

UNIVERSIDAD CENTRAL “MARTA ABREU” DE LAS VILLAS
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
DEPARTAMENTO DE ELECTROENERGÉTICA

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Diagnóstico del Aislamiento Eléctrico de las Máquinas Eléctricas Rotatorias de Gran Potencia de la Unidad-4 de la Empresa Termoeléctrica Cienfuegos.

Autor: Aleksandr Naranjo Chepius

Tutor: Ms.C. Yeranis Zurita García

Tutor: Dr.C. Angel Valcárcel Rojas

Villa Clara 2009

“Año del 50 Aniversario de la Revolución”

Agradecimientos

La gratitud, debe ser una de las principales cualidades de una persona, con ella se le debe corresponder a aquellos que te han brindado su amistad, a los que te han educado por ser padres o profesores y a quien, sin ningún interés, te brinda su apoyo y colaboración.

Quiero darles mis agradecimientos a:

- Mis padres que siempre me han apoyado en los diversos aspectos de la vida.
- Al claustro de profesores tan preparados de los cuales he tenido la dicha de ser pupilo a lo largo de estos cinco años.
- A mis compañeros de cuarto y de estudio, Maikel, Yuniel y Enrique por todas las vivencias compartidas.
- A Diana, por la preocupación e interés mostrado en la realización del presente trabajo.
- A Frank y Fausto, por las horas compartidas en el deporte y en la vida universitaria.
- A Eldis y Jarol, que me dieron el impulso inicial.
- A Raúl por asistirme con sus conocimientos sobre termoeléctricas.
- A mi tutor Dr.C. Angel Valcárcel Rojas, con quién compartí estos años de estudio y por quién siento un profundo respeto.
- Y en especial quiero agradecer a mi tutor el Ms.C. Yeranis Zurita García, una persona que hasta hace poco me era ajena, por su tiempo y dedicación vertidos en la realización de este trabajo de diploma le estaré siempre agradecido.

Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo a mi familia y en especial a mis padres, que lo reciban como el fruto de sus esfuerzos y sacrificios en la educación de su hijo.

Constancia y Certificación

Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas con la colaboración de la Empresa Termoeléctrica de Cienfuegos como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería Eléctrica autorizando que el mismo sea utilizado por ambas instituciones, para los fines que estimen conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos ni publicado sin la autorización de la Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas y la Empresa Termoeléctrica de Cienfuegos.

Nombre y Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Nombre y Firma del Autor

Nombre y Firma Jefe de Departamento

Tarea Técnica

Tarea Técnica

1. Realizar un estudio y búsqueda bibliográfica de los eventos que influyen en el envejecimiento acelerado y deterioro del aislamiento eléctrico de las Máquina Eléctricas Rotatorias de Gran Potencia.
2. Realizar un estudio de las Máquinas Eléctricas Rotatorias de Gran Potencia (MERGP) en la ETE Cienfuegos.
3. Aplicar la metodología del Diagnóstico Integral para el análisis de las causas que provocan fallos en las MERGP de la ETE Cienfuegos.
4. Desarrollar la Matriz de Falla para las MERGP de la ETE Cienfuegos.
5. Obtener las variables mínima necesarias a monitorear para evitar la ocurrencia de fallos en las MERGP de la ETE Cienfuegos.
6. Realizar un estudio de los criterios de Diagnóstico del Aislamiento Eléctrico de las MERGP.
7. Ejecutar ensayos al aislamiento eléctrico de las MERGP de la ETE Cienfuegos
8. Aplicar el Sistema de Diagnóstico vigente en la ETE Cienfuegos y comparar los resultados con los ensayos aplicados de forma general en otras industrias de Cuba.
9. Aplicar el Software “DAEMO” y comparar el diagnóstico brindado por este con el obtenido a partir del cálculo de los parámetros de diagnóstico.

Resumen

Resumen

En el presente trabajo se aplica un sistema de Diagnóstico Integral al aislamiento principal del Generador Hitachi de 158 MW de CMC-4 en la ETE Cienfuegos, así como un sistema de ensayos con CD, para optimizar las tareas y el tiempo empleado en el diagnóstico de los devanados del estator de MERGP, además se aplica con resultados satisfactorios un software capaz de interpretar los resultados obtenidos de cada ensayo, establecer el diagnóstico del aislamiento eléctrico ensayado y expresar recomendaciones que constituyen una herramienta muy útil para la toma de decisiones, todo lo cual se sustenta sobre conocimientos basados en criterios y recomendaciones de normas nacionales e internacionales vigentes, entre ellos algunos nunca antes empleados en Cuba, y que han sido propuestos tanto por investigadores de prestigio internacional como por normas internas de la Industria Eléctrica.

Como preámbulo de estos resultados se describe el uso y la importancia de las MERGP en la ETE Cienfuegos, a la vez que se analizan las principales causas de fallos de estas a nivel mundial llegando a la conclusión que los fallos en cojinetes y en el aislamiento principal representan más del 70% de los fallos totales.

Con toda la información obtenida y siguiendo los pasos que plantea la metodología del Diagnóstico Integral creada y desarrollada por el Dr.C. Sergio Fernández García, se construye la Matriz de Falla para estos equipos, obteniendo los parámetros óptimos aplicando el Diagrama de Lorenz. Posteriormente se enfoca el análisis en los sistemas aislantes de las MERGP como uno de los elementos principales que genera los fallos más graves y de más costosa reparación.

Índice

Índice

Tarea Técnica.....	V
Resumen	VII
Índicei	
Introducción	2
1 Máquinas Eléctricas Rotatorias de Gran Potencia (MERGP) en la Industria	5
1.1 Evolución de las Máquinas Eléctricas Rotatorias.....	5
1.2 Termoeléctricas en Cuba.....	6
1.3 Principales Elementos, Circuitos y Equipos de una Termoeléctrica	6
1.3.1 Circuito de Aire y Gases.....	7
1.3.2 Circuito de agua vapor	8
1.3.3 Generador Eléctrico	10
1.4 Principales causas de fallos en las MERGP	11
1.5 Principales ensayos de diagnóstico del aislamiento eléctrico y su evolución	13
1.5.1 Pruebas fuera de servicio (off-line).....	14
1.5.1.1 Inspección Sensorial	14
1.5.1.2 Resistencia de Aislamiento	15
1.5.1.3 Prueba de Tangente Delta “TIP-UP”	16
1.5.1.4 Capacitancia.....	17
1.5.1.5 Descargas Parciales	18
1.5.1.6 Prueba de Electromagnetic Core Imperfection Detector (ELCID)	20
1.5.1.7 Ensayo de Alta Tensión	20
1.5.2 Pruebas en servicio (on-line).....	21
1.5.2.1 Descargas Parciales	21
1.6 Criterios de Diagnóstico ejecutando ensayos no destructivos y destructivos	25
2 Diagnóstico Integral aplicado a las MERGP de la ETE Cienfuegos	27
2.1 Empresa Termoeléctrica Cienfuegos breve reseña	27
2.2 Pasos para aplicar la metodología del Diagnóstico Integral.	27
2.3 Principales fallos de los MERGP en la ETE Cienfuegos.....	28
2.4 Construcción del Diagrama de Ishikawa.....	30
2.4.1 Diagrama de Ishikawa para MERGP.....	31
2.5 Conformación de la Matriz de Falla de las MERGP	34
2.6 Parámetros Óptimos	36
3 Sistemas Aislantes, Ensayos y Automatización del Diagnóstico.....	40
3.1 Sistemas Aislante de las Máquinas de Eléctricas de Gran Potencia	40
3.2 Factores que Afectan las mediciones.	41
3.2.1 Condición de la Superficie.....	41
3.2.2 Efecto de la Humedad	42
3.2.3 Efecto de la Temperatura	42

3.2.4	Efecto de la Magnitud de la Tensión de Ensayo	44
3.2.5	Efecto de la Duración de la Aplicación de la Tensión.....	45
3.2.6	Efecto de la Existencia de Carga en los Devanados.....	45
3.3	Criterios de Diagnóstico.....	45
3.3.1	Corriente de Absorción, Reabsorción y Conducción	46
3.3.2	Coeficiente de absorción	48
3.3.3	Índice de Polarización	48
3.3.4	Resistencia de Aislamiento	50
3.3.5	Valor Mínimo de la Resistencia de Aislamiento.....	50
3.3.6	Permitividad Estática	53
3.3.7	Resistividad Volumétrica	53
3.3.8	Constante de tiempo CT	55
3.3.9	Escalones de Tensión	56
3.3.10	Índice de absorción	57
3.3.11	Razón de Absorción Dieléctrica	57
3.3.12	Descarga Dieléctrica	58
3.4	Interpretación de los Resultados de los Ensayos.	60
3.5	“DAEMO” Herramienta para automatizar el Diagnóstico.	66
4	Conclusiones.....	70
5	Recomendaciones.....	72
6	Referencias	74
7	Bibliografía	78
8	Anexos	81

Introducción

Introducción

En la industria a nivel mundial es muy importante contar con un sistema de diagnóstico que permita la evaluación y seguimiento del comportamiento de los equipos en las diferentes condiciones de operación, de esta manera se planifican sus mantenimientos en el momento más conveniente, incurriendo en los mínimos gastos.

Las Máquinas Eléctricas Rotatorias de Gran Potencia (MERGP) como parte importante de los sistemas que conforman las líneas de producción ó de servicios de las grandes industrias se le presta especial atención, no sólo por su alto valor en el mercado ya que los mismos se fabrican a pedido, sino a las gigantescas pérdidas económicas que se generan ante la puesta fuera de servicio de uno de estos motores por una avería en el mismo. Entre las averías más catastróficas se encuentran las fallas del aislamiento eléctrico principal, cuya reparación es sin dudas muy compleja, costosa y partiendo del hecho que normalmente en una falla de este tipo pueden ocurrir serios daños en el circuito magnético, específicamente en la zona de las ranuras del estator se incrementa aún más el valor de la reparación. Por todo lo anteriormente mencionado no se escatiman recursos en tratar de evitar estos desastres tecnológicos y es por esto que se desarrollan nuevas técnicas de diagnóstico y nuevos equipamientos para la ejecución de ensayos on-line y off-line que permitan conocer la condición del aislamiento eléctrico principal de estos motores.

En la industria de nuestro país desafortunadamente no se cuenta con un sistema de diagnóstico adecuado, que permita dar seguimiento a los fenómenos asociados al envejecimiento y la detección de fallos en desarrollo del aislamiento de los devanados del estator de las MERGP.

Partiendo del conocimiento de la problemática antes mencionada este trabajo parte del estudio de las MERGP en la Empresa Termoeléctrica Cienfuegos, enmarcándose en los problemas que provocan deterioros acelerados del

aislamiento y los ensayos para la detección de fallos en los devanados del estator específicamente los asociados al envejecimiento acelerado y deterioro del aislamiento principal, en específico se realiza un estudio exhaustivo de los ensayos de CD, especialmente los relacionados con el empleo del megóhmetro, los cuales internacionalmente han evolucionado hacia técnicas y métodos de ensayos más abarcadores que, en el mejor de los casos, son poco explotados en las instalaciones de la UNE, correspondiendo su alcance y estructura a los objetivos establecidos para los trabajos de diploma para la obtención del título de Ingeniero Electricista.

Este trabajo se plantea los siguientes objetivos:

Objetivo General

- Aplicar un Sistema Diagnóstico Integral y los ensayos correspondientes para el Aislamiento del Estator de las MERGP.

Objetivos Específicos

- Estudiar y clasificar las MERGP en la ETE Cienfuegos.
- Analizar los fallos ocurridos en las MERGP en la ETE Cienfuegos.
- Obtener y desarrollar la Matriz de Falla de las MERGP.
- A partir de la Matriz de Falla llegar a obtener los Parámetros Óptimos.
- Ejecutar los ensayos necesarios.

Estas tareas tienen como fin comprobar la Hipótesis de Trabajo: Si se aplican las técnicas del Diagnóstico Integral entonces, es posible dar seguimiento al comportamiento del aislamiento principal de las MERGP y detectar los fallos incipientes del aislamiento del estator de estos, contribuyendo a mejorar la disponibilidad operacional de los mismos.

CAPÍTULO I

MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATORIAS DE GRAN POTENCIA (MERGP) EN LA INDUSTRIA

1 Máquinas Eléctricas Rotatorias de Gran Potencia (MERGP) en la Industria

1.1 EVOLUCIÓN DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATORIAS

La energía eléctrica desde su descubrimiento ha sido la fuente de desarrollo de la industria y la sociedad a través del tiempo. En la actualidad la energía eléctrica es necesaria no solo para el sector industrial sino que la actividad diaria de la vida moderna es prácticamente imposible sin el uso de la misma, ya que no se puede concebir una sociedad sin el alumbrado, las comunicaciones y el abasto de agua por solo mencionar algunas cuestiones básicas.

Por todo lo anteriormente expuesto a nivel mundial se continúa en la búsqueda de nuevas fuentes de energía y la optimización de las existentes para lograr la mayor eficiencia de las mismas, actualmente existen distintos métodos para la generación de electricidad, que se diferencian y clasifican por el combustible empleado o por la estructura y distribución de los elementos que componen el ciclo, pero todos y cada uno de estos tienen la presencia obligatoria de una máquina eléctrica rotatoria, funcionando en régimen generador, mediante la cual se realiza la generación de la energía eléctrica [1].

Las máquinas eléctricas rotatorias no escaparon a los incansables esfuerzos por lograr la mayor eficiencia, en su evolución estas máquinas transitaron por varios períodos donde fue transformada su estructura y en mayor medida los materiales que las componen logrando obtener máquinas con una elevada potencia por unidad de volumen que si bien logran obtener fabulosas eficiencias, incrementan también la posibilidad de la ocurrencia de averías.

Tradicionalmente las máquinas eléctricas se habían considerado como elementos con muy bajo índice de averías, especialmente si se trataba de motores de inducción de jaula de ardilla, que requerían muy poca atención. Sin embargo, la

tendencia actual de diseñar máquinas de bajo costo hace que los materiales utilizados trabajen más cerca de sus límites de resistencia térmica, mecánica y electromagnética. Por este motivo, y en especial cuando la máquina eléctrica rotatoria trabaja en ambientes hostiles, la posibilidad de deterioro acelerado se ha incrementado [1].

En Cuba existen grandes industrias que participan en el desarrollo económico del país de forma directa, pero entre las más complejas e importantes se encuentran las termoeléctricas.

1.2 TERMOELÉCTRICAS EN CUBA

El Sistema Eléctrico Nacional cubano se encuentra diseminado por casi toda extensión territorial de la isla, beneficiando a más del 90 % de los habitantes, la otra parte de la población que se encuentra ubicada en pequeños asentamientos poblacionales, reciben la energía eléctrica a través de minihidroeléctricas, paneles solares y grupos electrógenos. Sin embargo, las grandes termoeléctricas son las encargadas de suministrar la energía eléctrica necesaria para el sector industrial y gran parte del sector residencial.

Existen Termoeléctricas en varias provincias del país, el resumen de ellas se puede apreciar en el Anexo 1, Tabla 8.7.

Las termoeléctricas además de ser grandes industrias su funcionamiento se rige por un conjunto de procesos muy complejos que tienen la finalidad de suministrar energía eléctrica.

1.3 PRINCIPALES ELEMENTOS, CIRCUITOS Y EQUIPOS DE UNA TERMOELÉCTRICA

Esencialmente una termoeléctrica está formada por tres elementos fundamentales tal y como se muestra en el Anexo 3, Figura 8.4.

La caldera normalmente de paredes de tubos de agua y de domo simple constituye el generador de vapor, el calor que se genera en la combustión del fuel oil transforma el agua que pasa por dentro de los tubos de la paredes de la

caldera en vapor y posteriormente mediante otros intercambiadores de calor se sobrecalienta para eliminar toda la humedad del mismo, este vapor con una elevada temperatura (540 °C) y presión (128 kgf/cm²) pasa a la turbina que es una máquina rotatoria, a través de la cual pasa un fluido en forma continua y este le entrega su energía a través de un rodete con paletas o álabes. La turbina constan de varias ruedas con paletas, denominadas rotor y estator, siendo la primera la que, impulsada por el fluido, arrastra el eje en el que se obtiene el movimiento de rotación.

Acoplado directamente al eje de la turbina se encuentra el generador eléctrico que gira a 3600 rpm y que es el encargado de generar la electricidad.

Partiendo del la ley física que sentencia "... la energía no se crea ni se destruye, solamente se transforma..." se puede realizar un análisis para cada proceso que se lleva a cabo en el ciclo, tal como lo muestra en el Anexo 3 la Figura 8.5.

En el ciclo térmico convencional la energía química del combustible después del proceso de combustión se transforma en calor, cuando intervienen el agua de alimentación de la caldera y los intercambiadores se genera vapor de altos parámetros que contienen una alta energía cinética al llegar a la turbina, el vapor al interactuar con los álabes del rotor transforma la energía en mecánica y genera un movimiento de rotación con un momento y velocidad determinada, como el generador eléctrico se encuentra acoplado directamente a la turbina de vapor la energía mecánica se transmite al generador eléctrico y este la transforma en energía eléctrica.

1.3.1 Circuito de Aire y Gases

La caldera como primer elemento del ciclo donde se produce todo el vapor que usa una termoeléctrica necesita una serie de equipos y circuitos auxiliares para su funcionamiento. El circuito de aire y gases es un esquema muy importante ya que es el encargado de suministrar el aire necesario para la combustión, mediante dos potentes ventiladores de tiro forzado (VTF) se toma el aire de la atmósfera se hace pasar por los precalentadores (Pre-cal) de aire donde el aire eleva su temperatura

hasta 100 °C y posteriormente pasa por los calentadores de aire regenerativos (CAR) donde toma la temperatura de 250 °C y pasa al sistema de quemadores donde se produce la combustión del fuel oil.

El diagrama simplificado del circuito de aire y gases se aprecia en el Anexo 3, Figura 8.6.

En la parte de gases de este circuito se encuentra el ventilador recirculador de gases (VRG), este toma parte de los gases de salida de la caldera y lo inyecta a la misma por el cenicero del horno manteniendo una velocidad adecuada de los gases en el interior de la caldera que permite controlar la temperatura de los vapores.

1.3.2 Circuito de agua vapor

El circuito de agua vapor es el encargado de unir tecnológicamente a la caldera y a la turbina, este es un circuito cerrado donde se encuentran las bombas de condensado que son potentes bombas multietápicas que son capaces de mover grandes flujos de agua que toman del condensador, esta agua pasa por los calentadores de baja presión (CBP) donde comienza a ganar temperatura y llega al desareador donde son eliminados algunos gases incondensables y toma más temperatura, de ahí el flujo es impulsado por las bombas de agua de alimentación de la caldera, estas son las más potentes del ciclo y circulan el agua a través de los calentadores de alta presión (CAP).

El diagrama simplificado del circuito de agua y vapor se puede ver en el Anexo 3, Figura 8.7.

Los calentadores de alta presión (CAP) usan las extracciones realizadas al cilindro de alta presión y de media presión de la turbina para calentar el agua haciéndola llegar al economizador (ECO) con valores de temperatura entre los 250 y 260 °C.

El economizador es un intercambiador de calor que representa una superficie independiente de intercambio que aprovecha la temperatura de los gases a la salida del eje convectivo para elevar la temperatura del agua de alimentación hasta valores adecuados antes de su entrada al domo a 285 °C. El ECO está diseñado

para que no ocurra vaporización en el interior de los tubos bajo ninguna condición de carga. Luego el agua pasa al domo que es el encargado de la producción, separación del vapor y el agua, constituye un almacén de vapor para satisfacer una demanda súbita de la turbina y ayuda a la circulación natural del agua que se encuentra en el interior de los tubos que conforman las paredes de agua de la caldera, pues forma parte de dicho circuito.

En el domo se hacen inyecciones de productos químicos y además se hacen extracciones de sales cuando existen desviaciones de los valores de sílice, conductividad y pH en el agua de la caldera.

Ahora el agua se ha convertido en vapor, pero para lograr los parámetros requeridos antes de entrar al cilindro de alta presión (CAP) de la turbina para realizar trabajo a, 530- 540 °C y 128 kgf/cm², debe pasar por los sobrecalentadores (SH).

El vapor no puede tener arrastres de humedad ya que provocaría erosión en la superficie de trabajo de la turbina con lo cual acortaría la vida útil de esta además provocaría averías en la misma y crearía incrustaciones de SiO₂ en las ruedas de trabajo de la turbina. Por tanto la condición de sequedad en el vapor es esencial.

El SH de la caldera está dividido en su parte primaria SH-1, y su parte secundaria SH-2, entre los cuales se encuentra el dispositivo de atemperamiento en forma de spray, con lo cual se logra la condición antes mencionada. El SH-1 está dividido a su vez en dos secciones, una dispuesta en el eje convectivo encima del ECO y la otra situada al final de la parte radiante encima del recalentador (RH), esta disposición hace que los denominen de baja y alta temperatura. Ambas secciones están dispuestas a contraflujo con respecto a los gases para un mejor aprovechamiento térmico.

La representación simplificada de la caldera de una termoeléctrica está en el Anexo 3, Figura 8.8.

El SH-2 está situado encima del horno donde la temperatura de los gases es muy alta y por tanto se encuentra a flujo con respecto a los gases. Para evitar daños por sobrepresión el SH está equipado con una válvula de seguridad. Luego de

realizar trabajo en el cilindro de alta presión de la turbina el vapor sobrecalentado regresa a la caldera con 20 kgf/cm^2 pasando por el recalentador (RH).

El recalentador (RH) es una superficie de calentamiento situada entre el SH-1 y el SH-2, está diseñado a contraflujo con los gases para aprovechar de manera más efectiva el calor de los gases, la función de este es devolver al vapor las características de trabajo adecuadas que eviten daños en la turbina. A la entrada del RH se encuentra situado el dispositivo de atemperamiento. Al pasar del recalentador al cilindro de media presión (CMP) de la turbina el vapor sobrecalentado tiene entre 530 y $540 \text{ }^\circ\text{C}$ y 25 kgf/cm^2 de presión.

Una vez en el CMP y después de realizar trabajo, el vapor pasa al cilindro de baja presión (CBP) y también se realizan 3 extracciones. En el CBP el vapor es suministrado por el medio de esta etapa de la turbina para compensar el empuje mecánico de las dos etapas anteriores, logrando así mantener al eje de la turbina en posición sobre sus rodamientos y reduciendo las vibraciones. Del CBP de la turbina ya una vez finalizado el trabajo del vapor este va al condensador que es un intercambiador de calor de tubos, donde usando agua de mar enviada por las bombas de circulación el vapor se condensa y es convertido en agua otra vez.

1.3.3 Generador Eléctrico

El Generador Eléctrico constituye la Máquina Eléctrica Rotatoria de Potencia (MERGP) más importante dentro de una termoeléctrica, pues es la encargada de transformar la energía mecánica rotatoria suministrada al eje por la Turbina en energía eléctrica. El Generador es completamente cerrado incluyendo el sistema de ventilación: ventiladores y enfriadores de hidrógeno para prevenir la entrada de materiales extraños.

Tabla 1.5 Principales características del Generador Hitachi de 158 MW

Generador Hitachi de 158 MW	
Tensión Nominal	17 000 V
Corriente Nominal	6 300 A

Factor de Potencia	0.85
Número de fases	3
Frecuencia	60 Hz
Número de Polos	2
Velocidad de Rotación	3600 rpm
Presión de Hidrógeno	3.17 kg / cm ²
Capacidad Nominal	186 000 kVA

Los finales a uno y otro lado de la carcasa son también de construcción soldada y soportan las chumaceras de apoyo del rotor y los sellos del eje. La construcción soldada provee un ajuste que evita las fugas de hidrógeno. Los instrumentos auxiliares del generador están dispuestos para controlar y supervisar la pureza y presión de hidrógeno, el aceite de sellaje del eje, la temperatura de los devanados, el gas de enfriamiento, el agua de enfriamiento y el aceite de lubricación.

Los terminales de línea y neutro pasan hacia la pizarra de conexiones por medio de aisladores de alta tensión completamente herméticos evitando de esta manera las fugas de hidrógeno.

Los datos, características y curvas dadas por el fabricante de dicha MERGP se hallan en los Anexos 2 y del 3, las figuras 8.1 y 8.2.

1.4 PRINCIPALES CAUSAS DE FALLOS EN LAS MERGP

En las máquinas eléctricas puede haber fallos de tipo eléctrico, mecánico, o una combinación de ambos, pudiendo ser originados por factores térmicos, como el calentamiento excesivo de alguno de sus componentes; por factores químicos normalmente asociados a la formación de sustancias corrosivas que van deteriorando partes y componentes del equipo o a la pérdida de las propiedades de los materiales que lo componen. En general, la mayor parte de los fallos suelen estar relacionados con el ambiente o ciclo de trabajo de la máquina y ocurren

durante algún proceso transitorio, que es cuando los esfuerzos mecánicos y eléctricos a los que está sometida son mayores.

Por otra parte, muchos problemas operacionales se podrían resolver utilizando una máquina sobredimensionada por ejemplo, en un ambiente con altas temperaturas puede ser más conveniente utilizar una máquina de mayor potencia que la de diseño, de forma que ofrezca un margen de trabajo algo mayor, pero teniendo en cuenta que los motores subcargados incrementan el consumo de potencia reactiva, empeorando el factor de potencia de la instalación e incidiendo en el aumento de las caídas de tensión en operación. Sin embargo, no se puede obviar el hecho de que en ocasiones, las máquinas no pueden ser sustituidas aún cuando sufran averías debido a insuficiencias en las especificaciones originales, sobre todo si se trata de máquinas de gran tamaño y, por tanto, elevado costo. Por ello, en estos casos un seguimiento periódico eficaz de su funcionamiento puede ser aplicado para la detección de fallos incipientes[2-4].

En el Anexo 1, Tabla 8.8 se expone el régimen de trabajo de las máquinas eléctricas y sus designaciones.

Mecánicamente, las máquinas pueden estar expuestas a períodos de marcha intermitente, arranques frecuentes y a ciclos de trabajo pesado, donde la carga varía frecuentemente entre plena carga y vacío con sobrecargas ocasionales. Esto puede provocar aflojamiento de los devanados, agrietamiento y degradación del aislamiento por envejecimiento térmico así como desgaste de los cojinetes. Del mismo modo, una máquina que soporte una carga pulsante, como un compresor o un molino, va a padecer un importante desgaste de sus cojinetes así como un nivel de vibración elevado.

Desde el punto de vista de la alimentación eléctrica, y en virtud de su situación en el sistema o su labor dentro del proceso industrial, una máquina puede estar sujeta a una serie de transitorios en sus terminales de alimentación. Éstos pueden ser ligeras fluctuaciones en la tensión de alimentación o incluso desequilibrios entre las fases. Este tipo de situaciones puede causar importantes problemas, especialmente si la máquina no tiene la suficiente capacidad para evacuar todo el

calor producido por el desequilibrio de la alimentación. Transitorios más rápidos pueden sobrecargar el aislamiento debido a que el esfuerzo eléctrico no aparece distribuido uniformemente a lo largo de todo el devanado. Por ejemplo, los interruptores producen sobretensiones que pueden deteriorar el aislamiento de las cabezas de bobina de los motores[5, 6].

La distribución de los posibles fallos en las máquinas eléctricas rotatorias según la IEEE y la EPRI se hallan en el Anexo 1, Tabla 8.9.

Allí se muestra la frecuencia de ocurrencia de fallos en distintos elementos de las máquinas eléctricas rotatorias, si bien los fallos del aislamiento eléctrico del estator es una de las principales en ocurrencia, además es de los que más indisponibilidad ocasiona así como elevado costo de reparación. Por tanto es de vital importancia conocer los ensayos que se le puede practicar al aislamiento eléctrico de las máquinas eléctricas rotatorias.

1.5 PRINCIPALES ENSAYOS DE DIAGNÓSTICO DEL AISLAMIENTO ELÉCTRICO Y SU EVOLUCIÓN

Aun con tanta variedad en diseños de máquinas eléctricas rotatorias, los mecanismos de degradación de los aislamientos del devanado del estator son los mismos y están determinados por la temperatura a la que operan, los esfuerzos mecánicos de los arranques, las sobretensiones generadas por descargas atmosféricas en el sistema de alimentación ó por recierres de interruptores, los esfuerzos eléctricos y el ataque de agentes químicos o ambientales. El impacto de cada mecanismo de degradación difiere dependiendo del diseño de la máquina en cuanto al tipo de sistema de aislamiento utilizado y tipo de enfriamiento, así como de la magnitud y nivel de incidencia de los mecanismos de degradación, y en última instancia los regímenes de explotación a los que sea sometido el motor.

Desde hace mucho tiempo se ha tratado de diagnosticar la condición de los aislamientos del devanado del estator buscando pruebas de diagnóstico que sean lo más efectivas posible para indicar el grado de deterioro, su localización específica y el mecanismo que produce la degradación[7]. Tradicionalmente, las

pruebas de diagnóstico del aislamiento se han hecho fuera de línea, es decir, con la máquina desenergizada y desconectada de la red de alimentación, aprovechando las salidas de las unidades a mantenimiento, con un enfoque de mantenimiento preventivo.

Desde unos años atrás, se ha buscado el enfoque predictivo, el cual se basa principalmente en diagnóstico en línea, es decir, con la máquina en operación normal, lo cual tiene la ventaja de analizar la máquina bajo todas las condiciones de operación. La limitante para implementar este tipo de diagnóstico estaba en el elemento primario de medición e instrumentos capaces de funcionar a partir de señales muy pequeñas y débiles, es así que hace unos 50 años se empezaron a desarrollar instrumentos para medir las descargas parciales en línea, las cuales son un buen indicador de la condición de los aislamientos. Esta técnica se inició en generadores hidroeléctricos ya que la tecnología de esos tiempos, con electrónica analógica, no permitía discriminar adecuadamente las descargas parciales del ruido eléctrico presente en los turbogeneradores. Con el desarrollo de la tecnología de estos instrumentos, en especial la tecnología digital, y el desarrollo de programas de computadoras, actualmente existen varias compañías que fabrican equipos de monitoreo para todo tipo y capacidad de máquinas eléctricas rotatorias[8-12].

1.5.1 Pruebas fuera de servicio (off-line)

1.5.1.1 Inspección Sensorial

Este control se sustenta básicamente, para el caso del aislamiento, en el empleo de los sentidos del tacto, el olfato y la visión, sin embargo es ese último sentido el más empleado, siendo la inspección visual una de las herramientas de diagnóstico más importantes y efectivas si se realiza adecuadamente. La condición en la que se puede realizar la inspección visual más extensiva y detallada es con el rotor extraído del motor[13]. Los puntos principales a inspeccionar son los siguientes:

- a) Verificar si hay zonas con polvo blanco en cuñas del estator y sobre amarres, separadores y barras en las cabezas de bobinas, indicativo de actividad de descargas parciales.
- b) Verificar si la separación entre los terminales de las cabezas de bobinas es uniforme. Que no haya signos de aflojamiento o deformación de las cabezas de bobinas, ni separadores ni amarres flojos.
- c) Verificar si hay caminos de falla eléctrica (tracking) entre barras en la cabeza. Se pone atención especial en separadores de barras contiguas que operan con alta diferencia de potencial entre ellas.
- d) Verificar que no haya grietas ni erosión en el aislamiento. Prestando especial atención en la zona de salida de las barras de las ranuras, en los amarres y separadores.
- e) Verificar si hay polvo amarillento sobre las cuñas en las ranuras. Esto es indicativo de desgaste del material de las cuñas o aislamiento por aflojamiento de cuñas.
- f) Verificar si hay signos de sobrecalentamiento en el aislamiento del devanado o en el núcleo magnético.
- g) Verificar el estado general de limpieza. Presencia de polvo o aceite sobre el aislamiento.
- h) Verificar que no estén obstruidos con suciedad o materiales extraños los conductos de enfriamiento del núcleo del estator.

1.5.1.2 Resistencia de Aislamiento

La medición de la resistencia de aislamiento no se considera como una prueba de diagnóstico de la degradación del aislamiento, aunque en ciertos casos y condiciones si puede serlo. Más bien, el valor absoluto de la resistencia de aislamiento y el índice de polarización se usan para determinar la condición del aislamiento en cuanto a suciedad y humedad del mismo y decidir si el devanado es apto para operar ó realizarle pruebas con tensiones elevadas. También, es la

prueba de rigor para determinar si existe falla a tierra o entre fases en el devanado después de ocurrir un disparo del motor.

La práctica usual es que cuando se vayan a realizar pruebas dieléctricas con tensiones equivalentes a la nominal del devanado ó mayores, se mida previamente su resistencia de aislamiento, incluyendo el índice de polarización, para asegurar que el devanado se encuentra en buenas condiciones de limpieza y sin humedad, para prevenir un posible daño al aislamiento al ser sometido a altos valores de tensión. Así mismo, después de realizar las pruebas dieléctricas, se miden de nuevo la resistencia de aislamiento y el índice de polarización para comprobar que no hubo ningún efecto adverso al aislamiento por las pruebas. La tensión de prueba para la medición de resistencia de aislamiento debe ser siempre la misma, 1 000 V C.D. a 5 000 V C.D., dependiendo de la tensión nominal de la máquina.

1.5.1.3 Prueba de Tangente Delta "TIP-UP"

La prueba de tangente delta de un aislamiento, también denominada factor de disipación y equivalente al factor de potencia, es una medida del comportamiento de las pérdidas dieléctricas del aislamiento. Su magnitud depende del tipo de aislamiento y de las condiciones del mismo y es independiente de su volumen. La desventaja de esta prueba es que sólo determina la condición promedio del aislamiento, es decir, no detecta el punto de peor condición. Su valor puede verse afectado por la humedad y suciedad en la superficie del aislamiento que incide sobre una circulación de corriente a tierra a través de la superficie del mismo aumentando las pérdidas. El valor de tangente delta aumenta con las descargas parciales en el aislamiento. Por esta razón, se recomienda efectuar la prueba a distintos valores de tensión, uno inicial, suficientemente bajo para prevenir que haya descargas parciales y otros hasta la tensión nominal de fase a tierra, que permita medir las pérdidas ocasionadas por las descargas parciales. Esta forma de medición se conoce como "Tip-up" y es una medición indirecta de las descargas parciales[14, 15].

Desafortunadamente, en devanados con recubrimientos graduadores del campo eléctrico a base de carburo de silicio, a tensión nominal la contribución principal en las pérdidas proviene de la conducción a tierra a través de este recubrimiento, siendo imposible discriminar cuanto de las pérdidas se deben a las descargas parciales y cuanto a la conducción de los recubrimientos graduadores. Por esta razón, con esta prueba no es posible determinar incrementos pequeños de descargas parciales con el tiempo.

Aun cuando muchos fabricantes establecen como aceptables valores de tangente delta “Tip-up” muy elevados, los recomendables se muestran en el Anexo 1, Tabla 8.10.

Es conveniente hacer notar que en devanados del estator enfriados con agua, si la prueba se realiza con agua dentro de los devanados los valores de tang δ pueden ser muy altos, dependiendo de la conductividad del agua.

Algunos fabricantes recomiendan obtener el “Tip-up” a una tensión de fase a tierra igual a la tensión nominal entre fases de la máquina. Se considera que no es necesario aplicar una tensión de prueba tan elevada, es suficiente con aplicar la tensión nominal de fase a tierra. En esta prueba, además de los valores absolutos de tangente delta “Tip-up”, se debe analizar la tendencia de estos valores.

1.5.1.4 Capacitancia

El devanado del estator puede considerarse como un capacitor cuyos electrodos están formados por los conductores del devanado y el núcleo del estator y su dieléctrico por el sistema de aislamiento. La capacitancia del devanado se reduce con la formación de huecos en el aislamiento y aumenta si este se satura con agua. La medición periódica de la capacitancia puede ser útil para determinar delaminaciones por sobrecalentamiento o presencia de agua en el devanado. Para poder detectar cambios significativos en la capacitancia se necesita medirla con equipos de prueba con resolución de tres decimales.

Generalmente los equipos de medición de tangente delta o factor de potencia incluyen la medición de la capacitancia con una buena resolución y se pueden realizar ambas mediciones al mismo tiempo. Sin embargo, la experiencia ha

mostrado que esta prueba no es muy sensible para detectar degradación del aislamiento del devanado[2, 14, 15].

1.5.1.5 Descargas Parciales

Por más cuidadoso que sea el proceso de fabricación del aislamiento de los devanados del estator, es imposible que la resina de impregnación de las cintas aislantes penetre y llene perfectamente todo el volumen del aislamiento por lo que siempre quedará una cantidad de huecos pequeños dentro del mismo. Cuando el aislamiento eléctrico del devanado es sometido a la tensión de operación, en aquellos huecos donde se alcance a través de ellos un nivel de tensión de aproximadamente 3 kV/mm, se romperá dieléctricamente el aire contenido en ellos y se producirán descargas parciales. La magnitud de las descargas parciales depende del tamaño de los huecos, mientras más grandes sean los huecos, mayor será la magnitud de las descargas parciales.

La unidad de magnitud de las descargas parciales se mide en picocoulomb (pC). Aun los devanados nuevos se crean con una cantidad de descargas parciales internas del orden de algunos miles de pC, generalmente de 2 a 3, en pruebas fuera de línea. En condiciones no severas de operación de una máquina eléctrica, es decir, sin aflojamiento de los devanados, sin arranques y paradas muy frecuentes, sin cambios bruscos y fuertes de carga y sin temperaturas excesivas, se espera que el aislamiento se vaya degradando gradualmente a lo largo de muchos años, apareciendo más huecos y los existentes haciéndose cada vez mayores. Sin embargo, ante la ocurrencia frecuente de los factores de degradación antes mencionados, la aparición de huecos y daños en diferentes puntos del sistema de aislamiento se acelera, con lo cual aumenta la cantidad y magnitud de las descargas parciales. Por esta razón, se considera que las descargas parciales son un síntoma y no la causa de la degradación del aislamiento. Sin embargo, una vez que las descargas parciales se presentan en gran cantidad y magnitud, su acción contribuye a acelerar la degradación del aislamiento. En las pruebas fuera de línea se miden la magnitud y el patrón de distribución de las descargas parciales respecto a una onda senoidal de referencia

con lo cual se trata de determinar el grado de la degradación y su probable localización en el sistema de aislamiento[5, 6, 16-27].

La correcta interpretación de estos patrones de descargas parciales requiere mucha experiencia en este tipo de pruebas. La ventaja de las pruebas fuera de línea es que, durante la medición, se puede ayudar a definir con más precisión la localización de las descargas parciales más intensas con sensores direccionales y, en la zona de ranuras, con una sonda conocida como tipo TVA (Tennessee Valley Authority). La medición en forma periódica, permite determinar la razón de degradación y, con cierta precisión, el tiempo de vida del aislamiento[28].

La medición fuera de línea de las descargas parciales tiene como desventaja que no indica el comportamiento de las descargas parciales en las condiciones de operación de la máquina. Adicionalmente, ya que sólo se puede probar el devanado de una fase a la vez, aplicándole una tensión al devanado completo contra tierra, no permite detectar problemas entre fases en las cabezas de bobinas, tal como la formación de caminos de falla eléctrica (tracking) entre fases. Tampoco detecta problemas incipientes en el recubrimiento semiconductor en la ranura por aflojamiento de las barras.

La forma de evaluación del aislamiento mediante esta técnica es mediante los valores absolutos de descargas parciales (magnitud de su intensidad y número de pulsos) y su comportamiento con el tiempo.

Es decir, se tiene que evaluar la tendencia. Un valor inicial de descargas parciales mayor al esperado no necesariamente significa que el aislamiento vaya a fallar pronto, se debe evaluar la magnitud del incremento con el tiempo.

El criterio general que se ha adoptado para el seguimiento de las descargas parciales fuera de línea está en el Anexo 1, Tabla 8.11 (dependiendo del equipo de medición utilizado y su calibración)

Si las descargas parciales han alcanzado valores de 30 000 pC o más, lo recomendable es instalar equipos de monitoreo en línea para realizar una mejor evaluación de la causa de las mismas y un seguimiento más oportuno de la tendencia. Es importante considerar que cuando se realicen mediciones periódicas

de descargas parciales, es necesario que siempre se midan con los mismos equipos y calibración, además que los sensores siempre sean colocados en la misma posición, para no tener variaciones de valores por utilizar diferentes equipos de medición, calibración y ubicación de los sensores.

La experiencia actual en la medición de descargas parciales muestra que, en muchos casos, no es fácil determinar el origen de las descargas parciales. La contaminación ó suciedad de los devanados producen descargas parciales que pueden confundirse con otro mecanismo de falla. Esto dificulta tomar la decisión respecto al tipo de trabajo correctivo necesario. Aun con todo, esta prueba ha demostrado ser la más sensible a degradación del aislamiento ó contaminación en el mismo.

1.5.1.6 Prueba de Electromagnetic Core Imperfection Detector (ELCID)

Aun cuando se ha hecho referencia al diagnóstico del devanado del estator, dado que el núcleo del estator está muy ligado al devanado, es conveniente abordar el diagnóstico del núcleo magnético del estator mediante la prueba de ELCID. Esta prueba determina cortocircuitos entre laminaciones del núcleo del estator mediante un toroide que produce un flujo magnético del 4 % aproximadamente del nominal. La prueba de ELCID ha demostrado buena sensibilidad para detectar laminaciones en cortocircuito en el núcleo del estator de turbogeneradores y motores de gran potencia. En los generadores hidroeléctricos no responde tan adecuadamente por la construcción en secciones del núcleo magnético[4, 29, 30]. El criterio de aceptación para considerar un núcleo magnético en buenas condiciones es el siguiente: Corriente máxima: ≤ 100 mA

1.5.1.7 Ensayo de Alta Tensión

El ensayo de Alta Tensión no es aceptado por muchos como una prueba de rutina para evaluar la condición del aislamiento del devanado del estator por considerarse una prueba posiblemente destructiva. Sin embargo, realizada a niveles de tensión menos severos que en fabrica o en puesta en servicio, si el devanado pasa la prueba, se tiene un buen nivel de confianza en que este no va a fallar en operación cuando ocurra un transitorio de tensión.

La prueba de Alta Tensión se puede realizar con corriente directa o con corriente alterna. Se recomienda esta última por que somete al aislamiento a un esfuerzo más real respecto a la operación del generador y es más sensible que la corriente directa a defectos serios del aislamiento.

El inconveniente con la prueba con C.A. es que se requieren equipos de prueba de alta capacidad, especialmente en máquinas grandes a menos que se ensaye a una frecuencia muy baja de 0,1 Hz. Por esta razón, generalmente esta prueba se realiza con C.D.

Los valores de tensión de corriente alterna recomendados para esta prueba se muestran en el Anexo 1, Tabla 8.12.

La prueba de Alta Tensión al aislamiento de los devanados no es una práctica recomendada como mantenimiento ya que se sobreesfuerza el aislamiento y se le resta vida. No se recomienda aplicar más de la tensión nominal de fase a tierra a un devanado.

1.5.2 Pruebas en servicio (on-line)

1.5.2.1 Descargas Parciales

La mejor prueba de diagnóstico en línea del devanado del estator de las máquinas eléctricas de gran potencia que existe actualmente es la medición de descargas parciales, la cual se ha constituido en la herramienta más poderosa de diagnóstico del aislamiento del devanado del estator ya que se realiza con la máquina en operación, bajo los esfuerzos eléctricos, mecánicos y térmicos propios de esa condición.

Las ventajas de esta técnica son: la medición se realiza en minutos en el momento que uno decida y dependiendo del sistema utilizado, puede interpretarse por una persona que haya recibido un sencillo curso. Además, no requiere calibración de equipos ya que los sensores son fijos.

En una máquina eléctrica la mayor parte del aislamiento del devanado del estator está sujeto a una tensión de fase a tierra, desde los conductores de cada barra del devanado a la superficie de las mismas recubiertas por una cinta o pintura

semiconductora que se pone a referencia de tierra al estar en contacto con el núcleo del estator en las ranuras del mismo. Por lo tanto, las descargas parciales originadas en la sección del devanado con recubrimiento semiconductor y graduador dependen de la tensión de fase a tierra de la máquina, existiendo reportes de estudios en motores a partir de los 4 kV de tensión nominal[16, 18, 21, 23, 25].

Los sistemas de medición de descargas parciales en línea incluyen una señal de tensión de la máquina de fase a tierra como referencia, tomada de uno de los secundarios de los transformadores de potencial, con la cual, mediante software, se reproducen las ondas de tensión de fase a tierra de las otras dos fases para mostrar los patrones de agrupamiento de las descargas parciales en cada fase del devanado respecto a su tensión correspondiente de fase a tierra.

Las descargas parciales que se originan por la tensión de fase a tierra durante el semiciclo positivo de la tensión, se agrupan alrededor de los 45 grados eléctricos y son de polaridad negativa. Mientras que, las descargas parciales originadas en el semiciclo negativo, se agrupan alrededor de los 225 grados eléctricos y son de polaridad positiva.

En un aislamiento en el cual sólo existen huecos dentro del volumen del aislamiento principal, condición que se considera normal y que se espera que progrese gradualmente a lo largo de muchos años de operación, la magnitud y cantidad de las descargas parciales de ambas polaridades son muy similares entre sí, con pequeñas diferencias, en la cual la magnitud de las descargas parciales negativas es mayor en un 12,5% que las descargas parciales positivas. Si la magnitud de las descargas parciales de una de las polaridades es mayor en un 50% aproximadamente que la de la otra polaridad, se dice que hay una predominancia de polaridad y esto es indicativo de la existencia de otros mecanismos de degradación en el aislamiento.

Los diferentes mecanismos de degradación del aislamiento se pueden identificar por las características en predominancia de polaridad así como del ángulo en que se agrupan las descargas parciales respecto a la onda de tensión de referencia.

También, se ha observado que algunos mecanismos de degradación del aislamiento muestran cambios en la magnitud de las descargas parciales por variaciones en temperatura y carga del devanado. A continuación se explican los mecanismos de degradación más común y la forma en que se pueden identificar mediante la predominancia de una polaridad.

No predominancia de polaridades. Si se encuentra que la magnitud y cantidad de las descargas parciales de ambas polaridades son similares, generalmente se debe a la existencia de huecos dentro del volumen del aislamiento principal. Aunque también es posible que esta característica este presente cuando existan dos mecanismos de falla diferentes que produzcan descargas parciales de polaridades opuestas que resulten en magnitudes y cantidades similares.

Predominancia de polaridad negativa. Cuando las descargas parciales de polaridad negativa predominan, se ha encontrado que se deben a que el aislamiento principal se separa de los conductores del devanado. Esta situación se origina por arranques y paradas excesivos en los que, por tener el cobre y el aislamiento principales coeficientes de dilatación por temperatura diferente, con la repetición de este efecto se fatiga la unión en la interfase de conductores y aislamiento hasta romperse formando huecos.

Predominancia de polaridad positiva. Cuando la polaridad que predomina en las descargas parciales es la positiva, se ha encontrado que son debidas a descargas parciales que ocurren de la superficie del aislamiento a tierra. Por ejemplo, al dañarse el recubrimiento semiconductor de las barras en la zona de ranuras y perderse la referencia de tierra, en donde haya separaciones entre el aislamiento y el núcleo del estator ocurrirán descargas parciales. También ocurrirán descargas parciales positivas en caso de daño en la interfase entre el recubrimiento semiconductor y el graduador a la salida de las barras de las ranuras.

Cuando se presentan problemas de contaminación ó tracking entre barras contiguas del devanado en el cabezal que son de fases diferentes con una alta tensión entre ellas, las descargas parciales en estos puntos son originadas por una tensión entre fases. En este caso, las descargas parciales se agruparán en un

ángulo de $\pm 30^\circ$ eléctricos respecto a la tensión de referencia de fase a tierra. Es decir, a 15° ó 75° para las descargas de polaridad negativa y 195° ó 255° para las positivas.

El efecto de las variaciones de carga ó temperatura del devanado sobre las descargas parciales de algunos mecanismos de degradación puede influir en un aumento ó disminución de la magnitud de aquellas. Si al subir la carga o la temperatura del devanado las descargas parciales se incrementan, se dice que hay un efecto positivo por estos factores. Si el resultado es contrario, es decir, que se reducen las descargas parciales con el aumento de carga o temperatura en el devanado, se dice que hay un efecto negativo.

Para determinar si hay un efecto en las descargas parciales por temperatura, se debe lograr una variación en temperatura en el devanado del estator de al menos 20°C y en el caso de la carga la variación debe ser al menos de 40%.

En el Anexo 1, Tabla 8.13 se indican los mecanismos de falla más comunes del aislamiento y las características de las descargas parciales que producen.

La Tabla 8.13 ayuda a determinar que pruebas hacer, incluyendo variar carga y temperatura, para determinar los mecanismos de falla que estén presentes. El criterio de evaluación incluye, además de la cantidad y magnitud de las descargas parciales, la tendencia. Inicialmente, se deben tomar lecturas cada seis meses. Si el valor inicial se considera muy elevado o si el segundo valor semestral es mayor que el anterior, se deben tomar lecturas con mayor frecuencia, por ejemplo cada tres meses. De acuerdo con el fabricante del equipo de medición en línea de descargas parciales, si el valor de estas se duplica cada seis meses, el devanado esta en un proceso de deterioro muy rápido y deben tomarse provisiones para un cambio de devanado o un mantenimiento correctivo. Otra forma de evaluación es comparando contra máquinas eléctricas similares.

1.6 CRITERIOS DE DIAGNÓSTICO EJECUTANDO ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS Y DESTRUCTIVOS

Algunos fabricantes de máquinas eléctricas han desarrollado la siguiente metodología para evaluar el grado de deterioro de los sistemas de aislamiento de los estatores a máquina parada (off-line), mediante una serie de pruebas no destructivas durante la vida operativa de la máquina y una serie de pruebas destructivas a una muestra de barras (semibobinas) retiradas de generadores mayores de 20 años o en base a diagnóstico actual, con los siguientes criterios que implican que el sistema de aislamiento esta cerca del final de su vida útil.

Descargas parciales >100 000 pC a $\frac{\tan\delta_{E_n}}{\sqrt{3}}$ voltios

$$\Delta \tan\delta = \tan\delta_{E_n} - \tan\delta_{E_0} > 0,065 \quad (1.1)$$

Las pruebas de diagnóstico típicas para determinar la condición del aislamiento del devanado del estator de las máquinas eléctricas de gran potencia son: $\tan \delta$, capacitancia y descargas parciales. La prueba de descargas parciales fuera de línea ha demostrado tener una mayor sensibilidad a la degradación del aislamiento y a la contaminación del mismo que las de $\tan \delta$ y capacitancia. Sin embargo, con los resultados obtenidos a la fecha con estas tres pruebas no se han podido correlacionar de una manera concluyente. Puesto que se hace necesaria la ejecución de nuevos ensayos cuyos resultados logren concatenarse con los obtenidos de los ensayos antes descritos y permitan emitir criterios mucho más precisos y cercanos a la realidad objetiva [4, 31, 32].

CAPÍTULO II

DIAGNÓSTICO INTEGRAL APLICADO A LAS MERGP DE
LA ETE CIENFUEGOS

2 Diagnóstico Integral aplicado a las MERGP de la ETE Cienfuegos

2.1 EMPRESA TERMOELÉCTRICA CIENFUEGOS BREVE RESEÑA

La Empresa Termoeléctrica Cienfuegos ubicada en el centro sur de Cuba, en el seno de la Bahía de Cienfuegos, es una Empresa cuyo objeto social es la generación de electricidad, con 316 MW instalados, la Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes”, como también se conoce es la de mayor estabilidad en el Sistema Electroenergético Nacional (SEN) en sus más de 30 años de explotación.

La Empresa Termoeléctrica Cienfuegos está formada por dos unidades de fabricación Japonesa (Hitachi) con una capacidad de 158 MW cada una y se denominan CMC-3 y CMC-4, estas unidades sincronizaron al SEN por primera vez en 1978 y en 1979 respectivamente.

La Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes” durante más de tres décadas ha permanecido con indicadores técnicos de calidad y eficiencia comparables con empresas similares del primer mundo, resultados que hacen notar un elevado rigor en el desempeño de sus tareas, que son avaladas por 29 años de Vanguardia Nacional y la Certificación de su Sistema de Calidad en las Normas ISO 9001 del 2008 entre otras.

2.2 PASOS PARA APLICAR LA METODOLOGÍA DEL DIAGNÓSTICO INTEGRAL.

La metodología del Diagnóstico Integral fue creada y desarrollada por el Dr.C. Sergio Fernández García (Ver Bibliografía 5, 6 y 7), para su aplicación se parte de la información disponible de las máquinas o dispositivos sobre el que se desea obtener resultados diferenciados.

En este caso, se parte de conocer la distribución de fallos en elementos partes y componentes de las MERGP en la CTE “Carlos Manuel de Céspedes”, partiendo

de esta información se realiza el diagrama de Ishikawa para los fallos en las MERGP, representando gráficamente por grado de importancia cada fallo.

En esta posición se elabora la Matriz de Falla donde se relaciona cada fallo con los parámetros de diagnóstico que hace posible su detección. Además se obtienen los pesos de las variables y el cubrimiento total de cada variable parámetros que permite continuar con la elaboración del diagrama de Lorenz ó Pareto como comúnmente se conoce.

Partiendo del diagrama de Lorenz se obtienen los mínimos parámetros de diagnósticos que son capaces de detectar el 80% de los fallos constituyendo estos los parámetros óptimos.

Una vez obtenidos los parámetros óptimos se analizan los ensayos que son necesarios ejecutar para la obtención de los mismos.

2.3 PRINCIPALES FALLOS DE LOS MERGP EN LA ETE CIENFUEGOS

Existen un gran número de fallos capaces de reducir el rendimiento de los MERGP, todos ellos se pueden clasificar siguiendo diferentes criterios, pero en cualquier caso lo fundamental es disponer de la máxima cantidad de información posible acerca de su origen, evolución y posibles causas, ya que dicha información es imprescindible para implementar el método de diagnóstico que sea elegido.

En los últimos años gran parte de las MERGP que conforman los equipos auxiliares de las unidades generadoras de la Empresa Termoeléctrica Cienfuegos han sido sustituidos por máquinas modernas, pero la mayor parte de los cambios se han efectuado en CMC-3, siendo en este caso CMC-4 quien cuenta entre sus equipos auxiliares con las MERGP de mayor tiempo de operación.

Si bien las MERGP que conforman los equipos auxiliares de CMC-4 durante su explotación no han tenido un número elevado de fallos, es muy importante estar preparados para prevenir los que se puedan producir en lo adelante.

Durante la vida de operación de estos equipos se han intervenido mediante mantenimientos planificados ejecutando acciones referidas por el fabricante,

desde hace 10 años atrás se viene ejecutando un mantenimiento predictivo basado en el comportamiento de las vibraciones mecánicas, pero que resulta aún insuficiente para evaluar eficazmente la totalidad de los parámetros de estado de las MERGP.

En la distribución de los fallos de las MERGP de la Unidad-4 Hitachi de 158 MW de la ETE Cienfuegos durante su vida de explotación se puede conocer que los fallos del aislamiento eléctrico de los devanados del estator son uno de los que más han ocurrido, tal y como se muestra en la gráfica de distribución de fallos en el Anexo 3, Figura 8.9.

Este tipo de fallo es el que causan mayor tiempo de indisponibilidad del equipo, ya que es necesario trasladarlo hasta el Taller Nacional, donde muchas veces no se cuenta con los materiales necesarios para su reparación y es entonces que se importan los mismos, gestión esta que demora algunos meses, una vez reparado es necesario retornarlo a la central. Este período puede demorar entre 6 meses y 8 meses, tiempo que la unidad afectada no puede contar con el equipo con pérdida de confiabilidad en la operación, ya que no se cuentan con máquinas de características similares que puedan asumir la función de la averiada por un margen de tiempo.

El caso real que ha ocurrido en varias ocasiones, es el fallo de un motor de la Bomba de Alimentar la Caldera y como estas Unidades Generadoras cuenta con tres equipos de este tipo, en operación sólo se encuentran 2, estando el tercero de reserva, no se limita la potencia de la central, pero de ocurrir en el motor de un Ventilador de Tiro Forzado o un motor de una Bomba de Circulación de agua de mar, la unidad quedaría limitada al 50% de la capacidad nominal de generación y aún más grave, de ocurrir en el motor del Ventilador Recirculador de Gases la Unidad quedaría fuera de servicio.

Otros fallos que han sido muy comunes en estos equipos son los fallos de chumaceras, principalmente en los motores de las Bombas de Agua de Alimentar a la Caldera, este tipo de fallo ha estado siempre inducido por la bomba y se produce cuando la bomba pierde la fijación del movimiento axial que provoca un

corrimiento brusco del rotor, arrastrando al rotor del motor provocando daños en la chumacera del motor del lado de la bomba.

Como quiera que sea es necesario analizar todas las averías posibles en las MERGP para llegar a las variables que permiten identificar cada tipo de fallo del mismo debido al gran peso que tienen estas máquinas para el funcionamiento adecuado y estable de las unidades generadoras.

Pero esto sólo es posible si se conoce detalladamente las características técnicas de las mismas y su funcionamiento[1].

2.4 CONSTRUCCIÓN DEL DIAGRAMA DE ISHIKAWA

El Diagrama de Ishikawa, también llamado diagrama de causa-efecto, es una de las diversas herramientas surgidas a lo largo del siglo XX en ámbitos de la industria y posteriormente en el de los servicios, para facilitar el análisis de problemas y sus soluciones en esferas como es la calidad de los procesos, los productos y servicios. Fue concebido por el ingeniero japonés Dr. Kaoru Ishikawa en el año 1953. Se trata de un diagrama que por su estructura ha venido a llamarse también, diagrama de espina de pescado, que consiste en una representación gráfica sencilla en la que puede verse de manera relacional una especie de espina central, que es una línea en el plano horizontal, representando el problema a analizar, que se escribe a su derecha.

El problema analizado puede provenir de diversos ámbitos como la salud, calidad de productos y servicios, fenómenos sociales, organización, etc. A este eje horizontal van llegando líneas oblicuas -como las espinas de un pez- que representan las causas valoradas como tales por las personas participantes en el análisis del problema. A su vez, cada una de estas líneas que representa una posible causa, recibe otras líneas perpendiculares que representan las causas secundarias, Anexo 3, Figura 8.10. Cada grupo formado por una posible causa primaria y las causas secundarias que se le relacionan forman un grupo de causas con naturaleza común. Este tipo de herramienta permite un análisis participativo mediante grupos de mejora o grupos de análisis, que mediante técnicas como por ejemplo la lluvia de ideas, sesiones de creatividad, y otras, facilita un resultado

óptimo en el entendimiento de las causas que originan un problema, con lo que puede ser posible la solución del mismo.

La primera parte de este Diagrama muestra todas aquellos posibles factores que puedan estar originando alguno de los problemas que tenemos, la segunda fase luego de la tormenta de ideas es la ponderación o valoración de estos factores a fin de centralizarse específicamente sobre los problemas principales, esta ponderación puede realizarse ya sea por la experiencia de quienes participan o por investigaciones in situ que sustenten el valor asignado.

2.4.1 Diagrama de Ishikawa para MERGP

Después de efectuar un estudio de los MERGP, realizando consultas a expertos y los datos históricos de las Unidades CMC-3 y CMC-4 de la ETE Cienfuegos se relacionan los posibles fallos que pueden ocurrir en los elementos que conforman al equipo.

1. Falla en el estator.

Dentro de las fallas que pueden ocurrir en el estator de los MERGP existen una gran gama de causas que pueden agruparse como sigue:

a. Aislamiento.

i. Contaminación.

1. Humedad.

a. Índice de Protección Inadecuado.

b. Pérdida de Hermeticidad.

c. Problemas con los calefactores.

2. Aflojamiento de partes envolventes.

ii. Eléctricas.

1. Sobretensión.

a. Internas.

i. Switching.

ii. Problemas de Suministro.

b. Externas.

i. Rayos.

2. Desarrollo y aparición de cavidades.

- a. Envejecimiento.
- b. Aflojamiento de Bobinas.
- c. Delaminación.
- d. Fallo del aislamiento entre espiras.

iii. Mecánicas.

- 1. Grandes Esfuerzos Electrodinámicos.
- 2. Aflojamiento cuñas.
- 3. Aflojamiento de separadores.
- 4. Vibraciones.

b. Circuito Magnético.

- i. Roces ó golpes.
- ii. Aflojamiento sistema de apriete.
 - 1. Vibraciones.

- a. Grandes esfuerzos Electrodinámicos.

c. Sobrecarga.

- i. Arranque con rotor en movimiento.
- ii. Rotor Bloqueado.
- iii. MIGP mal elegido.

2. Falla en cojinetes.

Las fallas de los cojinetes es un tipo de avería que se puede presentar comúnmente en los Motores de Inducción de Gran Potencia y que las causas normalmente varían en dependencia de los tipos de cojinetes y de los elementos que lo compongan, a continuación se relacionan una serie de causas muy comunes en diferentes cojinetes:

a. Cojinete de Fricción.

i. Falla Sistema Lubricación.

- 1. Suciedad.
 - a. Circuito de Lubricación.
 - b. Cojinete.
- 2. Falta de Lubricación.

- a. Holguras excesivas.
- b. Fallo lubricación.
- c. Fallo retenedor.
- 3. Error de montaje.
- 4. Corrosión.
- 5. Sobrecarga.
- 6. Cavitación.
- b. Cojinete rodante.
 - i. Sobrecarga.
 - ii. Contaminación.
 - iii. Lubricación.
 - 1. Defectuosa.
 - 2. Excesiva.
 - iv. Mal montaje.
 - v. Vibraciones en reposo.
 - vi. Corriente eléctrica por el cojinete.
- c. Vibraciones elevadas.
 - i. Desbalance.
 - ii. Desalineamiento.
 - iii. Solturas mecánicas.
- 3. Falla en el rotor.

Las fallas en el rotor de los Motores de Inducción de Gran Potencia son averías muy difíciles de determinar en un estado incipiente, toda vez que al igual que las demás fallas dependen en gran medida del tipo de rotor así como de la configuración de los elementos que lo conforman e incide directamente el hecho de constituir la única parte con movimiento del equipo aumentando el riesgo de fallos mecánicos:

- a. Falla en barras.
 - i. Rotura de barra.
 - 1. Incorrecto régimen de arranque.
 - 2. Barra floja.

- 3. Defecto del material.
 - ii. Fractura de soldadura.
 - 1. Defecto en soldadura.
 - 2. Incorrecto régimen de arranque.
- b. Desbalance.
 - i. Flexión.
 - ii. Desplazamiento de masas.
- c. Pérdida de ajuste del rodamiento.
 - i. Ajuste inadecuado.
- d. Daño acero activo.
 - i. Fricción.
 - 1. Falla Rodamiento.
 - 2. Cuñas sueltas.
 - 3. Golpes accidentales.
 - ii. Fallo por arco.
 - 1. Barra rota y floja.
- e. Fractura o flexión de eje.
 - i. Secados al estator alimentando con tensión reducida.
 - ii. Concentración de tensiones.

De forma gráfica se representa mediante el diagrama de causa-efecto ó diagrama de Ishikawa, Anexo 3, Figura 8.11 que facilita la comprensión y visión de los problemas o defectos que pueden terminar en una avería partiendo de la causa raíz[1].

2.5 CONFORMACIÓN DE LA MATRIZ DE FALLA DE LAS MERGP

A partir de la obtención del diagrama de Ishikawa se procede a la confección de una Matriz compuesta por Fallos vs Métodos de Detección de la Falla, denominada “Matriz de Falla”.

La Matriz de Falla se caracteriza por indicar qué método es aplicable a la detección de cada falla y si el método corresponde a la medición de algún parámetro. Además, la Matriz de Falla se complementa con la descripción del

comportamiento de cada uno de los parámetros que la componen, la misma se halla en el Anexo 1, Tabla 8.14.

Otros aspectos fundamentales de la Matriz de Fallas lo constituyen el Total de Cubrimiento y el Factor de Cubrimiento de Fallas. El primero se refiere al total de fallas posibles a detectar con la aplicación de cada uno de los métodos propuestos, mientras que el Factor de cubrimiento indica que porcentaje del total de fallos identificados se cubre con cada método, respectivamente. El peso de la variable determina porcentualmente cuán importante es un método de detección de fallos con respecto a otro.

Los elementos que componen la Matriz de Falla deben ser ordenados, en el caso de los fallos se comienza por el de mayor peso en cuanto a incidencia, veces de ocurrencia e impacto económico de la reparación. En el caso de los métodos de detección de los fallos son ordenados a partir del que posea el mayor factor de cubrimiento hasta el menor.

En la Matriz de Falla se ubican entre las averías más complicadas y de más difícil solución en cuanto a magnitud de los trabajos de reparación y al costo, el fallo a tierra del devanado del estator y posteriormente el fallo del aislamiento entre fases del devanado del estator.

Mediante esta metodología se llega a relacionar las averías y fallos más probables que ocurren en una MERGP con los métodos de detección, después de un análisis económico de toda la matriz salta a la vista la imposibilidad de aplicar cada uno de los métodos de detección ya que en algunos casos se necesita implementar e incorporar nuevas señales y en otros se necesita sacar de servicio la máquina para practicar algunas pruebas y ensayos.

A partir del análisis anterior surge la necesidad de optimizar la Matriz de Falla y se llega a los Parámetros Óptimos. Los Parámetros Óptimos surgen después de aplicar un diagrama de Pareto, como comúnmente se le conoce[1].

El Diagrama de Pareto es una gráfica en donde se organizan diversas clasificaciones de datos por orden descendente, de izquierda a derecha por medio de barras sencillas después de haber reunido los datos para calificar las causas.

De modo que se pueda asignar un orden de prioridades, se reorganiza la Matriz de Falla donde las filas que corresponden a los fallos se ordenan teniendo en cuenta el mayor número de métodos de detección que le sean común. Según la regla conocida como 80/20 derivada de aplicar el Pareto, si se tiene un problema con muchas causas, podemos decir que el 20% de las causas resuelven el 80% del problema y el 80% de las causas solo resuelven el 20% del problema.

Por lo tanto, el Análisis de Pareto es una técnica que separa los "pocos vitales" de los "muchos triviales". Una gráfica de Pareto es utilizada para separar gráficamente los aspectos significativos de un problema desde los triviales de manera que un equipo sepa dónde dirigir sus esfuerzos para mejorar. Reducir los problemas más significativos (las barras más largas en una Gráfica Pareto) servirá más para una mejora general que reducir los más pequeños. Con frecuencia, un aspecto tendrá el 80% de los problemas. En el resto de los casos, entre 2 y 3 aspectos serán responsables por el 80% de los problemas.

La determinación gráfica de los parámetros óptimos se muestra en el Anexo 3, Figura 8.12.

Una vez aplicado el análisis de Pareto son obtenidos los métodos mínimos de detección de fallos que son necesarios para llegar al mayor número de fallos dentro de los cuales estarán contenidos los fallos de mayor significación desde el punto de vista económico[1].

2.6 PARÁMETROS ÓPTIMOS

- Medición de Vibraciones.
- Inspección Sensorial.
- Medición de Temperaturas.
- Caracterización del Aislamiento Principal.
 - Resistencia del Aislamiento.
 - Rigidez Dieléctrica del Aislamiento.
 - Descargas Parciales.
 - Tangente de δ .

Determinados los parámetros óptimos, con la Tabla 8.15 del Anexo 1 se puede conocer qué objetivo persigue cada uno de los métodos de detección de fallos obtenidos del Pareto. La inspección visual tiene mayor valor es cuando el MERGP está fuera de servicio y se realiza esta en su interior donde se pueden detectar posibles fallos incipientes cuya manifestación sea imperceptible a las mediciones en tiempo real y a las mediciones on-line, aunque no se debe despreciar su aporte cuando se practica con el motor en servicio ya que si bien no es posible observar algún evento que puede estar ocurriendo en su interior, hay gran probabilidad de detectar posibles defectos vibratorios que puedan llevar a futuros fallos en el equipo.

La medición de las vibraciones, el análisis del comportamiento de sus componentes en el tiempo teniendo en cuenta sus características de respuesta conocidas ante determinados defectos es una de las herramientas fundamentales con que se cuenta para la detección de posibles fallos ya que se cuenta con sensores en tiempo real.

La medición de las Temperaturas en los puntos próximos al fondo de las ranuras y en los puntos entre devanados del estator, así como en el aire de salida, se toman cada muy poco tiempo y pueden detectar un sobrecalentamiento local brusco o de progreso lento en el tiempo, que ayuda a detectar un problema en desarrollo en cualquier de los puntos antes mencionados, siempre se tendrá en cuenta que la temperatura medida es función de la corriente de carga del motor, así que cualquier análisis se encaminará partiendo de iguales estados de carga.

El estado técnico del aislamiento principal es función de muchas variables y está ligado estrechamente al tiempo de vida de la MERGP, a las condiciones de operación a que haya sido sometido durante este período, que incluye cantidad de eventos transitorios de tal magnitud, que hayan provocado actuación de sus protecciones, de arranques y paradas, los valores de temperatura máximos y el tiempo que haya operado con esos valores de temperatura. Mediante la ubicación de sensores de descargas parciales para monitoreo en tiempo real o monitoreo on-line en el interior del motor se puede lograr un seguimiento en el tiempo de estas descargas permitiendo un análisis de la posible degradación del estado

técnico del aislamiento. Pero sólo se logra un diagnóstico preciso al practicarse los ensayos off-line tales como Resistencia del Aislamiento, Rigidez Dieléctrica del Aislamiento, medición del factor de pérdidas dieléctricas o $\tan \delta$.

A estos análisis se le debe prestar especial interés pues mediante estos se pueden determinar con un grado de precisión elevado el estado del aislamiento eléctrico de una máquina eléctrica en general [1-15, 17].

CAPÍTULO III

SISTEMAS AISLANTES, ENSAYOS Y AUTOMATIZACIÓN DEL DIAGNÓSTICO

3 Sistemas Aislantes, Ensayos y Automatización del Diagnóstico

3.1 SISTEMAS AISLANTE DE LAS MÁQUINAS DE ELÉCTRICAS DE GRAN POTENCIA

Un dieléctrico durante el funcionamiento, se va degradando poco a poco, o sea, va perdiendo su capacidad de desempeñar la función para la cual se ha diseñado. Por lo tanto se habla de duración de vida de un aislante, término que se propone indicar el tiempo durante el cual las propiedades del aislante se mantienen en valores preestablecidos de modo que está en condiciones de desempeñar las funciones para las cuales está destinado.

La duración de los materiales utilizados para el aislamiento de las máquinas eléctricas depende de numerosos factores de naturaleza térmica, química, mecánica y eléctrica. Entre éstos, los más importantes son las sollicitaciones térmica y eléctrica. En lo que se refiere a las máquinas, el valor de la temperatura de funcionamiento es de gran importancia puesto que de ésta depende la duración de la funcionalidad eficiente. En efecto, aunque cada uno de los aislantes tiene una temperatura límite de funcionamiento que no debe superarse en ningún caso, la duración de su eficiencia es mayor cuanto menor sea la temperatura a la cual trabajan.

Sobre la base de estos conceptos, los materiales aislantes sólidos se dividen en clases convencionalmente identificadas por una letra y contramarcadas por la máxima temperatura durante la operación tal como se muestra en el Anexo 1, Tabla 8.16.

Como a paridad de potencia la temperatura de las varias piezas de una máquina eléctrica depende de la temperatura ambiental, la normativa internacional habla más frecuentemente no de temperatura límite, sino de máxima sobret temperatura admisible con respecto a la temperatura ambiente.

Más precisamente, en relación con las máquinas eléctricas, se define una temperatura ambiente convencional y se fijan los límites para las sobretemperaturas de los bobinados en base a la clase de aislamiento adoptada.

En definitiva, se puede sintetizar afirmando que la clase de aislamiento de determinado máquina eléctrica es indicativa de la máxima sobretemperatura alcanzable con respecto a la temperatura ambiental de los bobinados de la máquina misma, un elevado valor de sobretemperatura admisible denota un empleo de material aislante "de calidad" en la fabricación de la máquina y la hace utilizable en condiciones particularmente gravosas[33].

3.2 FACTORES QUE AFECTAN LAS MEDICIONES.

A menos que las mediciones de resistencia y absorción dieléctrica se lleven a cabo con un alto grado de habilidad, se presentarán fluctuaciones importantes, provocadas por factores que se discuten en los párrafos siguientes. Cada uno de estos factores puede ser causa de grandes errores en la medición de la resistencia de aislamiento, los cuales no se deben considerar como problemas del aparato de medición.

3.2.1 Condición de la Superficie

Los residuos tales como carbón, polvo o aceite depositados en las superficies aislantes, pueden bajar la resistencia de aislamiento. Este factor es particularmente importante cuando se tienen superficies aislantes muy grandes expuestas al ambiente. El polvo depositado sobre las superficies aislantes, ordinariamente, no es conductor cuando está seco, pero cuando se expone a la humedad se vuelve, de modo parcial, conductor y baja la resistencia de aislamiento, por lo que se deberá eliminar toda materia extraña que esté depositada sobre él antes de efectuar la prueba.

3.2.2 Efecto de la Humedad

Una gran parte de los materiales utilizados en los sistemas de aislamiento como son el aceite, el papel, el cartón y algunas cintas, son higroscópicos, por lo tanto, capaces de absorber humedad, lo que ocasiona una reducción en la resistencia de aislamiento. Actualmente, se construyen algunas máquinas rotatorias con aislamientos que no absorben humedad, pero si la temperatura del devanado alcanza un valor igual o inferior a la de punto de rocío, se puede formar una película de humedad sobre la superficie del aislamiento, reduciendo su resistencia. Es importante, sobre todo en el caso de las máquinas rotatorias, efectuar las pruebas cuando los devanados tengan una temperatura superior a la de punto de rocío; esto es necesario, especialmente, en el caso de equipos de importancia y para ello se efectúan mediciones de temperatura de bulbo húmedo y bulbo seco para determinar el punto de rocío y la humedad absoluta o relativa.

3.2.3 Efecto de la Temperatura

La resistencia de aislamiento varía inversamente con la temperatura para la mayor parte de los materiales aislantes. Para comparar, de modo apropiado, las mediciones periódicas de resistencia de aislamiento, es necesario efectuar las mediciones a la misma temperatura, o convertir cada medición a una misma base.

El procedimiento adecuado para referir los valores de resistencia de aislamiento a una temperatura dada, es a partir del cálculo del coeficiente térmico de la resistividad (α). Para determinar el valor de α se requiere partir de dos mediciones de resistencia de aislamiento ($R_{60^{\circ}\text{T MED}}$) a sendas temperaturas, que difieran entre sí en no menos de 20°C. Calculándose según la siguiente expresión:

$$\alpha = 0,69 \cdot (T_1 - T_2) \cdot \left(\ln \frac{R_{60^{\circ}T_1}}{R_{60^{\circ}T_2}} \right)^{-1} \quad (3.1)$$

Donde:

$R_{60^{\circ}T_1}$ y $R_{60^{\circ}T_2}$ -Son las resistencias de aislamiento medidas a las

temperaturas T1 y T2 respectivamente.

La expresión para referir la resistencia de aislamiento a la temperatura T_{REF} es la siguiente:

$$R_{60^{\circ} T_{REF}} = R_{60^{\circ} T_{MED}} R_T \cdot 2^{\frac{T_{REF} - T_{MED}}{\alpha}} \quad (3.2)$$

Sin embargo, como en ocasiones en la práctica diaria no se cuenta con los resultados de mediciones $R_{60^{\circ} T_1}$ y $R_{60^{\circ} T_2}$ que permitan el cálculo de α , es acertado usar el coeficiente K_T , recomendado por la norma IEEE-43 2000[9], que se obtiene a partir de la gráfica mostrada en el Anexo 3, Figura 8.13.

La corrección de temperatura de la resistencia de aislamiento mediante el coeficiente K_T es de la siguiente forma:

$$R_{60^{\circ} 40^{\circ} C} = K_T \cdot R_{60^{\circ} T_{MED}} \quad (3.3)$$

Donde:

$R_{60^{\circ} 40^{\circ} C}$ -Es la resistencia de aislamiento referida a la temperatura base.

$R_{60^{\circ} T_{MED}}$ -Es la resistencia de aislamiento a la temperatura t de medida.

K_T -Es el coeficiente de temperatura de la resistencia de aislamiento a la temperatura T .

En cualquier caso es importante tener en cuenta que referir las resistencias de aislamiento mediante el empleo de α brinda resultados más confiables que K_T , asimismo, no debe obviarse que α depende de las características intrínsecas del aislamiento y que es afectado por su envejecimiento, lo cual lo convierte en otro elemento a tener en cuenta que brinda criterios de diagnóstico[1].

Al realizar pruebas de resistencia de aislamiento, es muy importante la medición de la temperatura; en el caso de máquinas rotatorias con detectores de temperatura por resistencia, se deberá utilizar el promedio de las lecturas de todos ellos; cuando no existen detectores se deberá tomar el promedio de lecturas de varios termómetros localizados estratégicamente. En el tiempo que transcurre

mientras se baja carga, se desconecta del equipo asociado y se prepara para la prueba, esto ayudará a disminuir el gradiente de temperatura entre el aislamiento y el dispositivo de medición de la temperatura, pero el tiempo transcurrido no deberá ser mayor de 1 h para los generadores.

En caso de máquinas rotatorias el efecto por temperatura en el índice de polarización, generalmente, es pequeño, si la temperatura de la máquina no cambia, de modo apreciable, durante el tiempo que se efectúan las lecturas. Pero, cuando la temperatura es alta, y por las características del sistema aislante, con cualquier variación de temperatura se puede obtener un índice de polarización bajo, en cuyo caso se recomienda una prueba por debajo de los 40⁰ C como una comprobación de la condición real de aislamiento.

3.2.4 Efecto de la Magnitud de la Tensión de Ensayo

La medición de la resistencia de aislamiento es en sí misma una prueba de potencial y debe, por lo tanto, restringirse a valores apropiados que dependan de la tensión nominal de operación del equipo que se va a someter a la prueba y de las condiciones en que se encuentre su aislamiento. Esto es importante, particularmente, para máquinas pequeñas o de baja tensión y para transformadores, sin su aceite aislante, que se encuentren húmedos. Si la tensión de prueba es alta, se puede provocar fatiga en el aislamiento. Los potenciales de pruebas más comúnmente utilizados son tensiones de corriente directa de 500 a 5000 V.

Las lecturas de resistencia disminuyen, normalmente, al utilizar potenciales más altos; sin embargo, para aislamientos en buenas condiciones y perfectamente secos, se obtendrán valores muy próximos para diferentes tensiones de prueba siempre que no pase del valor nominal de operación del equipo al que se está sometiendo a prueba.

Si al aumentar el potencial de prueba se reducen, significativamente, los valores de resistencia de aislamiento, esto puede indicar que existen imperfecciones o fracturas en el aislamiento, posiblemente agravados por suciedad o humedad,

aun cuando también la sola presencia de humedad con suciedad puede ocasionar este fenómeno.

3.2.5 Efecto de la Duración de la Aplicación de la Tensión

La resistencia de aislamiento de un devanado aumenta con la duración de la aplicación de la tensión continua. El incremento será normalmente rápido en los primeros instantes de aplicación de la tensión, y las lecturas se aproximarán gradualmente a un valor prácticamente constante conforme el tiempo transcurra.

La resistencia de aislamiento medida en un devanado seco y en buenas condiciones puede seguir aumentando durante horas con una tensión de ensayo constante aplicada de forma continua. Sin embargo, un valor bastante aproximado se alcanza al cabo de 10 ó 15 minutos. Si el devanado está húmedo o sucio, este valor se alcanzará al cabo de uno o dos minutos de iniciado el ensayo. La pendiente de la curva es, por tanto, un buen indicador del estado del aislante[1].

3.2.6 Efecto de la Existencia de Carga en los Devanados

Un factor que afecta las mediciones de resistencia de aislamiento y absorción dieléctrica, es la presencia de carga previa en el aislamiento. Esta carga se puede originar porque el equipo trabaja aislado de tierra o por una aplicación de voltaje de CD en una prueba anterior. Por lo tanto, es necesario que antes de efectuar las pruebas se descarguen los aislamientos mediante una conexión a tierra[34].

3.3 CRITERIOS DE DIAGNÓSTICO

Para efectuar un diagnóstico lo más cercano al estado real del equipo bajo ensayo se necesitan valorar, varios criterios de diagnóstico, los cuales se obtienen partiendo de diversos tipos de ensayos, ya sean con CD o CA. Los de CD predominan pues son sencillos de efectuar, no requieren mucho tiempo, alrededor de 30 minutos, además no son costosos pues se realizan tan solo con un Megger.

Estos equipos modernos permiten almacenar las lecturas y luego es posible descargarlos a una computadora para trabajar con ellos, también hay que resaltar

que estos ensayos no son destructivos para el aislamiento pues la tensión máxima a aplicar es la nominal de la máquina rotatoria.

3.3.1 Corriente de Absorción, Reabsorción y Conducción

Cuando el aislamiento de un conductor es sometido a un escalón de tensión de corriente directa, en él aparece una corriente que se denomina corriente total (I_T), esta es la que se puede medir con el Megger durante el ensayo.

Esta corriente total está compuesta por dos componentes, una corriente que circula por la superficie del aislamiento, la cual es favorecida por las partículas contaminantes y la humedad, y que se llama corriente superficial (I_{supf}), además por una componente de corriente volumétrica, o sea que atraviesa el aislante (I_{vol}).

$$I_T = I_{supf} + I_{vol} \quad (3.4)$$

La componente volumétrica, está formada por la corriente capacitiva (I_{cap}) y por la corriente de absorción (I_{abs}).

$$I_{vol} = I_{cap} + I_{abs} \quad (3.5)$$

La componente capacitiva resulta de la capacidad geométrica del devanado, que estrictamente depende de la superficie, forma y la pared de aislamiento. Esta corriente es de alto valor y corta duración, ya se ha extinguido en el momento de tomar el primer dato de medida y, por tanto, no influye en ella[1]. Su expresión es:

$$I_{cap} = \frac{E}{R} \cdot \frac{1}{R_{fc}} \quad (3.6)$$

Donde:

E -tensión que en circuito abierto proporciona la fuente (V).

R_{fc} - resistencia interna de la fuente y de los conductores empleados (Ω).

La corriente de absorción, corresponde a una polarización mucho más lenta que la anterior y que envuelve varios mecanismos moleculares del material aislante. Esta corriente es una medida de la compactación del aislamiento y la cantidad de impurezas presentes en el interior del aislamiento, es decir su comportamiento refleja el estado interno del aislamiento, estado que nunca es mejorable[1]. El comportamiento de la corriente de absorción obedece a la expresión:

$$I_{abs} = A * U * t^{-n} \quad (3.7)$$

Donde:

A -constante que depende de la capacidad, tipo y estado del aislamiento.

U -escalón de tensión aplicado (V).

n -constante que define la tasa de absorción del aislamiento y sus impurezas.

A su vez, la componente superficial está formada por dos corrientes también, la corriente de conducción o fuga, motivada esta por impurezas, electrones libres que existen en el aislamiento e iones disociados por efecto del campo eléctrico. Su comportamiento está relacionado, además de las dimensiones del devanado estático, con la presencia de impurezas y degradación, por envejecimiento, del aislamiento.

Por otra parte, el comportamiento de la corriente de dispersión depende fuertemente de las condiciones externas del aislamiento tales como humedad y contaminación[1].

$$I_0 = I_{cond} + I_{disp} \quad (3.8)$$

Ambas son las únicas que subsisten después de que la corriente de absorción se ha reducido a valores insignificante, por lo que la corriente superficial también es denominada corriente en estado estable (I_0).

Las corrientes arriba mencionadas están representadas en el Anexo 3, Figura 8.14 pues son las que se manifiestan en el proceso de carga del aislamiento durante el ensayo.

La corriente de reabsorción (I_{rabs}), no se muestra en la Figura 8.14 pues esta aparece el dejar de estar presente el escalón de tensión, o sea en el proceso de descarga (Figura 8.16), la misma decae desde un alto valor inicial hasta casi cero, de igual forma pero en sentido opuesto a la corriente de absorción descrita previamente, esta es la corriente de descarga.

La corriente de reabsorción permite identificar los mismos defectos que se detectan con la corriente de absorción, pero con mayor certeza y claridad pues en este caso, dicha corriente aparece sola y no contaminada con la corriente de conducción como ocurre durante el proceso de carga.

3.3.2 Coeficiente de absorción

Para la determinación del coeficiente de absorción (k_a) se calcula el cociente entre la resistencia registrada a los 15 segundos la de los 60 segundos, $R_{15''}$ y $R_{60''}$ atendiendo a lo señalado en la siguiente expresión:

$$k_a = \frac{R_{60''}}{R_{15''}} \quad (3.9)$$

Los criterios de estado referentes al nivel de contaminación, asociados al valor de coeficiente de absorción se muestran en la Tabla 8.17 del Anexo1.

3.3.3 Índice de Polarización

La implementación más simple de la prueba de tiempo-resistencia para un aislamiento sólido se representa por la prueba popular Índice de Polarización (IP), que requiere sólo dos lecturas seguidas por una división simple; la lectura de diez minutos se divide entre la lectura de un minuto para obtener una relación. El resultado es un factor y se puede considerar independiente de la temperatura puesto que la masa térmica del equipo que se está probando generalmente es tan

grande que el enfriamiento total que tiene lugar durante los diez minutos de la prueba es despreciable.

$$IP = \frac{R_{10}'}{R_1'} \quad (3.10)$$

Las referencias a valores IP típicos son comunes en la literatura, lo que hace que esta prueba sea fácilmente empleada. Hay materiales que exhiben muy poca absorción dieléctrica, llevando a cabo una prueba en esos materiales produciría entonces un resultado muy próximo a 1.

Nótese que las lecturas de resistencia son difíciles de trabajar, puesto que pueden ir de valores enormes en equipos nuevos a unos cuantos megohms antes de retirarlos de servicio.

Una prueba como la del IP es particularmente útil porque se puede realizar aún en equipos grandes, y produce una evaluación auto-contenida con base en lecturas relativas más que en valores absolutos. Pero no se puede calcular IP con un probador de rango limitado, porque “infinito” no es un número. Los probadores avanzados alcanzan el rango de teraohms, y por tanto, no se salen de la gráfica.

En las Tablas 8.18 y 8.19 mostradas en el Anexo 1, en base al tipo de aislamiento, es posible determinar el estado en que este se encuentra el mismo.

Los valores por encima de 4 indican equipo excelente para el que probablemente no sea necesaria ninguna acción dentro del programa de mantenimiento inmediato. Sin embargo, el operador puede ser llamado para hacer juicios críticos. Algunos valores de IP (arriba de 5) podrían indicar aislamiento quebradizo o agrietado; esto podría ser casi obvio. Un aumento súbito de IP mayor de 20%, sin haber realizado mantenimiento alguno, debe servir como una advertencia; el aislamiento puede mantener su valor por períodos largos, pero no es probable que los mejore espontáneamente de por sí[35].

3.3.4 Resistencia de Aislamiento

Todo alambre eléctrico en una instalación, ya sea en un motor, generador, cable, interruptor, está cubierta con alguna forma de aislamiento eléctrico. Aunque el alambre en sí es un buen conductor (generalmente de cobre o aluminio) de la corriente eléctrica que da potencia al equipo eléctrico, el aislamiento debe resistir la corriente y mantenerla en su trayectoria a lo largo del conductor. La comprensión de la Ley de Ohm, que se enuncia en la ecuación siguiente, es la clave para entender la prueba de aislamiento:

$$E = I * R \quad (3.11)$$

Donde:

E - tensión (V)

I - corriente (A)

R - resistencia (Ω)

Para una resistencia dada, a mayor tensión, mayor corriente. Alternativamente, a menor resistencia del alambre, mayor es la corriente que fluye con el mismo voltaje.

Ningún aislamiento es perfecto (no tiene resistencia infinita), por lo que algo de la corriente fluye por el aislamiento o a través de él a tierra. Tal corriente puede ser muy pequeña para fines prácticos pero es la base del equipo de prueba de aislamiento. Entonces, ¿qué es un “buen” aislamiento? “Bueno” significa una resistencia relativamente alta al flujo de la corriente. Cuando se usa para describir un material aislante, “bueno” también significa “la capacidad para mantener una resistencia alta”. La medición de la resistencia puede decir que tan “bueno” es el aislamiento[35].

3.3.5 Valor Mínimo de la Resistencia de Aislamiento

Los ensayos en la resistencia de aislamiento sólo pueden ser interpretadas correctamente si las medidas están realizadas a la misma temperatura o si todas ellas están referidas a una misma temperatura .

Si las mediciones referidas a una misma temperatura, realizadas a lo largo de varios años sobre un mismo devanado, revelan un descenso gradual de la resistencia, entonces es posible que el aislamiento se esté deteriorando; sin embargo, es mucho más probable que la resistencia de aislamiento presente una variación de valores importante entre medición y medición debido a las condiciones de humedad, haciendo más compleja su interpretación. De forma similar, cuando se hace una comparación entre dos devanados, el hecho de que uno de ellos presente una resistencia más alta no implica que ese devanado se encuentre en mejores condiciones.

Los datos históricos de resistencia de aislamiento para una máquina dada, obtenidos bajo unas condiciones uniformes, están reconocidos como una forma útil de "monitorizar" el estado del aislamiento. La estimación de la necesidad de aplicar a la máquina ensayos de sobretensión puede basarse en la comparación de los valores presentes, con los valores anteriores de la resistencia de aislamiento referidos a una temperatura base.

Cuando los datos históricos de resistencia de aislamiento no están disponibles, los valores mínimos recomendados de resistencia de aislamiento (R_{\min}) al cabo de un minuto pueden ser usados para estimar la conveniencia de aplicación de un ensayo de sobretensión, o para continuar con el funcionamiento normal. El valor, referido a la temperatura base, de resistencia de aislamiento al cabo de un minuto debe ser al menos el que se recomienda como mínimo[1].

La expresión (3.12) es el cálculo del valor mínimo admisible de la Resistencia de Aislamiento (R_{\min}) según el material usado por el fabricante, o sea, con los parámetros de diseño de la máquina[36].

$$R_{\min} = \frac{E_n}{1000 + 0.01 S} \quad (3.12)$$

Donde:

E_n - tensión nominal de la máquina ensayada (V)

S - potencia nominal de la máquina ensayada (kVA)

R_{\min} - valor mínimo de la resistencia de aislamiento referida a 75⁰ C (M Ω)

La resistencia medida al minuto, teniendo presente la temperatura a la cual se practica el ensayo, $R_{60''(T_{med})}$ se referencia a los 75⁰ C para poder compararla con el valor obtenido en la expresión (3.12).

$$R_{60''(75^{\circ}C)} = R_{60''(T_{med})} * 2^{\frac{(75-T_{med})}{10}} \quad (3.13)$$

Donde:

$R_{60''(T_{med})}$ - valor de la Resistencia de Aislamiento medida a la temperatura T_{MED} . (M Ω)

Si la expresión (3.13) da como resultado un valor menor que el de la expresión (3.12) se toma como un criterio discriminante para no mantener en operación la máquina, ya que de hacerlo el fallo del aislamiento del devanado es inminente. Si los resultados fuesen al revés, la expresión (3.13) mayor que (3.12), la máquina puede seguir en operación pero se recomienda practicar otros ensayos que permitan determinar el estado del aislamiento que permite establecer cuán pronto se le debe dar mantenimiento.

El valor de resistencia de aislamiento observado es una guía útil para la evaluación de la condición de los devanados de una máquina. Sin embargo, no debe ser considerado como un criterio exacto puesto que presenta algunas limitaciones:

– La resistencia de aislamiento de un devanado no está directamente relacionada con su rigidez dieléctrica; por tanto, es imposible determinar el valor de resistencia de aislamiento para el cual el devanado presentará un fallo eléctrico.

– Los devanados que presentan una superficie muy grande, máquinas grandes o de baja velocidad, o máquinas con colector, pueden presentar valores de resistencia de aislamiento que sean inferiores a los valores mínimos recomendados sin detrimentos sobre el criterio de R_{\min} . [1]

3.3.6 Permitividad Estática

Cuando el material se encuentra rodeado por un campo electrostático, los electrones en cada átomo cambian hacia el lado positivo y lejos del núcleo. Esto crea un momento dipolar en el átomo y polariza el material y reduce la fuerza del campo eléctrico dentro de él. Permitividad es una medida de la cantidad de un campo eléctrico que puede polarizar un material.

Cuanto mayor sea la permitividad de un dieléctrico, más débil es la fuerza del campo eléctrico dentro del material, y cuanto mayor sea el campo más puede resistir sin ruptura. Los dieléctricos de alta permitividad se utilizan en los condensadores, ya que permiten una mayor acumulación de cargas y dan un mayor valor de la capacitancia.

El criterio de Permitividad Estática se obtiene de la expresión 3.14 con los criterios establecidos en la Tabla 8.20 del Anexo 1.

$$\epsilon_E = \frac{Q_{ABS}}{\epsilon_0 A U} \quad (3.14)$$

Donde:

Q_{ABS} - carga de absorción, ésta se determina a partir de la expresión 3.15 (C).

$$Q_{ABS} = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \left(t \frac{U}{R(t)} \right) - \frac{U}{R_0} \sum_{i=1}^n t \right) \quad (3.15)$$

Donde:

t - tiempo transcurrido desde la aplicación de la tensión hasta la realización de cada medición. (seg)

R_0 .resistencia del aislamiento en estado estable. (M Ω)

$R(t)$ -resistencia de aislamiento correspondiente a cada intervalo de medición. t (seg)

3.3.7 Resistividad Volumétrica

La Resistividad Volumétrica es un criterio de gran utilidad para la evaluación de la resistencia de aislamiento de las MERGP, por cuanto su valor no depende de la

geometría de los lados de las bobinas, a la vez que el valor límite admisible responde a criterios establecidos por la física de los dieléctricos. No obstante los aislamientos nuevos de las MERGP poseen resistividades volumétricas superiores a $10^{14} \Omega \cdot m$, en esta norma se considerarán en buen estado aquellos aislamientos que posean al menos una resistividad de $1 T\Omega \cdot m$ a $20^\circ C$.

Para la determinación de la Resistividad Volumétrica (ρ_V) se emplea la expresión siguiente:

$$\rho_V = R_{0(20^\circ C)} \cdot \Lambda, M\Omega \cdot m \quad (3.16)$$

Donde:

Λ -longitud reducida del aislamiento, la cual se determina mediante la expresión (m).

$$\Lambda = \frac{Z \cdot L_R \cdot ((4 H_B + W_B))}{6 P_A} \quad (3.17)$$

Donde:

L_R -longitud total de la ranura incluyendo los canales de ventilación (m).

H_B -altura de la recta de la bobina (m).

W_B -ancho de la recta de la bobina (m).

P_A -pared de la recta de la bobina (m).

Z -número de ranuras

$R_{0(20^\circ C)}$ -resistencia de aislamiento en estado estable referenciada a $20^\circ C$ ($M\Omega$).

Este valor se determina a través de la siguiente expresión:

$$R_{0(20^\circ C)} = R_{0(T_{MED})} \cdot 2^{\frac{(20-T_{MED})}{\alpha}} \quad (3.18)$$

Los criterios de estado referentes a la magnitud de la Resistividad Volumétrica se muestran en la Tabla 8.21 y en la Tabla 8.22 se muestra el criterio combinado de Resistividad Volumétrica y Permitividad Estática, ambas del Anexo 1.

3.3.8 Constante de tiempo CT

Existen estudios que relacionan la variación de este parámetro con la rigidez dieléctrica residual del aislamiento y, por lo tanto, con la vida esperada en servicio.

No obstante, no es un parámetro ampliamente extendido por lo que no existe suficiente experiencia sobre su validez en el terreno del Diagnóstico.

Este es un criterio, completamente comparativo, que posibilita monitorear la degradación del aislamiento. El mismo presenta como dificultad la determinación in situ de la capacitancia del aislamiento con CD así como la resistencia en estado estable.

Algunos métodos similares fueron propuestos a finales del siglo XX, pero no es hasta el desarrollo de megóhmetros comerciales con nuevas tecnologías que en realidad se ha podido generalizar la aplicación de este método.

La constante de tiempo se determina como:

$$CT = R_0 C [s] \quad (3.19)$$

Donde:

R_0 - resistencia del aislamiento en estado estable (M Ω)

C - capacitancia del aislamiento (μ F)

La constante de tiempo, como se definía anteriormente, es muy útil para establecer comparaciones del estado del aislamiento del equipo en un período de tiempo, la disminución de esta constante al transcurrir el tiempo denota un envejecimiento del mismo y con valores inferiores a 800 segundos se puede asegurar que existen síntomas acentuados de envejecimiento del material aislante. Compruébese en el Anexo 1, Tabla 8.23.

El estudio de la tendencia de este parámetro permite supervisar la degradación del aislamiento.

3.3.9 Escalones de Tensión

Puesto que el aislamiento bueno es resistivo, un incremento en la tensión de prueba conducirá a un incremento en la corriente mientras la resistencia permanece constante, este comportamiento es para una resistencia ideal. En la realidad la presencia de suciedad, humedad o de cualquier partícula extraña hacen que el aislamiento se comporte como una resistencia en serie con un capacitor, por lo que al aplicar el escalón de tensión la resistencia se va a ir cargando en el tiempo hasta su valor pico. Cualquier desviación de esto podría significar aislamiento defectuoso. Con tensiones de prueba más bajas, 500 V o 1000 V, es bastante posible que estos defectos no se observen, pero conforme se eleva la tensión se llega a un punto donde tiene lugar la ionización dentro de las grietas o las cavidades, lo que da por resultado un incremento de la corriente, y por tanto una reducción de la resistencia de aislamiento. Nótese que no es necesario llegar a la tensión de diseño del aislamiento para que estos defectos se hagan aparentes, puesto que se busca simplemente la ionización en el defecto.

La prueba de Escalones de Tensión sigue exactamente este principio y puede emplearse útilmente con tensiones que alcanzan 5000 V y más. Este ensayo se puede emplear como una prueba de baja tensión o sobre tensión. Sin embargo, se debe recordar que una prueba de sobre tensión puede llevar a una falla catastrófica si se rompe el aislamiento debido a que los probadores de tensión tienen mucha potencia disponible. Una prueba de baja tensión realizada con un probador de aislamiento tiene relativamente poca potencia disponible y por lo tanto es menos probable que resulte una prueba destructiva.

Un procedimiento normal reconocido es incrementar la tensión en cinco pasos iguales en incrementos de un minuto, el Megger va registrando las lecturas de las impedancias cada cinco segundos. Cualquier reducción marcada o inusual de resistencia es una indicación incipiente de debilidad. La electrónica moderna permite que esas lecturas se capturen automáticamente.

La gráfica del Anexo 3, Figura 8.15 muestra los ensayos aplicados a un motor inundado y sucio (trazo inferior) y después de limpiarlo y secarlo (trazo superior).

En general, si se observa una desviación de 25% en las mediciones de resistencia en el rango de tensiones sucesivas, es una indicación de la presencia de humedad u otro contaminante. El daño físico localizado puede revelarse más por ruptura o arqueo. Una aguja con movimiento tembloroso puede anticipar esta condición cuando se acerca al voltaje de ruptura. Puede ser deseable terminar la prueba en tal punto antes que la ruptura del aislamiento deteriore más las condiciones de la máquina bajo ensayo.

Como la prueba IP, la prueba de Escalones de Tensión es una prueba repetible, auto-evaluable que, por su corta duración, está libre de influencias extrañas como el efecto de la temperatura[35].

3.3.10 Índice de absorción

El parámetro de diagnóstico Índice de Absorción (I_{abs}) refleja el grado de contaminación interna del aislamiento principal. Se obtiene a partir de la relación que existe entre la corriente que pasa a través del aislamiento en varios períodos de tiempo durante el ensayo.

Para determinarla son necesarias las expresiones siguientes, los valores obtenidos se analizan con la Tabla 8.24 del Anexo 1:

$$I_{abs} = \frac{I_{60''} - I_{f0}}{I_{30''} - I_{f0}} \quad (3.20)$$

Donde:

$$I_{f0} = \frac{I_1 * I_{10'} - I^2_{3'10''}}{I_1 + I_{10'} - 2I_{3'10''}} \quad (3.21)$$

3.3.11 Razón de Absorción Dieléctrica

Este parámetro de diagnóstico no es más que el cociente entre los valores de resistencia del aislamiento obtenidos a los 30 y 60segundos ($R_{30''}$) y ($R_{60''}$). El mismo surgió con la aparición de aislamiento de tipo poliméricos, pues en estos

las corrientes capacitivas pueden estar presentes más de 15 segundos y menos de 30, no siendo así en los aislamientos más viejos de base asfáltica, por lo que si se aplica solamente el parámetro de diagnóstico K_a el resultado obtenido no será del todo correcto. Luego de calculada la RAD con la expresión (3.22) se hace uso de la Tabla 8.25 del Anexo 1 para determinar el estado del aislamiento.

$$RAD = \frac{R_{50''}}{R_{20''}} \quad (3.22)$$

3.3.12 Descarga Dieléctrica

La prueba de Descarga Dieléctrica (DD) es un método de prueba relativamente nuevo que fue desarrollado por Electricité de France, con base en años de experiencia. Mientras que los otros métodos mencionados miden las corrientes que fluyen durante el proceso de carga, la prueba DD mide la corriente que fluye durante la descarga de la muestra bajo prueba. Como tal, no es una prueba de resistencia de aislamiento pura sino más bien un adjunto a las pruebas de aislamiento tradicionales.

La carga que se almacena durante una prueba de aislamiento se descarga automáticamente al final de la prueba cuando los resistores de descarga del probador de aislamiento se intercambian en las terminales.

La rapidez de descarga depende solamente de los resistores de descarga y de la cantidad de carga almacenada en el aislamiento. Sin embargo, la carga capacitiva se descarga rápidamente hasta que el voltaje a través del aislamiento se ha reducido casi a cero. En ese momento el efecto de las corrientes de fuga será despreciable. Así, sólo queda la inversión de la absorción dieléctrica. Esto se conoce como reabsorción dieléctrica y es una imagen de espejo de la absorción dieléctrica.

Las características de las corrientes que aparecen en el proceso de carga y descarga del aislamiento se muestran en el Anexo 3, Figura 8.16.

La corriente capacitiva decae rápidamente desde un valor alto con una constante de tiempo relativamente corta (unos cuantos segundos). La corriente de absorción (o reabsorción durante una descarga) siempre comienza a un nivel alto pero tiene una constante de tiempo mucho más larga (hasta muchos minutos). Es ocasionada por los dipolos que hacen aleatoria su alineación dentro del aislamiento y la capa de electrones que regresa a una forma no distorsionada. Esto tiene el efecto de una corriente que fluye si el circuito de descarga todavía está conectado, o un voltaje que reaparece en la muestra si se deja en circuito abierto. Removiendo rápidamente los efectos de las corrientes de fuga y capacitiva permite la posibilidad de interpretar el grado de polarización del aislamiento y relacionarlo con la humedad y otros efectos de la polarización. Se carga 30 minutos a una tensión igual o cercana a al nominal de la MERGP hasta que haya tenido lugar la absorción total. En este tiempo, la capacitancia se carga totalmente y la absorción eléctrica está esencialmente completa. El Megger registra el valor de la impedancia cada un minuto, excepto una medición a los 3:10 segundos empleada para el cálculo de la $I_{\text{Absorción}}$.

Sólo la corriente de fuga continúa fluyendo. En este punto se remueve el voltaje de prueba y el aislamiento se descarga a través de los resistores internos del instrumento para descargar rápidamente la carga capacitiva. Después de 60 segundos de descarga, se mide cualquier flujo de corriente remanente. En este tiempo, la capacitancia se descarga y el voltaje se colapsa de modo que la carga almacenada en los dipolos puede verse independientemente de las corrientes de “máscara” que dominan durante la fase de descarga de una prueba de aislamiento. Los resultados medidos se introducen en la fórmula siguiente y se calcula un índice que luego es analizado con la Tabla 8.26 del Anexo 1.

$$DD = \frac{I_{\text{reabsorción}} \text{ (mA)}}{\text{Tensión de ensayo (V)} * \text{Capacitancia } (\mu\text{F})} \quad (3.23)$$

La medición es dependiente de la temperatura, por lo que es importante probar a una temperatura de referencia o registrar la temperatura. El aislamiento en equipos de alta tensión consta de capas, cada una tiene su propia capacitancia y la resistencia de fuga asociada.

Cuando el aislamiento se construye de esta manera, la meta es hacer cada capa de modo que la fatiga por la tensión se comparta por igual entre las capas. Cuando se descarga el aislamiento, la carga de cada capa decrecerá en forma igual hasta que ya no hay tensión remanente. Cuando hay una capa defectuosa entre dos capas buenas, su resistencia de fuga decrecerá mientras que la capacitancia probablemente permanece igual.

Una prueba normal de aislamiento se determinará por las capas buenas, y probablemente no revelará esta condición. Pero durante la descarga dieléctrica, la constante de tiempo de la capa defectuosa desempeñará las otras para producir un valor DD más alto. Un valor DD bajo indica que la corriente de reabsorción decae rápidamente, y la constante de tiempo es similar. Un valor alto indica que la reabsorción exhibe tiempos de relajación largos, que pueden apuntar hacia un problema.

3.4 INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS.

El ensayo de Descargas Dieléctricas tiene como ventaja que mantiene la MERGP menos tiempo fuera de servicio, debido a que por medio de este único ensayo se pueden determinar varios parámetros de diagnóstico que antes se obtenían por medio de varios ensayos diferentes.

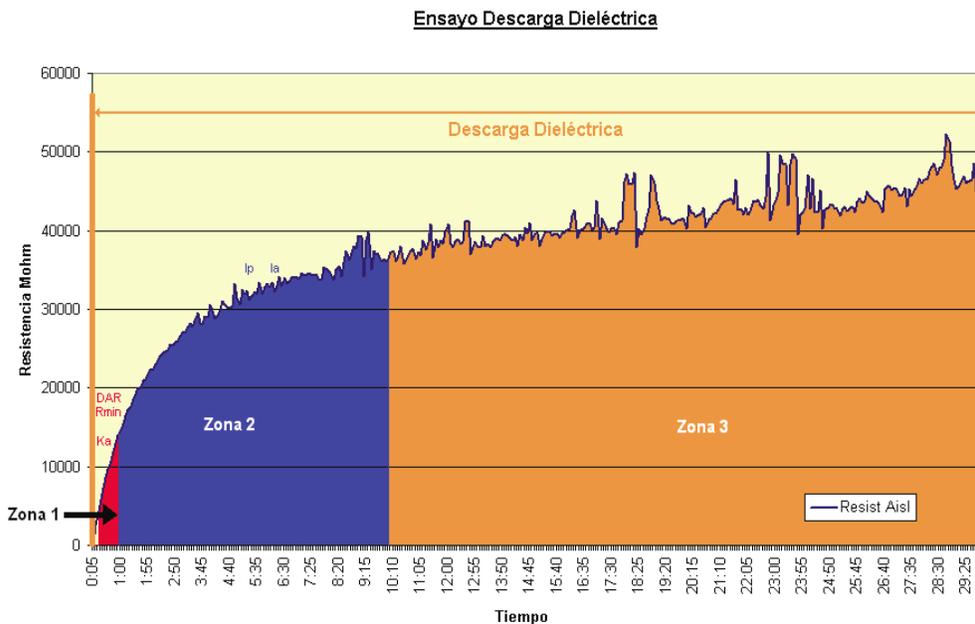


Fig. 3.1 Ensayo de Descarga Dieléctrica.

Como se aprecia en el Fig. 3.1 de las diferentes zonas que se divide el área bajo la curva, tomándose como base el tiempo, se determinan diversos parámetros de diagnóstico respectivamente.

De la zona uno, la cual comprende los primeros 60 segundos del ensayo DD se obtiene el coeficiente de absorción (K_a), cociente entre $R_{60''}$ y $R_{15''}$. Se registra la $R_{60'' (T_{med})}$ empleada en la expresión (3.6) y la razón de absorción dieléctrica (RAD), que no es más que el cociente entre $R_{60''}$ y $R_{30''}$.

De la zona dos, la cual va desde el primer minuto hasta los diez, se determina el índice de polarización (IP), el cual matemáticamente se interpreta como la pendiente de la gráfica en esa zona determinada por el cociente de la $R_{10''}$ sobre la R_1 . También se calcula el índice de absorción (I_a).

En la zona tres se analiza gráficamente la estabilidad del comportamiento de la resistencia en el tiempo restante del ensayo, y se puede determinar según sea el gráfico el nivel de contaminación que presenta el aislamiento, ya sea por humedad o por partículas sólidas.

A continuación se analizarán los resultados arrojados por los ensayos en el generador de la unidad 4, antes y después del mantenimiento.

Análisis de los resultados del ensayo del día 28/05/20008

- Generador de la unidad 4.
- Aislamiento tipo B de base polimérica.
- Humedad relativa: 73% Temp. ambiente: 29⁰ C
- El esquema de conexión empleado para el Megger se muestra en el Anexo 3 Figura 8.3.
- Los datos del Megger empleado están en el Anexo 4.

Parámetros de diagnóstico	Fase A	Fase B	Fase C	Estado del aislamiento
Ka	1.78	2644	2.43	Aislamiento excelente (Tabla 3.2).
IP	2.53	2.69	2.82	Aislamiento bueno (Tabla 3.4).
CT	1094	1059	941	Aislamiento aceptable (Tabla 3.8).
RAD	1.55	1.52	1.47	Aislamiento aceptable (Tabla 3.10).
I _{abs}	1.99	1.66	1.58	Aislamiento bueno (Tabla 3.9).
DD	1.75	1.72	1.69	Aislamiento OK (Tabla 3.11).
P _v	3,00E+13	2.8E+13	2.6E+13	Aislamiento en buen estado, limpio y seco (Tabla 3.7).
ε	92	8.1	7.9	



Fig. 3.2 Comportamiento de la estabilidad de la resistencia en el tiempo, G-4 fase A.



Fig. 3.3 Comportamiento de la estabilidad de la resistencia en el tiempo, G-4 fase B.

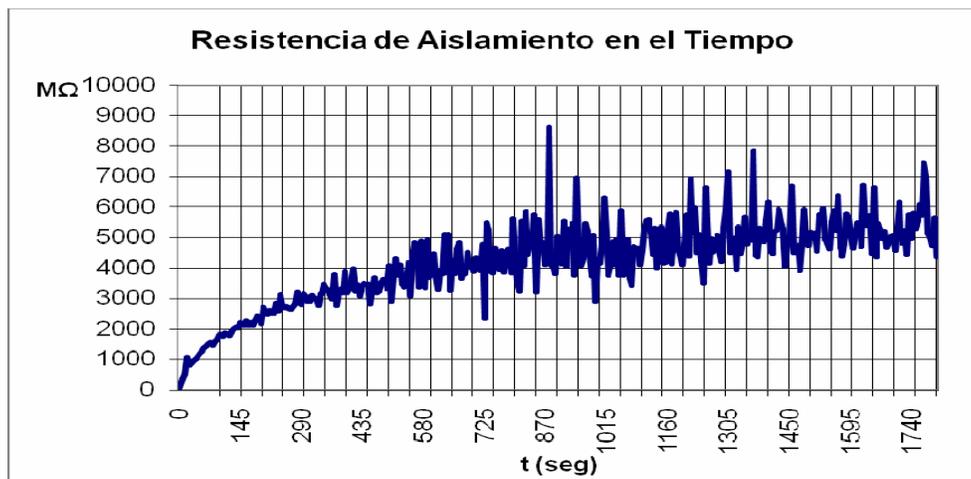


Fig. 3.4 Comportamiento de la estabilidad de la resistencia en el tiempo, G-4 fase C.

Diagnostico:

- Los aislamientos presentan muy buenas condiciones internas dadas, por la evaluación del índice de absorción el que nos dice que hay buen grado de homogeneidad y la descarga dieléctrica que las cavidades son totalmente normales, además el índice de polarización es satisfactorio. También los criterios combinados de resistividad volumétrica y permitividad estática arrojan que este está en buen estado, limpio y seco. El coeficiente de absorción arroja que el estado del aislamiento es excelente, este criterio no se debe tomar como muy acertado, pues es para aislamientos de base asfáltica y el que se ha analizado es tipo B polimérico.

- Las condiciones externas de los aislamientos no son satisfactorias, poseen cierto contenido de humedad, revelado por la valoración gráfica de la estabilidad de la resistencia de aislamiento en el tiempo. La razón de absorción dieléctrica, parámetro que se ajusta más al aislamiento ensayado, arroja un resultado aceptable, confirmando el comportamiento de las gráficas de resistencia en el tiempo de las tres fases. La constante de tiempo arroja signos de envejecimiento que resulta normal para un aislamiento de casi 30 años de explotación.

Recomendaciones:

- Efectuar el secado del aislamiento y repetir el ensayo.

El generador de esta unidad fue desmontado para reparaciones en las estaciones lluviosas del año, lo cual implica que estuvo abierto durante dos meses a merced del clima. Además en las estructuras cercanas a él se realizaban trabajos de mantenimiento, por lo cual también estaba expuesto a contaminarse con partículas sólidas. Las respectivas gráficas por fase del comportamiento de la resistencia en el tiempo demuestran como el aislamiento si fue contaminado en ese lapso de tiempo, a pesar de que los parámetros de diagnóstico arrojen buenos resultados.

Análisis de los resultados del ensayo del día 21/07/2008 (después del secado del aislamiento)

- Humedad relativa: 82% Temp. Ambiente: 35⁰ C

Parámetros de diagnóstico	Fase A	Fase B	Fase C	Estado del aislamiento
Ka	2.6	21	26	Aislamiento limpio y seco (Tabla 3.2).
IP	2.65	26	241	Aislamiento bueno (Tabla 3.4)
CT	1572	1328	1353	Aislamiento aceptable (Tabla 3.8).
RAD	1.51	1.44	1.55	Aislamiento aceptable (Tabla 3.10)
I _{abs}	1.79	1.55	1.38	Aislamiento bueno (Tabla 3.9).
DD	1.93	1.88	1.85	Aislamiento OK (Tabla 3.11).
ρ _v	4.4E+13	3E+13	3.7E+13	Aislamiento en buen estado, limpio y seco (Tabla 3.7).
ε _E	6	7	7	



Fig. 3.5 Comportamiento de la estabilidad de la resistencia en el tiempo, G-4 fase A. Después del secado.



Fig. 3.6 Comportamiento de la estabilidad de la resistencia en el tiempo, G-4 fase B. Después del secado.

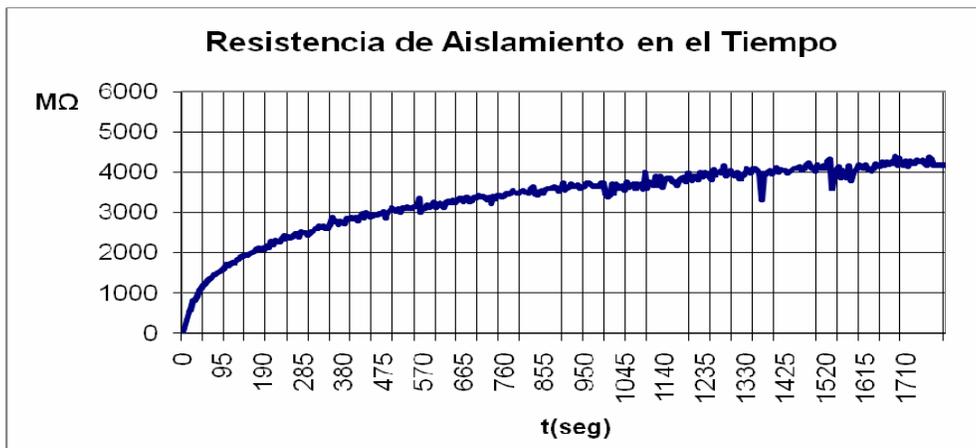


Fig. 3.7 Comportamiento de la estabilidad de la resistencia en el tiempo, G-4 fase C. Después del secado.

Diagnostico:

- El coeficiente de absorción, el índice de polarización, el índice de absorción, las descargas dieléctricas, la razón de absorción dieléctrica y la resistividad volumétrica mantuvieron sus valores respecto al ensayo anterior.
- Hay que señalar que los valores de permitividad estática disminuyeron unas unidades, demostrando que en cuanto a este parámetro las condiciones externas del aislamiento mejoraron con el secado efectuado, la constante de tiempo arrojó mejores valores, las gráficas por fase del comportamiento de la estabilidad de la resistencia en el tiempo corroboran el resultado anterior y nos dicen que el proceso de secado surtió efecto, aunque no se descarta por completo la presencia de humedad.

Recomendaciones:

- Repetir los ensayos a mediano plazo, pues aunque el aislamiento posee muy buenas condiciones, la literatura resalta la vida útil del aislamiento para 25 años, donde comienza un deterioro acelerado de sus condiciones aislantes y puede desencadenarse un fallo en un corto período de tiempo, tengamos presente que los valores de la constante de tiempo no están muy lejos de 800, valor a partir de donde ya se puede cuestionar el estado del aislamiento.

A pesar de que los ensayos no se realizaron en el momento correcto, al finalizar del proceso de secado, sino 24 horas después permitiendo en ese tiempo la entrada de humedad, estas se llevaron a cabo luego de insertado el rotor nuevamente y aún así los valores obtenidos son buenos.

3.5 “DAEMO” HERRAMIENTA PARA AUTOMATIZAR EL DIAGNÓSTICO.

En la industria es muy importante tener una disponibilidad bien alta de los equipos que intervienen en las líneas de producción y que ante una avería pudiera afectar en mayor ó menor grado la rentabilidad de la empresa en cuestión. Para lograr lo antes descrito es muy importante minimizar el tiempo de mantenimiento de los

equipos, así como el tiempo de los ensayos de diagnóstico que se le practica a cada máquina y además el tiempo para obtener el diagnóstico y recomendaciones después de practicadas las pruebas.

Con vista a lograr una automatización del diagnóstico se empleó un software que fue diseñado y elaborado por el personal técnico de la CTE que es capaz de brindar un diagnóstico y recomendaciones que puede ser de gran utilidad como una herramienta de apoyo para la toma de decisiones.



Fig. 3.8 Presentación de DAEMO

“**DAEMO**” es un software sencillo de fácil manipulación y su funcionamiento se basa en las normas cubanas establecidas para la detección de debilidades en el aislamiento de MERGP.

El software brinda la posibilidad de cargar directamente los datos de ensayo a partir de un fichero generado por el megóhmetro BM-25 de AVO Internacional y almacenado con el software Download Manager del propio Megger, con esta posibilidad el software identifica el tipo de ensayo practicado y elabora un diagnóstico y emite recomendaciones de acuerdo con lo diagnosticado.

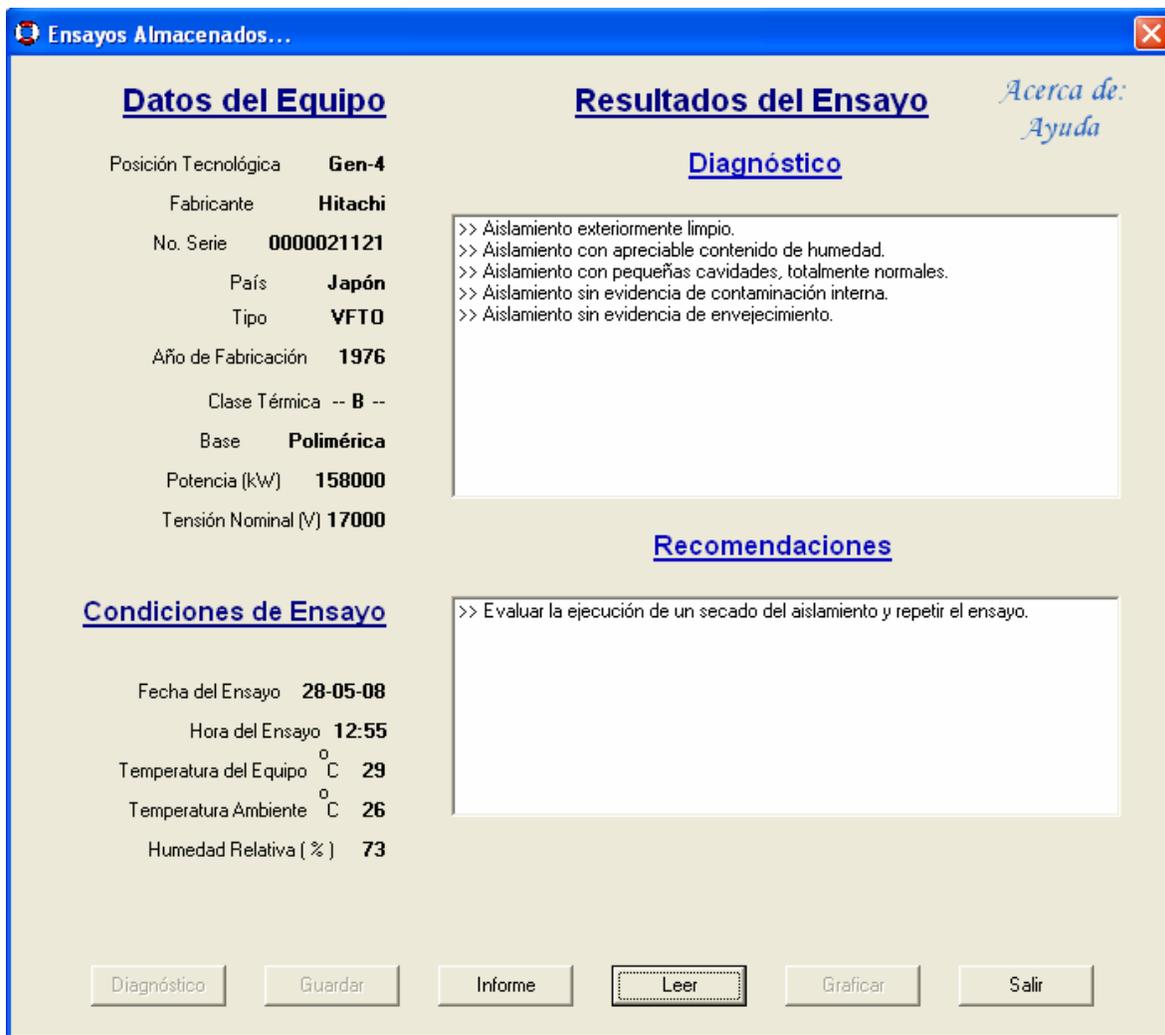


Fig. 3.9 Resultados de DAEMO

Al comparar los resultados ofrecidos por “DAEMO” con los obtenidos por la evaluación de cada uno de los parámetros de diagnóstico descritos en el epígrafe anterior se observa que el diagnóstico y las recomendaciones coinciden demostrando la factibilidad del uso de DAEMO como herramienta de apoyo para el diagnóstico del aislamiento de MERGP.

Conclusiones

4 Conclusiones

Con la culminación de un trabajo se abre una nueva etapa de evaluación y optimización de los resultados, pero siempre partiendo de la evaluación del porcentaje de cumplimiento de las metas iniciales, que se expresan en el cumplimiento de las tareas trazadas.

En el caso de este trabajo, los objetivos generales y específicos trazados fueron cumplidos satisfactoriamente llegándose a las siguientes conclusiones:

- El Sistema de Diagnóstico al Aislamiento Principal de las MERGP de la Unidad 4 de la ETE Cienfuegos, demostró ser más completo, abarcador y eficaz que la metodología usada tradicionalmente en la Industria.
- La Matriz de Fallas desarrollada indicó que los ensayos con el megóhmetro posibilitan un cubrimiento superior al 83% de los fallos relativos al aislamiento principal, indicando una elevada potencialidad de dicho dispositivo para el diagnóstico off-line del aislamiento estatórico.
- Se aplicó un Sistema de Diagnóstico novedoso que permite establecer un seguimiento confiable del estado del aislamiento de las MERGP a la vez que economiza el tiempo dedicado a los ensayos.
- El software DAEMO empleado en parte de este trabajo automatiza el diagnóstico del aislamiento eléctrico de las MERGP constituyendo una herramienta muy importante para la toma de decisiones, partiendo del diagnóstico emitido y recomendaciones propuestas por él.

Recomendaciones

5 Recomendaciones

El Diagnóstico Integral brinda un sinnúmero de posibilidades para el análisis de problemas, mediante la aplicación de su metodología en la industria cubana se pueden lograr mejoras considerables en el rendimiento del equipamiento y a la postre mejores resultados económicos que puede ser la base para el cambio del paradigma de mantenimiento imperante en la actualidad en nuestro país.

Partiendo de los resultados obtenidos en el desarrollo de este trabajo se propone:

- Modificar las normas y procedimientos vigentes en Cuba, incorporando los nuevos ensayos y criterios de evaluación del aislamiento eléctrico de las MERGP que se relacionan en el presente trabajo y que fueron presentadas por primera vez en la referencia[1].
- Difundir el Sistema de Diagnóstico empleado y el software DAEMO a las empresas de la UNE como una vía de homogenización de criterios de evaluación del diagnóstico del aislamiento eléctrico de las MERGP en la Industria.
- Continuar perfeccionando DAEMO con la incorporación de modelos y análisis de residuos para la emisión de diagnósticos.

Referencias

6 Referencias

1. Zurita García, Y., *Diagnóstico Integral de MERGP en la Empresa Termoeléctrica Cienfuegos*. 2007. **1**: p. 106.
2. Sang, B.L., et al., *An On-line Groundwall and Phase to Phase Insulation Quality Assessment Technique for AC Machine Stator Windings*. IEEE Transactions on Industry Applications, 2006. **42**(4): p. 946-957.
3. Sang, B.L., et al., *An Advanced Technique for Detecting Inter-Laminar Stator Core Faults in Large Electric Machines*. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005. **41**(5): p. 1185- 1193.
4. Bertenshaw, D., *Las mejoras en las pruebas para determinar la condición de motores de mediana y gran potencia*. FIEE, 2000: p. 12.
5. Stone, G.C., *Advancements During the Past Quarter Century in On-Line Monitoring of Motor and Generator Winding Insulation*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2002. **9**(5): p. 746 - 751.
6. Yue, B., et al., *Diagnosis of Stator Winding Insulation of Large Generator Based on Partial Discharge Measurement*. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006. **21**(2): p. 387-395.
7. Bartnikas, R. and R. Morin, *Analysis of Multistress-Accelerated Aged Stator Bars Using a Three-Phase Test Arrangement*. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006. **21**(1): p. 162-170.
8. Hidalgo B., J.C., *Análisis de las Zonas de Falla de Motores Eléctricos*.
9. Dorrbercker Drake, S.A., et al. *Obtención de la Matriz de Falla de los Motores de Inducción*. in *FIE'06 (Primera Jornada Técnica de CIGRE en Cuba)*. 2006. Santiago de Cuba: CSIC.
10. Odriozola Arteaga, L., *Evaluación del Estado del Aislamiento en Bobinados de Máquinas Eléctricas Rotativas*. anales de mecánica y electricidad, 2004: p. 26-33.
11. Cabanas, M.F., et al., *Técnicas para el Mantenimiento Predictivo y Diagnóstico de Máquinas Eléctricas Rotativas*. . p. 383.
12. Dorrbercker Drake, S.A. and Y. Zurita García, *Nuevos Criterios y Automatización del Diagnóstico mediante los Ensayos de Resistencia de Aislamiento*. CIE-2007, 2007: p. 4.

13. Stone, G.C., et al., *Electrical Insulation for Rotating Machines : Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair*. 1 ed. IEEE Press Series on Power Engineering. 2004: Wiley-IEEE Press. 392.
14. Esparza Saucedo, M. and E. Ponce de León Viedas, *Diagnóstico Integral del Devanado del Estator de Generadores*. CIGRÉ-MÉXICO, 2001: p. 8.
15. Saucedo, I.M.E. and I.E.P.d.L. Viedas, *Diagnóstico Integral del Devanado del Estator de Generadores*. CIGRÉ-MÉXICO, 2001: p. 8.
16. Zhu, H., V. Green, and D. Huynh, *Application of On-Line PD Testing Technology to Extend Lifetime of Stator Winding Insulation*, ADWEL International: Toronto, Ontario, Canada. p. 7.
17. Campbell, B.H. and G.C. Stone. *Investigations into the Use of Temperature Detectors as Stator Winding Partial Discharge Detectors*. in *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. 2006.
18. Fenger, M. and G.C. Stone, *A Novel Continuous On-Line PD Monitor for Motors, Switchgear and Dry-Type Transformers*. IEEE-MARCON p. 12.
19. Tetrault, S.M., G.C. Stone, and H.G. Sedding, *Monitoring Partial Discharges on 4-kV Motor Windings*. IEEE Transactions on Industry Applications, 1999. **35**(3): p. 682 - 688.
20. Zhu, H., et al., *Recent Improvement in Detection Sensitivity of PD Monitoring of Motors*, ADWEL International Ltd.: Toronto, Ontario, Canada. p. 7.
21. Campbell, S.R., et al., *Practical On-Line Partial Discharge Tests for Turbine Generators and Motors*. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1994. **9**(2): p. 281 - 287.
22. Han, Y. and Y.H. Song, *Using Improved Self-Organizing Map for Partial Discharge Diagnosis of Large Turbogenerators*. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2003. **18**(3): p. 392-399.
23. Lloyd, B.A., S.R. Campbell, and G.C. Stone, *Continuous On-Line Partial Discharge Monitoring of Generator Stator Windings*. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999. **14**(4): p. 1131 - 1138
24. Lyles, J.F., G.C. Stone, and M. Kurtz, *Experience with PDA Diagnostic Testing on Hydraulic Generators*. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1988. **3**(4): p. 824 - 832.
25. Sedding, H.G., et al., *A New Sensor for Detecting Partial Discharges in Operating Turbine Generators*. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1991. **6**(4): p. 700 - 706.
26. Stone, G.C., et al., *The Ability of Diagnostic Tests to Estimate the Remaining Life of Stator Insulation*. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1988. **3**(4): p. 833 - 841.

27. Stone, G.C. and V. Warren, *Objective Methods to Interpret Partial-Discharge Data on Rotating-Machine Stator Windings*. IEEE Transactions on Industry Applications, 2006. **42**(1): p. 195-200.
28. Sedding, H.G. and G.C. Stone, *A Discharge Locating Probe for Rotating Machines*. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1989. **5**(5): p. 14 - 17.
29. *Analog ELCID-Model 201 vs. Digital ELCID-Model 601*.
30. Paley, D.B., *Current Low Power Core Testing Using ELCID*, in *IEE Colloquium - Understanding your condition monitoring*.
31. Zhu, H., et al. *Partial Discharge Database: Its Benefits and Limitations on Assessment of Stator Insulation Deterioration*. in *IEEE Electrical Insulation Conference*. 2001. Cincinnati.
32. Bertenshaw, D. *Improvements in Testing Stator Core Condition of Medium to Large Motors*. in *CWIEME Conference*. 2000. Berlin.
33. *Nociones sobre los motores eléctricos*. 2003 [cited; Available from: <http://www.imponarbombas.com/pdf/Nociones%20sobre%20los%20motores%20electricos%20d>].
34. Suárez Olivares, L.M., O. Vejo Rodríguez, and C. Falla Aguilera, *Generadores, Mantenimiento y Reparación*, ed. E.d.M.a.C.E. Departamento de Capacitación. Vol. Capítulo 6. 2000.
35. Jones, D.O., et al., *Guía para pruebas de diagnóstico de aislamiento*. Megger, 2002: p. 18-20
36. CIPEL, *INA 01-03-13 Ensayo de Resistencia de Aislamiento del devanado del estator de las Máquinas Eléctricas Rotatorias de Gran Potencia*. 2000. p. 19.

Bibliografía

7 Bibliografía

1. Dorrbercker Drake, S.A. “Vida Residual del Aislamiento de los Motores de Inducción de Gran Potencia”, in ALTAE 2001, C. de la Habana, Cuba, 2001.
2. Dorrbercker Drake, S.A. “Introducción al Estudio de las Descargas Parciales”, Edición 1, Volumen 1, CIPEL, C. de la Habana, Cuba, 1999.
3. Dorrbercker Drake, S.A. “Monografía de Materiales Electrotécnico”, 2006.
4. Dorrbercker Drake, S.A. “Notas de Clase de la Asignatura Diagnóstico de Motores y Generadores Eléctricos”, Especialidad Diagnóstico Integral de Sistemas Eléctricos de Potencia, 2006.
5. Fernández García, S.J. “Diagnóstico, Táctica y Estrategia”, Energética. 1999, pag 47-53.
6. Fernández García, S.J. “Folleto Digital de Diagnóstico Integral de CCEE y SSEE”, 2006.
7. Fernández García, S.J. “Notas de clase de las asignaturas Diagnóstico Integral y Diagnóstico Integral de Centrales y Subestaciones Eléctricas”, Especialidad Diagnóstico Integral de Sistemas Eléctricos de Potencia, 2006.

Anexos

8 Anexos

Anexo 1. Tablas

Valores registrados por el Megger en el ensayo del día 28/05/2008.

Tabla 8.1 Generador 4 fase A

Tiempo (seg)	Resist (MΩ)	I(μA)	Tensión (V)
0	0	0	0
5	159,2	31,5	5013
10	354,5	14,22	5040
15	534,8	9,424	5040
20	929,5	5,422	5040
25	787	6,406	5042
30	893,7	5,64	5040
35	991,9	5,082	5040
40	1062	4,745	5040
45	1143	4,411	5040
50	1238	4,072	5040
55	1311	3,843	5040
60	1388	3,631	5039
65	1442	3,494	5039
70	1528	3,297	5039
75	1521	3,313	5039
80	1574	3,201	5039
85	1709	2,948	5039
90	1746	2,885	5038
95	1763	2,857	5039
100	1817	2,773	5039
105	1656	3,044	5040
110	1966	2,564	5042
115	1997	2,523	5039
120	1977	2,55	5040
125	1938	2,603	5043
130	2172	2,322	5042
135	2140	2,357	5043
140	2232	2,259	5042
145	2291	2,201	5042
150	2274	2,217	5042
155	2322	2,171	5042
160	2368	2,129	5042
165	2424	2,08	5042
170	2376	2,122	5042
175	2526	1,996	5042
185	2576	1,956	5040

Tiempo (seg)	Resist (MΩ)	I(μA)	Tensión (V)
190	2576	1,957	5040
195	2669	1,888	5039
200	2628	1,918	5040
205	2677	1,882	5039
210	2793	1,804	5039
215	2884	1,747	5038
220	2865	1,759	5038
225	2778	1,813	5038
230	2851	1,767	5036
235	2895	1,74	5036
240	2913	1,729	5036
245	2916	1,727	5036
250	2924	1,723	5038
255	2987	1,686	5036
260	2980	1,69	5038
265	3009	1,674	5036
270	3198	1,575	5036
275	2747	1,833	5035
280	2997	1,681	5035
285	3259	1,545	5036
290	3393	1,484	5035
295	3410	1,476	5035
300	3833	1,314	5035
305	3221	1,563	5035
310	3400	1,481	5035
315	3622	1,39	5035
320	3400	1,481	5036
325	3519	1,432	5038
330	3606	1,397	5036
335	3472	1,451	5036
340	3693	1,364	5036
345	3547	1,42	5036
350	3556	1,416	5036
355	3383	1,49	5039
360	3770	1,336	5038
365	3929	1,282	5038
370	3775	1,334	5038

Anexos

Tiempo (seg)	Resist (MΩ)	I(μA)	Tensión (V)
375	3794	1,326	5036
380	3795	1,327	5036
385	3773	1,335	5036
390	3862	1,304	5036
395	3886	1,296	5035
400	3980	1,265	5035
405	3865	1,303	5035
410	3866	1,302	5035
415	4007	1,257	5035
420	3952	1,274	5035
425	4300	1,171	5033
430	3835	1,313	5033
435	3787	1,329	5033
440	4057	1,241	5035
445	4055	1,242	5035
450	4085	1,232	5033
455	4013	1,255	5035
460	4053	1,242	5033
465	4098	1,228	5033
470	5991	0,8397	5031
475	4425	1,136	5027
480	4184	1,202	5027
485	4289	1,172	5028
490	4120	1,22	5028
495	4348	1,157	5028
500	4147	1,213	5029
505	4369	1,151	5028
510	4164	1,207	5028
515	4390	1,146	5029
520	4331	1,161	5028
525	4735	1,062	5027
530	4190	1,2	5027
535	4131	1,217	5027
540	4275	1,176	5028
545	4242	1,185	5027
550	4273	1,177	5028
555	4227	1,19	5028
560	4077	1,233	5028
565	4454	1,129	5028
570	4458	1,128	5028
575	5073	0,9905	5025
580	4358	1,153	5027
585	4366	1,151	5027
590	4440	1,132	5027
595	4588	1,096	5027
600	4506	1,116	5027
605	4320	1,164	5027
610	4534	1,109	5028
615	4455	1,129	5028
620	4498	1,118	5028
625	4194	1,199	5029
630	4523	1,112	5029

Tiempo (seg)	Resist (MΩ)	I(μA)	Tensión (V)
635	4813	1,045	5029
640	4483	1,122	5031
645	4670	1,077	5031
650	4561	1,103	5031
655	4607	1,092	5031
660	4594	1,095	5031
665	4579	1,099	5031
670	4579	1,099	5032
675	4625	1,088	5032
680	4596	1,095	5031
685	5504	0,9138	5029
690	5009	1,004	5028
695	4889	1,029	5029
700	4432	1,135	5029
705	4721	1,065	5029
710	4905	1,025	5029
715	4583	1,098	5029
720	4769	1,055	5029
725	4922	1,022	5029
730	4747	1,06	5031
735	4741	1,061	5031
740	4592	1,096	5031
745	5099	0,9865	5031
750	4814	1,045	5032
755	4728	1,064	5032
760	4430	1,136	5033
765	4838	1,041	5035
770	5358	0,9395	5033
775	4459	1,129	5033
780	4862	1,035	5035
785	5133	0,9806	5033
790	4931	1,021	5033
795	4932	1,021	5035
800	4747	1,061	5035
805	4932	1,021	5035
810	5146	0,9782	5033
815	5072	0,9924	5033
820	4959	1,015	5033
825	4319	1,166	5035
830	4885	1,031	5036
835	4914	1,025	5036
840	4975	1,012	5036
845	4765	1,057	5038
850	5200	0,9685	5036
855	4755	1,059	5036
860	4915	1,025	5038
865	5055	0,9965	5038
870	5041	0,9992	5038
875	5130	0,9821	5038
880	5224	0,9644	5038
885	5646	0,892	5036
890	5109	0,9858	5036

Anexos

Tiempo (seg)	Resist (MΩ)	I(μA)	Tensión (V)
895	5342	0,9427	5036
900	5512	0,9135	5035
905	4826	1,044	5036
910	5379	0,9361	5035
915	5793	0,8692	5035
920	5259	0,957	5033
925	5376	0,9363	5033
930	5149	0,9778	5035
935	5339	0,9427	5033
940	5405	0,9313	5033
945	5531	0,9097	5032
950	5648	0,8912	5033
955	5117	0,9836	5033
960	5278	0,9534	5032
965	5764	0,873	5032
970	5269	0,955	5032
975	5450	0,9234	5032
980	5256	0,9575	5032
985	5107	0,9854	5032
990	5448	0,9239	5033
995	5512	0,9132	5033
1000	5150	0,9773	5033
1005	9619	0,523	5031
1010	5432	0,9259	5029
1015	5052	0,9958	5031
1020	5516	0,9118	5029
1025	5079	0,9905	5031
1030	5118	0,983	5031
1035	5332	0,9434	5031
1040	5868	0,8573	5031
1045	5035	0,9991	5031
1050	5726	0,8786	5031
1055	5676	0,8863	5031
1060	5360	0,9385	5031
1065	5217	0,9643	5031
1070	6858	0,7332	5028
1075	5404	0,9304	5028
1080	5035	0,9985	5028
1085	5296	0,9494	5028
1090	5037	0,9985	5029
1095	5831	0,8626	5029
1100	5324	0,9447	5029
1105	5533	0,909	5029
1110	5581	0,9012	5029
1115	5473	0,9189	5029
1120	5733	0,8772	5029
1125	5151	0,9764	5029
1130	5505	0,9136	5029
1135	5340	0,9418	5029
1140	5656	0,8893	5029
1145	5597	0,8986	5029
1150	5665	0,8881	5031

Tiempo (seg)	Resist (MΩ)	I(μA)	Tensión (V)
1155	5463	0,9208	5031
1160	5572	0,9029	5031
1165	5666	0,8877	5029
1170	5690	0,884	5029
1175	5871	0,8567	5029
1180	5431	0,9261	5029
1185	5437	0,9253	5031
1190	5587	0,9005	5031
1195	5799	0,8675	5031
1200	5538	0,9085	5031
1205	5889	0,8543	5031
1210	5811	0,8657	5031
1215	6141	0,819	5029
1220	4410	1,141	5031
1225	5247	0,9594	5033
1230	5539	0,9087	5033
1235	5636	0,8931	5033
1240	5838	0,8622	5033
1245	5616	0,8962	5033
1250	6011	0,8376	5035
1255	5693	0,8841	5033
1260	6013	0,837	5033
1265	5532	0,9098	5033
1270	6407	0,7856	5033
1275	5607	0,8977	5033
1280	6073	0,8288	5033
1285	5916	0,8508	5033
1290	6367	0,7903	5032
1295	6083	0,8273	5032
1300	5921	0,8499	5032
1305	5618	0,8958	5032
1310	6000	0,0409	5027
1315	6952	0,7226	5024
1320	5905	0,8508	5024
1325	6159	0,8157	5024
1330	6445	0,7793	5023
1335	6043	0,8311	5023
1340	5779	0,8691	5023
1345	5627	0,8927	5023
1350	5893	0,8525	5024
1355	5859	0,8575	5024
1360	6187	0,812	5024
1365	6090	0,825	5024
1370	5860	0,8573	5024
1375	6230	0,8065	5024
1380	6022	0,8345	5025
1385	5570	0,9023	5025
1390	5638	0,8916	5027
1395	5994	0,8387	5027
1400	5913	0,8501	5027
1405	5851	0,8591	5027
1410	5471	0,9189	5027

Anexos

Tiempo (seg)	Resist (MΩ)	I(μA)	Tensión (V)
1415	5723	0,8785	5028
1420	5929	0,8478	5027
1425	5033	0,9992	5029
1430	5932	0,8481	5031
1435	5853	0,8597	5032
1440	5988	0,8401	5031
1445	6054	0,831	5031
1450	6075	0,8278	5029
1455	6326	0,7953	5031
1460	6255	0,8043	5031
1465	6055	0,8309	5031
1470	6890	0,7301	5031
1475	5975	0,842	5031
1480	6278	0,8013	5031
1485	6318	0,7962	5031
1490	6286	0,8003	5031
1495	6310	0,797	5029
1500	5889	0,8543	5031
1505	5935	0,8474	5029
1510	6396	0,7863	5029
1515	5924	0,8493	5031
1520	6464	0,778	5029
1525	6045	0,8323	5031
1530	6100	0,8247	5031
1535	6080	0,8275	5031
1540	5891	0,8539	5031
1545	6621	0,7598	5031
1550	6048	0,8318	5031
1555	6355	0,7916	5031
1560	6448	0,7802	5031
1565	6188	0,8128	5029
1570	5786	0,8694	5031
1575	5764	0,8728	5031
1580	6488	0,7753	5031
1585	6320	0,796	5031
1590	5965	0,8434	5031
1595	6424	0,7832	5031
1600	6185	0,8134	5031
1605	6326	0,7952	5031
1610	6661	0,7552	5031
1615	6562	0,7667	5031
1620	6155	0,8174	5031
1625	5833	0,8625	5031
1630	6882	0,731	5031
1635	5981	0,8412	5031
1640	6448	0,7803	5031
1645	6585	0,764	5031
1650	5831	0,863	5032
1655	6325	0,7954	5031
1660	6578	0,765	5032
1665	5909	0,8516	5032
1670	6114	0,823	5032

Tiempo (seg)	Resist (MΩ)	I(μA)	Tensión (V)
1675	5573	0,903	5032
1680	5715	0,8807	5033
1685	6024	0,8355	5033
1690	6286	0,8007	5033
1695	6831	0,7369	5033
1700	6102	0,8251	5035
1705	6856	0,7344	5035
1710	6088	0,827	5035
1715	7486	0,6726	5035
1720	6368	0,7907	5035
1725	5808	0,8667	5033
1730	6084	0,8276	5035
1735	6242	0,8064	5033
1740	6280	0,8015	5033
1745	6673	0,7546	5035
1750	6404	0,7862	5035
1755	6404	0,7862	5035

Tabla 8.2 Generador 4 fase B.

Tiempo (seg)	Resist (MΩ)	I(μA)	Tensión (V)
0	0	0	0
5	189,9	26,3	4997
10	375,9	13,4	5020
15	483,1	10,4	5025
20	4617	1,09	5028
25	763,5	6,59	5032
30	854,9	5,89	5032
35	938,6	5,36	5032
40	1010	4,98	5033
45	1074	4,69	5035
50	1176	4,28	5035
55	1217	4,14	5035
60	1302	3,87	5036
65	1348	3,74	5038
70	1388	3,63	5038
75	1456	3,46	5038
80	1518	3,32	5039
85	1563	3,22	5039
90	1594	3,16	5039
95	1663	3,03	5040
100	1733	2,91	5040
105	1744	2,89	5040
110	1809	2,79	5040
115	2124	2,37	5038
120	1803	2,79	5036
125	1806	2,79	5040
130	1917	2,63	5042
135	1965	2,57	5043
140	2029	2,49	5042
145	2060	2,45	5043
150	2087	2,42	5043
155	2134	2,36	5044
160	2150	2,35	5043
165	2210	2,28	5044
170	2584	1,95	5036
175	2260	2,23	5032
180	2217	2,27	5032
185	2184	2,31	5035
190	2891	1,74	5035
195	2259	2,23	5035
200	2322	2,17	5036
205	2383	2,12	5039
210	2362	2,13	5040
215	2433	2,07	5042
220	2488	2,03	5042

Tiempo (seg)	Resist (MΩ)	I(μA)	Tensión (V)
225	2509	2,01	5042
230	2566	1,97	5043
235	2564	1,97	5042
240	2568	1,96	5043
245	2673	1,89	5043
250	2692	1,87	5043
255	2706	1,86	5043
260	2720	1,85	5043
265	2787	1,81	5043
270	2765	1,82	5043
275	2784	1,81	5043
280	2864	1,76	5043
285	2860	1,76	5043
290	2860	1,76	5043
295	2867	1,76	5043
300	2795	1,81	5044
305	2905	1,74	5044
310	2954	1,71	5044
315	2918	1,73	5044
320	3007	1,68	5044
325	3008	1,68	5044
330	3019	1,67	5044
335	3053	1,65	5043
340	3095	1,63	5043
345	3019	1,67	5044
350	3091	1,63	5044
355	2965	1,7	5046
360	3104	1,63	5046
365	3140	1,61	5046
370	3207	1,57	5046
375	3157	1,6	5046
380	3208	1,57	5046
385	3153	1,6	5046
390	3339	1,51	5046
395	3178	1,59	5046
400	3266	1,55	5046
405	3278	1,54	5046
410	3182	1,59	5046
415	3196	1,58	5046
420	3267	1,55	5047
425	3375	1,5	5047
430	3343	1,51	5047
435	3328	1,52	5047
440	3376	1,5	5047
445	3351	1,51	5047

Anexos

Tiempo (seg)	Resist (MΩ)	I(μA)	Tensión (V)
450	3420	1,48	5047
455	3295	1,53	5047
460	3447	1,46	5048
465	3361	1,5	5048
470	3457	1,46	5048
475	3553	1,42	5047
480	3550	1,40	5047
485	3421	1,48	5048
490	3630	1,39	5047
495	3452	1,46	5047
500	3492	1,45	5047
505	3536	1,43	5048
510	3716	1,36	5048
515	3582	1,41	5047
520	3705	1,36	5047
525	3588	1,41	5048
530	3619	1,4	5048
535	3749	1,35	5048
540	3608	1,4	5047
545	3661	1,38	5048
550	3664	1,38	5047
555	3769	1,34	5047
560	3655	1,38	5048
565	3624	1,39	5048
570	3821	1,32	5047
575	3747	1,35	5047
580	3754	1,34	5047
585	3867	1,31	5047
590	3678	1,37	5047
595	3732	1,35	5047
600	3847	1,31	5047
605	3762	1,34	5047
610	3731	1,35	5047
615	3946	1,28	5047
620	3889	1,3	5047
625	4042	1,25	5047
630	3791	1,33	5046
635	3874	1,3	5047
640	3883	1,3	5046
645	3918	1,29	5047
650	4096	1,23	5043
655	4158	1,21	5042
660	3783	1,33	5042
665	3928	1,28	5043
670	4041	1,25	5042
675	3864	1,31	5043
680	3992	1,26	5043

Tiempo (seg)	Resist (MΩ)	I(μA)	Tensión (V)
685	3902	1,29	5043
690	3981	1,27	5043
695	4221	1,2	5043
700	4001	1,26	5043
705	3900	1,29	5043
710	3954	1,28	5044
715	3905	1,29	5044
720	3830	1,32	5044
725	4061	1,24	5044
730	4043	1,25	5044
735	4041	1,25	5046
740	4168	1,21	5044
745	4066	1,24	5046
750	4505	1,12	5039
755	3892	1,3	5040
760	3750	1,34	5040
765	3792	1,33	5042
770	3843	1,31	5042
775	4090	1,23	5043
780	3997	1,26	5043
785	4105	1,23	5044
790	4066	1,24	5044
795	4139	1,22	5046
800	4298	1,17	5044
805	4196	1,2	5044
810	4133	1,22	5044
815	4220	1,2	5044
820	4011	1,26	5044
825	4374	1,15	5044
830	4429	1,14	5043
835	4289	1,18	5043
840	4271	1,18	5043
845	4177	1,21	5044
850	4369	1,15	5043
855	4278	1,18	5044
860	4215	1,2	5044
865	4228	1,19	5044
870	4368	1,16	5044
875	4359	1,16	5044
880	4326	1,17	5044
885	4231	1,19	5046
890	4185	1,21	5044
895	4528	1,11	5044
900	4346	1,16	5044
905	4400	1,15	5044
910	4217	1,2	5044
915	4248	1,19	5046

Anexos

Tiempo (seg)	Resist (MΩ)	I(μA)	Tensión (V)
920	4380	1,15	5046
925	4350	1,16	5044
930	4371	1,15	5044
935	4422	1,14	5044
940	4468	1,13	5044
945	4469	1,13	5044
950	4514	1,12	5044
955	4573	1,1	5043
960	4726	1,07	5042
965	4230	1,19	5042
970	4318	1,17	5043
975	4759	1,06	5042
980	4310	1,17	5042
985	4403	1,15	5042
990	4413	1,14	5042
995	5158	0,98	5040
1000	5162	0,98	5039
1005	4700	1,07	5039
1010	4270	1,18	5039
1015	4219	1,2	5040
1020	4178	1,21	5042
1025	4310	1,17	5042
1030	4212	1,2	5042
1035	4790	1,05	5043
1040	4331	1,16	5042
1045	4325	1,17	5043
1050	4427	1,14	5043
1055	4482	1,13	5043
1060	4612	1,09	5044
1065	4604	1,1	5043
1070	4398	1,15	5044
1075	4581	1,1	5043
1080	5391	0,94	5043
1085	4623	1,09	5042
1090	4459	1,13	5042
1095	4394	1,15	5042
1100	4365	1,16	5043
1105	4762	1,06	5043
1110	4429	1,14	5043
1115	4471	1,13	5043
1120	4677	1,08	5043
1125	4599	1,1	5043
1130	4783	1,06	5044
1135	4704	1,07	5044
1140	4597	1,1	5044
1145	4731	1,07	5043
1150	4604	1,1	5043

Tiempo (seg)	Resist (MΩ)	I(μA)	Tensión (V)
1155	4963	1,02	5042
1160	4534	1,11	5043
1165	4636	1,09	5043
1170	4532	1,11	5043
1175	4680	1,08	5043
1180	4707	1,07	5044
1185	4700	1,07	5043
1190	4556	1,11	5044
1195	4847	1,04	5044
1200	4770	1,06	5044
1205	4556	1,11	5044
1210	4506	1,12	5043
1215	4252	1,19	5044
1220	4638	1,09	5044
1225	4730	1,07	5044
1230	5294	0,95	5044
1235	5052	1	5039
1240	4586	1,1	5040
1245	4421	1,14	5040
1250	4473	1,13	5043
1255	4730	1,07	5043
1260	4561	1,11	5044
1265	4693	1,08	5044
1270	4757	1,06	5046
1275	4895	1,03	5044
1280	4804	1,05	5044
1285	4894	1,03	5044
1290	5041	1	5044
1295	4854	1,04	5044
1300	4907	1,03	5044
1305	5858	0,86	5043
1310	6330	0,8	5038
1315	4658	1,08	5036
1320	4296	1,17	5039
1325	4497	1,12	5040
1330	4547	1,11	5043
1335	4622	1,09	5043
1340	4734	1,07	5044
1345	4870	1,04	5043
1350	4555	1,11	5044
1355	4892	1,03	5044
1360	4744	1,06	5044
1365	7073	0,71	5043
1370	4818	1,05	5043
1375	4870	1,04	5042
1380	4788	1,05	5043
1385	4852	1,04	5043

Anexos

Tiempo (seg)	Resist (MΩ)	I(μA)	Tensión (V)
1390	5160	0,98	5043
1395	8768	0,57	5039
1400	6323	0,8	5035
1405	4566	1,1	5033
1410	4393	1,15	5036
1415	7234	0,7	5036
1420	6594	0,76	5029
1425	4740	1,06	5031
1430	4867	1,03	5029
1435	4376	1,15	5031
1440	4402	1,14	5033
1445	4973	1,01	5036
1450	4431	1,14	5036
1455	4314	1,17	5038
1460	4698	1,07	5039
1465	4699	1,07	5040
1470	4273	1,18	5042
1475	4412	1,14	5044
1480	4938	1,02	5044
1485	5435	0,93	5044
1490	5117	0,99	5044
1495	4857	1,04	5044
1500	5795	0,87	5043
1505	4920	1,03	5043
1510	4866	1,04	5042
1515	4729	1,07	5043
1520	5505	0,92	5042
1525	4872	1,04	5042
1530	5074	0,99	5040
1535	5016	1,01	5042
1540	4745	1,06	5042
1545	4885	1,03	5042
1550	4972	1,01	5042
1555	4945	1,02	5043
1560	5066	1	5043
1565	4920	1,03	5043
1570	4629	1,09	5043
1575	5053	1	5044
1580	14540	0,35	5040
1585	26790	0,19	5031
1590	9926	0,51	5027
1595	5031	1	5027
1600	4534	1,11	5027
1605	4188	1,2	5029
1610	4433	1,14	5032
1615	4453	1,13	5035
1620	4833	1,04	5035

Tiempo (seg)	Resist (MΩ)	I(μA)	Tensión (V)
1625	6665	0,76	5032
1630	4094	1,23	5036
1635	4567	1,1	5036
1640	4714	1,07	5039
1645	14550	0,35	5035
1650	5609	0,9	5031
1655	7148	0,7	5025
1660	4628	1,09	5027
1665	4630	1,09	5029
1670	4330	1,16	5031
1675	4637	1,09	5033
1680	4878	1,03	5035
1685	5408	0,93	5032
1690	4510	1,12	5035
1695	4490	1,12	5036
1700	4433	1,14	5039
1705	4798	1,05	5040
1710	4417	1,14	5043
1715	4345	1,16	5046
1720	5148	0,98	5047
1725	5404	0,93	5046
1730	5061	1	5046
1735	5225	0,97	5046
1740	5312	0,95	5044
1745	4587	1,1	5046
1750	5145	0,98	5044
1755	5111	0,99	5046
1760	5089	0,99	5046
1765	5632	0,9	5043
1770	4383	1,15	5044
1775	4994	1,01	5047
1780	5236	0,96	5047
1785	5282	0,96	5047
1790	5552	0,91	5047
1795	5739	0,88	5046
1800	5363	0,94	5047

Tabla 8.3 Generador 4 fase C.

Tiempo (seg)	Resist (MΩ)	I(μA)	Tensión (V)
0	0	0	0
5	162,8	30,8	5019
10	362,5	13,9	5043
15	520,1	9,7	5047
20	628,4	8,04	5050
25	781,5	6,46	5051
30	859,6	5,88	5051
35	933,8	5,41	5052
40	1012	5	5052
45	1108	4,56	5052
50	1156	4,37	5052
55	1233	4,1	5052
60	1269	3,98	5052
65	1347	3,75	5052
70	1398	3,61	5052
75	1422	3,56	5054
80	1511	3,35	5054
85	1538	3,29	5054
90	1572	3,21	5054
95	1650	3,06	5054
100	1668	3,03	5054
105	1690	2,99	5055
110	1772	2,85	5055
115	1815	2,79	5055
120	1825	2,77	5054
125	1890	2,68	5055
130	1943	2,6	5054
135	1919	2,63	5055
140	1987	2,55	5055
145	2006	2,52	5055
150	1964	2,57	5055
155	2098	2,41	5056
160	2100	2,41	5055
165	2158	2,34	5055
170	2186	2,31	5055
175	2194	2,31	5055
180	2271	2,23	5055
185	2187	2,31	5055
190	2298	2,2	5055
195	2347	2,15	5055
200	2320	2,18	5055
205	2340	2,16	5055
210	2419	2,09	5056
215	2391	2,11	5055
220	2434	2,08	5055

Tiempo (seg)	Resist (MΩ)	I(μA)	Tensión (V)
225	2474	2,04	5055
230	2458	2,06	5055
235	2529	2	5055
240	2493	2,03	5056
245	2594	1,95	5055
250	2560	1,98	5056
255	2493	2,03	5056
260	2548	1,99	5058
265	2630	1,92	5056
270	2662	1,9	5058
275	2666	1,9	5056
280	2691	1,88	5058
285	2705	1,87	5058
290	2748	1,84	5056
295	2752	1,84	5056
300	2778	1,82	5058
305	2808	1,8	5058
310	2803	1,8	5056
315	2813	1,8	5058
320	2851	1,77	5058
325	2847	1,78	5058
330	2903	1,74	5058
335	2891	1,75	5058
340	2926	1,73	5058
345	2927	1,73	5058
350	2939	1,72	5058
355	2975	1,7	5058
360	3036	1,67	5058
365	2980	1,7	5058
370	3015	1,68	5058
375	3032	1,67	5058
380	3013	1,68	5058
385	3053	1,66	5058
390	3064	1,65	5058
395	3111	1,63	5058
400	3101	1,63	5058
405	3100	1,63	5058
410	3172	1,6	5058
415	3111	1,63	5058
420	3152	1,61	5058
425	3162	1,6	5058
430	3156	1,6	5058
435	3179	1,59	5058
440	3186	1,59	5058
445	3243	1,56	5058

Anexos

Tiempo (seg)	Resist (MΩ)	I(μA)	Tensión (V)
450	3240	1,56	5058
455	3241	1,56	5058
460	3288	1,54	5059
465	3272	1,55	5059
470	3299	1,53	5058
475	3289	1,54	5058
480	3295	1,54	5059
485	3362	1,5	5058
490	3338	1,52	5058
495	3370	1,5	5058
500	3383	1,5	5058
505	3391	1,49	5058
510	3391	1,49	5058
515	3411	1,48	5058
520	3383	1,5	5058
525	3427	1,48	5058
530	3455	1,46	5059
535	3463	1,46	5058
540	3474	1,46	5058
545	3487	1,45	5058
550	3473	1,46	5058
555	3510	1,44	5059
560	3519	1,44	5058
565	3514	1,44	5059
570	3546	1,43	5058
575	3538	1,43	5058
580	3550	1,43	5059
585	3554	1,42	5058
590	3587	1,41	5059
595	3595	1,41	5058
600	3586	1,41	5058
605	3626	1,4	5058
610	3631	1,39	5059
615	3633	1,39	5059
620	3625	1,4	5059
625	3635	1,39	5059
630	3642	1,39	5058
635	3705	1,37	5059
640	3660	1,38	5058
645	3701	1,37	5059
650	3693	1,37	5058
655	3716	1,36	5059
660	3716	1,36	5059
665	3688	1,37	5059
670	3775	1,34	5059
675	3756	1,35	5058
680	3806	1,33	5059

Tiempo (seg)	Resist (MΩ)	I(μA)	Tensión (V)
685	3732	1,36	5059
690	3803	1,33	5059
695	3741	1,35	5059
700	3794	1,33	5059
705	3802	1,33	5058
710	3814	1,33	5059
715	3829	1,32	5058
720	3838	1,32	5059
725	3837	1,32	5059
730	3859	1,31	5059
735	3855	1,31	5058
740	3855	1,31	5059
745	3862	1,31	5059
750	3907	1,3	5059
755	3899	1,3	5059
760	3899	1,3	5059
765	3889	1,3	5059
770	3922	1,29	5059
775	3894	1,3	5059
780	3925	1,29	5059
785	3931	1,29	5059
790	3943	1,28	5059
795	3956	1,28	5058
800	3985	1,27	5059
805	3946	1,28	5059
810	3969	1,28	5059
815	3969	1,28	5059
820	3975	1,27	5059
825	4002	1,26	5059
830	3996	1,27	5059
835	4038	1,25	5059
840	3993	1,27	5059
845	4088	1,24	5059
850	4014	1,26	5058
855	4026	1,26	5059
860	4029	1,26	5059
865	4054	1,25	5059
870	4071	1,24	5059
875	4095	1,24	5059
880	4028	1,26	5059
885	4048	1,25	5059
890	4052	1,25	5058
895	4122	1,23	5059
900	4064	1,25	5059
905	4089	1,24	5059
910	4101	1,23	5058
915	4123	1,23	5059

Anexos

Tiempo (seg)	Resist (MΩ)	I(μA)	Tensión (V)
920	4118	1,23	5058
925	4127	1,23	5059
930	4137	1,22	5059
935	4140	1,22	5059
940	4136	1,22	5059
945	4177	1,21	5059
950	4180	1,21	5058
955	4148	1,22	5058
960	4156	1,22	5059
965	4188	1,21	5059
970	4182	1,21	5059
975	4177	1,21	5059
980	4199	1,21	5059
985	4209	1,2	5059
990	4197	1,21	5058
995	4202	1,2	5058
1000	4205	1,2	5058
1005	4229	1,2	5059
1010	4221	1,2	5059
1015	4243	1,19	5059
1020	4252	1,19	5058
1025	4266	1,19	5059
1030	4247	1,19	5059
1035	4249	1,19	5059
1040	4289	1,18	5059
1045	4285	1,18	5059
1050	4323	1,17	5059
1055	4274	1,18	5059
1060	4287	1,18	5058
1065	4295	1,18	5059
1070	4297	1,18	5059
1075	4311	1,17	5059
1080	4317	1,17	5059
1085	4328	1,17	5059
1090	4323	1,17	5059
1095	4332	1,17	5059
1100	4337	1,17	5059
1105	4336	1,17	5059
1110	4364	1,16	5059
1115	4359	1,16	5058
1120	4346	1,16	5059
1125	4376	1,16	5059
1130	4363	1,16	5059
1135	4390	1,15	5059
1140	4387	1,15	5059
1145	4394	1,15	5059
1150	4389	1,15	5058

Tiempo (seg)	Resist (MΩ)	I(μA)	Tensión (V)
1155	4404	1,15	5059
1160	4407	1,15	5059
1165	4410	1,15	5059
1170	4410	1,15	5059
1175	4411	1,15	5059
1180	4411	1,15	5059
1185	4437	1,14	5059
1190	4426	1,14	5058
1195	4431	1,14	5058
1200	4442	1,14	5059
1205	4455	1,14	5059
1210	4466	1,13	5059
1215	4453	1,14	5059
1220	4460	1,13	5059
1225	4475	1,13	5058
1230	4476	1,13	5059
1235	4477	1,13	5059
1240	4473	1,13	5059
1245	4476	1,13	5059
1250	4503	1,12	5058
1255	4492	1,13	5059
1260	4502	1,12	5059
1265	4508	1,12	5059
1270	4517	1,12	5059
1275	4513	1,12	5059
1280	4517	1,12	5059
1285	4517	1,12	5059
1290	4519	1,12	5059
1295	4542	1,11	5059
1300	4521	1,12	5059
1305	4526	1,12	5059
1310	4544	1,11	5059
1315	4549	1,11	5059
1320	4565	1,11	5059
1325	4556	1,11	5059
1330	4567	1,11	5059
1335	4560	1,11	5059
1340	4586	1,1	5059
1345	4596	1,1	5059
1350	4564	1,11	5059
1355	4593	1,1	5059
1360	4604	1,1	5059
1365	4595	1,1	5059
1370	4628	1,09	5059
1375	4584	1,1	5059
1380	4618	1,1	5059
1385	4599	1,1	5058

Anexos

Tiempo (seg)	Resist (MΩ)	I(μA)	Tensión (V)
1390	4619	1,1	5059
1395	4601	1,1	5059
1400	4631	1,09	5059
1405	4620	1,1	5059
1410	4644	1,09	5059
1415	4630	1,09	5058
1420	4653	1,09	5059
1425	4638	1,09	5059
1430	4633	1,09	5059
1435	4644	1,09	5059
1440	4651	1,09	5059
1445	4638	1,09	5059
1450	4659	1,09	5058
1455	4680	1,08	5058
1460	4672	1,08	5059
1465	4668	1,08	5059
1470	4672	1,08	5059
1475	4688	1,08	5059
1480	4683	1,08	5058
1485	4676	1,08	5059
1490	4698	1,08	5059
1495	4696	1,08	5059
1500	4694	1,08	5059
1505	4713	1,07	5059
1510	4704	1,08	5059
1515	4720	1,07	5059
1520	4710	1,07	5059
1525	4730	1,07	5059
1530	4734	1,07	5059
1535	4727	1,07	5058
1540	4752	1,07	5059
1545	4734	1,07	5059
1550	4758	1,06	5059
1555	4742	1,07	5059
1560	4756	1,06	5059
1565	4762	1,06	5059
1570	4762	1,06	5059
1575	4753	1,06	5059
1580	4778	1,06	5059
1585	4759	1,06	5059
1590	4778	1,06	5059
1595	4792	1,06	5059
1600	4786	1,06	5059
1605	4804	1,05	5059
1610	4791	1,06	5059
1615	4806	1,05	5059
1620	4806	1,05	5059

Tiempo (seg)	Resist (MΩ)	I(μA)	Tensión (V)
1625	4816	1,05	5059
1630	4828	1,05	5059
1635	4794	1,06	5059
1640	4811	1,05	5059
1645	4789	1,06	5059
1650	4832	1,05	5059
1655	4863	1,04	5059
1660	4818	1,05	5059
1665	4840	1,05	5059
1670	4852	1,04	5059
1675	4862	1,04	5059
1680	4846	1,04	5059
1685	4831	1,05	5059
1690	4849	1,04	5058
1695	4846	1,04	5059
1700	4845	1,04	5059
1705	4863	1,04	5059
1710	4825	1,05	5059
1715	4865	1,04	5059
1720	4870	1,04	5059
1725	4879	1,04	5059
1730	4886	1,04	5059
1735	4898	1,03	5059
1740	4891	1,03	5059
1745	4868	1,04	5059
1750	4897	1,03	5059
1755	4894	1,03	5059
1760	4902	1,03	5059
1765	4880	1,04	5059
1770	4903	1,03	5058
1775	4912	1,03	5059
1780	4896	1,03	5059
1785	4917	1,03	5059
1790	4920	1,03	5059
1795	4915	1,03	5059
1800	4922	1,03	5059

Valores registrados por el Megger en el ensayo del día 21/07/2008. Después del secado.

Tabla 8.4 Generador 4 fase A.

Tiempo (seg)	Resist (MΩ)	I(μA)	Tensión (V)
0	0	0	0
5	157	31,67	4978
10	324	15,41	4994
15	456	10,97	4997
20	583	8,58	4998
25	733	6,82	5001
30	785	6,37	5002
35	852	5,87	5002
40	919	5,44	5005
45	999	5,01	5005
50	1060	4,72	5007
55	1138	4,40	5007
60	1186	4,22	5007
65	1238	4,05	5007
70	1293	3,87	5007
80	1360	3,68	5009
85	1477	3,39	5009
90	1544	3,24	5007
95	1549	3,23	5007
100	1588	3,15	5005
105	1630	3,07	5004
110	1682	2,98	5004
115	1738	2,88	5004
120	1712	2,92	5001
125	1798	2,78	5000
130	1831	2,73	5001
135	1919	2,60	4998
140	1832	2,73	5000
145	2047	2,44	4998
150	2063	2,42	4997
155	2063	2,42	4996
160	1961	2,55	4996
165	2008	2,49	4997
170	2116	2,36	4996
175	2057	2,43	4996
180	1873	2,67	4998
185	2129	2,35	4998
190	2112	2,37	4998
195	2231	2,24	4998
200	2245	2,23	4998
205	2320	2,15	4998

Tiempo (seg)	Resist (MΩ)	I(μA)	Tensión (V)
210	2315	2,16	4998
215	2285	2,19	4998
220	2366	2,11	5000
225	2375	2,10	4998
230	2385	2,10	5000
235	2425	2,06	5000
240	2533	1,97	5000
245	2398	2,09	5000
250	2462	2,03	5001
255	2382	2,10	5000
260	2576	1,94	5000
265	2560	1,95	5000
270	2518	1,99	5001
275	2556	1,96	5000
280	2576	1,94	4998
285	2664	1,88	5000
290	2717	1,84	5000
295	2772	1,80	5000
300	2728	1,83	5000
305	2757	1,81	4998
310	2749	1,82	4998
315	2739	1,83	4998
320	2781	1,80	5000
325	2806	1,78	5000
330	2877	1,74	5000
335	2847	1,76	5000
340	2744	1,82	5000
345	2867	1,74	5000
350	2719	1,84	5001
355	2772	1,80	5001
360	2817	1,78	5000
365	2838	1,76	4997
370	2879	1,74	4998
375	2899	1,72	4998
380	2851	1,75	4998
385	2854	1,75	5001
390	2772	1,81	5012
395	2833	1,77	5011
400	2884	1,74	5013
405	3016	1,66	5013
410	3178	1,58	5012

Anexos

Tiempo (seg)	Resist (MΩ)	I(μA)	Tensión (V)
415	3039	1,65	5011
420	2872	1,75	5011
425	2871	1,75	5012
430	3178	1,58	5009
435	3252	1,54	5008
440	3250	1,54	5009
445	3273	1,53	5008
450	3108	1,61	5007
455	3230	1,55	5007
460	3237	1,55	5007
465	3229	1,55	5005
470	3249	1,54	5004
475	3265	1,53	5005
480	3301	1,52	5004
485	3299	1,52	5002
490	3291	1,52	5002
495	3326	1,50	5002
500	3260	1,53	5001
505	3170	1,58	5002
510	3307	1,51	5000
515	3294	1,52	5001
520	3301	1,52	5001
525	3305	1,51	5001
530	3400	1,47	5001
535	3428	1,46	5001
540	3435	1,46	5001
545	3988	1,25	5001
550	3528	1,42	5002
555	3341	1,50	5002
560	3664	1,37	5002
565	3716	1,35	5002
570	3545	1,41	5002
575	3711	1,35	5002
580	3198	1,56	5001
585	4067	1,23	5002
590	3778	1,32	5002
595	3528	1,42	5002
600	3151	1,59	5001
605	3623	1,38	5004
610	3176	1,58	5005
615	3651	1,37	5005
620	3871	1,29	5005
625	3534	1,42	5004
630	3502	1,43	5005
635	3650	1,37	5004
640	3752	1,33	5002
645	3606	1,39	5002

Tiempo (seg)	Resist (MΩ)	I(μA)	Tensión (V)
650	3634	1,38	5001
655	3500	1,43	5001
660	3676	1,36	5000
665	3757	1,33	5000
670	3882	1,29	5000
675	3667	1,36	4998
680	3683	1,36	4998
685	3741	1,34	4998
690	3707	1,35	4997
695	3693	1,35	4997
700	3871	1,29	4997
705	3603	1,39	4997
710	3696	1,35	4997
715	3632	1,38	4997
720	3938	1,27	4997
725	3500	1,43	4998
730	3656	1,37	4998
735	3783	1,32	4998
740	3781	1,32	4998
745	3656	1,37	4998
750	3567	1,40	4998
755	3658	1,37	5000
760	3701	1,35	5000
765	3549	1,41	5001
770	3760	1,33	5001
775	3732	1,34	5001
780	3755	1,33	5001
785	3672	1,36	5001
790	3809	1,31	4998
795	3844	1,30	4998
800	3861	1,30	5000
805	3852	1,30	5000
810	3843	1,30	5000
815	3858	1,30	5000
820	3854	1,30	4998
825	3856	1,30	4998
830	3839	1,30	4999
835	3698	1,35	5000
840	3934	1,27	5000
845	3828	1,31	5000
850	3826	1,31	5000
855	3954	1,26	4998
860	3920	1,28	4998
865	4109	1,22	4997
870	3988	1,25	4997
875	3883	1,29	4997
880	3975	1,26	4997

Anexos

Tiempo (seg)	Resist (MΩ)	I(μA)	Tensión (V)
885	3904	1,28	4997
890	3985	1,25	4997
895	3918	1,28	4996
900	4102	1,22	4996
905	3797	1,32	4997
910	3950	1,27	4997
915	3995	1,25	4998
920	3737	1,34	4997
925	4023	1,24	5001
930	4185	1,20	5001
935	3953	1,27	5001
940	3922	1,28	5001
945	4014	1,25	5001
950	4003	1,25	5000
955	3981	1,26	5000
960	3946	1,27	5000
965	3981	1,26	5000
970	4023	1,24	5000
975	4032	1,24	5000
980	4119	1,21	5000
985	4049	1,24	5001
990	4133	1,21	5001
995	4042	1,24	5000
1000	4049	1,24	5000
1005	4115	1,22	5000
1010	4079	1,23	5001
1015	4147	1,21	5001
1020	4468	1,12	5000
1025	4011	1,25	4998
1030	4072	1,23	5000
1035	4234	1,18	5000
1040	4255	1,18	5000
1045	4019	1,24	5000
1050	4105	1,22	5000
1055	4000	1,25	5000
1060	4274	1,17	5000
1065	4085	1,22	5000
1070	4163	1,20	5000
1075	4053	1,23	5001
1080	4036	1,24	5001
1085	4161	1,20	5001
1090	4158	1,20	5002
1095	4293	1,17	5001
1100	4165	1,20	5002
1105	4331	1,16	5002
1110	4021	1,24	5002
1115	4148	1,21	5002

Tiempo (seg)	Resist (MΩ)	I(μA)	Tensión (V)
1120	4194	1,19	5004
1125	4205	1,19	5004
1130	4351	1,15	5004
1135	4219	1,19	5004
1140	4209	1,19	5004
1145	4206	1,19	5005
1150	4220	1,19	5005
1155	4202	1,19	5005
1160	4295	1,17	5004
1165	4351	1,15	5004
1170	3957	1,27	5005
1175	4269	1,17	5007
1180	4320	1,16	5007
1185	4989	1,00	5004
1190	4399	1,14	5002
1195	4750	1,05	5002
1200	4568	1,10	5002
1205	4241	1,18	5004
1210	4250	1,18	5002
1215	4388	1,14	5002
1220	4336	1,15	5004
1225	4597	1,09	5004
1230	4432	1,13	5004
1235	4510	1,11	5002
1240	4485	1,12	5001
1245	4559	1,10	5001
1250	4072	1,23	5001
1255	4584	1,09	5001
1260	4527	1,11	5002
1265	4327	1,16	5002
1270	4327	1,16	5002
1275	4546	1,10	5001
1280	4383	1,14	5001
1285	4481	1,12	5001
1290	4609	1,09	5001
1295	4445	1,13	5001
1300	4434	1,13	5001
1305	4387	1,14	5001
1310	4338	1,15	5002
1315	4388	1,14	5002
1320	4368	1,15	5001
1325	4392	1,14	5002
1330	4403	1,14	5002
1335	4666	1,07	5002
1340	4430	1,13	5002
1345	4568	1,10	5002
1350	4643	1,08	5001

Anexos

Tiempo (seg)	Resist (MΩ)	I(μA)	Tensión (V)
1355	4514	1,11	5001
1360	5138	0,97	5000
1365	4066	1,23	5001
1370	4592	1,09	5001
1375	4618	1,08	5001
1380	4558	1,10	5000
1385	4575	1,09	5000
1390	4713	1,06	5000
1395	4509	1,11	5000
1400	4460	1,12	5000
1405	4525	1,11	5000
1410	4687	1,07	5001
1415	4551	1,10	5001
1420	4529	1,10	5000
1425	4798	1,04	5000
1430	4514	1,11	5001
1435	4530	1,10	5001
1440	4453	1,12	5001
1445	4352	1,15	5001
1450	4731	1,06	5001
1455	4509	1,11	5001
1460	4449	1,12	5001
1465	4534	1,10	5001
1470	4665	1,07	5001
1475	4580	1,09	5001
1480	4683	1,07	5001
1485	4501	1,11	5001
1490	4713	1,06	5001
1495	4538	1,10	5001
1500	4605	1,09	5001
1505	4571	1,09	5001
1510	4584	1,09	5001
1515	4584	1,09	5001
1520	4349	1,15	5001
1525	4606	1,09	5002
1530	4656	1,07	5001
1535	4745	1,05	5001
1540	4597	1,09	5001
1545	4368	1,15	5001
1550	4593	1,09	5002
1555	4661	1,07	5001
1560	4631	1,08	5001
1565	4706	1,06	5002
1570	5821	0,86	4998
1575	5343	0,94	4997
1580	4601	1,09	4997
1585	4782	1,05	4997

Tiempo (seg)	Resist (MΩ)	I(μA)	Tensión (V)
1590	4610	1,08	4997
1595	4498	1,11	4997
1600	4510	1,11	4997
1605	4913	1,02	4997
1610	4357	1,15	4998
1615	4751	1,05	4998
1620	4594	1,09	4998
1625	4689	1,07	4998
1630	4737	1,06	4998
1635	4751	1,05	4998
1640	4606	1,09	4998
1645	4796	1,04	4997
1650	4518	1,11	4997
1655	4912	1,02	5000
1660	4552	1,10	4998
1665	4751	1,05	4998
1670	4513	1,11	5000
1675	4902	1,02	5000
1680	4980	1,00	5000
1685	4695	1,07	5000
1690	4245	1,18	5001
1695	4966	1,01	5001
1700	4927	1,02	5001
1705	4592	1,09	5001
1710	4705	1,06	5001
1715	4827	1,04	5001
1720	4941	1,01	5000
1725	4387	1,14	5001
1730	4846	1,03	5001
1735	5082	0,98	5000
1740	4686	1,07	5000
1745	4643	1,08	5000
1750	4441	1,13	5001
1755	4860	1,03	5001
1760	4860	1,03	5001
1765	4860	1,03	5001
1770	4860	1,03	5001
1775	4860	1,03	5001
1780	4860	1,03	5001
1785	4860	1,03	5001
1790	4860	1,03	5001
1795	4860	1,03	5001
1800	4860	1,03	5001

Tabla 8.5 Generador 4 fase B.

Tiempo (seg)	Resist (MΩ)	I(μA)	Tensión (V)
0	0	0	0
5	323	15,5	4993
10	493	10,1	4996
15	587	8,52	4997
20	729	6,85	4998
25	772	6,47	4998
30	844	5,93	5000
35	924	5,41	5001
40	969	5,16	5002
45	1026	4,88	5004
50	1115	4,49	5004
55	1183	4,23	5004
60	1213	4,13	5004
65	1284	3,9	5004
70	1282	3,9	5005
75	1362	3,68	5005
80	1480	3,38	5001
85	1539	3,25	5001
90	1347	3,72	5005
95	1658	3,02	5005
100	1445	3,46	5005
105	1619	3,09	5004
110	1598	3,13	5007
115	1673	2,99	5007
120	1668	3	5007
125	1705	2,94	5007
130	1796	2,79	5005
135	1740	2,88	5007
140	1793	2,79	5007
145	1718	2,91	5004
150	2091	2,39	5005
155	1839	2,72	5007
160	2072	2,42	5007
165	2004	2,5	5007
170	2078	2,41	5008
175	2310	2,17	5007
180	2036	2,46	5008
185	2130	2,35	5007
190	2115	2,37	5007
195	2185	2,29	5007
200	2436	2,06	5005
205	2401	2,08	4998
210	2359	2,12	4998
215	2473	2,02	4997
220	2601	1,92	4997

Tiempo (seg)	Resist (MΩ)	I(μA)	Tensión (V)
225	2625	1,9	4992
230	2365	2,11	4992
235	2176	2,3	4993
240	2220	2,25	4996
245	2349	2,13	4992
250	2161	2,31	4996
255	2260	2,21	5001
260	2290	2,18	4992
265	2369	2,11	4996
270	2336	2,14	4996
275	1904	2,63	5004
280	2276	2,2	5007
285	2602	1,93	5008
290	2480	2,02	5008
295	2503	2	5008
300	2453	2,04	5009
305	2543	1,97	5009
310	2581	1,94	5009
315	2557	1,96	5009
320	2593	1,93	5009
325	2467	2,03	5009
330	2530	1,98	5009
335	2583	1,94	5011
340	2635	1,9	5011
345	2665	1,88	5011
350	2693	1,86	5009
355	2751	1,82	5009
360	2713	1,85	5009
365	2694	1,86	5009
370	2720	1,84	5008
375	2823	1,77	5008
380	2779	1,8	5008
385	2796	1,79	5008
390	2771	1,81	5007
395	2837	1,77	5007
400	2874	1,74	5007
405	2815	1,78	5007
410	2827	1,77	5007
415	2815	1,78	5007
420	2811	1,78	5007
425	2820	1,78	5008
430	2867	1,75	5008
435	2876	1,74	5007
440	2837	1,77	5008
445	2860	1,75	5008

Anexos

Tiempo (seg)	Resist (MΩ)	I(μA)	Tensión (V)
450	2854	1,76	5008
455	2951	1,7	5008
460	2868	1,75	5008
465	2893	1,73	5008
470	3005	1,67	5009
475	2978	1,68	5009
480	2892	1,73	5009
485	2959	1,69	5009
490	3043	1,65	5008
495	3037	1,65	5008
500	2960	1,69	5008
505	2905	1,72	5008
510	3003	1,67	5009
515	2845	1,76	5008
520	2931	1,71	5009
525	3011	1,66	5011
530	3166	1,58	5009
535	3063	1,64	5008
540	3107	1,61	5008
545	3107	1,61	5008
550	3114	1,61	5008
555	3082	1,63	5008
560	3144	1,59	5008
565	3096	1,62	5009
570	3334	1,5	5008
575	3084	1,62	5008
580	3153	1,59	5007
585	3201	1,56	5007
590	3061	1,64	5008
595	3181	1,57	5007
600	3150	1,59	5008
605	3241	1,55	5007
610	3237	1,55	5007
615	3235	1,55	5008
620	3228	1,55	5007
625	3376	1,48	5007
630	3265	1,53	5008
635	3263	1,54	5008
640	3258	1,54	5007
645	3106	1,61	5007
650	3277	1,53	5007
655	3234	1,55	5007
660	3228	1,55	5007
665	3237	1,55	5007
670	3214	1,56	5007
675	3090	1,62	5005
680	3331	1,5	5007

Tiempo (seg)	Resist (MΩ)	I(μA)	Tensión (V)
685	3228	1,55	5007
690	3349	1,5	5007
695	3216	1,56	5008
700	3339	1,5	5008
705	3295	1,52	5008
710	3494	1,43	5007
715	3332	1,5	5005
720	3301	1,52	5005
725	3367	1,49	5007
730	3440	1,46	5005
735	3323	1,51	5005
740	3445	1,45	5005
745	3453	1,45	5004
750	3502	1,43	5004
755	3386	1,48	5004
760	3468	1,44	5004
765	3412	1,47	5002
770	3403	1,47	5002
775	3476	1,44	5002
780	3431	1,46	5002
785	3365	1,49	5004
790	3404	1,47	5004
795	3420	1,46	5004
800	3416	1,47	5004
805	3434	1,46	5004
810	3465	1,44	5004
815	3468	1,44	5004
820	3697	1,35	5002
825	3352	1,49	5004
830	3473	1,44	5004
835	3463	1,45	5004
840	3572	1,4	5004
845	3471	1,44	5002
850	3469	1,44	5002
855	3492	1,43	5004
860	3531	1,42	5004
865	3551	1,41	5004
870	3477	1,44	5004
875	3343	1,5	5005
880	3498	1,43	5005
885	3448	1,45	5007
890	3511	1,43	5007
895	3393	1,48	5005
900	3728	1,34	5007
905	3372	1,49	5007
910	3608	1,39	5008
915	3544	1,41	5007

Anexos

Tiempo (seg)	Resist (MΩ)	I(μA)	Tensión (V)
920	3444	1,45	5008
925	3562	1,41	5008
930	3762	1,33	5007
935	3377	1,48	5008
940	3669	1,37	5008
945	3618	1,38	5008
950	3742	1,34	5007
955	3690	1,36	5007
960	3574	1,4	5007
965	3637	1,38	5005
970	3611	1,39	5005
975	3620	1,38	5007
980	3584	1,4	5007
985	3605	1,39	5007
990	3566	1,4	5007
995	3671	1,36	5007
1000	3706	1,35	5007
1005	3644	1,37	5007
1010	3634	1,38	5007
1015	3832	1,31	5005
1020	3718	1,35	5005
1025	3614	1,39	5005
1030	3691	1,36	5005
1035	3645	1,37	5005
1040	3579	1,4	5007
1045	3706	1,35	5007
1050	3672	1,36	5005
1055	3728	1,34	5007
1060	3856	1,3	5005
1065	3746	1,34	5005
1070	3541	1,41	5007
1075	3597	1,39	5007
1080	3658	1,37	5008
1085	3835	1,31	5008
1090	3723	1,35	5008
1095	3754	1,33	5008
1100	3881	1,29	5007
1105	3904	1,28	5005
1110	3674	1,36	5007
1115	3860	1,3	5007
1120	3709	1,35	5007
1125	3737	1,34	5007
1130	3883	1,29	5005
1135	3641	1,38	5007
1140	3734	1,34	5007
1145	3793	1,32	5007
1150	3857	1,3	5007

Tiempo (seg)	Resist (MΩ)	I(μA)	Tensión (V)
1155	3799	1,32	5007
1160	3872	1,29	5007
1165	3838	1,3	5005
1170	3826	1,31	5005
1175	3758	1,33	5005
1180	3688	1,36	5005
1185	3821	1,31	5005
1190	3880	1,29	5005
1195	3821	1,31	5005
1200	3874	1,29	5005
1205	3786	1,32	5005
1210	3740	1,34	5004
1215	3730	1,34	5005
1220	3932	1,27	5005
1225	3775	1,33	5005
1230	3752	1,33	5005
1235	3766	1,33	5005
1240	3837	1,31	5007
1245	3946	1,27	5007
1250	3883	1,29	5005
1255	3895	1,29	5005
1260	3925	1,28	5005
1265	3838	1,3	5005
1270	3829	1,31	5005
1275	3972	1,26	5005
1280	3844	1,3	5005
1285	3856	1,3	5005
1290	3850	1,3	5005
1295	3853	1,3	5005
1300	3824	1,31	5005
1305	3912	1,28	5007
1310	3872	1,29	5007
1315	3944	1,27	5005
1320	3950	1,27	5005
1325	3956	1,26	5000
1330	3828	1,31	5007
1335	3966	1,26	5005
1340	3982	1,26	5005
1345	3895	1,29	5005
1350	3972	1,26	5005
1355	4046	1,24	5005
1360	3935	1,27	5005
1365	3916	1,28	5005
1370	3957	1,27	5005
1375	3991	1,25	5005
1380	3991	1,25	5005
1385	3975	1,26	5005

Anexos

Tiempo (seg)	Resist (MΩ)	I(μA)	Tensión (V)
1390	4136	1,21	5005
1395	3957	1,27	5005
1400	3890	1,29	5007
1405	4038	1,24	5007
1410	3977	1,26	5007
1415	4006	1,25	5007
1420	4059	1,23	5005
1425	4023	1,24	5005
1430	3975	1,26	5005
1435	4049	1,24	5005
1440	4132	1,21	5004
1445	4227	1,18	5005
1450	4003	1,25	5004
1455	3975	1,26	5004
1460	4033	1,24	5005
1465	4026	1,24	5004
1470	3935	1,27	5005
1475	4244	1,18	5004
1480	4180	1,2	5004
1485	4088	1,22	5004
1490	3975	1,26	5005
1495	4007	1,25	5005
1500	4156	1,2	5004
1505	4259	1,18	5004
1510	3785	1,32	5004
1515	4092	1,22	5005
1520	4042	1,24	5004
1525	3941	1,27	5005
1530	4238	1,18	5005
1535	4001	1,25	5005
1540	3929	1,27	5005
1545	4150	1,21	5005
1550	4113	1,22	5005
1555	4029	1,24	5004
1560	4026	1,24	5004
1565	4132	1,21	5004
1570	4184	1,2	5004
1575	4026	1,24	5004
1580	4056	1,23	5005
1585	4056	1,23	5005
1590	4113	1,22	5005
1595	4140	1,21	5005
1600	3979	1,26	5005
1605	4096	1,22	5005
1610	4184	1,2	5004
1615	3919	1,28	5004
1620	4140	1,21	5005

Tiempo (seg)	Resist (MΩ)	I(μA)	Tensión (V)
1625	4023	1,24	5005
1630	4160	1,2	5004
1635	4132	1,21	5004
1640	4007	1,25	5005
1645	4126	1,21	5005
1650	3866	1,3	5007
1655	4009	1,25	5007
1660	4107	1,22	5007
1665	4530	1,1	4992
1670	3580	1,4	4994
1675	3788	1,32	4997
1680	3992	1,25	4998
1685	4060	1,23	4998
1690	4054	1,23	4998
1695	4163	1,2	5000
1700	4065	1,23	5000
1705	4026	1,24	5000
1710	4129	1,21	5000
1715	4129	1,21	5000
1720	4129	1,21	5000
1725	4129	1,21	5000
1730	4129	1,21	5000
1735	4129	1,21	5000
1740	4129	1,21	5000
1745	4129	1,21	5000
1750	4129	1,21	5000
1755	4129	1,21	5000
1760	4129	1,21	5000
1765	4129	1,21	5000
1770	4129	1,21	5000
1775	4129	1,21	5000
1780	4129	1,21	5000
1785	4129	1,21	5000
1790	4129	1,21	5000
1795	4129	1,21	5000
1800	4129	1,21	5000

Tabla 8.6 Generador 4 fase C.

Tiempo (seg)	Resist (MΩ)	I(μA)	Tensión (V)
0	0	0	0
5	155	32,1	4981
10	344	14,6	5002
15	507	9,86	5002
20	605	8,27	5004
25	816	6,13	5004
30	842	5,94	5005
35	917	5,46	5005
40	1075	4,66	5007
45	1149	4,36	5007
50	1197	4,18	5005
55	1232	4,06	5005
60	1307	3,83	5005
65	1350	3,71	5005
70	1377	3,64	5005
75	1437	3,48	5005
80	1461	3,43	5005
85	1512	3,31	5004
90	1537	3,26	5004
95	1575	3,18	5004
100	1636	3,06	5004
105	1715	2,92	5004
110	1704	2,94	5004
115	1741	2,88	5004
120	1756	2,85	5004
125	1772	2,82	5004
130	1838	2,72	5004
135	1850	2,71	5005
140	1904	2,63	5005
145	1915	2,61	5005
150	1944	2,58	5005
155	1956	2,56	5005
160	1996	2,51	5005
165	2019	2,48	5005
170	2040	2,45	5005
175	2095	2,39	5007
180	2123	2,36	5005
185	2114	2,37	5005
190	2126	2,36	5007
195	2114	2,37	5005
200	2168	2,31	5007
205	2143	2,34	5007
210	2282	2,19	5007
215	2228	2,25	5008
220	2304	2,17	5007

Tiempo (seg)	Resist (MΩ)	I(μA)	Tensión (V)
225	2287	2,19	5007
230	2285	2,19	5007
235	2365	2,12	5007
240	2412	2,08	5005
245	2355	2,13	5007
250	2399	2,09	5007
255	2373	2,11	5007
260	2401	2,09	5007
265	2441	2,05	5007
270	2479	2,02	5007
275	2408	2,08	5007
280	2540	1,97	5007
285	2507	2	5007
290	2506	2	5007
295	2449	2,05	5008
300	2480	2,02	5009
305	2532	1,98	5009
310	2534	1,98	5009
315	2604	1,92	5011
320	2599	1,93	5011
325	2671	1,88	5011
330	2647	1,89	5011
335	2668	1,88	5011
340	2629	1,91	5011
345	2622	1,91	5011
350	2716	1,85	5011
355	2867	1,75	5009
360	2787	1,8	5009
365	2779	1,8	5008
370	2722	1,84	5009
375	2783	1,8	5009
380	2754	1,82	5009
385	2729	1,84	5011
390	2859	1,75	5011
395	2849	1,76	5009
400	2882	1,74	5009
405	2848	1,76	5009
410	2875	1,74	5009
415	2804	1,79	5011
420	2888	1,74	5011
425	2956	1,7	5011
430	2866	1,75	5009
435	3001	1,67	5009
440	2941	1,7	5009
445	2889	1,73	5009

Anexos

Tiempo (seg)	Resist (MΩ)	I(μA)	Tensión (V)
450	2930	1,71	5011
455	2952	1,7	5009
460	2936	1,71	5011
465	2958	1,69	5011
470	2999	1,67	5011
475	3044	1,65	5011
480	2885	1,74	5011
485	2979	1,68	5011
490	3048	1,64	5011
495	3118	1,61	5011
500	3070	1,63	5011
505	3035	1,65	5011
510	3097	1,62	5011
515	3006	1,67	5011
520	3123	1,61	5012
525	3134	1,6	5012
530	3138	1,6	5012
535	3117	1,61	5012
540	3136	1,6	5012
545	3144	1,59	5012
550	3164	1,58	5012
555	3160	1,59	5012
560	3353	1,49	5009
565	3008	1,67	5012
570	3105	1,61	5012
575	3133	1,6	5013
580	3203	1,57	5013
585	3151	1,59	5013
590	3197	1,57	5013
595	3251	1,54	5013
600	3148	1,59	5012
605	3220	1,56	5013
610	3243	1,55	5013
615	3184	1,58	5015
620	3140	1,6	5015
625	3255	1,54	5016
630	3291	1,52	5016
635	3261	1,54	5016
640	3309	1,52	5016
645	3259	1,54	5016
650	3313	1,51	5016
655	3362	1,49	5016
660	3355	1,5	5016
665	3287	1,53	5016
670	3378	1,49	5016
675	3371	1,49	5016
680	3293	1,52	5016

Tiempo (seg)	Resist (MΩ)	I(μA)	Tensión (V)
685	3309	1,52	5016
690	3371	1,49	5016
695	3376	1,49	5016
700	3422	1,47	5016
705	3398	1,48	5016
710	3396	1,48	5016
715	3369	1,49	5016
720	3324	1,51	5016
725	3369	1,49	5017
730	3249	1,54	5017
735	3394	1,48	5017
740	3354	1,5	5017
745	3426	1,47	5019
750	3414	1,47	5019
755	3403	1,48	5019
760	3415	1,47	5020
765	3467	1,45	5020
770	3464	1,45	5020
775	3493	1,44	5020
780	3555	1,41	5019
785	3506	1,43	5020
790	3488	1,44	5019
795	3478	1,44	5019
800	3527	1,42	5019
805	3552	1,41	5019
810	3512	1,43	5019
815	3520	1,43	5019
820	3481	1,44	5020
825	3599	1,4	5020
830	3655	1,37	5019
835	3472	1,45	5020
840	3448	1,46	5020
845	3528	1,42	5020
850	3563	1,41	5020
855	3493	1,44	5020
860	3569	1,41	5021
865	3606	1,39	5020
870	3601	1,39	5020
875	3630	1,38	5020
880	3646	1,38	5020
885	3635	1,38	5020
890	3543	1,42	5020
895	3589	1,4	5021
900	3738	1,34	5020
905	3551	1,41	5021
910	3620	1,39	5021
915	3657	1,37	5021

Anexos

Tiempo (seg)	Resist (MΩ)	I(μA)	Tensión (V)
920	3721	1,35	5019
925	3664	1,37	5020
930	3680	1,36	5020
935	3696	1,36	5019
940	3632	1,38	5020
945	3656	1,37	5020
950	3662	1,37	5020
955	3735	1,34	5020
960	3743	1,34	5020
965	3716	1,35	5020
970	3661	1,37	5019
975	3678	1,37	5020
980	3680	1,36	5020
985	3680	1,36	5020
990	3727	1,35	5020
995	3743	1,34	5020
1000	3474	1,44	5016
1005	3402	1,47	5001
1010	3445	1,45	5005
1015	3725	1,34	5007
1020	3490	1,44	5008
1025	3714	1,35	5007
1030	3667	1,37	5009
1035	3611	1,39	5009
1040	3663	1,37	5011
1045	3567	1,41	5011
1050	3765	1,33	5011
1055	3650	1,37	5011
1060	3693	1,36	5012
1065	3713	1,35	5012
1070	3606	1,39	5013
1075	3712	1,35	5015
1080	3677	1,36	5015
1085	3716	1,35	5016
1090	3584	1,4	5017
1095	4019	1,25	5016
1100	3633	1,38	5017
1105	3767	1,33	5017
1110	3721	1,35	5019
1115	3688	1,36	5019
1120	3900	1,29	5019
1125	3702	1,36	5020
1130	3888	1,29	5020
1135	3654	1,37	5021
1140	3832	1,31	5020
1145	3862	1,3	5021
1150	3850	1,3	5021

Tiempo (seg)	Resist (MΩ)	I(μA)	Tensión (V)
1155	3842	1,31	5021
1160	3778	1,33	5021
1165	3770	1,33	5021
1170	3704	1,36	5023
1175	3805	1,32	5023
1180	3861	1,3	5023
1185	3864	1,3	5023
1190	3788	1,33	5023
1195	3987	1,26	5023
1200	3883	1,29	5024
1205	3809	1,32	5024
1210	3892	1,29	5024
1215	3901	1,29	5024
1220	3838	1,31	5024
1225	4013	1,25	5024
1230	3891	1,29	5023
1235	4019	1,25	5024
1240	3978	1,26	5024
1245	3898	1,29	5024
1250	3818	1,32	5024
1255	4068	1,24	5024
1260	3950	1,27	5024
1265	4013	1,25	5024
1270	4029	1,25	5024
1275	3997	1,26	5024
1280	4162	1,21	5023
1285	3912	1,28	5023
1290	3994	1,26	5024
1295	4064	1,24	5023
1300	3937	1,28	5023
1305	3931	1,28	5024
1310	4006	1,25	5023
1315	3856	1,3	5024
1320	3853	1,3	5024
1325	3950	1,27	5025
1330	3938	1,28	5025
1335	4101	1,23	5024
1340	4013	1,25	5024
1345	3978	1,26	5024
1350	4108	1,22	5024
1355	4105	1,22	5024
1360	4061	1,24	5024
1365	3965	1,27	5024
1370	3340	1,51	5027
1375	3987	1,26	5028
1380	3965	1,27	5027
1385	4039	1,25	5028

Anexos

Tiempo (seg)	Resist (MΩ)	I(μA)	Tensión (V)
1390	4058	1,24	5028
1395	3965	1,27	5028
1400	4032	1,25	5028
1405	4125	1,22	5028
1410	4000	1,26	5028
1415	4071	1,24	5028
1420	4052	1,24	5028
1425	4065	1,24	5029
1430	3988	1,26	5029
1435	4036	1,25	5029
1440	4059	1,24	5029
1445	4095	1,23	5029
1450	4095	1,23	5029
1455	4115	1,22	5028
1460	4145	1,21	5028
1465	4058	1,24	5028
1470	4104	1,23	5028
1475	4201	1,2	5029
1480	4247	1,18	5028
1485	4149	1,21	5028
1490	4111	1,22	5028
1495	4032	1,25	5028
1500	4183	1,2	5028
1505	4155	1,21	5028
1510	4135	1,22	5028
1515	4176	1,2	5028
1520	4108	1,22	5028
1525	4293	1,17	5013
1530	4318	1,16	5009
1535	3598	1,39	5009
1540	3950	1,27	5016
1545	4085	1,23	5016
1550	4152	1,21	5016
1555	3873	1,3	5020
1560	4052	1,24	5020
1565	3904	1,29	5020
1570	3882	1,29	5023
1575	4168	1,21	5023
1580	3813	1,32	5025
1585	3979	1,26	5025
1590	4041	1,24	5027
1595	4074	1,23	5027
1600	4182	1,2	5027
1605	4168	1,21	5027
1610	4117	1,22	5027
1615	4193	1,2	5027
1620	4077	1,23	5027

Tiempo (seg)	Resist (MΩ)	I(μA)	Tensión (V)
1625	4098	1,23	5028
1630	4039	1,25	5028
1635	4092	1,23	5029
1640	4205	1,2	5029
1645	4173	1,21	5029
1650	4180	1,2	5029
1655	4261	1,18	5028
1660	4198	1,2	5029
1665	4258	1,18	5029
1670	4208	1,2	5029
1675	4251	1,18	5029
1680	4233	1,19	5029
1685	4396	1,14	5029
1690	4201	1,2	5029
1695	4350	1,16	5029
1700	4204	1,2	5028
1705	4193	1,2	5028
1710	4276	1,18	5029
1715	4177	1,2	5029
1720	4276	1,18	5029
1725	4247	1,18	5029
1730	4237	1,19	5029
1735	4295	1,17	5029
1740	4286	1,17	5028
1745	4272	1,18	5028
1750	4295	1,17	5029
1755	4243	1,19	5028
1760	4191	1,2	5029
1765	4369	1,15	5029
1770	4324	1,16	5029
1775	4184	1,2	5029
1780	4184	1,2	5029
1785	4184	1,2	5029
1790	4184	1,2	5029
1795	4184	1,2	5029
1800	4184	1,2	5029

Tabla 8.7 Distribución de termoeléctricas por provincias.

Termoeléctricas	Provincia
1 Mariel	La Habana
2 Este Habana	La Habana
3 Planta Martí	Matanzas
4 Antonio Guiteras	Matanzas
5 Carlos Manuel de Céspedes	Cienfuegos
6 10 de Octubre	Camagüey
7 Lidio Ramón Pérez	Holguín
8 Antonio Maceo	Santiago de Cuba

Tabla 8.8 Régimen de trabajo de los máquinas eléctricas.

Característica del Régimen	Designación
De larga duración	<i>S1</i>
De corta duración, con períodos de trabajo de 10, 30, 60 y 90 min	<i>S2</i>
De corta duración, con períodos de trabajo relativos de 15%, 20%, 40% y 60% de la duración de un ciclo de trabajo de 10 min	<i>S3</i>
De corta duración variable, en el que se alterna la carga nominal con la marcha en vacío sin desconectar la carga con períodos de trabajo relativos de 15%, 25%, 40% y 60% de la duración de un ciclo de trabajo de 10 min	<i>S6</i>

Tabla 8.9 Distribución de posibles fallos en maquina eléctricas rotatorias según IEEE y EPRI.

Posibilidad de ocurrencia de fallos en máquinas eléctricas rotatorias				
	Cojinetes	Estator	Rotor	Otros
IEEE	42%	28%	8%	22%
EPRI	40%	38%	10%	12%

Tabla 8.10 Valores recomendables de ensayos de $\tan\delta$ Tip-up.

	$\tan\delta$	“Tip-Up”
Tipo de Aislamiento	$\tan\delta_{E_n/\sqrt{3}}$	$\tan\delta_{E_n/\sqrt{3}} - \tan\delta_{0,2 \cdot E_n/\sqrt{3}}$
Poliéster ó Epoxi-mica	$\leq 1\%$	$\leq 1\%$

E_n es la tensión nominal del motor ensayado

Tabla 8.11 Periodicidad de ensayos de Descargas Parciales según resultados.

Periodicidad	Magnitud de las Descargas Parciales
Cada 4 años	$\leq 10\ 000\ \text{pC}$
Cada 2 años	$> 10\ 000\ \text{pC} \leq 30\ 000\ \text{pC}$
Cada año	$> 30\ 000\ \text{pC} < 100\ 000\ \text{pC}$

Tabla 8.12 Tiempo de sometimiento y niveles de tensión para ensayos de Alta Tensión.

	Tensión de prueba	Tiempo de la Prueba
En fábrica	$(2E_n + 1)$ kV	1 minuto
Puesta en Servicio	$0,85 (2E_n + 1)$ kV	1 minuto

E_n es la tensión nominal del motor ensayado

Tabla 8.13 Características de Descargas Parciales para determinas fallas

Mecanismo de fallo	Polaridad que predomina	Efecto de carga	Efecto de Temperatura	Ángulo de fase
Deterioro Térmico	Ninguna	Ninguno	Negativo	45 ° y 225 °
Ciclos de carga	Negativa	Negativo	Negativo	45 °
Devanado Flojo	Positiva	Positivo	Negativo	225 °
Descargas a la ranura	Positiva	Ninguno	Negativo	225 °
Mala Impregnación	Ninguna	Ninguno	Negativo	45 ° y 225 °
Contaminación	Ninguna	Ninguno	Impredecible	15 °, 75 °, 195 ° y 255 °
Espacio inadecuado entre barras	Ninguna	Ninguno	Impredecible	15 °, 75 °, 195 ° y 255 °
Interfase semiconductor y graduadora	Positiva	Ninguno	Positivo	225°

Tabla 8.14 Matriz de Falla de una MERGP.

Tipos de / Métodos de fallos / detección	Vibraciones	Inspección sensorial	temp.	Ensayos Megohmetro	Rigidez dieléctrica	Descargas parciales	tang δ o $\cos \theta$	I ₂	Resistencia devanado	I ₀	P _{magt}
Aislamiento a tierra		*	+	*	-	+	+			+	
Aislamiento entre fases del estator		*	+	*	-	+	+				
Contaminación y humedad del aislto		*	+	*	-	+	+				
Barras del estator rotas	+	*									
Cuñas del estator flojas	+	*				+					
Bobina flojas en las ranuras del estator	+	*		*	-	+	+				
Cabeza de bob. Flojas	+	*		*	-	+					
Fallo del aislamiento e/ espiras del estator	+		+			+		+	-		
Sistema de lubricación	+										
Defectos en la estructura de las chumaceras	+	*									
Fallo del aislamto e/ laminas del estator	+		+								+
Sistema de enfriamiento			+								
Total de fallos	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Cubrimiento total	8	8	6	5	5	7	4	1	1	1	1
Factor de cubrimiento	66,7%	66,7%	50,0%	41,7%	41,7%	58,3%	33,3%	8,3%	8,3%	8,3%	8,3%
Peso de la variable	17,0%	17,0%	13,0%	10,6%	10,6%	15,0%	8,5%	2,1%	2,1%	2,1%	2,1%
Porcentaje acumulativo	17,0%	34,0%	47,0%	57,6%	68,2%	83,2%	91,7%	93,8%	95,9%	97,9%	100,0%

Tabla 8.15 Métodos de detección de fallos y objetivos que persiguen.

Método	Objetivo
- Inspección Sensorial.	-Detección de defectos visibles, producidos por eventos destructivos. Por ejemplo, pérdidas de partes, señales de descargas parciales, calentamientos excesivos, etc.
-Ensayos con el Megger®.	-Evaluación la compactación, de la presencia de humedad y contaminantes del aislamiento.
-Medición de la CD en función de la tensión respecto a tierra.	-Detección de heterogeneidades locales en el aislamiento, tales como: <ul style="list-style-type: none"> ➤ Fisuras en el Aislamiento. ➤ Conductividad Superficial.
-Ensayo con CA.	-Detección de debilidades en el aislamiento y evaluación del nivel mínimo de rigidez dieléctrica en el devanado.
-Medición del Factor de Pérdidas Dieléctricas ($\tan \delta$).	-Evaluación de las pérdidas dieléctricas, de la homogeneidad del aislamiento así como de su capacitancia.
-Medición de las DP en función de la tensión.	-Evaluación de las Descargas Parciales y de su intensidad.

Tabla 8.16 Temperaturas limites según la clase térmica del aislamiento[1].

Clase Térmica	Temperatura Ambiente Máxima	Aumento medio de Temperatura sobre el Ambiente	Temperatura Limite Media	Aumento Máximo de Temperatura en el punto más caliente	Temperatura Máxima en el punto más caliente
	°C	°C	°C	°C	°C
Y	40	45	85	50	90
A	40	60	100	65	105
E	40	75	115	80	120
B	40	80	120	90	130
F	40	100	140	115	155
H	40	125	165	140	180

Tabla 8.17 Criterios sobre el estado del aislamiento, asociados al coeficiente de absorción (k_a).

Valor de k_a	Criterio
< 1,1	Pobre
$\geq 1,1$ hasta < 1,25	Dudoso
$\geq 1,25$ hasta < 1,40	Aceptable
$\geq 1,40$ hasta < 1,60	Bueno
$\geq 1,60$ hasta < 2,5	Excelente
$\geq 2,5$	Limpio y seco, pero deteriorado térmicamente si es de base asfáltica

Tabla 8.18 Criterios sobre el estado del aislamiento asociados al Índice de Polarización (IP) para aislamientos Clase B de Base Asfáltica.

Valor	Criterio
≤ 1	Contaminado
2 ~ 6	Limpio y Seco
> 7	Limpio y seco, pero deteriorado térmicamente

Tabla 8.19 Criterios sobre el estado del aislamiento asociados al Índice de Polarización (IP) para aislamientos Clase B y F de Base Polimérica.

Valor	Criterio
~ 1	Contaminado
> 2	Bueno

Tabla 8.20 Criterios del estado del aislamiento a partir del valor de la Permitividad Estática. (ϵ_E).[36]

Valores de ϵ_E	Criterios de Estado
$\epsilon_E \leq 10$	Excelente
$10 < \epsilon_E \leq 17$	Regular
$\epsilon_E > 17$	Mal

Tabla 8.21 Criterios del estado del aislamiento a partir del valor de la Resistividad Volumétrica a 20°C.[36]

Clase Térmica B	Clase Térmica F	Criterios de Estado
$\rho_V \geq 10^{14} \Omega \cdot m$	$\rho_V \geq 10^{15}$	Excelente
$10^{12} \leq \rho_V < 10^{14} \Omega \cdot m$	$10^{12} \leq \rho_V < 10^{15}$	Bueno
$10^{10} \leq \rho_V < 10^{12} \Omega \cdot m$		Dudoso
$\rho_V < 10^{10} \Omega \cdot m$		Malo

Tabla 8.22 Criterios integrados del estado del aislamiento a partir del valor de la Resistividad Volumétrica (ρ_V) y la Permitividad Estática (ϵ_E).[36]

Criterio de ρ_V	Criterio de ϵ_E	Criterio acerca del estado del aislamiento
EXCELENTE	EXCELENTE	Aislamiento en buen estado, limpio y seco.
EXCELENTE	REGULAR	Aislamiento en buen estado y seco pero contaminado. Posiblemente con elementos sólidos pulverizados no conductores. Se requiere de limpieza de aislamiento a mediano plazo
EXCELENTE	MAL	Aislamiento en buen estado, seco pero contaminado. Posiblemente con aceite de lubricación u otro elemento impregnante no conductor. Se requiere de limpieza inmediata.
MAL	EXCELENTE	Aislamiento posiblemente fallado, pero limpio y seco. Se requiere revisión inmediata para detectar defectos.
MAL	REGULAR	Aislamiento en mal estado, contaminado y seco. Se requiere de Mantenimiento inmediato,
MAL	MAL	Aislamiento en mal estado, contaminado y húmedo. Se requiere de secado y limpieza inmediata.

Tabla 8.23 Criterio del estado del aislamiento a partir de la Constante de Tiempo (CT).

Valores	Criterio de estado
CT<100	Pobre
100<CT<800	Cuestionable
800<CT<2000	Aceptable
CT>2000	Bien

Tabla 8.24 Criterio del estado del aislamiento a partir del Índice de Absorción (I_{abs}).

Valores	Criterio de estado
$I_a \leq 1$	Insatisfactorio
$1 < I_a \leq 1,25$	Dudoso
$1,25 < I_a \leq 1,4$	Aceptable
$1,4 < I_a \leq 1,6$	Bueno
$I_a > 1,6$	Muy Bueno

Tabla 8.25 Criterio del estado del aislamiento a partir de la Razón de Absorción Dieléctrica (RAD).

Valores	Criterio de estado
$RAD \leq 1$	Malo
$1 < RAD \leq 1,4$	Cuestionable
$1,4 < RAD \leq 1,6$	Aceptable
$RAD > 1,6$	Bueno

Tabla 3.11 Criterio del estado del aislamiento a partir de los ensayos de DD.[35]

Valor DD	Condiciones del aislamiento
> 7	Malo
$4 \leq DD < 7$	Pobre
$2 \leq DD < 4$	Cuestionable
< 2	OK
$= 0$	Homogéneo

Anexo 2. Datos técnicos del generador de la unidad 4.

1. Nombre de la central eléctrica-----**Carlos Manuel de Céspedes**
2. No. de la unidad ----- **4**
3. Fabricante----- **Japón**
4. Año de fabricación/instalación----- **1977**
5. MVA nominales del generador----- **185 MVA**
6. Voltaje nominal en los terminales del Generador---- **17.0 kV**
7. Velocidad nominal----- **3600 rpm**
8. Número de polos----- **2**
9. Factor de potencia nominal----- **0.85**
10. Eficiencia del generador para carga Nominal----- **98.88 %**
11. Momento de inercia (turbina más
generador) wR^2 ----- **23715.04 lb-ft²**
12. Constante de inercia (en base a
la máquina)----- **20 s o MJ/MVA**
13. Relación de cortocircuito (Rcc)----- **0.552**
14. Carga auxiliar típica----- **7.8 MW**
15. Potencia de salida máxima----- **158 MW**
16. Adjunte las curvas de
capacidad de potencia reactiva Q_{MAX} : ----- **144.05 MVAR, atraso**
del generador. Si estas curvas no
están disponibles provea los límites
de reactivo mínimo y máximo. Q_{MIN} : ----- **76.2 MVAR, adelanto**
- Todos los datos de impedancia deben estar en base a los MVA dados en el punto (5) y los kV dados en el punto (6).
17. X_d Reactancia sincrónica no
saturada de eje directo----- **181.1 %**
saturada de eje directo----- **25.8 %**
18. X''_d Reactancia subtransitoria no
saturada de eje directo----- **19.56 %**

19. R_a	Resistencia de armadura-----	0.00189 Ω
20. T_{AGEN}	Constante de tiempo de la armadura en cortocircuito-----	1.13 s
21.	T'_d Constante de tiempo transitoria de eje directo en cortocircuito.-----	0.87 s
22. T''_d	Constante de tiempo subtransitoria de eje directo en cortocircuito.-----	0.038 s
23.	X_2 Reactancia de secuencia negativa (saturada/no saturada) -----	21.4 %
24.	X_0 Reactancia de secuencia cero (saturada/no saturada) -----	10.9 %

Anexo 3. Figuras

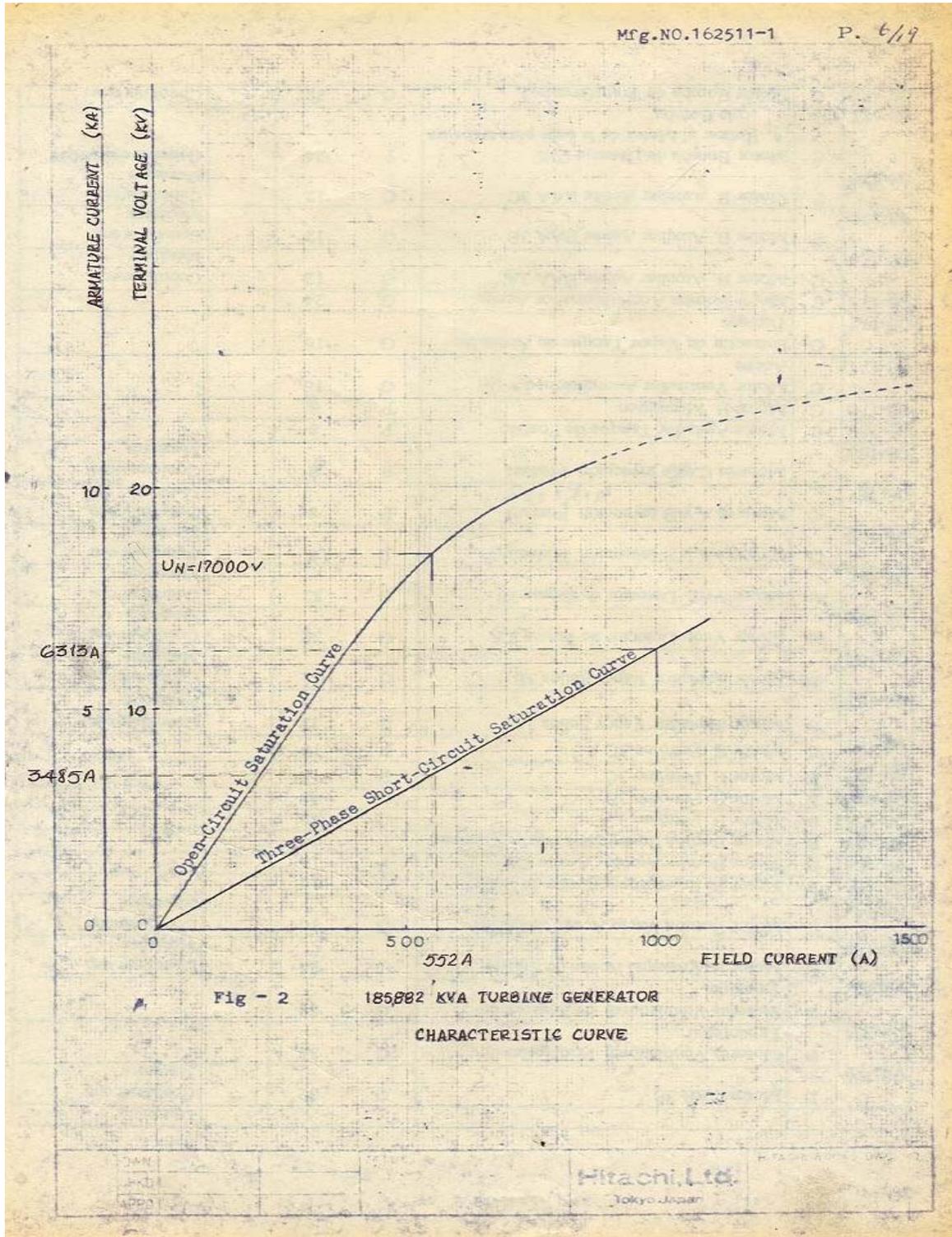


Fig. 8.1 Curva de vacío y característica de cortocircuito del generador 4.

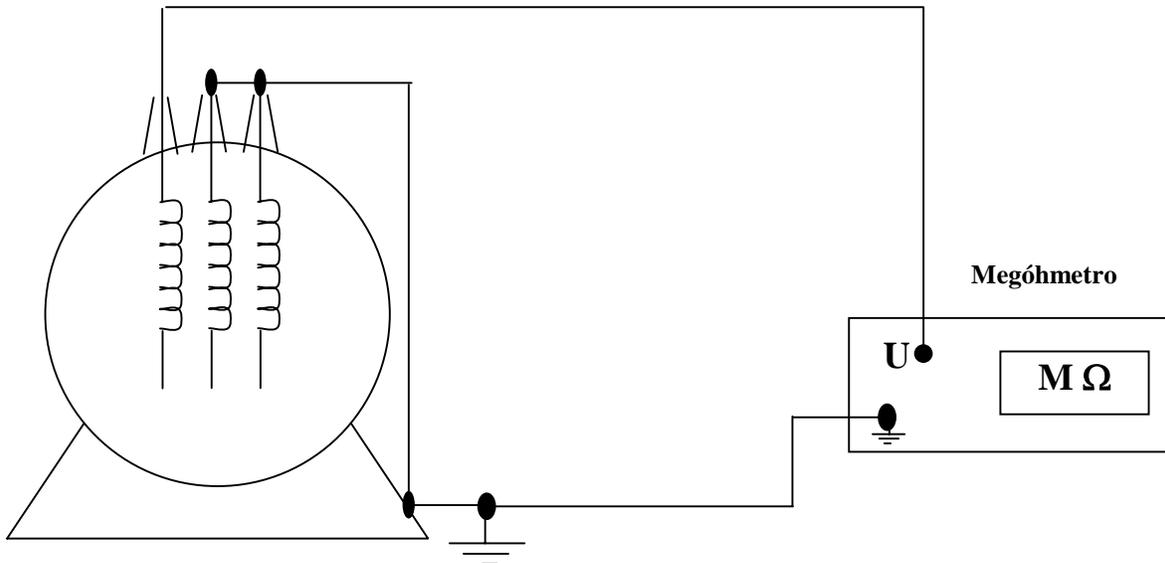


Fig. 8.3 Esquema para la realización de los ensayos de resistencia de aislamiento y resistencia de aislamiento en función del tiempo.

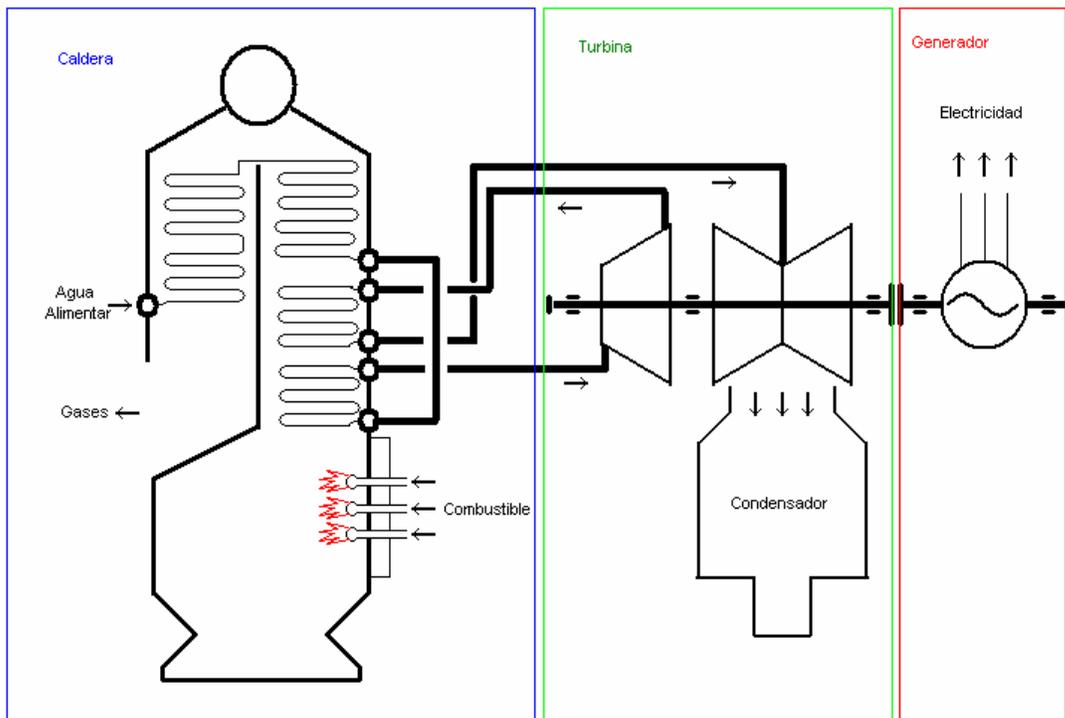


Fig. 8.4 Elementos fundamentales que componen el ciclo de generación de electricidad de una termoelectrica.

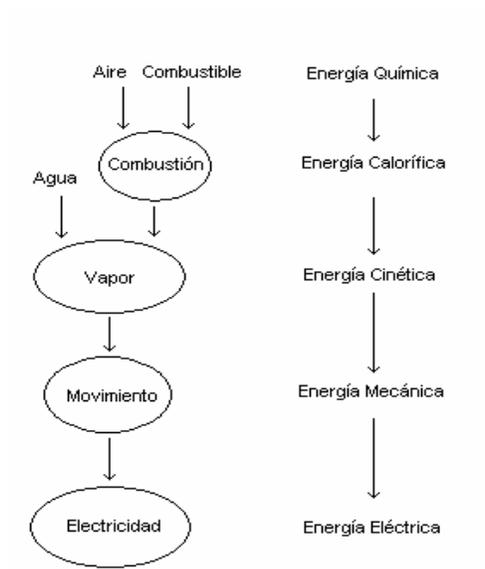


Fig. 8.5 Transformación de energía en un ciclo térmico.

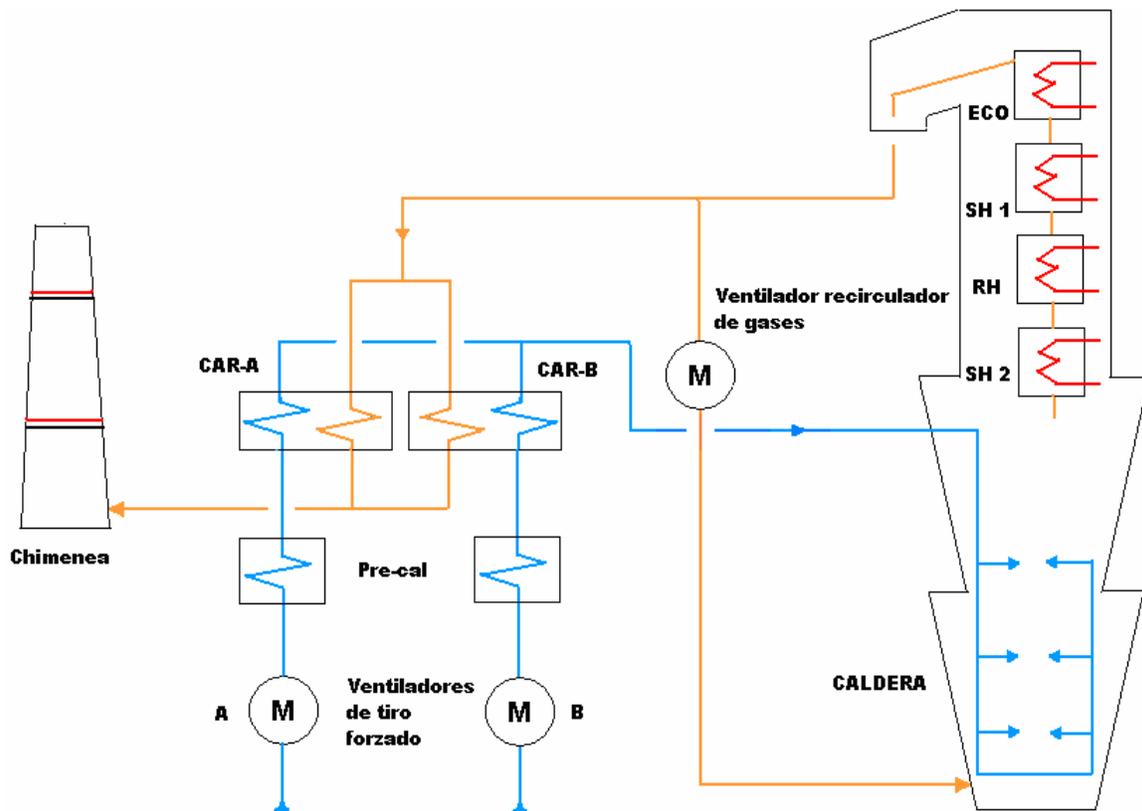


Fig. 8.6 Diagrama Esquemático Simplificado del Circuito de Aire y Gases de una Termoeléctrica.

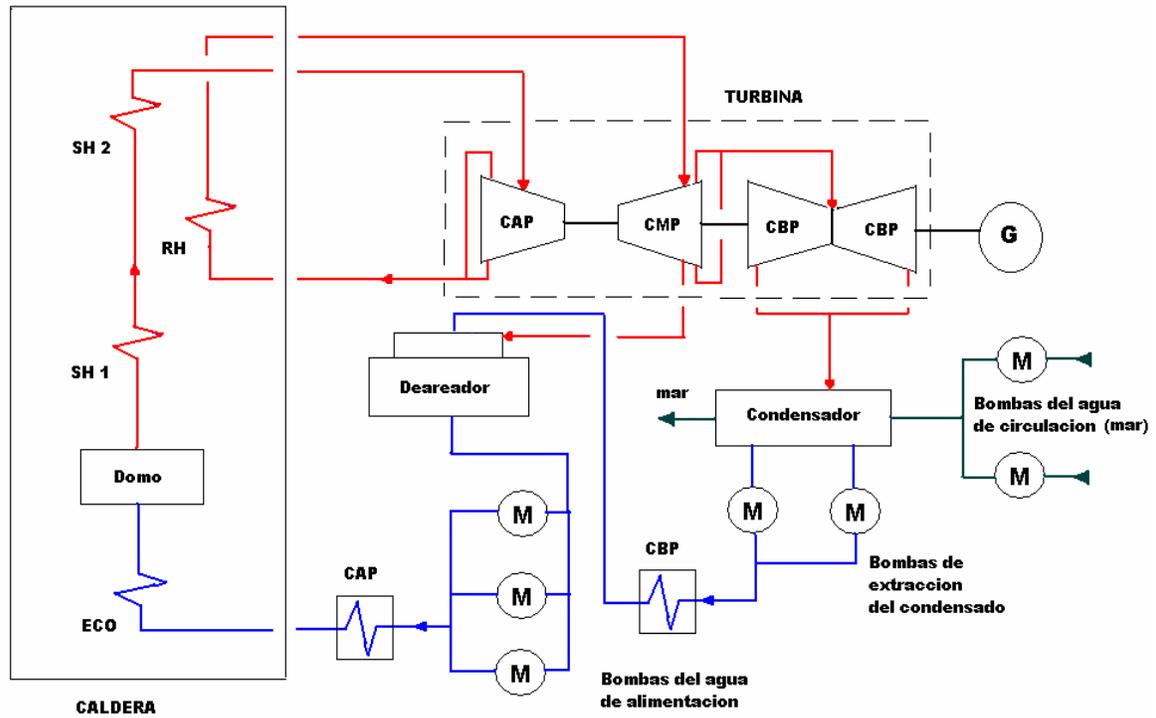


Fig. 8.7 Circuito simplificado de agua y vapor de una termoeléctrica.

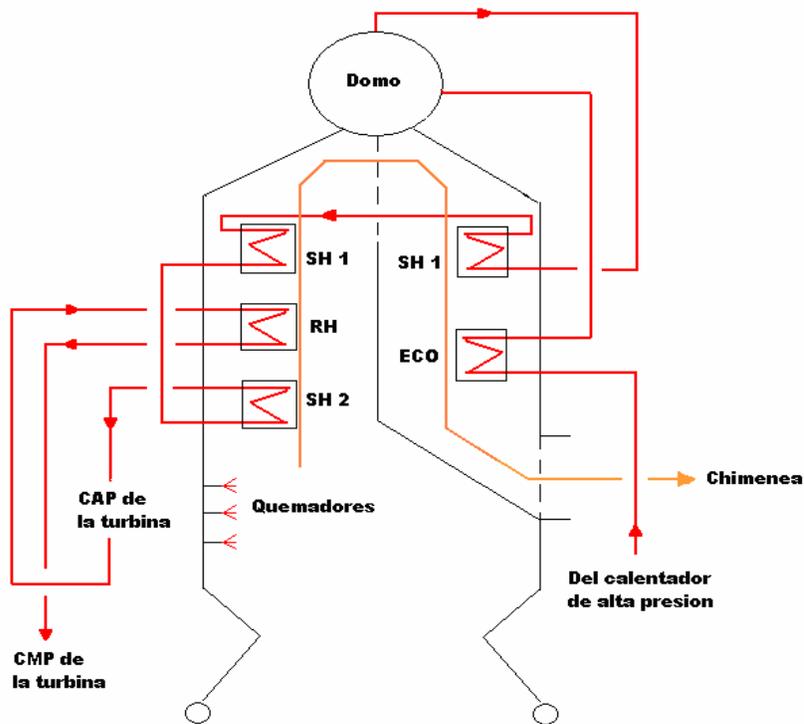


Fig. 8.8 Representación simplificada de la caldera de una termoeléctrica.

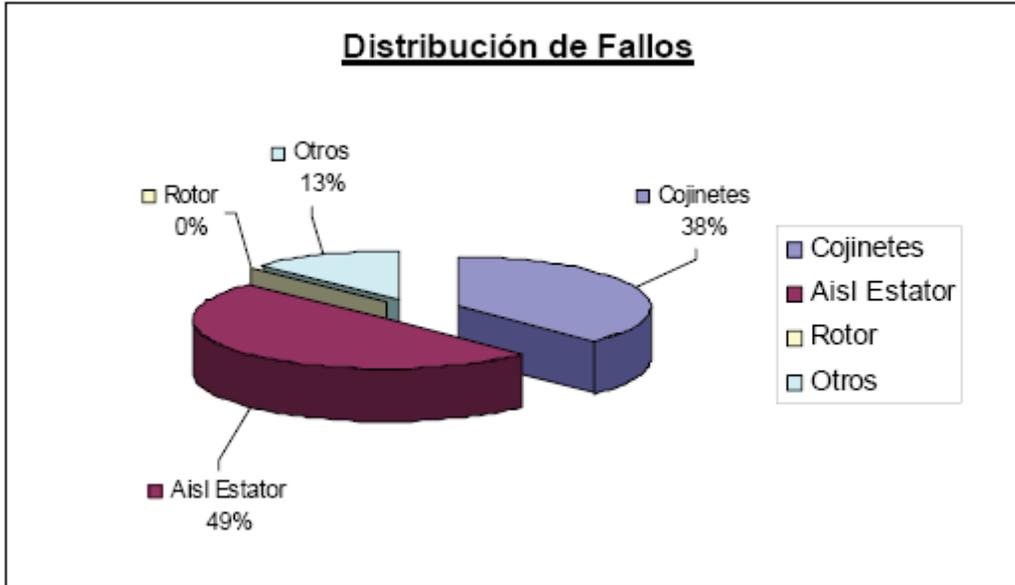


Fig. 8.9 Distribución de Fallos en MERGP de CMC-4.

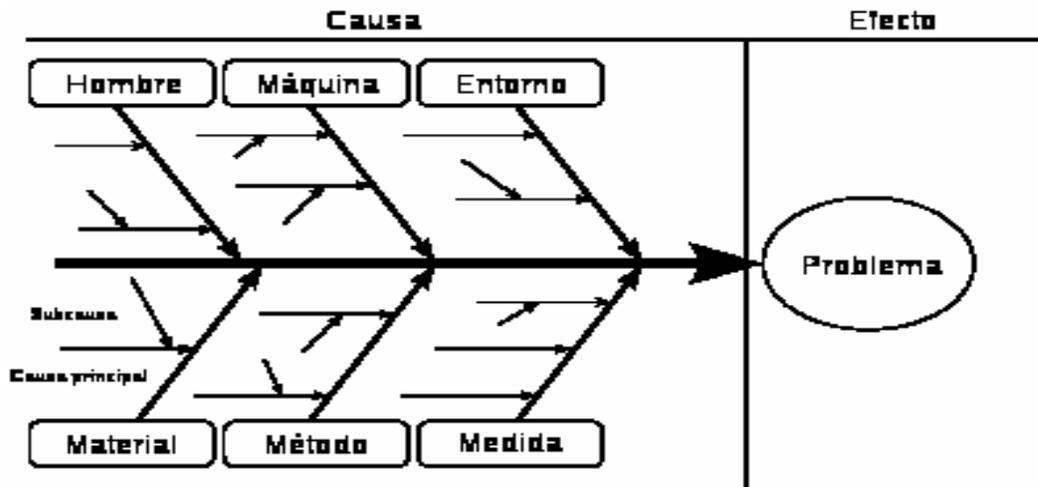


Fig. 8.10 Diagrama de causa efecto o de espina de pez ideado por el ingeniero Ishikawa.

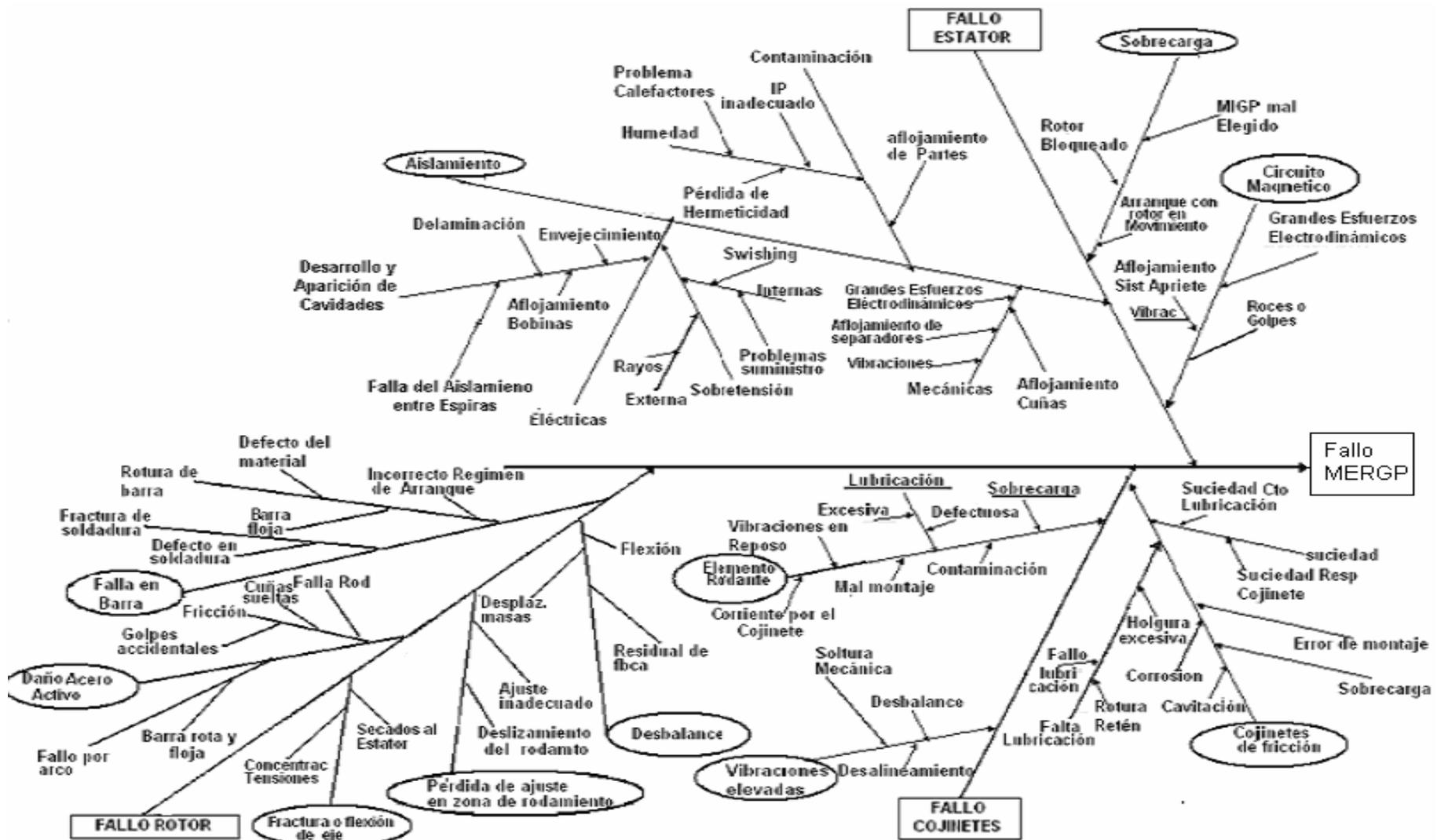


Fig. 8.11 Diagrama de Ishikawa para los Fallos de las MERGP.

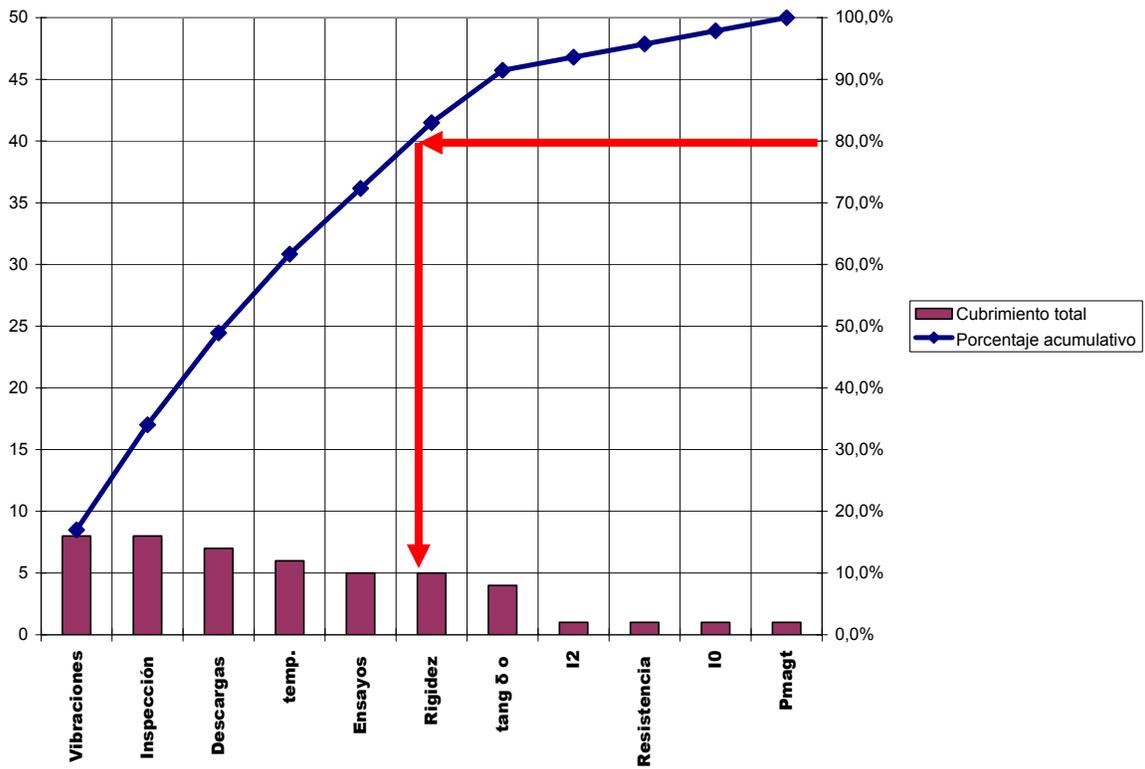


Fig. 8.12 Diagrama de Pareto para la Matriz de Falla de las MERGP.

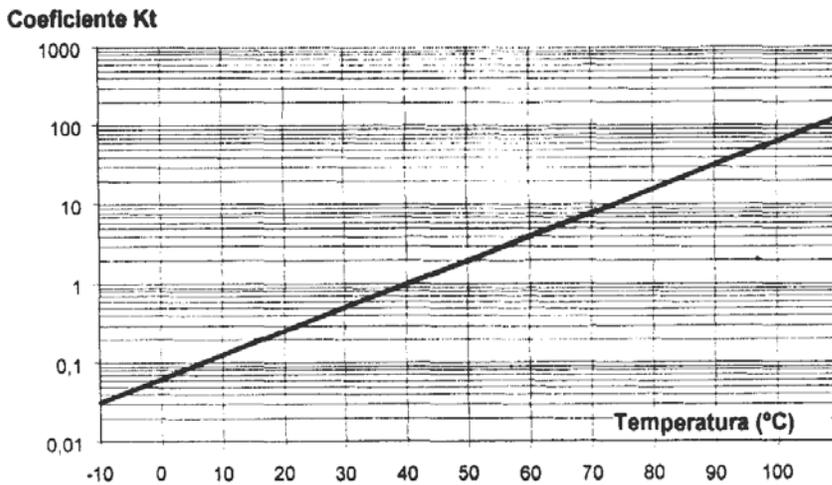


Fig. 8.13 Obtención del coeficiente KT para una temperatura base de 40°C [9].

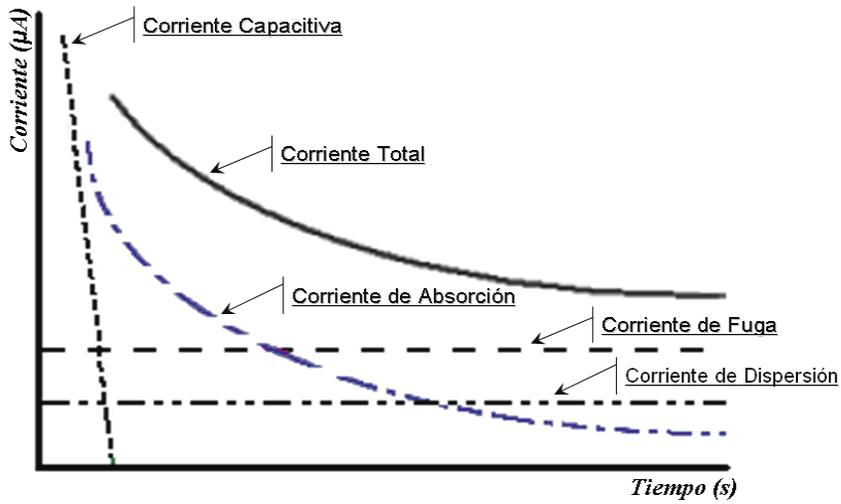


Fig. 8.14 Corrientes en un aislamiento sometido a un escalón de tensión directa[1].

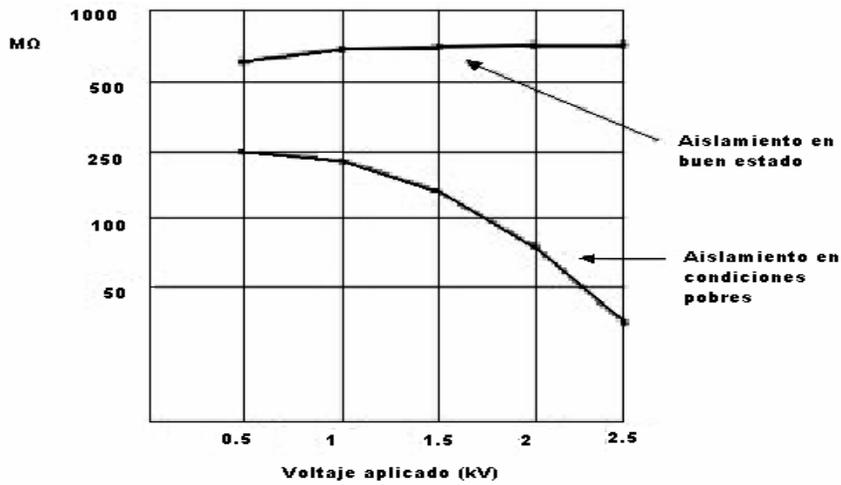


Fig. 8.15 Comportamiento de la resistencia de aislamiento en el tiempo al aplicar un escalón de tensión

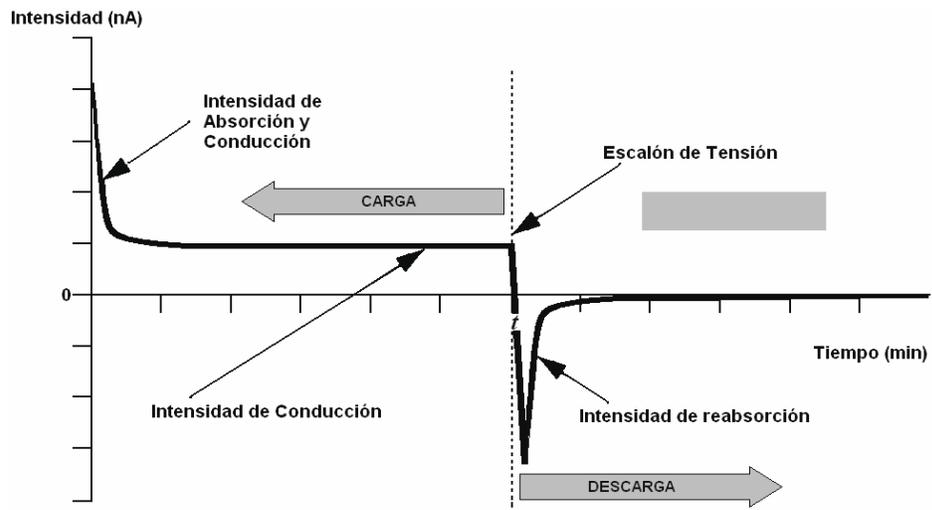


Fig. 8.16 Corrientes de absorción-reabsorción.