min} mínima es igual a $5M\Omega$, no es factible evaluar la condición del aislamiento con tan solo este valor absoluto, por ello se debe tomar en cuenta los valores de DAR y PI, ya que la $IR_{1min}@40^{\circ}C$ no supera los $5000M\Omega$. Los valores de DAR son: $DAR(2016) = 1,09$ y $DAR(2018) = 1,04$, los cuales, aunque tienen una ligera variación, serían un valor cuestionable en cuanto a suciedad/humedad ([ver tabla 11](#)). En cuanto al PI son: $PI(2016) = 1,03$ e $PI(2018) = 0,97$, que de forma similar presentan una ligera disminución pero representan un estado de Deficiente ([ver tabla 9](#)) y no cumplen con el valor de PI_{min} según lo establecido en la norma para una clase de aislamiento en particular ([ver tabla 5](#)).

En estas condiciones, y tomando en cuenta que en este motor no se realiza ninguna clase de mantenimiento, excepto por las mediciones que conllevan un efecto práctico como el realizado en este trabajo, se puede denotar que existe presencia de suciedad y humedad en los bobinados lo cual está afectando al desempeño del aislamiento paulatinamente.

Finalmente, es posible comparar cualitativamente las cuatro máquinas pertenecientes a este grupo mediante su curva de PI, en donde, de todos los perfiles de IR el motor 1 presenta un incremento de la resistencia en el tiempo, hasta llegar a 10min, el resto de curvas se estabilizan a un determinado tiempo. Como se mencionó anteriormente, una curva de PI puede resultar útil como establecimiento de perfiles de resistencia de aislamiento, para visualizar justamente si la resistencia sube, baja o tiende a estabilizarse al cabo de los 10 min que dura la prueba.

4.3.Motores Inoperativos

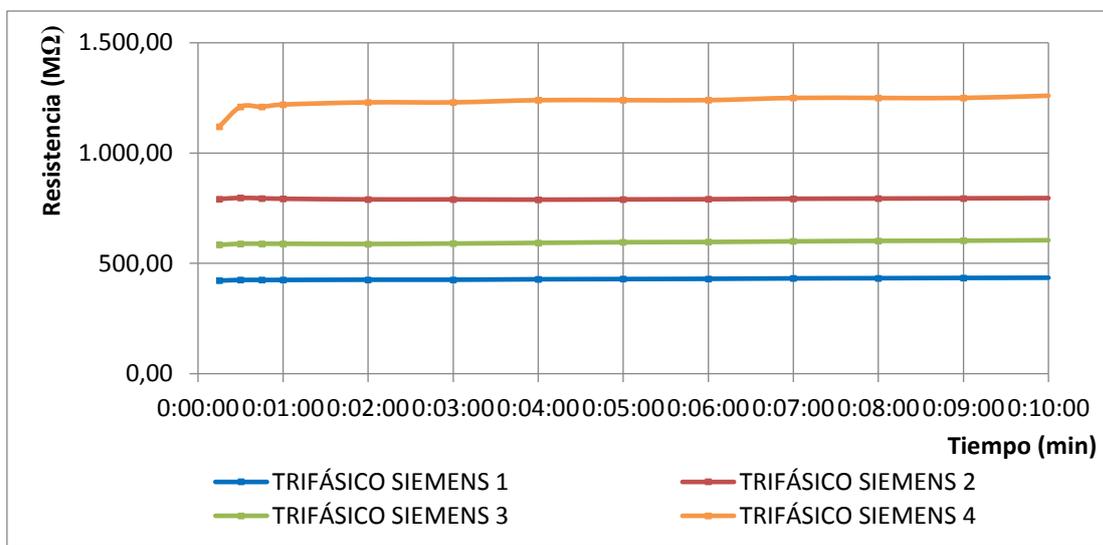


Figura 25. Curva del índice de polarización en motores inoperativos.

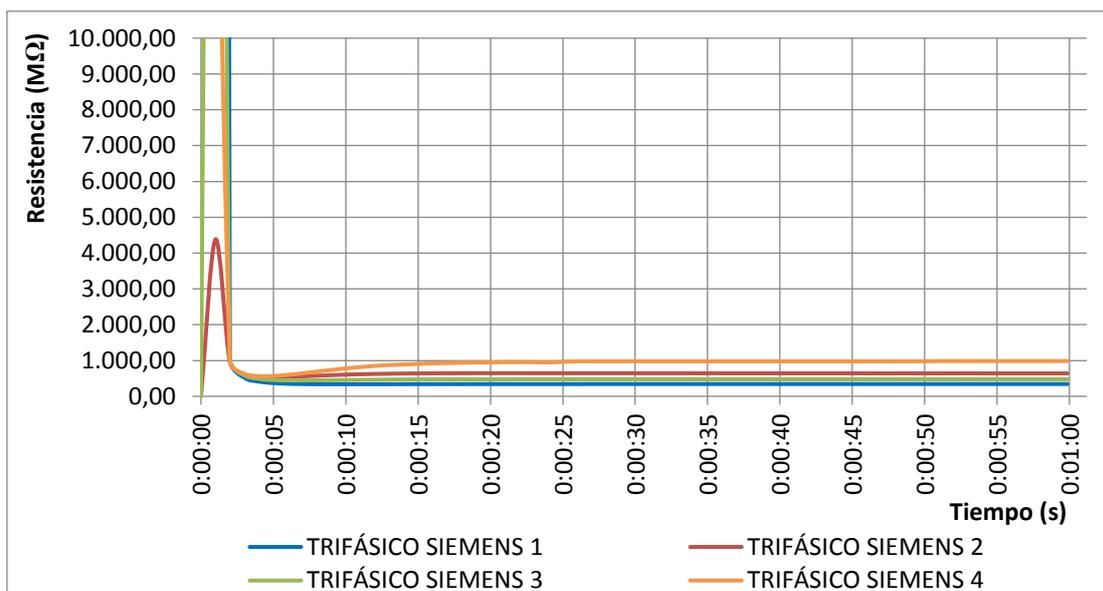


Figura 26. Curva de resistencia de aislamiento en motores inoperativos.

MÁQUINA	IR _{30seg} (MΩ)	IR _{1min} ¹ (MΩ)	IR _{1min} (MΩ)	IR _{10min} (MΩ)	PI	DAR
Trifásico SIEMENS 1	425,0	343,0	425,0	435,0	1,02	1,00
Trifásico SIEMENS 2	797,0	640,1	793,0	796,0	1,00	0,99
Trifásico SIEMENS 3	589,0	475,4	589,0	605,0	1,03	1,00
Trifásico SIEMENS 4	1.210,0	984,7	1.220,0	1.260,0	1,03	1,01
Nota¹	Resistencia de aislamiento corregida a 40°C, utilizando la fórmula [6].					

Tabla 21. Resultados medición de IR en motores inoperativos.

Conforme a los resultados obtenidos, en la figura 25, la curva de PI se estabiliza en un tiempo relativamente corto, por lo que, lógicamente los valores de PI y DAR serán bajos y por ende, todos los motores se encuentran en un estado de aislamiento Deficiente, (ver tabla 9 y 11, respectivamente) y tampoco cumplirían con el valor mínimo de PI ([ver tabla 5](#)), de acuerdo a la norma. Aunque su valor de IR_{1min} supere el valor de resistencia mínima ([ver tabla 6](#)), no se podría considerar un buen estado de aislamiento, ya que la IR_{1min} no es mayor a la lectura de IR_{30seg}, cuando lo óptimo es que la resistencia de aislamiento incremente su valor en el tiempo e incluso como se manifiesta inicialmente, la curva se estabiliza demasiado pronto, evidenciando de esta forma la presencia de suciedad y más probablemente de humedad, puesto que durante la realización de la prueba se detectó olor a humedad.

4.4. Comparación con resultados anteriores

En este apartado se analizan los resultados obtenidos en el Trabajo de Fin de Máster [4] referente a la medición del índice de polarización. Para realizar esta comparación, del grupo de motores ensayos en el año 2016 se han seleccionado 4 motores, que son: Indar 11381, Siemens 2124655, Siemens 2124590 y Siemens 2124610, mientras que de los motores ensayados actualmente se eligen a: Trifásico WEG 1, Motor 1 y Trifásico Siemens 2, de los cuales se tienen las siguientes gráficas y tabla de resultados:

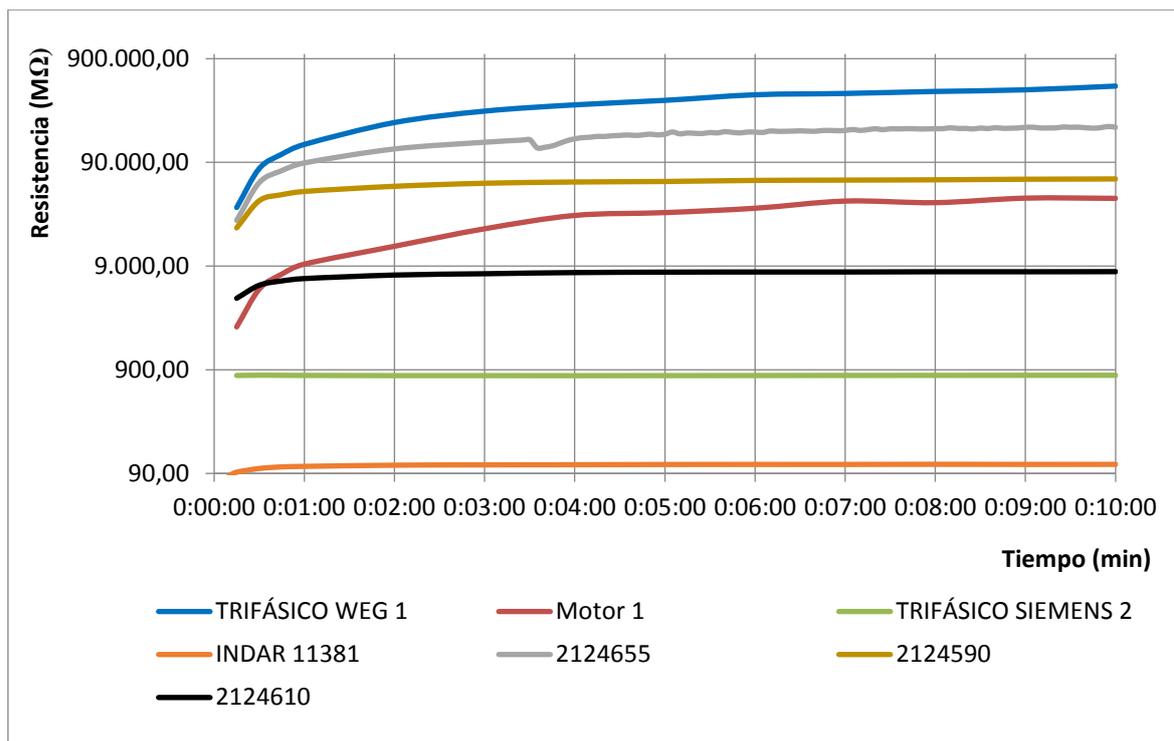


Figura 27. Curvas de índice de polarización comparativas entre motores.

MÁQUINA	IR _{30seg} (MΩ)	IR _{1min} ¹ (MΩ)	IR _{1min} (MΩ)	IR _{10min} (MΩ)	PI	DAR
INDAR 11381	100,4	42,7	105,2	110,0	1,05	1,05
SIEMENS 2124655	57.400,0	74.825,0	88.900,0	196.200,0	2,21	1,55
SIEMENS 2124590	38.400,0	39.727,0	47.200,0	62.300,0	1,32	1,23
SIEMENS 2124610	5.880,0	5.739,4	6.819,0	7.950,0	1,17	1,16
TRIFÁSICO WEG 1	78.399,99	108.234,74	134.100,00	490.000,00	3,65	1,71
MOTOR 1	5.390,00	7.694,40	9.400,00	40.500,00	4,31	1,74
SIEMENS 2	797,0	640,1	793,0	796,0	1,00	0,99

Nota¹ INDAR 11381 La resistencia de aislamiento debe ser corregida a 40°C, utilizando la fórmula [5].
SIEMENS La resistencia de aislamiento se corrige con la fórmula [6].

Tabla 22. Resultados comparativos de motores.

Las curvas de los motores INDAR 11381, SIEMENS 2124610, SIEMENS 2124590 y SIEMENS 2, tienden a estabilizarse en un corto tiempo, por lo que, en primera instancia se puede deducir que este efecto se debe a una rápida polarización de su aislamiento, no obstante, este supuesto no aplica al motor INDAR 11381 considerado como un motor con aislamiento termoplástico (supuesto referido por los 30 años de servicio que tiene el

motor). Bajo esta premisa, el motor INDAR 11381 no necesariamente estabiliza su curva por una “rápida polarización”, sino que la estabilización de la curva puede estar relacionada con un mal estado del aislamiento.

Por el contrario, para los tres motores SIEMENS, si es factible considerar que la estabilización de las curvas se deba a una rápida polarización, puesto que por sus años de fabricación mayor a 1970, el aislamiento pueda ser del tipo termoestable. Se debe observar que, esta rápida polarización conlleva a utilizar relaciones de PI más cortas por ejemplo IR_{1min}/IR_{30seg} , que prácticamente es la relación de absorción dieléctrica DAR, para que se pueda determinar con mayor precisión los cambios en la resistencia de aislamiento.

A mayor incremento de la IR entre 1min y 30seg se tendrá un mayor valor de DAR que significa un buen estado del aislamiento o en mal estado en el caso contrario. Este efecto se puede observar en las curvas comparativas (ver figura 27), donde la curva de PI del motor SIEMENS 2124590 presenta una mayor pendiente que los motores SIEMENS 2124610 y SIEMENS 2, inclusive esta última es prácticamente constante por ende el valor de DAR del motor SIEMENS 2 será menor que el valor de DAR del motor SIEMENS 2124590 (ver tabla 22).

En cuanto a las curvas de PI de los motores designados como: Motor 1, Trifásico WEG 1 y SIEMENS 2124655, se observa en cambio un incremento de la IR hasta el final de la prueba de PI en principio se asume que este incremento en el tiempo denota un buen estado del aislamiento, no obstante, según lo indica la norma IEEE 43-2013, cuando la $IR_{1min}@40^{\circ}C$ es mayor a $5000M\Omega$, el PI puede ser ambiguo y se puede descartar, específicamente en el caso de estos motores, los valores de PI denotan en general un estado aceptable de aislamiento (ver tabla 9), no obstante lo más recomendable es acortar el tiempo de relación de PI, por ende utilizar como indicativo de evaluación el DAR.

Finalmente, y de forma general se presenta un posible comportamiento de perfiles de curva de PI en las tres etapas de vida de una máquina, es decir durante el arranque, operación normal y desgaste.

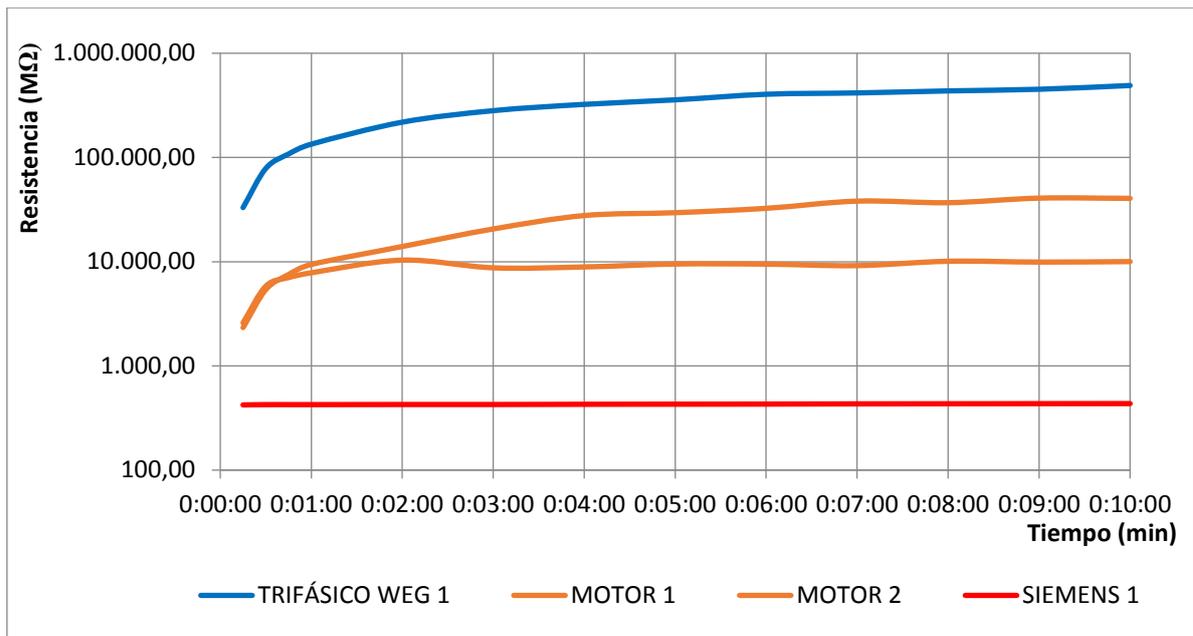


Tabla 23. Posibles curvas de PI durante el funcionamiento de una máquina.

La curva en azul podría corresponder a un perfil de curva antes de una puesta en marcha del equipo, es decir de un motor nuevo, caracterizada por incremento de IR hasta el final de la prueba de PI. Las curvas en color naranja podrían representar el comportamiento de la IR después de un tiempo de puesta en marcha del equipo, donde los valores de IR se incrementen hasta al final de la prueba, pero a valores más bajos que cuando era nuevo, en cambio casi al final de esta etapa pueda ser que los valores de IR tiendan a estabilizarse en el tiempo. Finalmente, la curva en rojo denotaría un estado de aislamiento en malas condiciones, aunque no necesariamente sea por presencia de humedad o polvo, sino que la máquina al estar en su estado de desgaste, no tiene las mismas prestaciones de eficiencia para mantener el estado de aislamiento en buenas condiciones mecánicas y térmicas principalmente.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES

- En el presente Trabajo Fin de Máster se han aplicado diversos ensayos off-line para la determinación del estado del aislamiento y presencia de suciedad/humedad en motores eléctricos reales, tanto de laboratorio como industriales, con el fin de analizar con detalle el procedimiento a seguir para la aplicación óptima de cada ensayo, así como evaluar los resultados obtenidos para cada tipo de motor ensayado.
- De manera general, el estado del aislamiento por grupos de motores ensayados se puede resumir como: un estado aceptable para motores nuevos y motores industriales, con dos de ellos en el nivel cuestionable y definitivamente un estado deficiente para motores inoperativos. Cabe recalcar que todos los motores cumplen con el $IR_{\text{mínimo}}$ establecido por la norma IEEE 43-2013.
- La medición de la resistencia de aislamiento para un tiempo definido de 1–10min abarca prácticamente a la prueba rápida de resistencia de aislamiento $IR_{1\text{min}}$; la prueba de índice de polarización $PI = IR_{10\text{min}} / IR_{1\text{min}}$ y la prueba de relación de absorción dieléctrica $DAR = IR_{1\text{min}} / IR_{30\text{seg}}$, cuyos valores son independientes entre sí, pero dependientes de los valores mínimos establecidos por las norma IEEE 43-2013, por ejemplo, el valor de PI depende del valor de $IR_{1\text{min}} @40^{\circ}\text{C}$ para ser valedero o no.
- De los resultados obtenidos, se puede inferir que el valor de DAR es el mejor indicativo del estado del aislamiento, si la IR incrementa notoriamente en el tiempo o se estabiliza rápidamente. En el primer caso, porque se observó que la $IR_{1\text{min}} @40^{\circ}\text{C}$ superó los $5000\text{M}\Omega$, y en el segundo caso, cuando se trata de clases de aislamientos que se polarizan rápidamente.
- El perfil de resistencia de aislamiento (curva de índice de polarización), permite comparar cualitativamente el comportamiento de la resistencia de aislamiento en el tiempo, donde un incremento de IR vs tiempo o una rápida estabilización de la curva, una vez superado los $5000\text{M}\Omega$, pueden significar un buen estado de aislamiento. Por este motivo, se pudo realizar comparaciones entre medidas anteriores de motores de diferentes características y los actuales.

- Una prueba rápida de IR_{1min} , por sí sola, no puede ser un indicativo fiable del estado de aislamiento, aunque se obtengan valores altos de IR. Se incide en llevar un análisis de tendencia de los resultados, para evidenciar variaciones de IR. Es decir, si entre la media anterior y la actual existe ligeras variaciones se denota que no existe problemas de aislamiento INDEPENDIENTEMENTE de si estos valores son altos o bajos.
- Actualmente en la norma vigente IEEE 43-2013 se establece valores mínimos tanto de PI como de IR_{1min} , pero no valores máximos aceptables. Tampoco existe mayores contribuciones para los diferentes tipos de perfiles de resistencia de aislamiento para diferentes tipos de defectos, por este motivo se ha realizado mediciones de PI a motores en diferentes estados de funcionamiento para dejar constancia del comportamiento de la IR en el tiempo.
- Las curvas de PI que tienden a estabilizarse rápidamente se han atribuido a aislamientos termoestables considerando el año de fabricación de los motores y la clase de aislamiento, no obstante, lo más recomendable es consultar al fabricante del motor una información más detallada del tipo y características del aislamiento, y así tener referencias y valoraciones más correctas del estado de aislamiento.
- La prueba de PI es de importancia significativa para la evaluación del estado de aislamiento. No obstante, se recalca que las mediciones realizadas en este trabajo fueron enfocadas a la medición de resistencia de aislamiento global a tierra. Si se detectara valores bajos de resistencia, se recomienda mediciones de IR entre fase y fase.
- Finalmente, se precisa en la integración de varias técnicas o ensayos para una monitorización más real del estado general de un motor, puesto que hasta la actualidad no existe una sola técnica que evalúe todos los fallos presentes en un equipo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Fraile, J. (2015). *Máquinas Eléctricas*. Madrid, España: Ibergarceta Publicaciones, S.L.
- [2] Cabanas, M., Melero, M., Orcajo, G., Rodríguez, J. y Sariego, J. (1998). *Técnicas para el mantenimiento y diagnóstico de máquinas eléctricas rotativas*. Barcelona, España: Marcombo.
- [3] Zhidong Jia; Xiang Peng; Zhicheng Guan; Liming Wang; Bo Yue, "Evaluation of the Degradation of Generator Stator Ground Wall Insulation Under Multistresses Aging," Energy Conversion, IEEE Transactions on, vol.23, no.2, pp.474-483, June 2008.
- [4] Carrión, R. (2016). *Comprobación del estado del aislamiento en máquinas eléctricas rotativas mediante la aplicación de ensayos offline*. Universidad Politécnica de Valencia, España.
- [5] Megger, (2006). *The Complete Guide to Electrical Insulation Testing*. [PDF file]. Recuperado de: <http://www.biddlemegger.com/biddle/Stitch-new.pdf>
- [6] Chauvin Arnoux, (2010). *Insulation resistance testing guide*. [PDF file]. Recuperado de: <http://www.chauvin-arnoux.com/sites/default/files/D00VEC36.PDF>
- [7] Weg, (2012). *Daños en los bobinados motores trifásicos*. [PDF file]. Recuperado de: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h64/h9b/WEG-danos-en-los-bobinados-motores-trifasicos-50036032-brochure-spanish-web.pdf>
- [8] Noah, P. (). *Análisis por zonas de fallas*. [PDF file]. Recuperado de: http://www.pdma.com/pdfs/Articles/Analisis_de_Zonas_de_Falla.pdf
- [9] León, W. (2012). *Mantenimiento Predictivo Eléctrico – Análisis Estático*. [PDF file]. Recuperado de: <https://edoc.site/queue/skf-motores-pruebas-8-pdf-free.html>
- [10] Motortico. (2013). *Clase de aislamiento – Materiales aislantes*. [PDF file]. Recuperado de: <http://www.motortico.com/biblioteca/MotorTico/2013%20AGO%20-%20Clase%20de%20Aislamiento%20-%20Materiales.pdf>
- [11] Serrano, L., Martínez, J. (2017). *Máquinas eléctricas*. Valencia, España: Universitat Politècnica de València.

[12] IEEE Std 43™-2013: IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery. Electric Machinery Committee of the IEEE Power and Energy Society; New York, 2013.

[13] Megger. () MIT515, MIT525, MIT1025 y MIT1525 Comprobadores de resistencia de aislamiento de 5 kV, 10 kV y 15 kV. [PDF file]. Recuperado de: https://portalvhds963slh4m3fqg2.blob.core.windows.net/megger-products/MIT515--MIT525--MIT1025--MIT1525_UG_es_V03.pdf

ANEXO 1: FALLOS EN EL SISTEMA AISLANTE

La finalidad en la realización de ensayos off line es monitorizar el estado del aislamiento mediante la presencia o ausencia de humedad/contaminación y de esta manera evitar cortos entre espiras que puedan desencadenar en fallos catastróficos, tales como los ilustrados en las siguientes imágenes.





Figura 28. Fallos en los bobinados de motores trifásicos [7].

PROBLEMA	POSIBLES CAUSAS
Corto entre espiras o Bobina en corto-circuito	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Contaminación interna del motor. ▪ Fallo del esmalte de aislamiento del hilo. ▪ Fallo del barniz de impregnación. ▪ Rápidas oscilaciones en la tensión de alimentación.
Corto entre fases	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Contaminación interna del motor. ▪ Degradación del material aislante por resecado, ocasionado por exceso de temperatura.
Corto en la conexión	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Contaminación interna del motor. ▪ Fallo del material aislante. ▪ Sobrecalentamiento de la conexión debido a un mal contacto.

Tabla 24. Características del problema y posibles causas de fallos en bobinados [7].