



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**PRUEBAS Y DIAGNÓSTICO DE UN GENERADOR ELÉCTRICO MARCA ELECTRIC
MACHINERY CON UNA CAPACIDAD NOMINAL DE 33 MVA, PARA DETERMINAR LA
FACTIBILIDAD DE INSTALARLO EN OTRA UNIDAD GENERADORA QUE SE ENCUENTRA
FUERA DE OPERACIÓN**

Guillermo Rafael Roche Rodríguez

Asesorado por el Ing. Marco Junio Martínez Hernández

Guatemala, octubre de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PRUEBAS Y DIAGNÓSTICO DE UN GENERADOR ELÉCTRICO MARCA ELECTRIC
MACHINERY CON UNA CAPACIDAD NOMINAL DE 33 MVA, PARA DETERMINAR LA
FACTIBILIDAD DE INSTALARLO EN OTRA UNIDAD GENERADORA QUE SE ENCUENTRA
FUERA DE OPERACIÓN**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

GUILLERMO RAFAEL ROCHE RODRÍGUEZ
ASESORADO POR EL ING. MARCO JUNIO MARTÍNEZ HERNÁNDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
VOCAL V	Br. Carlos Enrique Gómez Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Saul Cabezas Durán
EXAMINADOR	Ing. Kenneth Issur Estrada Ruíz
EXAMINADOR	Ing. Marco Junio Martinez Hernández
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

PRUEBAS Y DIAGNÓSTICO DE UN GENERADOR ELÉCTRICO MARCA ELECTRIC MACHINERY CON UNA CAPACIDAD NOMINAL DE 33 MVA, PARA DETERMINAR LA FACTIBILIDAD DE INSTALARLO EN OTRA UNIDAD GENERADORA QUE SE ENCUENTRA FUERA DE OPERACIÓN

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 20 de marzo del 2013.



Guillermo Rafael Roche Rodríguez

Guatemala, 17 de octubre del 2017

Inga. Christa Classon de Pinto
Dirección Unidad de EPS
Universidad de San Carlos de Guatemala
Ciudad de Guatemala

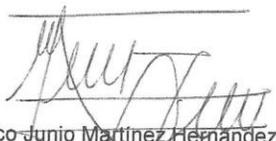
Estimada Ingeniera Classon:

Reciba un cordial saludo, deseándole éxitos en sus actividades profesionales.

Luego de mi corto saludo, aprovecho para hacer de su conocimiento que he asesorado el informe final del estudiante Guillermo Rafael Roche Rodríguez quien se identifica con número de carne: 199712084, titulado **"PRUEBAS Y DIAGNÓSTICO DE UN GENERADOR ELÉCTRICO MARCA ELECTRIC MACHINERY CON UNA CAPACIDAD NOMINAL DE 33 MVA, PARA DETERMINAR LA FACTIBILIDAD DE INSTALARLO EN OTRA UNIDAD GENERADORA QUE SE ENCUENTRA FUERA DE OPERACIÓN"**, el cual fue revisado y realizadas las correcciones que correspondieron.

Sin otro particular,

Atentamente,



Marco Junio Martínez Hernández
Ingeniero Electricista
Colegiado: 4672

ING. MARCO JUNIO MARTÍNEZ
COLEGIADO No. 4,672

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIDAD DE EPS

Guatemala, 12 de abril de 2018.
Ref.EPS.DOC.332.04,18.

Inga. Christa Classon de Pinto
Directora Unidad de EPS
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimada Ingeniera Classon de Pinto.

Por este medio atentamente le informo que como Asesor-Supervisor de la Práctica del Ejercicio Profesional Supervisado (E.P.S.), del estudiante universitario **Guillermo Rafael Roche Rodríguez** de la Carrera de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Registro Académico No. **9712084** y CUI **2557 74435 0501**, procedí a revisar el informe final, cuyo título es **"PRUEBAS Y DIAGNÓSTICO DE GENERADOR ELÉCTRICO MARCA ELECTRIC MACHINERY CON UNA CAPACIDAD NOMINAL DE 33 MVA PARA DETERMINAR LA FACTIBILIDAD DE INSTALARLO EN OTRA UNIDAD GENERADORA QUE SE ENCUENTRA FUERA DE OPERACIÓN"**.

En tal virtud, **LO DOY POR APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Kenneth Issur Estrada Ruiz
Asesor-Supervisor de EPS
Área de Ingeniería Eléctrica
Ing. Kenneth Issur Estrada Ruiz
ASESOR - SUPERVISOR DE EPS
Unidad de Prácticas de Ingeniería y EPS
Facultad de Ingeniería

c.c. Archivo
KIER/ra

Edificio de EPS, Facultad de Ingeniería, Ciudad Universitaria, zona 12.
Teléfono directo: 2442-3509

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIDAD DE EPS

Guatemala 12 de abril de 2018.
Ref.EPS.D.134.04.18.

Ing. Otto Fernando Andriño González
Director Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimado Ingeniero Andriño González:

Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado **"PRUEBAS Y DIAGNÓSTICO DE GENERADOR ELÉCTRICO MARCA ELECTRIC MACHINERY CON UNA CAPACIDAD NOMINAL DE 33 MVA PARA DETERMINAR LA FACTIBILIDAD DE INSTALARLO EN OTRA UNIDAD GENERADORA QUE SE ENCUENTRA FUERA DE OPERACIÓN"** que fue desarrollado por el estudiante universitario, **Guillermo Rafael Roche Rodríguez**, quien fue debidamente asesorado por el Ing. Marco Junio Martínez Hernández y supervisado por el Ing. Kenneth Issur Estrada Ruiz.

Por lo que habiendo cumplido con los objetivos y requisitos de ley del referido trabajo y existiendo la aprobación del mismo por parte del Asesor y del Supervisor de EPS, en mi calidad de Directora apruebo su contenido solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,
"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Christa Classon de Parro
Directora Unidad de EPS

DIRECCION
Unidad de Prácticas de Ingeniería y EPS
Facultad de Ingeniería

CCdP/ra

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

REF. EIME 36.2018.
5 DE MARZO 2018.

Señor Director
Ing. Otto Fernando Andrino González
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
**PRUEBAS Y DIAGNÓSTICO DE GENERADOR ELÉCTRICO
MARCA ELECTRIC MACHINERY CON UNA CAPACIDAD
NOMINAL DE 33 MVA PARA DETERMINAR LA FACTIBILIDAD
DE INSTALARLO EN OTRA UNIDAD GENERADORA QUE SE
ENCUENTRA FUERA DE OPERACIÓN,** del estudiante; Guillermo
Rafael Roche Rodríguez, que cumple con los requisitos establecidos
para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS


M.B.A. Ing. Saul Cabezas Durán
Ingeniero Electricista
Colegiado No. 4648
Ing. Saul Cabezas Durán
Coordinador de Potencia



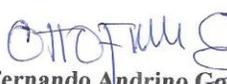
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

REF. EIME 37.2018.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen el Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante: **GUILLERMO RAFAEL ROCHE RODRÍGUEZ** titulado: **PRUEBAS Y DIAGNÓSTICO DE GENERADOR ELÉCTRICO MARCA ELECTRIC MACHINERY CON UNA CAPACIDAD NOMINAL DE 33 MVA PARA DETERMINAR LA FACTIBILIDAD DE INSTALARLO EN OTRA UNIDAD GENERADORA QUE SE ENCUENTRA FUERA DE OPERACIÓN** procede a la autorización del mismo.


Ing. Otto Fernando Andrino González



GUATEMALA, 18 DE MAYO 2018.

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 387.2018

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **PRUEBAS Y DIAGNÓSTICO DE UN GENERADOR ELÉCTRICO MARCA ELECTRIC MACHINERY CON UNA CAPACIDAD NOMINAL DE 33 MVA, PARA DETERMINAR LA FACTIBILIDAD DE INSTALARLO EN OTRA UNIDAD GENERADORA QUE SE ENCUENTRA FUERA DE OPERACIÓN**, presentado por el estudiante universitario: **Guillermo Rafael Roche Rodríguez**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, octubre de 2018

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Porque es mi guía espiritual y con sus bendiciones me permite alcanzar otra meta en mi vida.
Mis padres	Guillermo Roche y Leticia Rodríguez de Roche, por todo el sacrificio, amor incondicional y ser el ejemplo en mi vida.
Mi esposa	María Alejandra Reyes de Roche. Por ser mi apoyo incondicional en las decisiones importantes de mi vida.
Mis hijos	Sebastian, Thiago y Julián Roche Reyes, por la felicidad que me dan y son mi inspiración en todo lo que realizo en mi vida.
Mis hermanos	Jarol y Roberto Roche Rodríguez, por su apoyo y todos los momentos compartidos.
Mis cuñadas y cuñados	Con mucho cariño.
Mis sobrinas	Valerie y Adriana Roche, con mucho amor.

Mis abuelos

Celia Cuyún, Rafael Roche (q. e. p. d.) y Guillermina Roldán (q. e. p. d.), por sus consejos y el amor brindado.

Mis padrinos

Yolanda Rodríguez, Carlos Estrada y Dora Galicia, por el amor, consejos y apoyo brindado.

Mis suegros

Oscar Castillo y Aracely Reyes, con mucho cariño, gracias por el amor y cuidado de mis hijos.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por abrirme las puertas del conocimiento.
Facultad de Ingeniería	Por todo el conocimiento transmitido que me llevo a formarme como profesional.
Mis amigos de la facultad	Que me apoyaron en todo momento, siendo parte importante en esta etapa de mi vida.
Ing. Marco Junio Martínez Hernández	Por su amistad, compartir su conocimiento, ayuda y tiempo en el asesoramiento.
Ing. Carlos Juventino Esteban Girón	Por su amistad y apoyo.
Lázaro Rubén Díaz Sandoval	Por su amistad y apoyo.
Instituto Nacional de Electrificación	Por permitir desarrollarme como profesional y darme la oportunidad de realizar mi Ejercicio Profesional Supervisado.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
GLOSARIO	XV
RESUMEN.....	XIX
OBJETIVOS.....	XXI
INTRODUCCIÓN	XXIII
1. FASE DE INVESTIGACIÓN	1
1.1. Historia de la energía eléctrica en Guatemala.....	1
1.2. Antecedentes del Instituto Nacional de Electrificación – INDE-.....	2
1.2.1. Misión del Inde.....	3
1.2.2. Visión del Inde	3
1.2.3. Estructura organizacional	3
1.2.4. Organigrama Inde.....	5
1.3. Generalidades del municipio de Escuintla	5
1.3.1. Topografía y geología:	7
1.3.2. Población económicamente activa (PEA):.....	8
1.3.3. Recursos naturales.....	8
1.3.4. Suelo.	8
1.3.5. Bosques.....	9
1.3.6. Ubicación geográfica	9
1.4. Marco teórico.....	9
1.4.1. Centrales termoeléctricas	9
1.4.2. Tipos de centrales termoeléctricas	10

1.4.2.1.	Central termoeléctrica de ciclo convencional	10
1.4.2.2.	Central termoeléctrica de ciclo combinado.....	11
1.4.3.	Principios básicos de las máquinas rotativas.....	12
1.4.3.1.	Ley de inducción electromagnética de Faraday	12
1.4.3.2.	Ley de Ampere-Biot-Savart sobre las fuerzas electromagnéticas inducidas.	13
1.4.3.3.	Ley de Lenz de acción y reacción	14
1.4.3.4.	Conversión electromecánica de la energía.....	15
1.4.3.5.	La máquina sincrónica	16
1.5.	Tipos de mantenimiento y descripción de pruebas eléctricas para diagnóstico de generadores de potencia	
1.5.1.	Definición de mantenimiento	19
1.5.2.	Tipos de mantenimiento	
1.5.2.1.	Mantenimiento correctivo	20
1.5.2.2.	Mantenimiento preventivo	20
1.5.2.3.	Mantenimiento predictivo.....	22
1.5.3.	Descripción de pruebas para diagnóstico de generadores de potencia.....	
1.5.3.1.	Prueba de resistencia de aislamiento de devanados del estator principal (MEGGER).....	
1.5.3.1.1.	Índice de polarización (IP)	23

1.5.3.1.2.	Resistencia del aislamiento valores mínimos.....	25
1.5.3.1.3.	Corrección por temperatura de la resistencia del aislamiento.	27
1.5.3.1.4.	Interpretación de resultados.....	30
1.5.3.2.	Prueba de factor de potencia y capacitancia del aislamiento en función de voltaje (TIP-UP-TEST)	31
1.5.3.2.1.	Definición de factor de potencia en pruebas de corriente alterna.....	31
1.5.3.2.2.	Conceptos de capacitancia para aislamientos.....	34
1.5.3.2.3.	Interpretación de resultados.....	35
1.5.3.3.	Prueba de resistencia óhmica de devanados del estator principal	36
1.5.3.4.	Prueba de descargas parciales	38
1.5.3.4.1.	Definición de descargas parciales.....	38
1.5.3.4.2.	tipos de descargas parciales	39
1.5.3.4.3.	Modelado del fenómeno	40

1.5.3.4.4.	Efectos negativos de las descargas parciales	41
1.5.3.4.5.	Detección de las descargas parciales	43
1.5.3.4.6.	Método de prueba.....	44
1.5.3.4.7.	Ventajas que ofrece este ensayo.....	46
1.5.3.4.8.	Fuentes externas que influyen en la medición de descargas parciales	46
1.5.3.4.9.	Interpretación de resultados	47
2.	FASE TÉCNICO PROFESIONAL	49
2.1.	documentación de resultados, diagnóstico y evaluación del generador eléctrico.....	49
2.1.1.	descripción de los trabajos realizados a unidad generadora gas núm. 3	49
2.1.1.1.	Inspección visual	50
2.1.1.2.	Prueba de factor de potencia de aislamiento en función de voltaje (tip-up test)	52
2.1.1.3.	Prueba de resistencia de aislamiento de devanados del estator	59
2.1.2.	Descripción de los trabajos realizados a unidad generadora gas núm. 4	64
2.1.2.1.	Inspección visual	65

2.1.2.2.	Prueba de factor de potencia de aislamiento en funcion de voltaje (tip-up test).....	67
2.1.2.3.	Prueba de resistencia de aislamiento de devanados del estator (megger)	75
2.1.2.4.	Prueba de resistencia óhmica de devanados	81
2.1.2.5.	Prueba de descargas parciales	82
3.	FASE ENSEÑANZA APRENDIZAJE	87
3.1.	Objetivo del curso electricidad básica	87
3.2.	Contenido del curso.....	87
3.2.1.	Definición de electricidad.....	88
3.2.2.	Magnitudes fundamentales de la electricidad	88
3.2.2.1.	Intensidad de corriente	88
3.2.2.2.	Resistencia	88
3.2.2.3.	Voltaje o diferencia de potencial	88
3.2.3.	Ley de OHM.....	89
3.2.4.	Conexión de resistencias en serie o paralelo.	89
3.2.4.1.	Resistencias en serie.....	89
3.2.4.2.	Resistencias en paralelo.....	91
3.2.5.	Leyes de Kirchhoff	92
3.2.5.1.	Ley de corrientes de Kirchhoff	92
3.2.5.2.	Ley de voltaje de Kirchhoff	94
3.2.6.	Potencia y energía eléctrica.....	95
3.2.6.1.	Potencia eléctrica	96
3.2.6.2.	Energía eléctrica.....	97
3.2.7.	Corriente alterna	97
3.2.8.	Protecciones eléctricas	98

3.2.8.1.	Protección contra cortocircuito	99
3.2.8.1.1.	Fusibles.....	100
3.2.8.1.2.	Interruptor termomagnético	100
3.2.9.	El transformador.....	102
3.2.10.	El relé y el contactor	104
3.2.11.	Temporizadores	105
3.2.12.	Electroválvulas	107
4.	ANALISIS FINANCIERO.....	109
4.1.	Antecedentes	109
4.2.	Análisis costo-beneficio:.....	110
4.2.1.	Sistemas y equipos a intervenir para la Rehabilitacion de la unidad GENERADORA GAS núm. 3	111
	CONCLUSIONES.....	115
	RECOMENDACIONES	117
	BIBLIOGRAFÍA.....	119
	APÉNDICES.....	121
	ANEXOS.....	123

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Organigrama Inde	5
2.	Mapa de Escuintla.....	7
3.	Ley de Faraday en ambas formas, a) Inducción del voltaje por flujo cambiante b) Inducción del voltaje por movimiento del conductor	13
4.	Ley de Ampere-Biot-Savart sobre electromagnetismo, dirección de la fuerza inducida.	14
5.	Ley de Lenz, las corrientes inducidas tratarán de cancelar el efecto que las originó.....	15
6.	Principio de conversión de la energía, aplicable a las máquinas eléctricas rotativas.....	16
7.	Esquema de la construcción de las máquinas sincrónicas, a) Corte transversal de una máquina de polos salientes, b) Corte transversal de una máquina de polos lisos.....	17
8.	Obtención de la onda sinusoidal por medio de un rotor de polos lisos.....	18
9.	Curva vida útil de un equipo.....	21
10.	Medidas típicas de resistencia para dos estados en los devanados	26
11.	Coeficiente aproximado KT para aislamientos que se reducen a la mitad cada 10 °C de incremento en la temperatura.	28
12.	Circuito equivalente en paralelo simplificado de un sistema de aislamiento.....	32

13.	Componentes vectoriales del voltaje de prueba y corrientes en un circuito equivalente en paralelo.	33
14.	Representación simplificada de los sistemas de aislamiento de un generador de potencia	36
15.	Dieléctrico entre dos conductores	40
16.	Gráfica de desplazamiento y producción de las descargas parciales.	41
17.	Arborescencias producidas en el dieléctrico a causa de las descargas parciales.....	43
18.	Esquema básico del circuito para la medición de descargas parciales.	44
19.	Esquema de la prueba de detección de descargas parciales.....	45
20.	Representación de las descargas parciales a) con una base de tiempos elíptica b) con una base de tiempos lineal.	46
21.	Unidad generadora gas núm. 3	50
22.	Placa de datos de la unidad generadora gas núm. 3.....	51
23.	Conexión punto estrella de la unidad generadora gas núm. 3.....	51
24.	Desmontaje del rotor de la unidad generadora gas núm. 3	52
25.	Unidad generadora gas núm. 4.....	66
26.	Desmontaje del rotor de la unidad generadora gas núm. 4	66
27.	Configuración instrumental de la prueba de descargas parciales.....	82
28.	Resultado de prueba de descargas parciales: ruido de excitador	83
29.	Resultado de prueba de descargas parciales: descarga interna (micro huecos) o descarga de superficie en la fase V	83
30.	Resultados de prueba de descargas parciales: descarga interna (micro huecos) o descarga superficial en la fase W.....	84
31.	Resultados de prueba de descargas parciales: descargas similares a la superficie del devanado final y micro huecos en la fase U.....	84

32.	Resultados de prueba de descargas parciales: descargas similares a la descarga final del arrollamiento en la fase U.....	85
33.	Resistencias en serie	90
34.	Resistencias en paralelo	91
35.	Representación simplificada de las corrientes en un circuito	93
36.	Representación simplificada de las voltajes en un circuito.....	94
37.	Forma de onda sinusoidal	98
38.	Fusibles.....	100
39.	Interruptor termomagnético	102
40.	Transformador.....	104
41.	Relé y contactor	105
42.	Temporizador	106
43.	Electroválvula	108

TABLAS

I.	Valores mínimos para los índices de polarización según la clase de aislamiento.....	25
II.	Valores mínimos recomendados de resistencia del aislamiento a 40°C.....	26
III.	Guía de voltajes CD a ser aplicados durante la resistencia de aislamiento.....	29
IV.	Placa de datos del generador de la unidad generadora gas núm. 3..	49
V.	Resultados de la prueba de factor de potencia de aislamiento Tip-up al generador de la unidad gas núm. 3.....	53
VI.	Resultados de la prueba de factor de potencia de aislamiento TIP-UP fase u/tierra al generador de la unidad gas núm. 3.....	54
VII.	Resultados de la prueba de factor de potencia de aislamiento TIP-UP fase v/tierra al generador de la unidad gas núm. 3.....	55

VIII.	Resultados de la prueba de factor de potencia de aislamiento TIP- UP fase w/tierra al generador de la unidad gas núm. 3.....	56
IX.	Resultados de la prueba de factor de potencia de aislamiento TIP- UP fase uvw/tierra al generador de la unidad gas núm. 3.....	57
X.	Resultados de la prueba de factor de potencia de aislamiento TIP- UP fase u/v al generador de la unidad gas núm. 3.....	57
XI.	Resultados de la prueba de factor de potencia de aislamiento TIP- UP fase v/w al generador de la unidad gas núm. 3.....	58
XII.	Resultados de la prueba de factor de potencia de aislamiento TIP- UP fase w/u al generador de la unidad gas núm. 3.....	59
XIII.	Resultados de la prueba de resistencia de aislamiento de devanados del estator de la unidad generadora gas núm. 3.....	60
XIV.	Resultados de la prueba de resistencia de aislamiento U/TIERRA de la unidad generadora gas núm. 3.....	61
XV.	Resultados de la prueba de resistencia de aislamiento V/TIERRA de la unidad generadora gas núm. 3.....	61
XVI.	Resultados de la prueba de resistencia de aislamiento W/TIERRA de la unidad generadora gas núm. 3.....	62
XVII.	Resultados de la prueba de resistencia de aislamiento UVW/TIERRA de la unidad generadora gas núm. 3.....	62
XVIII.	Resultados de la prueba de resistencia de aislamiento U/V de la unidad generadora gas núm. 3.....	63
XIX.	Resultados de la prueba de resistencia de aislamiento V/W de la unidad generadora gas núm. 3.....	63
XX.	Resultados de la prueba de resistencia de aislamiento W/U de la unidad generadora gas núm. 3.....	64
XXI.	Placa de datos del generador de la unidad generadora gas núm. 4...	65
XXII.	Resultados de la prueba de factor de potencia de aislamiento tip- up al generador de la unidad gas núm. 4.....	67

XXIII.	Resultados de la prueba de factor de potencia de aislamiento tip-up fase u/tierra al generador de la unidad gas núm. 4.	68
XXIV.	Resultados de la prueba de factor de potencia de aislamiento tip-up fase v/tierra al generador de la unidad gas núm. 4.	69
XXV.	Resultados de la prueba de factor de potencia de aislamiento tip-up fase w/tierra al generador de la unidad gas núm. 4.	70
XXVI.	Resultados de la prueba de factor de potencia de aislamiento tip-up fase uvw/tierra al generador de la unidad gas núm. 4.....	71
XXVII.	Resultados de la prueba de factor de potencia de aislamiento tip-up fase u/v al generador de la unidad gas núm. 4.	72
XXVIII.	Resultados de la prueba de factor de potencia de aislamiento tip-up fase v/w al generador de la unidad gas núm. 4.....	73
XXIX.	Resultados de la prueba de factor de potencia de aislamiento tip-up fase w/u al generador de la unidad gas núm. 4.....	74
XXX.	Resultados de la prueba de resistencia de aislamiento u/tierra de la unidad generadora gas núm. 4.....	75
XXXI.	Resultados de la prueba de resistencia de aislamiento v/tierra de la unidad generadora gas núm. 4.....	76
XXXII.	Resultados de la prueba de resistencia de aislamiento w/tierra de la unidad generadora gas núm. 4.....	77
XXXIII.	Resultados de la prueba de resistencia de aislamiento uvw/tierra de la unidad generadora gas núm. 4.....	78
XXXIV.	Resultados de la prueba de resistencia de aislamiento U/V de la unidad generadora gas núm. 4	79
XXXV.	Resultados de la prueba de resistencia de aislamiento V/W de la unidad generadora gas núm. 4	80
XXXVI.	Resultados de la prueba de resistencia de aislamiento W/U de la unidad generadora gas núm. 4	81

XXXVII.	Resultados de la prueba de resistencia óhmica a los devanados del generador eléctrico de la unidad generadora gas núm.4	82
XXXVIII.	Sistemas y equipos	111

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Amperios
C	Celcius
CA	Corriente alterna
CD	Corriente directa
I_p	Corriente primaria
I_s	Corriente secundaria
EGEE	Empresa de Generación de Energía Eléctrica
FP	Factor de potencia
FMM	Fuerza magnetomotriz
°	Grado (s)
Hz	Hertz
IEEE	Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
INDE	Instituto Nacional de Electrificación
IP	Índice de polarización
KΩ	Kilo ohmios
KW	Kilo vatio o kilowatts (s)
KV	Kilo voltio
LCK	Ley de corrientes de Kirchhoff
MW	Mega vatio o mega watts
MVA	Mega voltio amperio
mA	Mili amperios
mN	Mili newton
mV	Mili voltio

mW	Mili Watt o Mili Vatio
mm	Milímetro
N.A	Normalmente abierta
N.C	Normalmente cerrada
N_p	Número de espiras en el primario
N_s	Número de espiras en el secundario
Ω	Ohmio
pF	Pico Faradios
%	Porcentaje
m	Relación de transformación
R	Resistencia
S.T.	Sobre tensión
T	Temperatura
VED	Voltaje de extinción de descarga
VID	Voltaje de inicio de descarga
V_p	Voltaje primario
V_s	Voltaje secundario

GLOSARIO

Aislador	Es un material, usualmente porcelana o polímeros, que su función es evitar el paso de la electricidad.
Amperios	Es la unidad de medida de la corriente eléctrica.
Baja tensión	Es un nivel de voltaje de 120/240 V y 380/440 V.
Bobina	Es un grupo de conductores eléctricos en forma de espiras puestas una sobre otra, también llamado devanado.
Capacitancia	Es la magnitud eléctrica de un capacitor.
Capacitor	Es un dispositivo eléctrico capaz de acumular energía en forma de campo eléctrico.
Conductor eléctrico	Es un material, cable o alambre, capaz de conducir una corriente eléctrica, usualmente de cobre.
Conector	Es un dispositivo utilizado para unir dos o más equipos eléctricos.
Corto circuito	Es una falla dentro de un circuito eléctrico.

Corriente	A menos que se indique lo contrario, corriente significa corriente eléctrica.
Devanado	También llamado bobina.
<i>Electric Machinery</i>	Empresa fabricante del equipo.
Energía	Capacidad que tiene la materia de producir trabajo en forma de movimiento, luz, calor, entre otros.
Espira	Es un conductor eléctrico en forma circular, el cual puede ser de alambre o de platina.
Estator	Es la parte inmóvil o estática de un generador de energía eléctrica.
Falla	Es una condición de un circuito eléctrico en el cual los parámetros de operación son elevados.
Fase	A menos que se indique lo contrario, es cada una de las líneas o conductores eléctricos de un sistema trifásico.
Frecuencia	Cambio de dirección de la corriente eléctrica; se expresa en Hertz o ciclos por segundo.
Fuerza magnetomotriz	Es el diferencial de potencial o voltaje, producido por una campo magnético.

Impedancia	Es la oposición que presenta un circuito o dispositivo al paso de una corriente eléctrica.
Inducción	Proceso por el cual el campo magnético creado por un conductor eléctrico provoca una fuerza eléctrica en otro conductor próximo.
Ley de Kirchhoff	Es un fundamento teórico, en la cual se indica que en cualquier nodo, la suma de las corrientes que entran en él son iguales a la suma de las corrientes que salen.
Media tensión	Es un nivel de voltaje entre 1KV Y 69 KV
Nominal	Es el valor al cual está diseñado un equipo, por ejemplo tensión nominal, corriente nominal.
<i>Overhaul</i>	Se le denomina así al mantenimiento mayor de un motor o equipo en general.
Potencia	Capacidad para realizar una función o una acción, o para producir un efecto determinado.
Primotor	Es un componente mecánico que transmite la potencia hacia el generador eléctrico.
Protecciones	Es un sistema de equipos eléctricos conectados entre sí para proteger un equipo importante.

Resistencia óhmica	Es la oposición que presenta un circuito o dispositivo al paso de una corriente eléctrica, expresada en ohms.
Rotor	Es la parte móvil de un generador de energía eléctrica.
Tensión o Voltaje	A menos que se indique lo contrario, tensión significa voltaje o una diferencia de potencial efectiva entre dos conductores o entre un conductor y tierra.
Tierra física	Es un sistema o red de seguridad para equipos eléctricos.
Turbina	Máquina que consiste en paletas o alabes en configuración circular, que puede ser accionada mediante vapor, gas, agua, entre otros.
Vibración	Es un movimiento u oscilación presentada en equipos en movimiento.

RESUMEN

El presente trabajo contiene la recopilación de los resultados de las pruebas de mantenimiento predictivo para llevar a cabo el diagnóstico de un generador eléctrico marca *Electric Machinery* con una capacidad nominal de 33 MVA y así determinar la factibilidad de instalarlo en otra unidad generadora que se encuentra fuera de operación en la Central Térmica Escuintla, así también un curso básico de generadores eléctricos al personal de trabajo de la planta.

En el primer capítulo se da a conocer información acerca del Instituto Nacional de Electrificación (Inde), así como de la planta Central Térmica Escuintla, generalidades del departamento de Escuintla que es donde se encuentran ubicadas sus instalaciones, introducción a las maquinas rotativas, los tipos de mantenimientos y las descripción de las distintas pruebas eléctricas realizadas.

En el segundo capítulo se dan a conocer los resultados de los protocolos de pruebas eléctricas realizados a los generadores eléctricos de las unidades generadoras gas 3 y 4.

En el tercer capítulo se muestra el contenido del curso básico de generadores eléctricos dirigido al personal de la planta Central Térmica Escuintla, recalando la importancia de un generador eléctrico en un sistema de generación de energía eléctrica.

En el capítulo final se hace un análisis financiero costo-beneficio, en donde se evalúan los costos de reparación de la unidad generadora de energía eléctrica gas núm. 3 versus los ingresos que podrían representar para el Instituto Nacional de Electrificación (Inde) si esta unidad generadora se declara con oferta firme ante el Administrador del Mercado Mayorista (AMM).

OBJETIVOS

General

Realizar pruebas y diagnóstico del generador eléctrico de la unidad generadora de energía eléctrica Gas No. 4 para evaluar la factibilidad de instalarlo en la unidad Gas núm. 3.

Específicos

1. Documentar los conceptos generales de los diferentes tipos de mantenimiento aplicables a todo equipo de potencia.
2. Documentar los resultados de las pruebas eléctricas de los generadores eléctricos de las unidades de gas núms. 3 y 4.
3. Evaluar la correcta interpretación de las pruebas eléctricas realizadas a los generadores eléctricos de las unidades de gas núms. 3 y 4.
4. Determinar la factibilidad de instalar el generador eléctrico de la unidad generadora gas núm. 4 en la unidad generadora gas núm. 3.
5. Documentar la capacitación básica impartida sobre generadores eléctricos al personal de la planta Central Térmica Escuintla.

INTRODUCCIÓN

La Central Térmica Escuintla es una planta de generación de energía eléctrica, la cual cuenta con una unidad generadora de energía eléctrica denominada como gas núm. 3 la cual se encuentra declarada indisponible por falla en el generador eléctrico. Para la rehabilitación de esta unidad generadora es necesario realizar el mantenimiento correspondiente, que consiste en la realización de protocolos de pruebas eléctricas a otro generador eléctrico denominado como gas núm. 4 para evaluar la factibilidad de reutilizarlo en la unidad de gas núm. 3 y poder declararla nuevamente como disponible para generar energía eléctrica.

El propósito del mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo es incrementar la disponibilidad de los activos a bajo costo, permitiendo que dichos funcionen de forma eficiente y confiable dentro de un contexto operacional, es decir lo que se busca con esto es asegurar que los activos continúen realizando la función para la cual fueron diseñados.

Estas condiciones traen como consecuencia el análisis del estado de ambos generadores eléctricos mediante la ejecución de pruebas eléctricas no destructivas tales como factor de potencia entre fases y fase a tierra, capacitancia entre fases y fase a tierra, resistencia de aislamiento de devanados del estator, descargas parciales, entre otras.

Una de las partes principales y fundamentales de un sistema de generación de energía eléctrica por la función que desempeña y su costo, es el generador eléctrico. La vida útil de un generador eléctrico se encuentra en su aislamiento sólido los cuales pueden ser tipo A, B, F y H, es por ello que se

realizan pruebas rigurosas periódicamente y así ver si los valores se encuentran bajo norma y visualizar la tendencia de los resultados en base a un historial.

1. FASE DE INVESTIGACIÓN

1.1. Historia de la energía eléctrica en Guatemala

La historia de la generación de energía eléctrica en Guatemala inicia en 1884 al instalarse la primera hidroeléctrica en la finca El Zapote, al norte de la capital. Al año siguiente se forma la Empresa Eléctrica del Sur, fundada por empresarios alemanes que instalaron la hidroeléctrica Palín de 732 KW., esta instalación brindó servicio de energía eléctrica a los departamentos de Guatemala, Sacatepéquez y Escuintla.

Posteriormente, en 1927 se construye la hidroeléctrica Santa María, con el fin de proveer de energía al Ferrocarril de los Altos. Cuando este medio de transporte desaparece, las autoridades de gobierno deciden que dicha planta se convierte en la hidroeléctrica del Estado, con el fin de llevar la electricidad al interior del país, para lo cual en 1940 se crea el Departamento de Electrificación Nacional.

El Instituto Nacional de Electrificación -INDE-, fue creado el 27 de mayo de 1959 mediante el decreto ley 1287. El objetivo de su fundación se encaminó a dar solución pronta y eficaz a la escasez de energía eléctrica en el país, así como mantener la energía disponible a efecto de satisfacer la demanda normal e impulsar el desarrollo de nuevas industrias, incrementar el consumo doméstico y el uso de la electricidad en las áreas rurales. Cuando el INDE se hizo cargo de la electrificación a nivel nacional, existía en el país apenas 54 KW instalados y en ese entonces se trabajaba en la construcción de la hidroeléctrica río Hondo.

Posteriormente y ante la situación deficitaria de generación que había en el 1961, el INDE instaló en forma emergente, mientras se desarrollaban los planes de expansión, la central diésel de San Felipe Retalhuleu con 2,44 MW y dos turbinas de gas en Escuintla con una capacidad instalada de 12,5 MW cada una en 1965. Además en ese período amplió la capacidad de la hidroeléctrica de Santa María a 6,88 MW en 1966.

El patrimonio inicial lo constituyó una emisión de bonos de Q. 15 millones, los bienes de las hidroeléctricas Santa María y río Hondo y los bienes del Departamento de Electrificación Nacional.

Durante sus 58 años de existencia, los retos afrontados y superados por el Instituto Nacional de Electrificación -INDE- le han llevado a consolidarse como una de las instituciones más eficientes de Guatemala, gracias al esfuerzo diario de un personal comprometido con el mejoramiento continuo de la entidad, logrando que cada día la energía eléctrica que mueve al país llegue cada vez a más guatemaltecos.

El INDE ha sido una pieza fundamental en el desarrollo nacional, generando la energía eléctrica necesaria para industrias, empresas, comunidades y hogares, iluminando un sendero de crecimiento continuo para Guatemala.

1.2. Antecedentes del Instituto Nacional de electrificación -iNDE-

El INDE está regido por su Ley Orgánica, decreto 64-94, la cual establece que es una entidad estatal autónoma y autofinanciable, que goza de autonomía funcional, patrimonio propio, personalidad jurídica y plena capacidad para adquirir derechos y contraer obligaciones en materia de su competencia.

El órgano superior de la administración del INDE es el Consejo Directivo, el que está conformado por miembros del Ministerio de Energía y Minas, Ministerio de Economía, la Secretaría de Planificación y Programación de la Presidencia, Asociación Nacional de Municipalidades, Asociaciones Empresariales y Entidades Sindicales. La Gerencia General quien ocupa el puesto de secretario dentro del consejo directivo, es la encargada de la ejecución de las instrucciones y directrices emanadas del consejo directivo, además, debe llevar a cabo la administración y gobierno de la institución

1.2.1. Misión del INDE

Contribuir al desarrollo del mercado eléctrico nacional y regional, a través de la producción, transporte y comercialización de electricidad, permitiendo como empresa nacional cumplir con su función social, incrementar la electrificación rural, suministrar un servicio eficiente y de calidad para el progreso de Guatemala.

1.2.2. Visión del INDE

Ser la Institución Eléctrica Nacional líder e impulsora del desarrollo del mercado eléctrico nacional y regional cumpliendo con estándares de calidad mundial, a través de la actualización tecnológica y excelencia de su recurso humano.

1.2.3. Estructura organizacional

El órgano superior de la administración del INDE es su consejo directivo, el cual está integrado por representantes del Ministerio de Energía y Minas, el Ministerio de Economía, la Secretaría de Planificación y Programación de la

Presidencia, la Asociación Nacional de Municipalidades, la Cámara de Asociaciones Empresariales, y Asociaciones o Sindicatos de los Trabajadores del país.

- Consejo directivo: dictamina las directrices a seguir en la institución, tanto interna como externamente.
- Gerencia General: está encargada de la ejecución de las directrices y políticas emanadas del Consejo Directivo, además de llevar la administración y gobierno de la Institución.
- Gerencia de la Empresa de Generación de Energía Eléctrica: es la encargada de operar las centrales, plantas y unidades de generación de energía eléctrica.
- Gerencia de la Empresa de Transporte y Control de Energía Eléctrica: presta el servicio de transporte de Electricidad en forma continua y eficiente entre los productores y consumidores de la misma.
- Gerencia de la Empresa Comercializadora de Energía Eléctrica: es la encargada de comercializar la energía eléctrica en el mercado eléctrico nacional y regional.
- Gerencia de Servicios Corporativos: es la encargada de dirigir los lineamientos administrativos internos.
- Gerencia de Planificación Estratégica: es la encargada de la planificación de los proyectos a corto, mediano y largo plazo.
- Gerencia de Electrificación Rural y Obras: elabora planes de Electrificación Rural de acuerdo a las políticas dictadas por el Estado de Guatemala a través del Ministerio de Energía y Minas al INDE.
- Gerencia Financiera: maneja y controla ingresos y egresos de la institución.
- Asesoría Jurídica: como su nombre lo indica, asesora jurídicamente a la institución.

- Auditoría Interna: es la encargada de la fiscalización de todos los procesos internos que llevan a cabo todas las unidades del INDE.

Figura 1. Organigrama INDE



Fuente: Organigrama INDE. <http://www.inde.gob.gt/>. Consulta: 10 de enero de 2018.

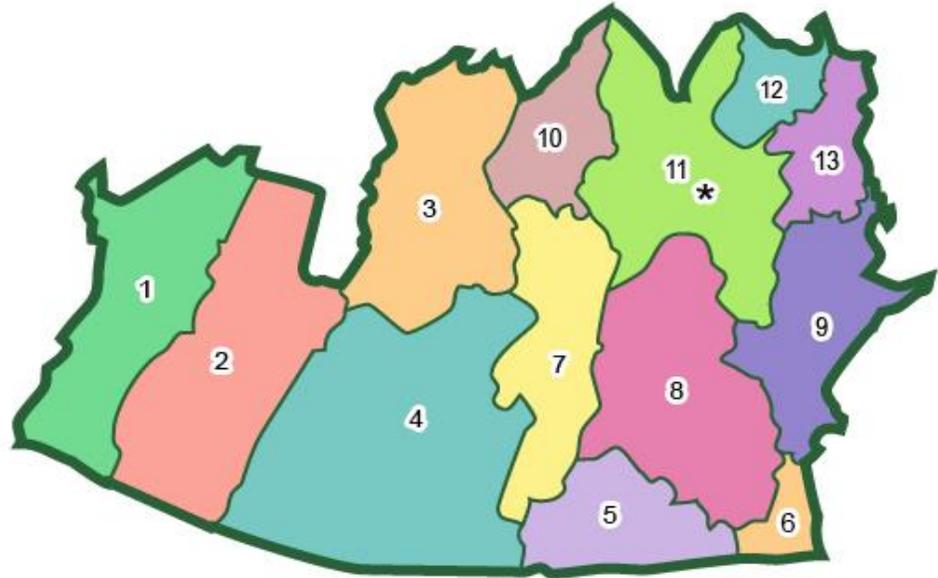
1.3. Generalidades del municipio de Escuintla

Escuintla es un departamento de Guatemala y es considerada la tercera ciudad más grande de Guatemala. Fue bautizada con el nombre de Itzucintlan o Itzucintepeque en lengua pipil que quiere decir cerro de perros, porque los nativos criaban tepezcuintles y los españoles los confundieron con perros.

El departamento está dividido en municipios:

- Escuintla (cabecera departamental)
- Guanagazapa
- Iztapa
- La Democracia
- La Gomera
- Masagua
- Nueva Concepción
- Palín
- San José
- San Vicente Pacaya
- Santa Lucía Cotzumalguapa
- Sipacate
- Siquinalá
- Tiquisate

Figura 2. **Mapa de Escuintla**



- | | |
|------------------------------|------------------------|
| 1. Tiquisate | 8. Masagua |
| 2. Nueva Concepción | 9. Guanagazapa |
| 3. Santa Lucía Cotzumalguapa | 10. Siquinalá |
| 4. La Gomera | 11. Escuintla |
| 5. San José | 12. Palín |
| 6. Iztapa | 13. San Vicente Pacaya |
| 7. La Democracia | |

Fuente: Instituto Geográfico Nacional.

1.3.1. **Topografía y geología**

Topografía plana, ondulada a suavemente inclinada. El 80 % de los suelos de la comunidad son de la clase I y el restante 20 % de clase II.

Los suelos clase I se caracterizan por ser tierras cultivables con ninguna o pocas limitaciones, aptas para el riego, con topografía plana, productividad alta con buen nivel de manejo.

Los suelos Clase II son tierras cultivables con pocas limitaciones, aptas para el riego, con topografía plana, ondulada a suavemente inclinada, alta productividad de manejo moderadamente intensivas.

1.3.2. Población económicamente activa (PEA)

La población económicamente activa está comprendida por personas desde los 14 a 65 años de edad.

1.3.3. Recursos naturales

El departamento de Escuintla tiene entre su producción agrícola el maíz, algodón, frutas de zona cálida, té de limón, citronela y caña de azúcar. Referente a la fauna en la comunidad existe una gran variedad de animales silvestres: conejos, venados, tacuacines e iguanas y así como también la crianza de ganado.

1.3.4. Suelo

El suelo de esta región es inmensamente fértil, es el recurso más importante del departamento de Escuintla, que es básicamente un departamento Agrícola y ganadero. El tipo de suelo es arcilloso.

1.3.5. Bosques

Los bosques encontrados en escuintla son el bosque húmedo sub tropical cálido (precipitación: 1 200 a 2 000 mm. Anuales; temperatura: 27 grados centígrados; altitud: 0 a 80 metros sobre el nivel del mar), y el bosque muy húmedo subtropical cálido (precipitación: 2 136 a 4 327mm. Anuales; temperatura: 21 a 25 grados centígrados; altitud: 80 a 1 600 metros sobre el nivel del mar)

1.3.6. Ubicación geográfica

Según el decreto 70-86 del congreso de la republica de fecha del 17 de noviembre de 1936, Guatemala se encuentre dividida en 8 regiones por su similitud en producción, clima, área geográfica entre otros.

1.4. Marco teórico

A continuación se elabora el marco teórico del proyecto.

1.4.1. Centrales termoeléctricas

Es una instalación empleada en la generación de energía eléctrica a partir de la energía liberada en forma de calor, normalmente mediante la combustión de combustibles fósiles como petróleo, gas natural o carbón. Este calor es empleado por un ciclo termodinámico convencional para mover un alternador y producir energía eléctrica, liberando dióxido de carbono a la atmósfera.

1.4.2. Tipos de centrales termoeléctricas

Existen dos tipos de centrales termoeléctricas las cuales son:

- Centrales termoeléctricas de ciclo convencional
- Centrales termoeléctricas de ciclo combinado

1.4.2.1. Central termoeléctrica de ciclo convencional

Se llaman centrales clásicas o de ciclo convencional a aquellas centrales térmicas que emplean la combustión del carbón, petróleo (aceite) o gas natural para generar la energía eléctrica.

Son consideradas las centrales más económicas, por lo que su utilización está muy extendida en el mundo económicamente avanzado y en el mundo en vías de desarrollo, a pesar de que estén siendo criticadas debido a su elevado impacto medioambiental.

Básicamente el funcionamiento de este tipo de centrales es el mismo independientemente del combustible que se consume. Así, este se quema en la caldera, liberando calor que se usa para calentar agua.

El agua calentada se transformará en vapor con una presión muy elevada, que es la que hace girar una turbina de vapor, lo que transformará la energía interna del vapor en energía mecánica (rotación de un eje).

La producción de electricidad se generará en el alternador por la rotación del rotor (que comparte el mismo eje que la turbina de vapor) y mediante la inducción electromagnética.

La electricidad generada pasa por un transformador, que aumentará su tensión para el transporte.

El vapor que sale de la turbina de vapor se envía a un condensador para transformarlo en líquido y retornarlo a la caldera para empezar de nuevo un ciclo de producción de vapor.

1.4.2.2. Central termoeléctrica de ciclo combinado

Es un tipo de central que utiliza gas natural, diésel, bunker o incluso carbón preparado como combustible para alimentar una turbina de gas. Luego los gases de escape de la turbina de gas todavía tienen una elevada temperatura, se utilizan para producir vapor que mueve una segunda turbina, esta vez de vapor. Cada una de estas turbinas está acoplada a su correspondiente alternador para generar la electricidad como en una central termoeléctrica clásica.

Normalmente durante el proceso de partida de estas centrales sólo funciona la turbina de gas, a este modo de operación se le llama ciclo abierto. Si bien la mayoría de las centrales de este tipo pueden intercambiar de combustible (entre gas y diésel) incluso en funcionamiento. Al funcionar con petróleo diésel ven afectada su potencia de salida (baja un 10 % aprox.), y los intervalos entre mantenimientos mayores y fallas, se reducen fuertemente.

Como la diferencia de temperaturas que se produce entre la combustión y los gases de escape es más alta que en el caso de una turbina de gas o una de vapor, se consiguen rendimientos muy superiores, del orden del 55 %.

1.4.3. Principios básicos de las máquinas rotativas

Para el entendimiento de las máquinas se deben enumerar tres importantes leyes del electromagnetismo, que junto con la ley de conservación de energía constituyen la base teórica con la cual se pueden explicar el funcionamiento de cualquier máquina eléctrica.

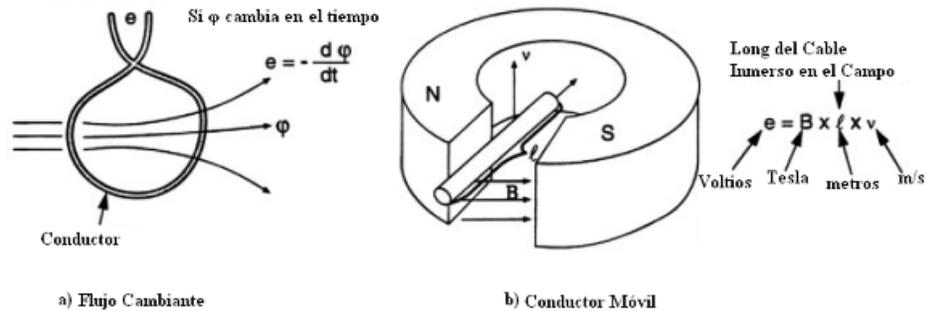
1.4.3.1. Ley de inducción electromagnética de Faraday

Esta ley descubierta por el químico y físico inglés Michael Faraday (1791-1867) se presenta de dos maneras:

- Un conductor moviéndose a través de las líneas de flujo de un campo magnético constante presentará un voltaje inducido en él.
- Un flujo magnético cambiante encerrado en una espira de material conductor inducirá un voltaje en la espira.

En ambos casos una tasa de cambio es la parte más importante a la hora de producir una diferencia de potencial, en la figura 3 se ilustran ambos casos de inducción electromagnética.

Figura 3. **Ley de Faraday en ambas formas, a) Inducción del voltaje por flujo cambiante b) Inducción del voltaje por movimiento del conductor**



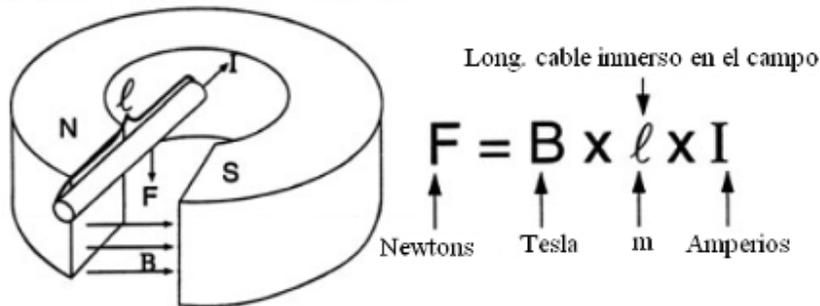
Fuente: Ley de Faraday. https://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_Faraday. Consulta: 10 de enero de 2018.

Para el primer caso se muestra relación básica entre el flujo cambiante y el voltaje inducido en la espira, y para el segundo caso la relación entre el voltaje inducido en un conductor moviéndose a través de un campo magnético constante.

1.4.3.2. Ley de Ampere-biot-savart sobre las fuerzas electromagnéticas inducidas

Esta ley es atribuida a los físicos franceses Andre Marie Ampere (1775 - 1836), Jean Baptiste Biot (1774 - 1862), y Víctor Savart (1803 - 1862). En su forma más simple esta ley puede ser vista como la inversa de la ley de Faraday, mientras que la ley de Faraday predice el voltaje en un conductor moviéndose a través de un campo magnético, la ley de Ampere-Biot-Savart establece que una fuerza es generada por un conductor al paso de la corriente, al estar inmerso en un campo magnético.

Figura 4. **Ley de Ampere-Biot-Savart sobre electromagnetismo, dirección de la fuerza inducida**



Fuente: Ley de Ampere-Bio-Savart.

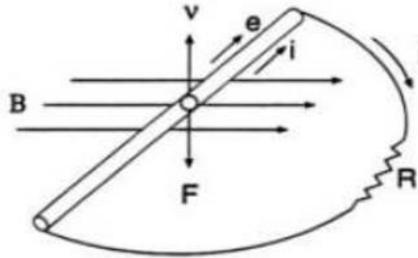
https://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_Amp%C3%A8re. Consulta: 10 de enero de 2018.

1.4.3.3. Ley de Lenz de acción y reacción

Las leyes de Faraday y Ampere-Biot-Savart se pueden reescribir gracias al físico Estonio de nacimiento, Heinrich Lenz (1804 - 1865). Esta ley postula que las corrientes y fuerzas inducidas tratarán de cancelar el efecto que las originó, esto es, si un conductor es forzado a moverse a través de las líneas de campo entonces por la Ley de Faraday un voltaje se inducirá en él, ahora si ambos extremos del conductor están conectados entre ellos, entonces una corriente circulará por este, lo que por la Ley de Ampere-Biot-Savart, producirá una fuerza actuando sobre el conductor, lo que la ley de Lenz predice es que esta fuerza actuará para oponerse al movimiento del conductor en su dirección original. Grosso modo, se acaba de explicar el principio de operación de las máquinas eléctricas rotativas.

Esta ley explica por qué cuando un generador es cargado (mas flujo pasa por el entrehierro entre el rotor y estator) se necesita más fuerza por parte del primotor para contrarrestar las fuerzas mayores de inducción y mantener el suministro de potencia a la carga.

Figura 5. **Ley de Lenz, las corrientes inducidas tratarán de cancelar el efecto que las originó**



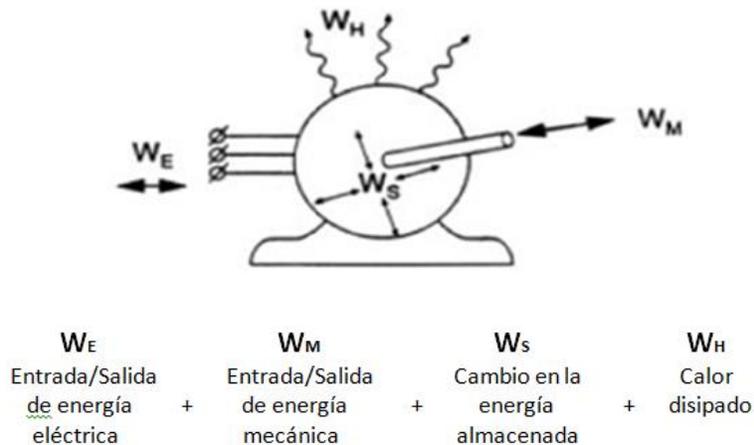
Fuente: Ley de Lenz. https://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_Lenz. Consulta: 10 de enero de 2018.

1.4.3.4. **Conversión electromecánica de la energía**

La ley final de la física que engloba de manera conjunta los procesos físicos dentro de la maquinaria eléctrica es el principio de la conversión de la energía, este dice que: toda la energía tanto mecánica como eléctrica que fluye hacia adentro de la máquina menos la energía mecánica y eléctrica que fluye fuera de la máquina y la acumulada dentro de la misma es igual a la energía disipada por la máquina como calor.

Es importante recordar que mientras la energía mecánica y eléctrica puede entrar o salir de la máquina, el calor generado siempre va a tener un signo negativo, esto es que el calor siempre es disipado durante el proceso de conversión.

Figura 6. **Principio de conversión de la energía, aplicable a las máquinas eléctricas rotativas**



Fuente: MELÉNDEZ NARANJO, José Gustavo. *Desarrollo de un plan de pruebas eléctricas para el mantenimiento predictivo de generadores síncronos*. p. 7.

El balance entre estas energías en la máquina determinará tanto su eficiencia como los requerimientos de enfriamiento en la misma, ambos aspectos críticos en el rendimiento y los parámetros constructivos de los grandes generadores.

1.4.3.5. La máquina sincrónica

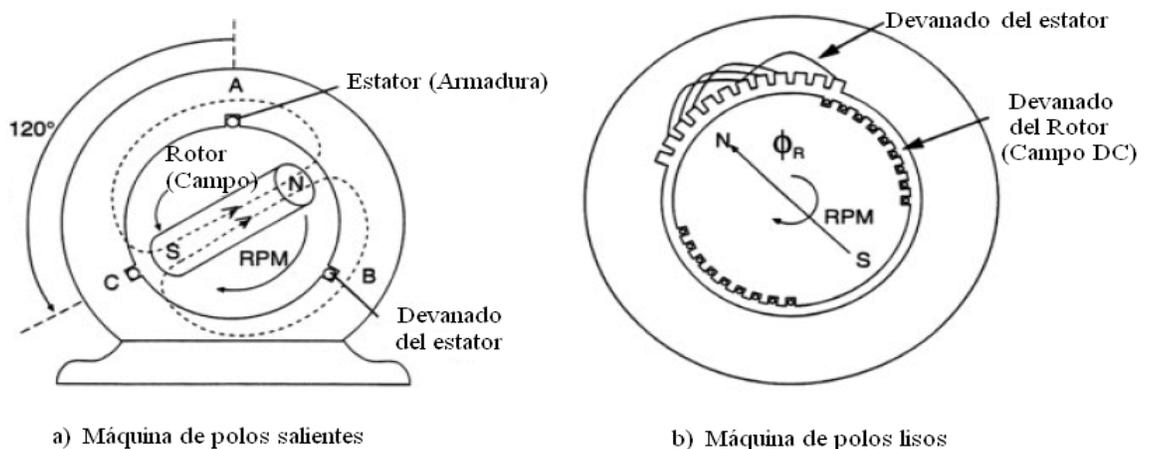
Las máquinas sincrónicas vienen en diferentes tamaños y formas, éstas se pueden clasificar en dos tipos, de campo estacionario o de campo rotativo de corriente continua.

Las máquinas sincrónicas con campo magnético rotatorio tienen el devanado de campo en la parte rotativa (rotor), y el devanado de armadura en la parte estacionaria (estator), la corriente DC que crea el campo debe de rotar a velocidad sincrónica, este campo rotatorio puede ser conseguido por excitación externa (por medio de colectores y escobillas) o por

medio de un puente de diodos montado en el rotor (autoexcitado), existen diferentes variaciones de estas conexiones.

El núcleo del estator está hecho de láminas de acero aisladas, el grosor de las láminas y el tipo de acero se diseñan para minimizar las corrientes de eddy y las pérdidas por histéresis, se puede diferenciar dos tipos de rotor en las máquinas sincrónicas, las de polos salientes y las de polos lisos, éstas últimas son utilizadas para el caso de turbinas de vapor o combustión, las demás máquinas sincrónicas tales como hidrogenadores, casi todos los condensadores sincrónicos, y la gran mayoría de los motores síncronos, son de polos salientes.

Figura 7. **Esquema de la construcción de las máquinas sincrónicas, a) Corte transversal de una máquina de polos salientes, b) Corte transversal de una máquina de polos lisos**



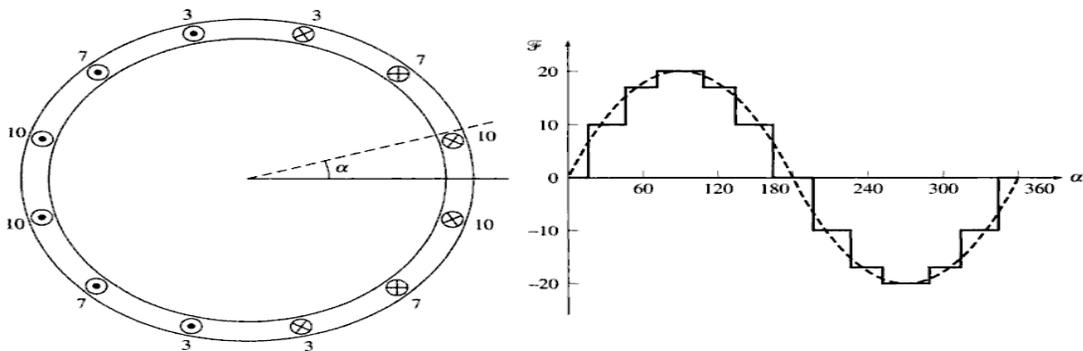
Fuente: MELÉNDEZ NARANJO José Gustavo. *Desarrollo de un plan de pruebas eléctricas para el mantenimiento predictivo de generadores síncronos*. p. 9.

Al alimentar de corriente continua el devanado de excitación se produce una fuerza magnétomotriz (fmm) que interactúa con la fmm producida por las

corrientes en los devanados de armadura, lo que produce torques que se oponen entre sí, en el caso de los generadores el torque es suministrado por el primotor e induce voltajes en los devanados de armadura.

Para lograr que la onda de voltaje producida por el generador sea de forma sinusoidal se debe obtener una variación igual en la fuerza magnétomotriz a lo largo de la superficie del entrehierro, esto se logra al distribuir las vueltas del devanado que producen la fuerza magnétomotriz en ranuras espaciadas muy cercanas alrededor de la superficie de la máquina y variar el número de conductores en cada ranura de manera sinusoidal, con esta distribución se aproxima la forma sinusoidal de la fmm, entre más ranuras hayan y cuanto más juntas estén alrededor del estator más cercana será a la forma sinusoidal buscada.

Figura 8. **Obtención de la onda sinusoidal por medio de un rotor de polos lisos**



Fuente: MELÉNDEZ NARANJO, José Gustavo. *Desarrollo de un plan de pruebas eléctricas para el mantenimiento predictivo de generadores síncronos*. p. 10.

Dado que en las máquinas reales hay un número finito de ranuras y dentro de estas ranuras solo se pueden insertar números enteros de

conductores la onda nunca podrá ser perfectamente sinusoidal, siempre tendrá una carga de componentes armónicos de orden superior.

1.5. Tipos de mantenimiento y descripción de pruebas eléctricas para diagnóstico de generadores de potencia

A continuación se da una breve descripción de los tipos de mantenimiento y descripción de pruebas eléctricas para diagnóstico de generadores de potencia.

1.5.1. Definición de mantenimiento

Se define como todas las acciones que se realizan para que un equipo continúe realizando la función para la cual fue fabricado, minimizando los tiempos de intervención y obteniendo la menor indisponibilidad en la operación.

1.5.2. Tipos de mantenimiento

Los tipos de mantenimientos que se pueden aplicar al equipo en operación son los siguientes:

- Mantenimiento correctivo
- Mantenimiento preventivo
- Mantenimiento predictivo

Para cada uno de ellos, se describen a continuación sus principales características y definiciones:

1.5.2.1. Mantenimiento correctivo

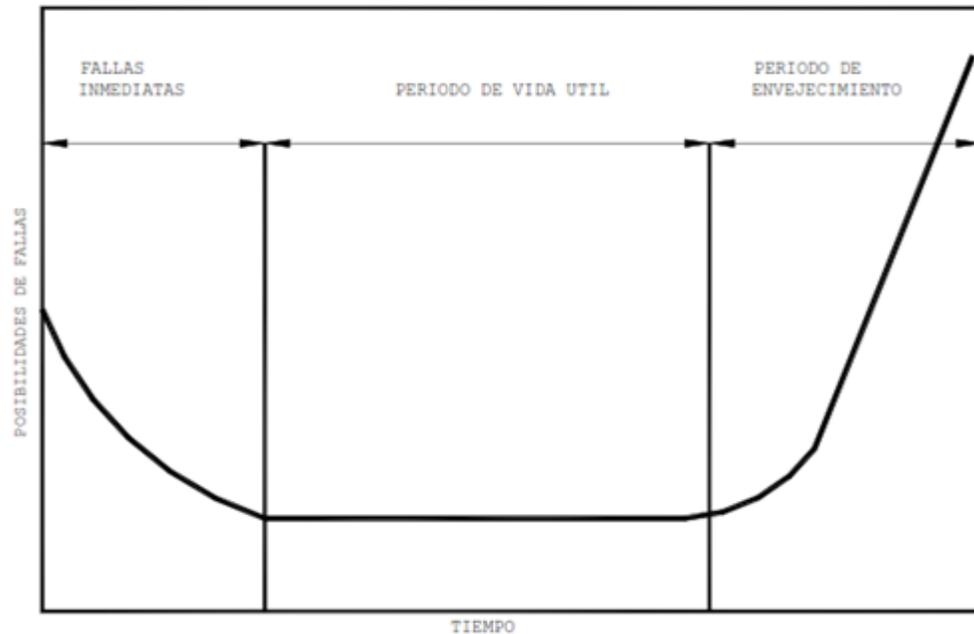
Es el concepto de mantenimiento más antiguo, puesto que permite operar el equipo hasta que la falla ocurra antes de su reparación o sustitución. Este tipo de mantenimiento requiere poca planeación y control, pero sus desventajas lo hacen inaceptable en grandes instalaciones, ya que el trabajo es realizado sobre una base de emergencia, la cual resulta en un ineficiente empleo de la mano de obra y ocasiona interrupciones del servicio.

Este mantenimiento se efectúa después que ocurre una falla o avería en el equipo que por su naturaleza no puede planificarse en el tiempo, presenta costos por reparación y repuestos no presupuestados, dado que incluye el cambio de piezas del equipo en caso de ser necesario. Algunas veces es imposible predecir una falla, en especial cuando estas son provocadas por fuentes externas al sistema, como lo son descargas electro atmosféricas (rayos), por un mal procedimiento en la realización del mantenimiento preventivo o por utilizar repuestos genéricos.

1.5.2.2. Mantenimiento preventivo

Las actividades de mantenimiento preventivo tienen la finalidad de impedir o evitar que el equipo falle durante el período de su vida útil (ver figura 1.1) y la técnica de su aplicación, se apoya en experiencias de operación que determinan que el equipo después de pasar el período de puesta en servicio reduce sus posibilidades de falla.

Figura 9. Curva vida útil de un equipo



Fuente: Curva vida útil de un equipo. <http://insenormex.com/tecnica.htm>. Consulta: 10 de enero de 2018.

El objeto principal de realizar mantenimiento preventivo es evitar o minimizar las consecuencias de fallas en equipos, logrando prevenir las posibles fallas antes de que estas ocurran. Las acciones en el mantenimiento preventivo pueden incluir procesos establecidos como sustitución de lubricantes, cambio de piezas por desgaste normal, entre otros.

Los métodos utilizados para establecer los procesos de mantenimiento preventivo se apoyan en las recomendaciones de los fabricantes, recomendaciones de expertos en el tipo de maquinaria bajo análisis y experiencias obtenidas en mantenimientos realizados en máquinas similares.

1.5.2.3. Mantenimiento predictivo

En este mantenimiento se programan actividades de revisión e inspección de los equipos con el objetivo de detectar posibles fallas o desperfectos en las etapas iniciales para evitar que estos se manifiesten durante su funcionamiento.

Para realizar mantenimiento predictivo es necesario realizar pruebas de diagnóstico y técnicas avanzadas para determinar con exactitud la condición del equipo bajo análisis, por ejemplo termografía, análisis de vibraciones, análisis de ultrasonido, descargas parciales, pruebas de aislamiento, entre otros, con base en los resultados obtenidos se planifica y programan acciones correctivas en los mantenimientos normalizados basados en la condición del equipo bajo análisis.

La ventaja del mantenimiento basado en la condición es que se detectan posibles fallas en etapas iniciales y se puede programar con suficiente tiempo las acciones correctivas en los paros programados minimizando los tiempos, costos y los índices de indisponibilidad en la producción, ya que con este se puede llevar un control más detallado del estado de los equipos maximizando el tiempo de vida y reduciendo las posibles fallas en operación.

1.5.3. Descripción de pruebas para diagnóstico de generadores de potencia

En el mantenimiento predictivo de máquinas rotativas realizadas en central térmica Escuintla se implementaron pruebas de diagnóstico basadas en la condición actual del aislamiento, con base en normativas internacionales vigentes siendo las siguientes:

1.5.3.1. Prueba de resistencia de aislamiento de devanados del estator principal (MEGGER)

Esta técnica de medición se realiza según la Norma Standard IEEE 43-2000 *Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery* (Standard IEEE Práctica recomendada para la prueba de resistencia de aislamiento de máquinas eléctricas).

Por definición la resistencia del aislamiento es el cociente del voltaje DC aplicado a través de la superficie dividido por la corriente resultante total a un tiempo dado. La resistencia del aislamiento del devanado de una máquina rotativa es función del tipo y las condiciones del material aislador usado, en general esta varía proporcionalmente con el espesor e inversamente con el área de superficie del conductor.

La medición de la resistencia del aislamiento se lleva a cabo aplicando una tensión continua de magnitud inferior a la de la prueba dieléctrica (Hi-Pot o alto potencial aplicado) y da un resultado expresado en $k\Omega$, $M\Omega$, $G\Omega$ o incluso $T\Omega$. Esta resistencia expresa la calidad del aislamiento entre dos elementos conductores. Su naturaleza es no destructiva (puesto que la energía es limitada en condiciones de prueba normales). Esta medición se lleva a cabo mediante un comprobador de aislamiento llamado también megaóhmetro.

1.5.3.1.1. Índice de polarización (IP)

El índice de polarización es un valor que informa sobre el estado de humedad y limpieza de la máquina. Se define (IP) como la relación entre la resistencia de aislamiento medida a 10 minutos sobre 1 minuto después de

aplicada una tensión continua de prueba. Durante esos 10 minutos el nivel de tensión deberá ser estable.

$$IP = R_{\text{aislamiento a 10 minutos}} / R_{\text{aislamiento a 1 minuto}}$$

Los valores del índice de polarización están muy poco afectados por la temperatura, salvo en condiciones en que la prueba se haya realizado a elevada temperatura (por encima 40°C) no necesitan corrección. En este sentido, se debe considerar que no se produce un cambio de temperatura importante durante el tiempo en que dura el ensayo.

El índice de polarización de un aislamiento es un valor adimensional que va a permitir hacer comparaciones sobre el estado del aislamiento de máquinas de distintas características (tamaño, potencias, tensiones). Permite definir la calidad del aislamiento. La Norma IEEE 43-2000 define el valor mínimo del índice de polarización PI para máquinas rotativas AC y DC de clase de temperatura B, F y H en 2. De forma general, un índice PI superior a 4 es señal de un aislamiento excelente mientras que un índice inferior a 2 indica un problema potencial. Cabe destacar que el método de medida mediante lectura del índice de polarización es apropiado para el control de los circuitos aislantes sólidos.

Tabla I. **Valores mínimos para los índices de polarización según la clase de aislamiento**

Clase de aislamiento	Índice de polarización mínimo
Clase A	1.5
Clase B	2.0
Clase F	2.0
Clase H	2.0

Fuente: IEEE Std 43-2000, IEEE *Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery*. p. 16.

Si la medida a 1 minuto es mayor a 5000MΩ no se recomienda tomar el índice de polarización como medida significativa del estado del devanado.

1.5.3.1.2. Resistencia del aislamiento valores mínimos

Esta consiste en la medición realizada al aplicar un voltaje DC a un devanado por 1 minuto.

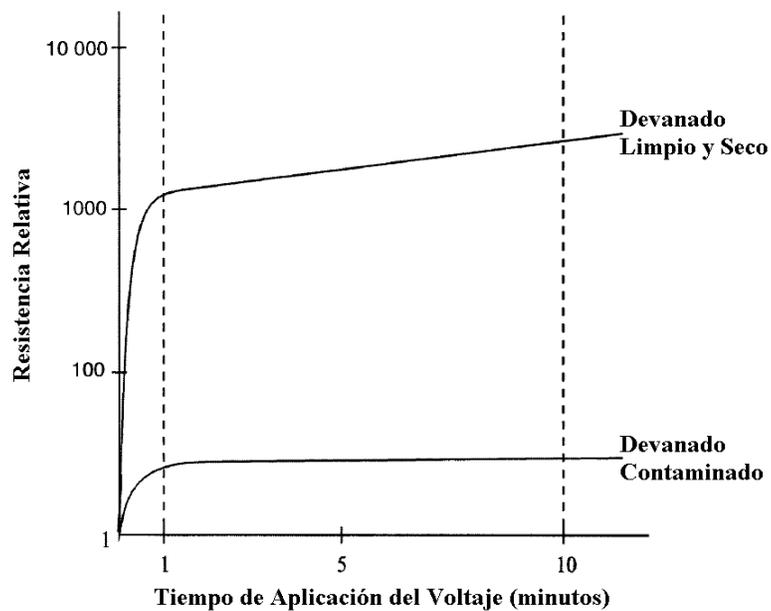
La resistencia mínima de una de las tres fases de un devanado probada con las otras dos fases aterrizadas deberá de ser aproximadamente el doble del devanado total. Si cada fase es probada separadamente y se usan circuitos guarda en las dos fases, no bajo prueba la resistencia mínima debe de ser tres veces la del devanado total.

Tabla II. **Valores mínimos recomendados de resistencia del aislamiento a 40 °C**

Resistencia de aislamiento mínima (MΩ)	Devanados
kV+1	Mayoría de los devanados hechos antes de 1970, devanados de campo, otros no descritos abajo
100	Para la mayoría de los devanados hechos después de 1970
5	Devanados menores a 1kV

Fuente: IEEE Std 43-2000, IEEE *Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery*. p. 17.

Figura 10. **Medidas típicas de resistencia para dos estados en los devanados**



Fuente: IEEE Std 43-2000, IEEE *Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery*. p. 8.

Influencia de la temperatura: la temperatura hace variar el valor de la resistencia de aislamiento según una ley casi exponencial. Dentro de un programa de mantenimiento preventivo es conveniente realizar medidas en condiciones de temperatura similares o en el caso de que no resultara posible, corregirlas para acercarnos a unas condiciones de temperatura de referencia. Como ejemplo y aproximación rápida, un incremento de 10 °C se traduce por una disminución a la mitad de la resistencia de aislamiento y a la inversa, una disminución de 10 °C de la temperatura duplica el valor de la resistencia de aislamiento.

1.5.3.1.3. Corrección por temperatura de la resistencia del aislamiento

La temperatura juega un papel importante a la hora de realizar mediciones de la resistencia del aislamiento, dado que esta varía de manera inversa a la temperatura del devanado, por lo tanto una práctica recomendable es la de realizar las mediciones del aislamiento a una temperatura definida. Normalmente las mediciones se realizan después de que la máquina haya estado un tiempo prudente fuera de servicio, lapso necesario para que alcance una temperatura cercana a la del ambiente, en el país no se presentan cambios drásticos de temperatura, por lo que las mediciones normalmente van se van a comparar unas con otras, para casos especiales se tiene con una herramienta de corrección de temperatura usando la siguiente ecuación

$$R_c = K_T R_T$$

Donde:

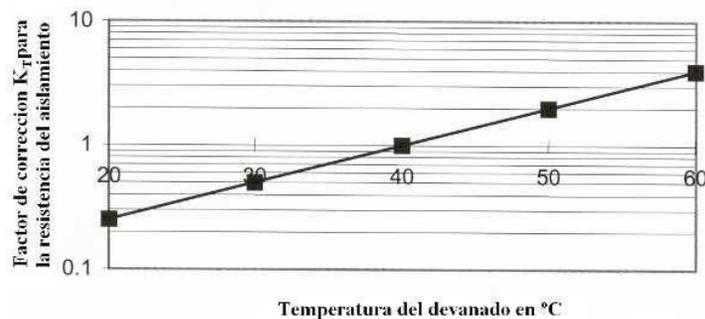
R_C es la resistencia del aislamiento (en megohms) corregida a 40 °C.

K_T es el coeficiente de corrección a la temperatura T °C.

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

Una aproximación del factor de corrección K_T se puede obtener por medio de la siguiente figura 11 indica que la resistencia se reduce a la mitad cada 10 °C de incremento en la temperatura del devanado.

Figura 11. **Coeficiente aproximado K_T para aislamientos que se reducen a la mitad cada 10 °C de incremento en la temperatura**



Fuente: IEEE Std 43-2000, IEEE *Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery*. p. 11.

Se debe hacer la salvedad que este coeficiente puede no ser muy exacto para aislamientos que no reduzcan a la mitad su valor con un aumento de 10 °C.

Para estos casos se recomienda graficar los datos de la resistencia del aislamiento en una escala logarítmica versus la temperatura del devanado en ese momento bajo una escala lineal, lo que resulta en un gráfico semilogarítmico, con el cual se puede extrapolar para obtener el valor corregido a 40 °C.

$$K_T = (0.5)^{(40-T)/10}$$

o

$$K_T = (0.5)^{(40-T)/10} = (0.5)^{5/10} = (0.5)^{1/2} = 0.707$$

Determinación de las tensiones de prueba

Tabla III. **Guía de voltajes CD a ser aplicados durante la resistencia de aislamiento**

Voltaje nominal del devanado (V) ^a ^a Voltaje nominal Línea - Línea.	Voltaje CD aplicado para la prueba de resistencia de aislamiento (V)
<1000	500
1000-2500	500-1000
2501-5000	1000-2500
5001-12 000	2500-5000
>12 000	5000-10 000

Fuente: IEEE Std 43-2000, IEEE *Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery*. p. 11.

La tabla III proporciona las tensiones de prueba recomendadas en función de las tensiones de servicio de las instalaciones y equipos (obtenida de la guía IEEE 43-2000).

1.5.3.1.4. Interpretación de resultados

La mejor manera de evaluar los datos obtenidos en la prueba de resistencia de aislamiento y el índice de polarización es comparando estos resultados con el historial de pruebas de la máquina tomando la precaución de comparar los datos tomados bajo condiciones similares de humedad relativa, temperatura del devanado, magnitud y duración del voltaje aplicado.

Diferentes comportamientos pueden significar condiciones variadas, un nivel muy bajo de la resistencia de aislamiento o de índice de polarización comparado con las medidas anteriores puede significar humedad, una superficie contaminada o en casos más severos una ruptura del aislamiento, cuando en condiciones afines en el historial la medida de resistencia de aislamiento presente una tendencia a subir puede significar una descomposición de los materiales de unión (en especial si son de tipo termoplásticos).

En los casos en que no existan datos para comparar, estos deben cumplir un mínimo recomendado si se quiere someter a los devanados a operación normal o a pruebas de sobretensión.

Es posible que en máquinas con aislamientos hechos de tejidos barnizados, asfalto-mica o goma laca-mica un alto índice de polarización, (por ejemplo más de 8) puede indicar que el aislamiento ha sufrido envejecimiento

por altas temperaturas, esto se puede comprobar inspeccionando que los devanados estén secos y quebradizos, la puesta en marcha con este tipo de condición no es recomendable.

La prueba de resistencia de aislamiento es útil en detectar problemas de aislamiento, pero si se quiere un diagnóstico más acertado del estado de los devanados otras pruebas deben de ser llevadas a cabo.

1.5.3.2. Prueba de factor de potencia y capacitancia del aislamiento en función de voltaje (*TIP-UP-TEST*)

Esta técnica de medición se realiza según la Norma Standard IEEE 286-2000 - IEEE *Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation* (práctica recomendada para la medición del factor de potencia *Tip-Up* al aislamiento de las bobinas del estator de máquinas eléctricas)

1.5.3.2.1. Definición de factor de potencia en pruebas de corriente alterna

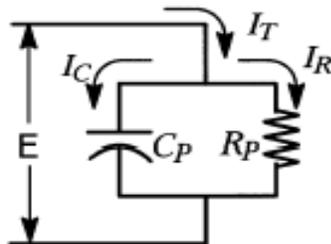
Factor de potencia es la relación entre la potencia disipada en el aislamiento y los voltamperios totales. La prueba se realiza sobre el aislamiento de cada fase a tierra y entre fases.

Las pruebas de factor de potencia de aislamiento a la frecuencia de operación es una prueba que se utiliza para detectar contaminación, deterioro y para determinar la condición física del aislamiento. El exceso de humedad en la

celulosa y en cualquier otro aislante del generador es indeseable para mantener su composición o constitución.

Al observar cambios en estas importantes características eléctricas, se detectan fallas que pueden ser peligrosas, pudiéndose prevenir pérdidas del servicio al reparar el aislamiento defectuoso.

Figura 12. **Circuito equivalente en paralelo simplificado de un sistema de aislamiento**



Fuente: MELÉNDEZ NARANJO, José Gustavo. *Desarrollo de un plan de pruebas eléctricas para el mantenimiento predictivo de generadores síncronos*. p. 15.

Donde:

E = voltaje de prueba

I_T = corriente total del espécimen

I_C = componente en cuadratura o capacitiva de la corriente total

I_R = componente en fase o resistiva de la corriente total

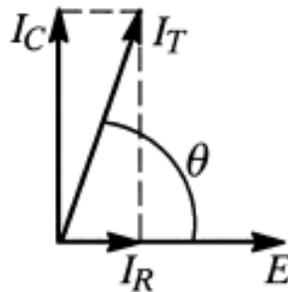
C_P = capacitancia equivalente en paralelo del aislamiento del espécimen

R_P = resistencia equivalente en paralelo del aislamiento del espécimen

El elemento resistivo del circuito dieléctrico equivalente de la figura, representa las pérdidas en watts disipados en el aislamiento cuando un voltaje es aplicado.

En un capacitor perfecto (sin pérdidas), la corriente adelanta al voltaje de prueba exactamente en 90° . En un resistor perfecto, la corriente y el voltaje están exactamente en fase. En la figura 13 se muestra la relación de los vectores de corriente y el voltaje de prueba.

Figura 13. **Componentes vectoriales del voltaje de prueba y corrientes en un circuito equivalente en paralelo**



Fuente: MELÉNDEZ NARANJO, José Gustavo. *Desarrollo de un plan de pruebas eléctricas para el mantenimiento predictivo de generadores síncronos*. p. 16.

En un circuito eléctrico con un voltaje alterno aplicado:

$$\text{Watts} = E \times I_T \times \cos Y$$

El ángulo Y que se muestra en la figura 13, representa el ángulo de fase entre el voltaje de prueba E , conectado entre los terminales del dieléctrico del espécimen, y la corriente total I_T .

El coseno del ángulo γ , es por definición el factor de potencia. Por tanto:

$$\text{Factor de potencia} = \cos \gamma = \text{watts} / (E \times IT)$$

El factor de potencia de aislamiento de un material dieléctrico es la relación entre la potencia real (en watts) disipada en el material y el producto (en volt-amperios) del voltaje eficaz y la corriente resultante al ser aplicado un voltaje sinusoidal.

Como puede observarse la medición del porcentaje de factor de potencia está en función del flujo real de potencia, a través del aislamiento y no de la cantidad de éste.

1.5.3.2.2. Conceptos de capacitancia para aislamientos

El comportamiento de un material aislante tiene mucho en común con lo que sucede dentro de un capacitor. Un capacitor está formado por dos electrodos separados por un dieléctrico. Del mismo modo, un sistema de aislamiento está formado por dos conductores separados por material aislante. Haciendo la analogía de que los conductores son los electrodos, y que los materiales aislantes son el dieléctrico, se ve que un sistema de aislamiento tiene la forma de un capacitor. Otra forma simple de ver el capacitor es analizando el que está formado por placas paralelas. De la fórmula:

$$C = \epsilon A/d$$

Donde:

C = es la capacidad, en faradios;

A = es el área de las placas, en metros cuadrados;

ϵ = es la permitividad;

d = es la separación entre las placas

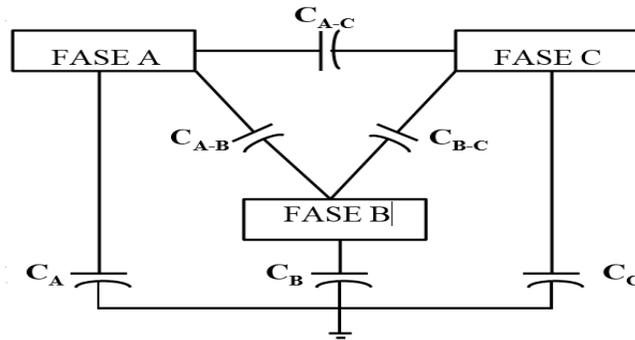
Es importante denotar que la capacitancia representa básicamente la geometría del espécimen bajo análisis.

1.5.3.2.3. Interpretación de resultados

Para pruebas de mantenimiento en devanados completos la medida inicial del factor de disipación es irrelevante, valores típicos de 0,5 % pueden observarse en aislamientos hechos de epóxico y poliéster impregnado, valores de 3 a 5 % se pueden obtener para aislamientos de mica asfáltica, al medir el valor del factor de disipación al paso del tiempo si este se mantiene constante a lo largo del tiempo es un indicador que no se presenta envejecimiento o contaminación excesiva en los devanados, por el contrario si el factor de disipación se incrementa a lo largo del tiempo puede significar un sobrecalentamiento del devanado, contaminación por la presencia de humedad o agentes que afectan el aislamiento.

El factor de disipación es un indicador de la condición promedio del aislamiento, esto significa que si un devanado está sufriendo de sobrecalentamiento y los demás están en buena condición no va a significar un aumento perceptible en este.

Figura 14. **Representación simplificada de los sistemas de aislamiento de un generador de potencia**



Fuente: IEEE Std 286-2000. *Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation*. p. 24.

1.5.3.3. Prueba de resistencia óhmica de devanados del estator principal

La manera de realizar esta prueba es la de calcular la resistencia (o conductancia) por medio de la ley de ohm haciendo pasar una corriente directa a través del devanado y midiendo el voltaje producido.

Las resistencias a ser calculadas van a ser muy pequeñas, existen varios equipos comerciales que miden la resistencia con la exactitud de un 1 % necesaria.

En el caso de los devanados del estator se recomienda medir cada fase de manera individual entre los terminales de fase y los de neutro por medio de los anillos deslizantes.

La resistencia en DC se ve fuertemente afectada por la temperatura del devanado, esto porque a mayor temperatura la resistencia tiende a subir, es por esto que para graficar el desarrollo de un devanado a través del tiempo se aplica una corrección por la temperatura, esta es:

$$R_{20} = \frac{R_T}{1+(T-20)/255,5}.$$

Dónde:

R_{20} = es la resistencia a 20 grados Celsius.

R_T = es la resistencia medida a la temperatura T.

De los datos medidos de la resistencia se puede obtener mayor información si estos se comparan entre fases, entre devanados de máquinas idénticas o con el historial del devanado.

En el caso de las medidas de resistencia de los devanados de un estator, estas deben de tener una diferencia de 1 % entre fases en el caso de bobinas preformadas y 3 % en bobinas de alambrado común, en el caso que una de las fases presente una resistencia más alta puede significar que hay un problema con el devanado de esta fase, ya sea una espira rota o una mala conexión en el alambre.

Cuando se comparan los valores de la resistencia en máquinas idénticas, estos deben de cumplir con un máximo de 5 % de diferencia entre los devanados. Para el caso de máquinas rebobinadas estas deberán cumplir el criterio de diferencia máxima de 1 % entre sus devanados.

Aun así la manera más útil para observar el deterioro en el bobinado es la comparación con las medidas en el historial de la máquina, para esto se debe de usar la medida corregida a la misma temperatura, es prudente usar siempre el mismo instrumento, un aumento de un 1 % en la resistencia puede significar desgastes en los conductores del devanado.

1.5.3.4. Prueba de descargas parciales

A continuación se realiza una definición de las descargas parciales.

1.5.3.4.1. Definición de descargas parciales

Se definen como aquellas descargas eléctricas que cortocircuitan sólo parcialmente el material aislante entre conductores. Se localizan en una pequeña área dentro de un medio aislante.

Las descargas parciales tienen su origen en las pequeñas cavidades de gas en los aislantes que se forman ya sea en el proceso de fabricación, entre cavidades conductor- aislante o ya sea por envejecimiento del aislamiento.

Cuando un medio aislante es sometido a una diferencia de potencial, en las cavidades del aislamiento se concentra campo eléctrico por lo que el gas se ioniza dando lugar a una descarga.

El proceso de ionización se inicia cuando un electrón libre o ion negativo tiene suficiente libertad de moverse en el material ionizable en presencia de un campo eléctrico, al moverse este podrá adquirir una gran energía dinámica de tal manera al colisionar con una molécula neutra se liberará un

electrón por el impacto, así se repite este efecto hasta lograr un efecto de avalancha.

Así, tanto los electrones como las moléculas se moverán hacia los electrodos positivos y negativos, respectivamente, el movimiento de los iones es más lento que el de los electrones y depende de la fuerza que ejerce el campo eléctrico sobre estos. Al llegar al punto donde la intensidad del campo eléctrico tiene un valor menor al valor en que se inició la ionización no se generan más electrones por avalancha. La carga en los electrodos disminuye por la influencia de las cargas atraídas por ellos, a medida que esto sucede la intensidad del campo eléctrico aumenta otra vez, cuando este alcanza el valor al cual la ionización fue iniciada por primera vez lo que provoca la avalancha de electrones y el proceso comienza de nuevo.

Los niveles de voltaje que inician estas descargas son bajos, puesto que el campo eléctrico tiende a concentrarse en las cavidades, y la rigidez dieléctrica del gas es menor que la rigidez dieléctricas del sólido.

1.5.3.4.2. Tipos de descargas parciales

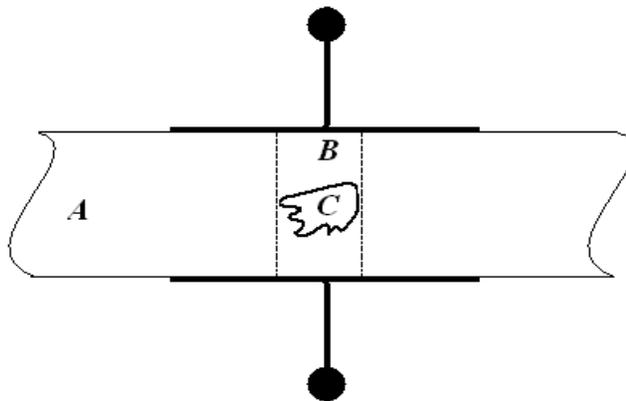
- Descargas internas que ocurren en huecos o cavidades dentro de aislamientos sólidos o líquidos.
- Descargas superficiales que ocurren en los límites de diferentes materiales aislantes.
- Descargas por efecto corona que ocurren en dieléctricos gaseosos en presencia de campos electromagnéticos no homogéneos, produciendo una descarga luminosa debida a la ionización del aire que rodea a un

conductor alrededor del cual existe un gradiente de potencial que excede un cierto valor crítico.

1.5.3.4.3. Modelado del fenómeno

Una cavidad en el aislamiento representa una capacitancia al someterse a un campo eléctrico alterno.

Figura 15. **Dieléctrico entre dos conductores**



Fuente: MELÉNDEZ NARANJO, José Gustavo. *Desarrollo de un plan de pruebas eléctricas para el mantenimiento predictivo de generadores síncronos*. p. 27.

A : representa la capacitancia de la aislación sin falla.

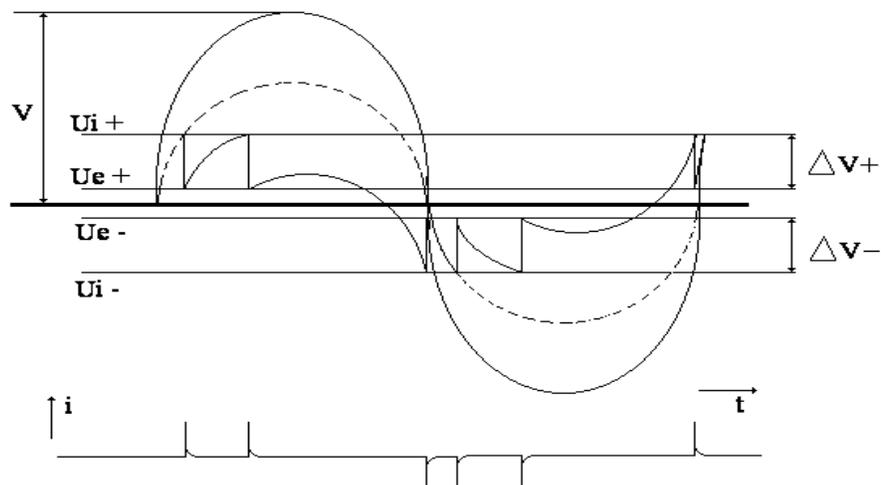
B : capacitancia serie a la cavidad, es decir, de la zona sin falla.

C : es la capacitancia equivalente de la cavidad.

Cuando la tensión dentro de la cavidad no puede ser sostenida esta se descarga, lo que produce una caída brusca de la tensión $V_c(t)$, hasta un valor U_e llamado extinción de la descarga.

Debido que la tensión externa sigue siendo aplicada, la tensión en la cavidad C comienza a subir nuevamente, una vez que ya ha alcanzado el valor U_i , se produce una descarga, y así se repite sucesivamente, después cuando el máximo de la onda V_c se ha alcanzado, y empiezan los valores negativos entonces se producen descargas en sentido opuesto al alcanzarse valores de $-U_i$, es entonces cuando se producirán descargas en sentido negativo.

Figura 16. **Gráfica de desplazamiento y producción de las descargas parciales**



Fuente: MELÉNDEZ NARANJO, José Gustavo. *Desarrollo de un plan de pruebas eléctricas para el mantenimiento predictivo de generadores síncronos*. p. 29.

1.5.3.4.4. Efectos negativos de las descargas parciales

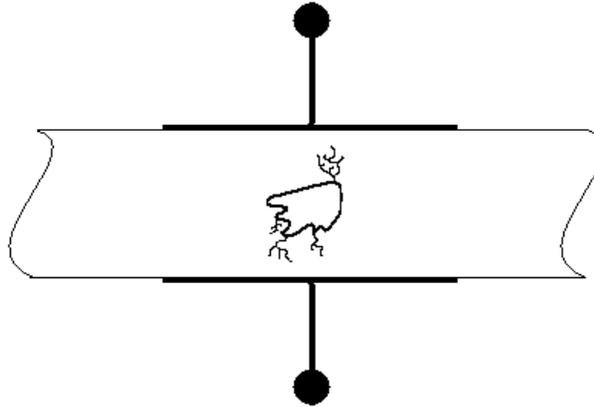
Las descargas parciales producen un efecto de degradación en el aislante sólido, esta degradación se da por los siguientes fenómenos:

- Elevación de la temperatura del gas encerrado producido por los choques elásticos entre electrones y moléculas gaseosas.
- Erosión de las paredes de la cavidad por el bombardeo iónico.
- Acción de rayos ultravioleta producidas por átomos excitados y por la recombinación de portadores.
- Descarga química progresiva del material con producción de gases, particularmente hidrogeno.

El efecto de estos fenómenos varía respecto al material que se utiliza en el aislamiento, la experiencia ha demostrado que la degradación tiene un mismo tipo de evolución que comprende tres fases sucesivas,

- El proceso comienza con una erosión lenta, las cavidades crecen agravando el problema del aislamiento.
- La segunda etapa se da cuando comienzan a aparecer arborescencias en los puntos más susceptibles, propagándose por el interior del dieléctrico.
- Cuando una de las ramificaciones alcanza al gradiente disruptivo intrínseco del aislante se observa un desgaste acelerado del material, cuando las ramificaciones se producen hacia el lado opuesto del aislante es cuando se produce una descarga total entre conductores.

Figura 17. **Arborescencias producidas en el dieléctrico a causa de las descargas parciales**



Fuente: MELÉNDEZ NARANJO, José Gustavo. *Desarrollo de un plan de pruebas eléctricas para el mantenimiento predictivo de generadores síncronos*. p. 31.

1.5.3.4.5. Detección de las descargas parciales

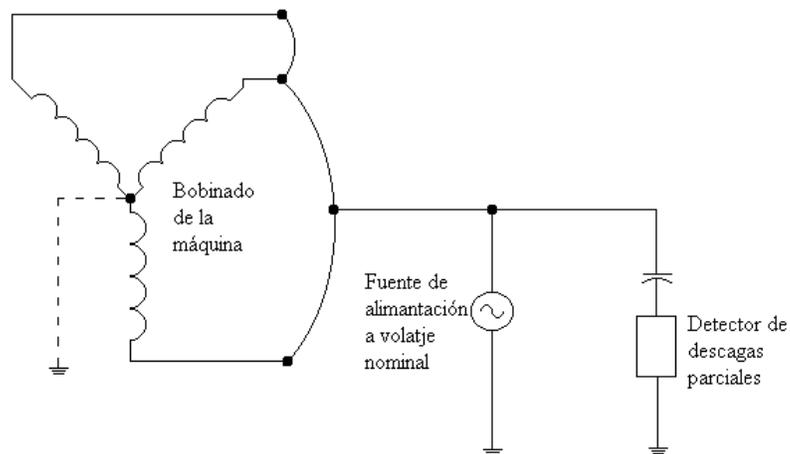
A la hora de realizar las pruebas para la detección de las descargas parciales se debe de tomar en cuenta lo siguiente:

- Estas no deben de aumentar la probabilidad de falla.
- No debe de dar falsas indicaciones de deterioro.
- No debe de ser riesgoso tanto para el equipo como para el personal que realiza la prueba.
- El costo de la prueba debe ser bastante menor que el costo de una salida de operación o de una falla.

1.5.3.4.6. Método de prueba

Para la medición de las descargas parciales en los bobinados del estator estos son energizados con el voltaje nominal de fase por medio de una fuente de alimentación externa, y empleando un detector de descargas parciales.

Figura 18. **Esquema básico del circuito para la medición de descargas parciales**



Fuente: MELÉNDEZ NARANJO, José Gustavo. *Desarrollo de un plan de pruebas eléctricas para el mantenimiento predictivo de generadores síncronos*. p. 32.

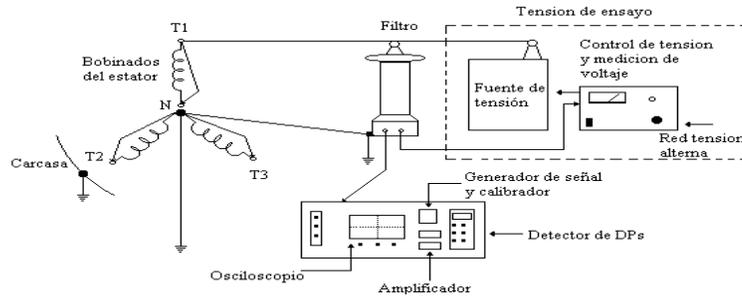
Para filtrar las señales de la frecuencia de la red, se utiliza un capacitor de alto voltaje lo que permite que los pulsos de alta frecuencia de las descargas parciales lleguen al detector.

El procedimiento más común es el de aumentar gradualmente la tensión de la fuente de alimentación, hasta que los pulsos pertenecientes a las descargas sean visibles en el instrumento de medida, al nivel de tensión donde inician las descargas se le llama voltaje de inicio de descarga (VID) y al voltaje donde las descargas se extinguen se le llama voltaje de extinción de descargas (VED), normalmente $VID > VED$.

En la detección de las descargas parciales en bobinados de máquinas fuera de línea existen ciertos inconvenientes, puesto que el bobinado completo se energiza junto con el punto de neutro existen varios lugares con voltaje que normalmente en servicio no lo estaría que puede llevar a que se produzcan pulsos que lleven a una interpretación errónea por parte del operador.

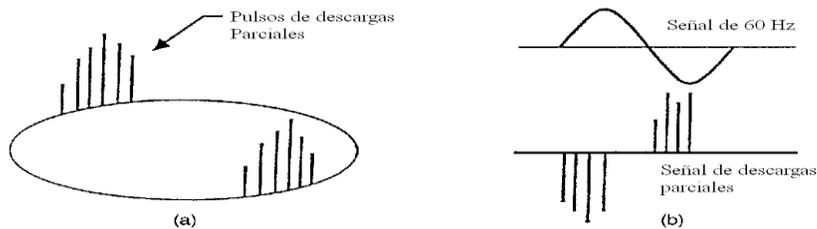
Otro problema está en que dado que la máquina está detenida, las descargas parciales generadas entre ranuras sueltas no se van a presentar puesto que no hay vibración.

Figura 19. **Esquema de la prueba de detección de descargas parciales**



Fuente: MELÉNDEZ NARANJO, José Gustavo. *Desarrollo de un plan de pruebas eléctricas para el mantenimiento predictivo de generadores síncronos*. p. 33.

Figura 20. **Representación de las descargas parciales a) con una base de tiempos elíptica b) con una base de tiempos lineal**



Fuente: MELÉNDEZ NARANJO, José Gustavo. *Desarrollo de un plan de pruebas eléctricas para el mantenimiento predictivo de generadores síncronos*. p. 33.

1.5.3.4.7. Ventajas que ofrece este ensayo

- Es un método no-destructivo indicador inicial.
- Este ensayo produce información diferente en cada tipo de fallo, de forma que se puede determinar con exactitud el tipo de fallo producido
- Es un ensayo de alta sofisticación, que puede ser utilizado para el control de calidad de fabricación de aisladores, pararrayos, transformadores, generadores.
- Para la realización de este ensayo no es necesario detener la máquina

1.5.3.4.8. Fuentes externas que influyen en la medición de descargas parciales

- Alimentación.
- Capacitor de acoplamiento.
- Conexión a tierra.

- Partes metálicas no aterrizadas.
 - Campo electrostático electromagnético.
 - Conexión en la alta tensión.

1.5.3.4.9. Interpretación de resultados

La interpretación de resultados es el paso más importante en la toma de decisiones sobre el estado del aislamiento de una máquina. Es difícil de definir niveles apropiados permitidos puesto que estos dependen en gran medida de las características del bobinado y de los materiales utilizados en su aislamiento, sin embargo, se puede obtener información valiosa al comparar medidas realizadas con anterioridad en las mismas condiciones (historial de la máquina), y para una evaluación más completa, estos resultados deben también ser comparados con otras pruebas buscando rastros que puedan indicar deterioro del aislamiento.

A partir de la detección de las descargas parciales, el siguiente paso en el proceso de evaluación del estado del aislamiento es determinar que descargas son peligrosas a largo plazo y cuales limitarán a corto plazo la vida del aislamiento.

Para generadores en los cuales las condiciones de operación no han sido demasiado severas, esto es que no han trabajado la mayor parte del tiempo sobrecargados, sin cambios bruscos de carga, y sin aumentos de temperatura muy frecuentes se podría esperar que el aislamiento se haya degradado de manera gradual, se puede decir que las descargas parciales son un síntoma de un aislamiento degradado, pero por otro lado en los casos muy

severos de descargas parciales se puede decir que estas contribuyen al rápido deterioro del aislamiento.

En esta prueba se mide la magnitud y la distribución de las descargas parciales, para así averiguar el grado de detrimento del aislamiento, la correcta interpretación de estas medidas requiere no solo mucha experiencia sino que a veces se ocupan otras pruebas para tener una mayor inferencia en los resultados.

La evaluación de las descargas parciales por medio de valores absolutos y su incremento en el tiempo son indicadores de envejecimiento, pero este incremento no necesariamente significa que el aislamiento vaya a fallar pronto, para esto se debe evaluar y comparar la magnitud del incremento, en casos en que las medidas estén en un valor crítico, entonces se recomienda realizar inspecciones con mayor frecuencia y si es posible implementar un sistema de medida con la máquina en operación para una mejor observación.

La experiencia ha demostrado que saber con seguridad el origen de las descargas parciales no es fácil, puesto que la contaminación en los devanados pueden producir lecturas que se lleguen a confundir con otros mecanismos de falla, a pesar de todo esta prueba ha demostrado ser la más sensible a la degradación o contaminación del aislamiento.

2. FASE TÉCNICO PROFESIONAL

2.1. Documentación de resultados, diagnóstico y evaluación del generador eléctrico

Se realiza la descripción de resultados, diagnóstico y evaluación del generador eléctrico.

2.1.1. Descripción de los trabajos realizados a unidad generadora gas núm. 3

El protocolo de pruebas eléctricas de diagnóstico se efectuó en instalaciones de Central Térmica Escuintla, en el departamento y municipio de Escuintla.

A continuación se presentan los resultados del protocolo de diagnóstico realizado al generador de potencia síncrono de dos polos con las siguientes características:

Tabla IV. **Placa de datos del generador de la unidad generadora gas núm. 3**

Generador	3ø
Id especial	Generador unidad gas núm.3
Fabricante	<i>Electric machinery</i>
Núm. serie	175253501
Voltaje de operación	13,8 kv
Potencia nominal	33,30 mva

Fuente: elaboración propia.

Dichas pruebas se han realizado con el objeto de diagnosticar el estado general del sistema de aislamiento del generador de potencia mediante protocolos de prueba normalizados.

Se efectuó el siguiente protocolo de pruebas eléctricas de diagnóstico:

2.1.1.1. Inspección visual

Se realizó inspección visual se documentan fotografías individuales de los componentes del generador de potencia en los puntos de conexiones para realizar protocolo de pruebas eléctricas.

Figura 21. **Unidad generadora gas núm. 3**



Fuente: Central Térmica Escuintla. Municipio Escuintla, departamento Escuintla.

Figura 22. **Placa de datos de la unidad generadora gas núm. 3**



Fuente: Central Térmica Escuintla. Municipio Escuintla, departamento Escuintla.

Figura 23. **Conexión punto estrella de la unidad generadora gas núm. 3**



Fuente: Central Térmica Escuintla. Municipio Escuintla, departamento Escuintla.

Figura 24. **Desmontaje del rotor de la unidad generadora gas núm. 3**



Fuente: Central Térmica Escuintla. Municipio Escuintla, departamento Escuintla.

2.1.1.2. Prueba de factor de potencia de aislamiento en función de voltaje (*TIP-UP TEST*)

Se realizaron pruebas de factor de potencia de aislamiento y capacitancia para los devanados del estator a distintos voltajes de prueba según IEEE 286-2000, *Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation*.

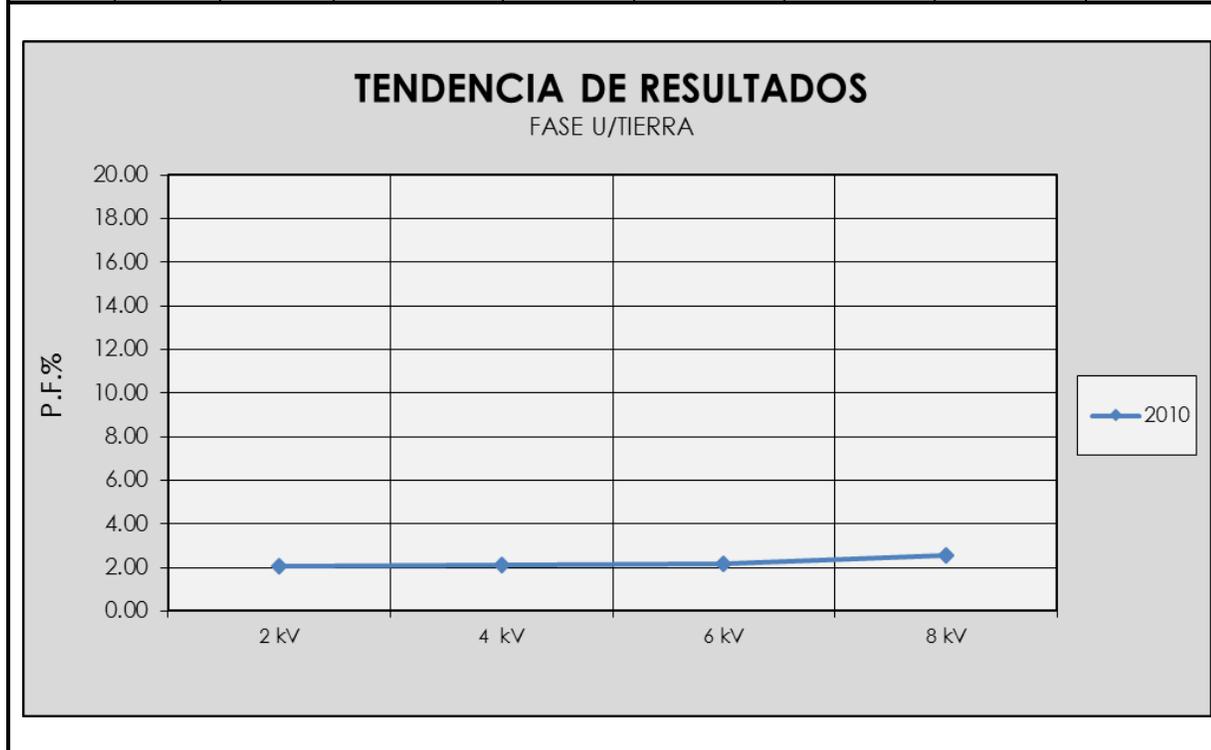
Tabla V. **Resultados de la prueba de factor de potencia de aislamiento TIP-UP al generador de la unidad gas núm. 3**

ENG	GND	UST	Test kV	mA	Watts	Cap (pF)	%PF	Tip-Up
A	B,C	-	2 000	310,58	63,643	82456,7	2,05	0,48
A	B,C	-	4 000	310,79	65,016	82487,7	2,09	
A	B,C	-	6 000	311,09	66,96	82512,6	2,15	
A	B,C	-	8 000	312,19	79,084	82828,3	2,53	
B	C,A	-	2 000	321,44	248,35	85025,9	7,73	3,72
B	C,A	-	4 000	321 82	234 88	85190 ,6	7,30	
B	C,A	-	6 000	323 02	288 2	85332,1	8,92	
B	C,A	-	8 000	324 88	372 06	85591,2	11,45	
C	A,B	-	2 000	325 59	252 1	86108	7,74	8,82
C	A,B	-	4 000	326 63	281 86	86388	8,63	
C	A,B	-	6 000	327 76	353 77	86456,4	10,79	
C	A,B	-	8 000	330 37	547 1	86485,3	16,56	
A	C	B	2 000	4 769	7 181	1251,3	15,06	2,08
A	C	B	4 000	4 788	7 476	1254,5	15,61	
A	C	B	6 000	4 802	7 801	1257,4	16,25	
A	C	B	8 000	4 826	8 27	1260,8	17,14	
B	A	C	2 000	4 786	7 908	1252,7	16,52	1,85
B	A	C	4 000	4 795	8 124	1254,9	16,94	
B	A	C	6 000	4 807	8 417	1256,7	17,51	
B	A	C	8 000	4 839	8 891	1262,3	18,37	
C	B	A	2 000	4 924	7,718	1290,5	15,67	1,35
C	B	A	4 000	4 947	8,045	12943,3	16,26	
C	B	A	6 000	4 966	8,53	1298,5	17,02	
C	B	A	8 000					
A,B,C	-	-	2 000					
A,B,C	-	-	4 000					
A,B,C	-	-	6 000					
A,B,C	-	-	8 000					

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Resultados de la prueba de factor de potencia de aislamiento
TIP-UP FASE U/TIERRA al generador de la unidad gas núm. 3**

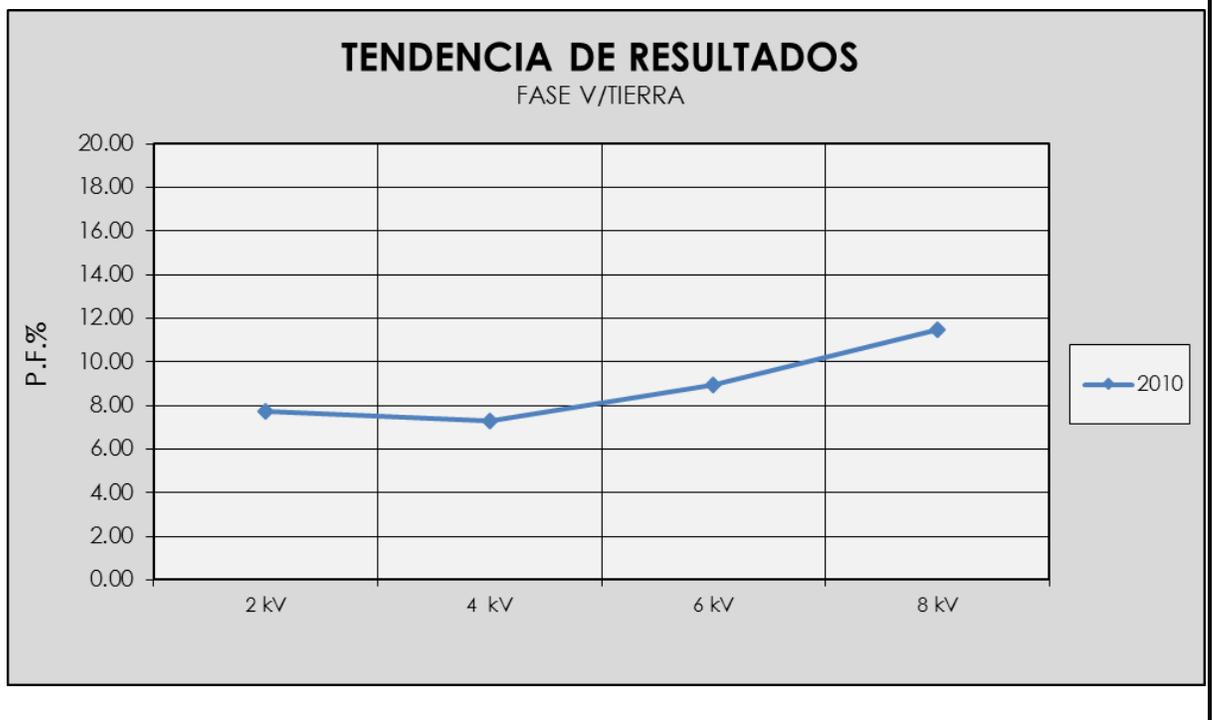
ENG	GND	UST	Test kV	mA	Watts	Cap (pF)	%PF	Tip-Up
A	B,C	-	2.000	310.58	63.643	82456.7	2.05	0.48
A	B,C	-	4.000	310.79	65.016	82487.7	2.09	
A	B,C	-	6.000	311.09	66.96	82512.6	2.15	
A	B,C	-	8.000	312.19	79.084	82828.3	2.53	



Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. Resultados de la prueba de factor de potencia de aislamiento
TIP-UP FASE V/TIERRA al generador de la unidad gas núm. 3

ENG	GND	UST	Test kV	mA	Watts	Cap (pF)	%PF	Tip-Up
B	C,A	-	2 000	321 44	248 35	85025 9	7 73	3 72
B	C,A	-	4 000	321 82	234 88	85190 6	7 30	
B	C,A	-	6 000	323 02	288 2	85332 1	8 92	
B	C,A	-	8 000	324 88	372 06	85591 2	11 45	



Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. Resultados de la prueba de factor de potencia de aislamiento
TIP-UP FASE W/TIERRA al generador de la unidad gas núm. 3

ENG	GND	UST	Test kV	mA	Watts	Cap (pF)	%PF	Tip-Up
C	A,B	-	2 000	325,59	252,1	86108	7,74	8,82
C	A,B	-	4 000	326,63	281,86	86388	8,63	
C	A,B	-	6 000	327,76	353,77	86456,4	10,79	
C	A,B	-	8 000	330,37	547,1	86485,3	16,56	



Fuente: elaboración propia.

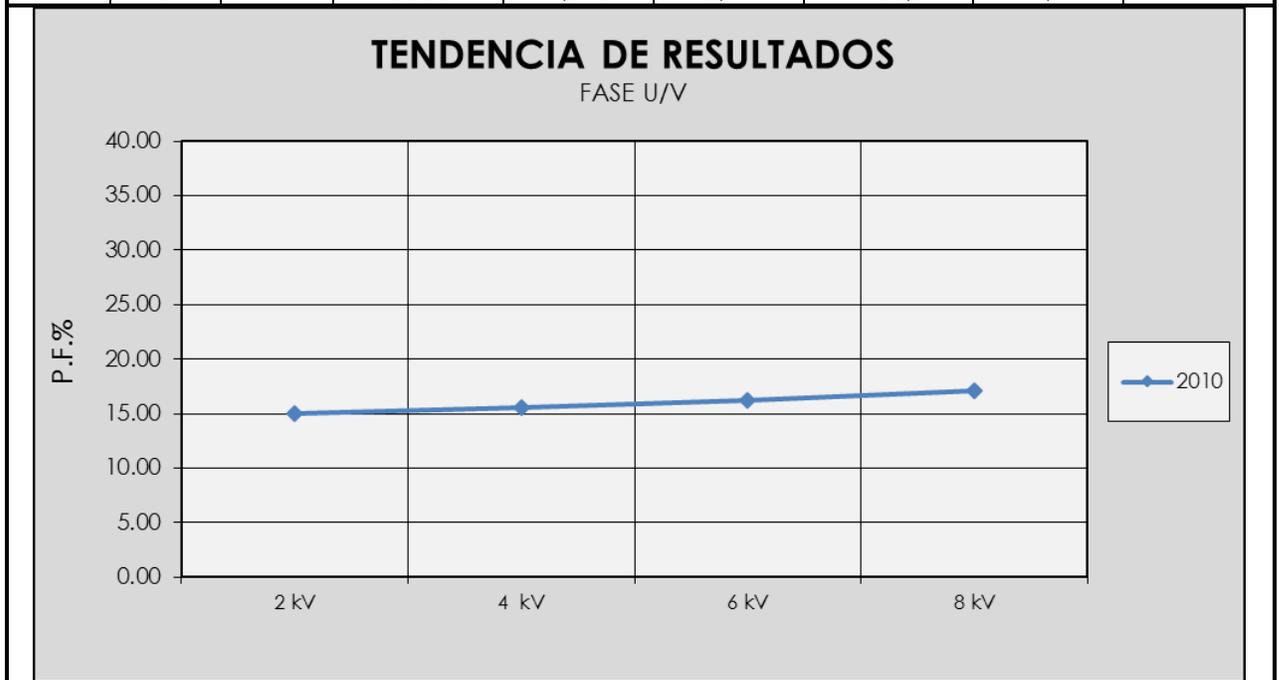
Tabla IX. **Resultados de la prueba de factor de potencia de aislamiento TIP-UP FASE UVW/TIERRA al generador de la unidad gas núm. 3**

ENG	GND	UST	Test kV	mA	Watts	Cap (pF)	%PF	Tip-Up
A,B,C	-	-	2 000					
A,B,C	-	-	4 000					
A,B,C	-	-	6 000					
A,B,C	-	-	8 000					

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Resultados de la prueba de factor de potencia de aislamiento TIP-UP FASE U/V al generador de la unidad gas núm. 3**

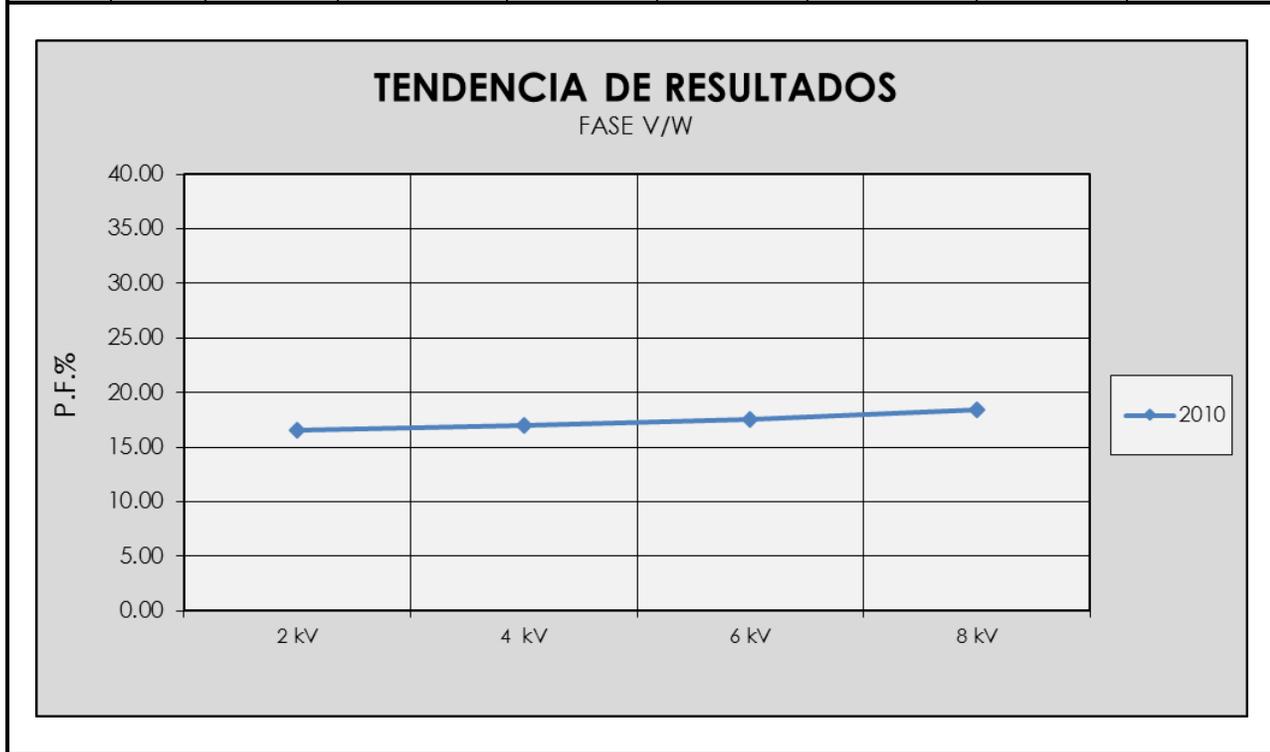
ENG	GND	UST	Test kV	mA	Watts	Cap (pF)	%PF	Tip-Up
A	C	B	2 000	4,769	7,181	1251,3	15,06	2,08
A	C	B	4 000	4,788	7,476	1254,5	15,61	
A	C	B	6 000	4,802	7,801	1257,4	16,25	
A	C	B	8 000	4,826	8,27	1260,8	17,14	



Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Resultados de la prueba de factor de potencia de aislamiento
TIP-UP FASE V/W al generador de la unidad gas núm. 3**

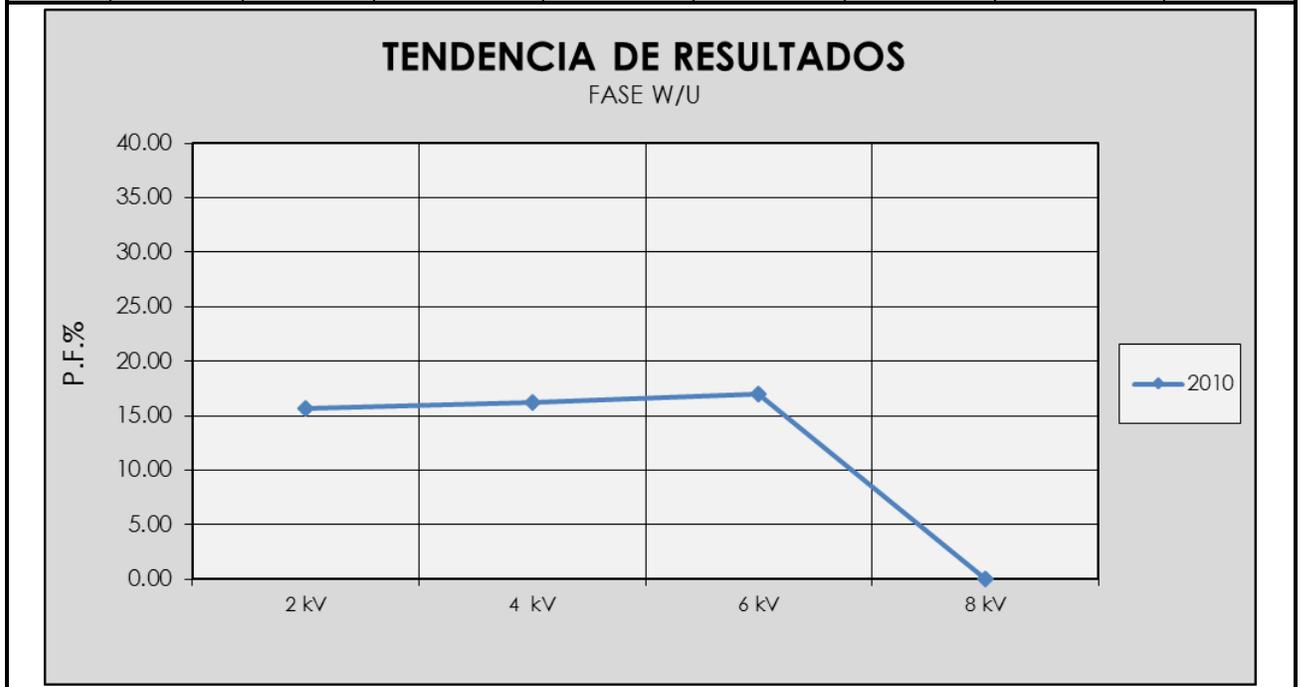
ENG	GND	UST	Test kV	mA	Watts	Cap (pF)	%PF	Tip-Up
B	A	C	2 000	4,786	7,908	1252,7	16,52	1,85
B	A	C	4 000	4,795	8,124	1254,9	16,94	
B	A	C	6 000	4,807	8,417	1256,7	17,51	
B	A	C	8 000	4,839	8,891	1262,3	18,37	



Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Resultados de la prueba de factor de potencia de aislamiento TIP-UP FASE W/U al generador de la unidad gas núm. 3**

ENG	GND	UST	Test kV	mA	Watts	Cap (pF)	%PF	Tip-Up
C	B	A	2 000	4,924	7,718	1290,5	15,67	1,35
C	B	A	4 000	4,947	8,045	12943,3	16,26	
C	B	A	6 000	4,966	8,453	1298,5	17,02	
C	B	A	8 000					



Fuente: elaboración propia.

2.1.1.3. Prueba de resistencia de aislamiento de devanados del estator

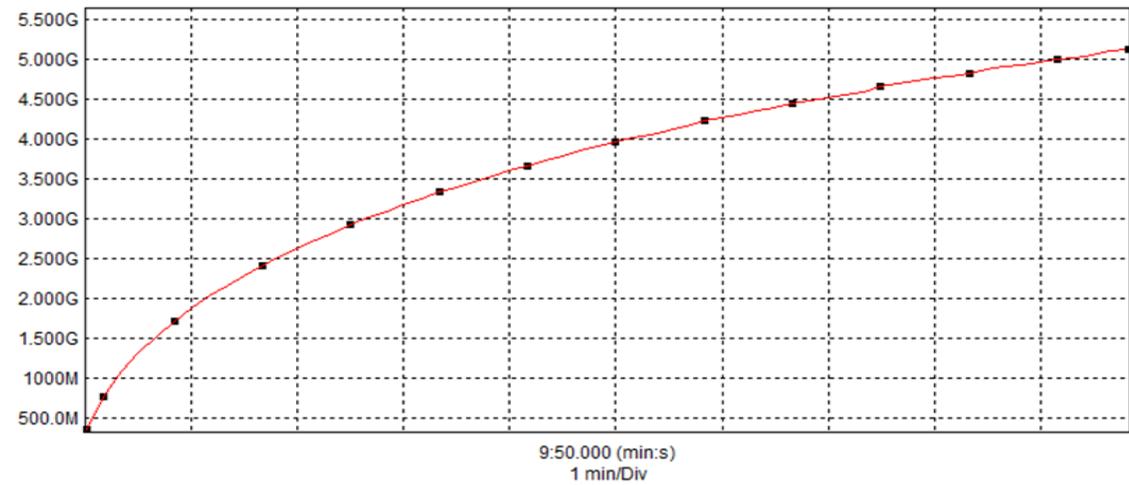
Se realizaron pruebas de resistencia de aislamiento para los devanados del estator según IEEE 43-2000 *Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery*.

Tabla XIII. Resultados de la prueba de resistencia de aislamiento de devanados del estator de la unidad generadora gas núm. 3

RESISTENCIA DE AISLAMIENTO DE DEVANADOS (MEGGER)						
					TEMPERATURA AMBIENTE	32 ° C
					TEMPERATURA APARATO	35 ° C
					HUMEDAD RELATIVA	32 %
CONEXIÓN	RESISTENCIA	RESISTENCIA (ref. 40° C)	PI	CAPACITANCIA	DAR	RESULTADOS GRÁFICOS
FASE U - TIERRA	5.194 GΩ	3.673 GΩ	2.917	114,500 pF	1.501	GRÁFICA 1
FASE V - TIERRA	22.69 MΩ	16.044 MΩ	1.118	133,000 pF	1.024	GRÁFICA 2
FASE W - TIERRA	6.314 MΩ	4.465 MΩ	1.502	144,200 pF	1.295	GRÁFICA 3
FASE UVW - TIERRA	3.350 MΩ	2.369 MΩ	1.739	394,600 pF	1.174	GRÁFICA 4
FASE U - V	5.229 GΩ	3.697 GΩ	3.088	70,910 pF	1.665	GRÁFICA 5
FASE V - W	26.18 MΩ	18.512 MΩ	1.315	76,350 pF	1.014	GRÁFICA 6
FASE W - U	5.791 GΩ	4.095 GΩ	2.873	105,800 pF	1.539	GRÁFICA 7

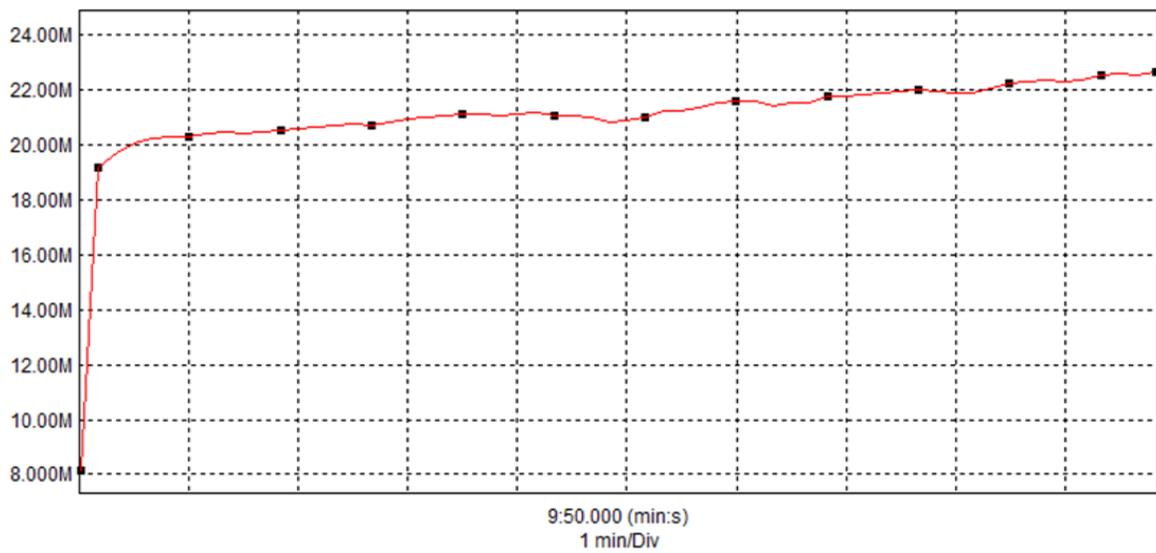
Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Resultados de la prueba de resistencia de aislamiento U/TIERRA de la unidad generadora gas núm. 3**



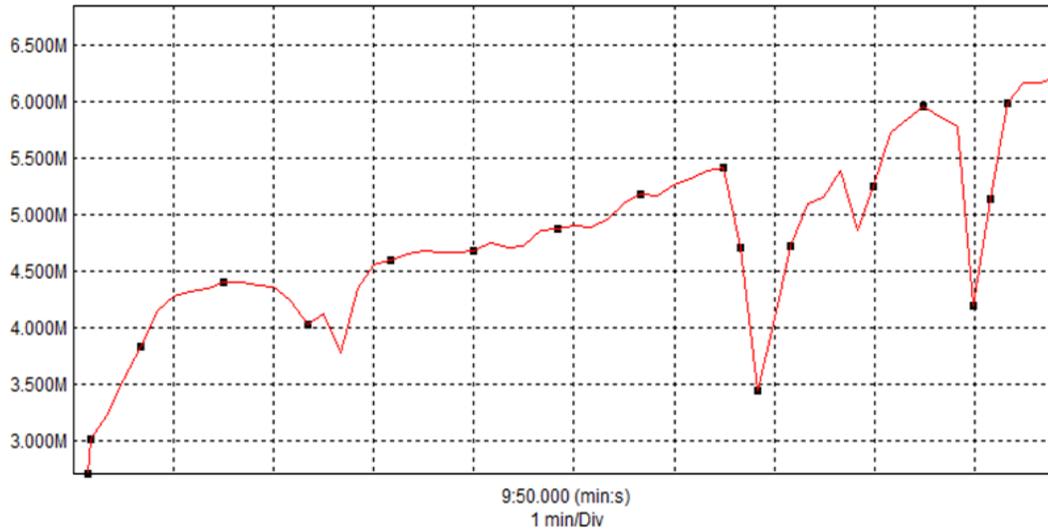
Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Resultados de la prueba de resistencia de aislamiento V/TIERRA de la unidad generadora gas núm. 3**



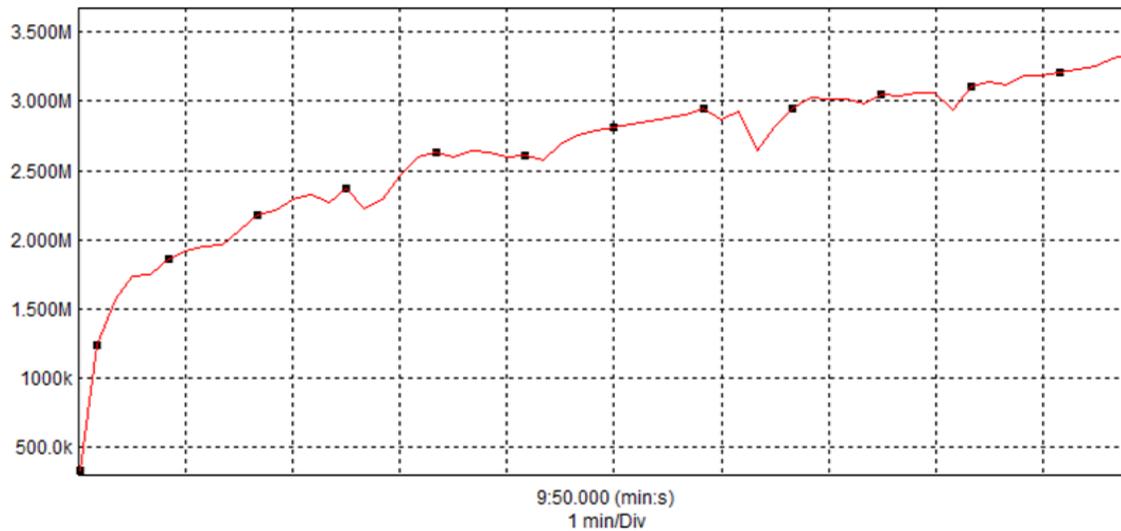
Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. Resultados de la prueba de resistencia de aislamiento W/TIERRA de la unidad generadora gas núm. 3



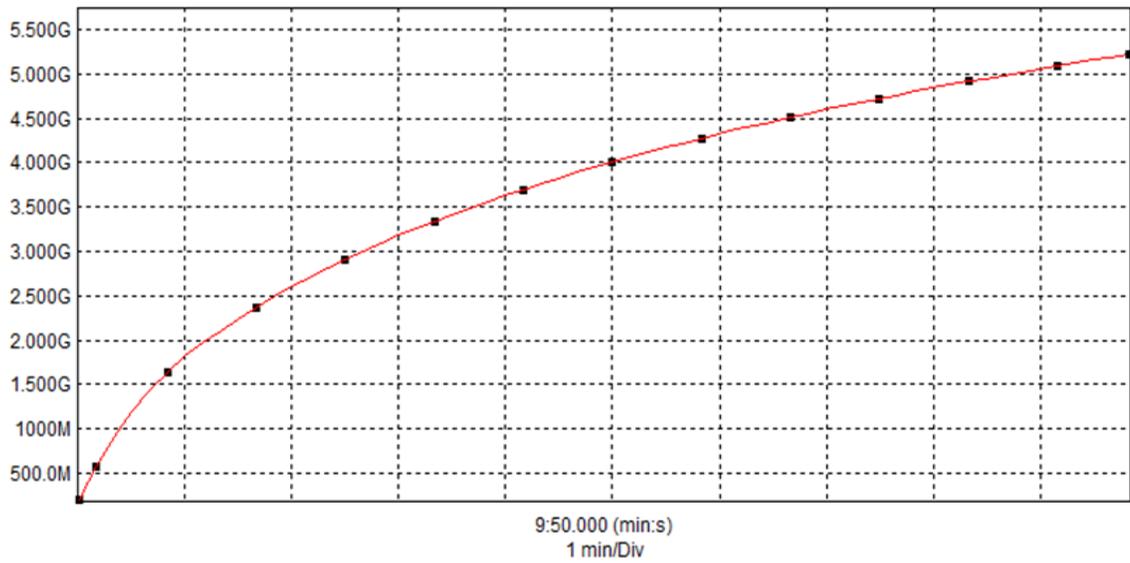
Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. Resultados de la prueba de resistencia de aislamiento UVW/TIERRA de la unidad generadora gas núm. 3



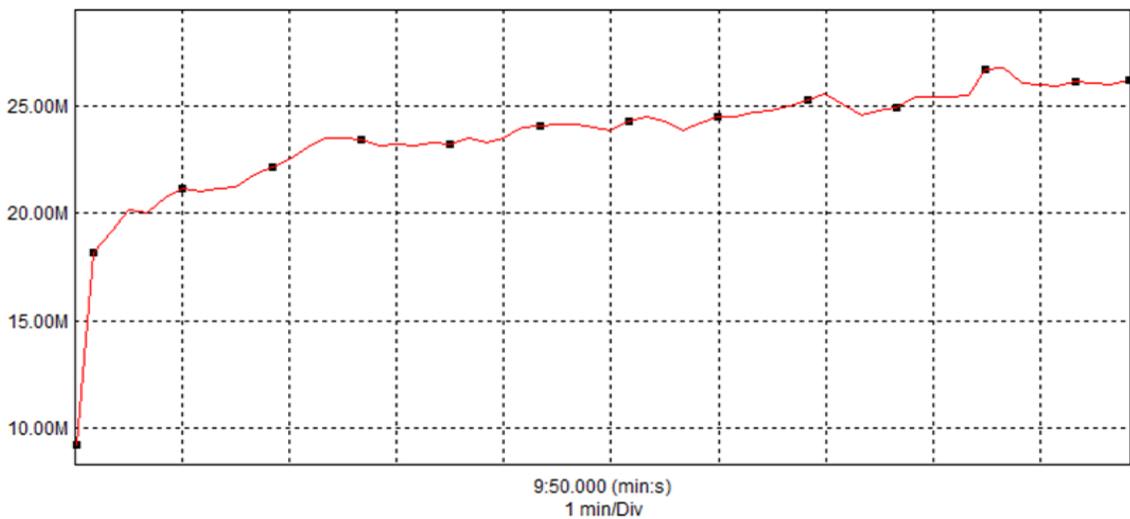
Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Resultados de la prueba de resistencia de aislamiento U/V de la unidad generadora gas núm. 3**



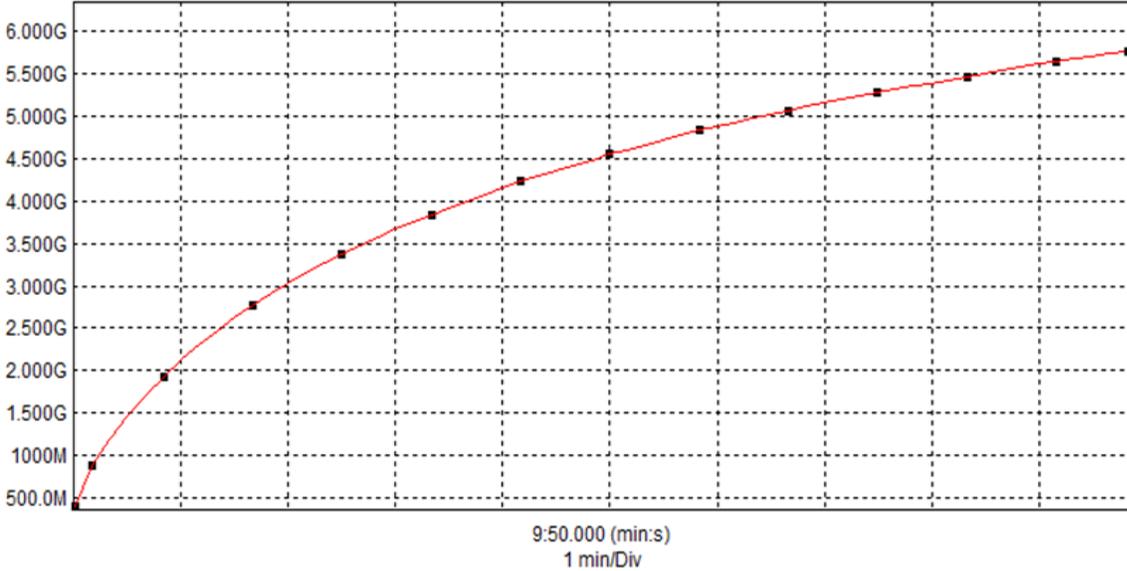
Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Resultados de la prueba de resistencia de aislamiento V/W de la unidad generadora gas núm. 3**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Resultados de la prueba de resistencia de aislamiento W/U de la unidad generadora gas núm. 3**



Fuente: elaboración propia.

2.1.2. Descripción de los trabajos realizados a unidad generadora gas núm. 4

El protocolo de pruebas eléctricas de diagnóstico se efectuó en instalaciones de Central Térmica Escuintla, en el departamento y municipio de Escuintla.

El presente documento tiene por objeto presentar los resultados del protocolo de diagnóstico realizado al generador de potencia con las siguientes características:

Tabla XXI. **Placa de datos del generador de la unidad generadora gas
núm. 4**

Generador	3ø
Id especial	Generador unidad gas núm. 4
Fabricante	<i>Electric machinery</i>
Núm. serie	275253501
Voltaje de operación	13,8 kv
Potencia nominal	33,30 mva

Fuente: elaboración propia.

Dichas pruebas se han realizado con el objeto de diagnosticar el estado general del sistema de aislamiento del generador de potencia mediante protocolos de prueba normalizados.

Se efectuó el siguiente protocolo de pruebas eléctricas de diagnóstico:

2.1.2.1. Inspección visual

Se realizó inspección visual se documentan fotografías individuales de los componentes del generador de potencia en los puntos de conexiones para realizar protocolo de pruebas eléctricas.

Figura 25. **Unidad generadora gas núm. 4**



Fuente: Central Térmica Escuintla. Municipio Escuintla, departamento Escuintla.

Figura 26. **Desmontaje del rotor de la unidad generadora gas núm. 4**



Fuente: Central Térmica Escuintla. Municipio Escuintla, departamento Escuintla.

2.1.2.2. Prueba de factor de potencia de aislamiento en funcion de voltaje (tip-up test)

Se realizaron pruebas de factor de potencia de aislamiento y capacitancia para los devanados del estator a distintos voltajes de prueba según IEEE 286-2000, *Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation*.

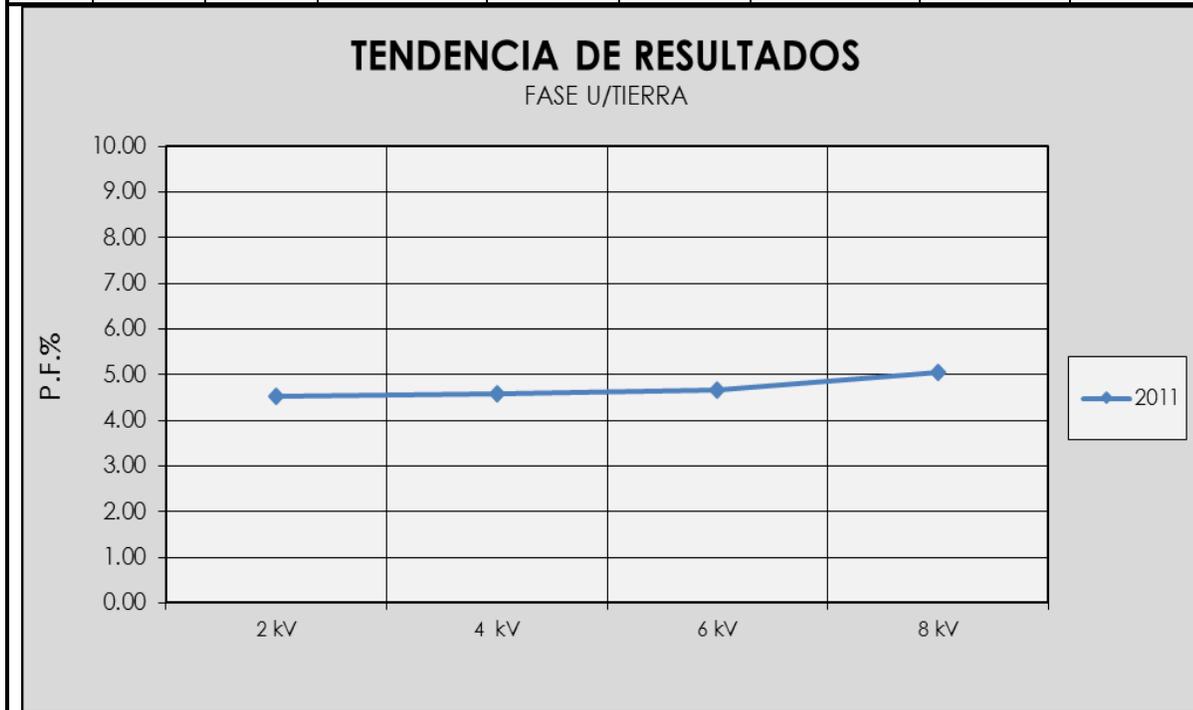
Tabla XXII. Resultados de la prueba de factor de potencia de aislamiento TIP-UP al generador de la unidad gas núm. 4

ENG	GND	UST	Test kV	mA	Watts	Cap (pF)	%PF	Tip-Up
A	B,C	-	2 000	314.22	142,04	83234,1	4,52	0,52
A	B,C	-	4 000	314.45	143,59	83292,0	4,57	
A	B,C	-	6 000	314.50	146,19	83342,4	4,65	
A	B,C	-	8 000	315.68	159,15	83666,8	5,04	
B	C,A	-	2 000	311.20	147,05	82463,9	4,73	0,55
B	C,A	-	4 000	311.38	149,53	82533,0	4,80	
B	C,A	-	6 000	311.78	152,17	82594,4	4,88	
B	C,A	-	8 000	313.03	165,21	82928,7	5,28	
C	A,B	-	2 000	312.06	143,29	82663,2	4,59	0,48
C	A,B	-	4 000	312.28	144,08	82735,0	4,61	
C	A,B	-	6 000	312.59	146,26	82769,0	4,68	
C	A,B	-	8 000	313.66	158,90	83101,5	5,07	
A	C	B	2 000	6.618	19,400	1679,1	29,31	2,10
A	C	B	4 000	6.664	19,964	1687,0	29,96	
A	C	B	6 000	6.706	20,527	1693,7	30,61	
A	C	B	8 000	6.760	21,232	1702,1	31,41	
B	A	C	2 000	6.691	20,455	1689,9	30,57	2,05
B	A	C	4 000	6.737	21,090	1697,3	31,30	
B	A	C	6 000	6.785	21,693	1704,4	31,97	
B	A	C	8 000	6.832	22,289	1713,5	32,62	
C	B	A	2 000	6.718	20,390	1697,9	30,35	1,88
C	B	A	4 000	6.765	20,897	1704,8	30,89	
C	B	A	6 000	6.803	21,443	1711,1	31,52	
C	B	A	8 000	6.853	22,090	1719,6	32,23	
A,B,C	-	-	2 000	899.49	309,17	238361,8	3,44	0,52
A,B,C	-	-	4 000	901.00	313,49	238640,7	3,48	
A,B,C	-	-	6 000	901.19	319,28	238772,5	3,54	
A,B,C	-	-	8 000	905.07	358,64	239740,4	3,96	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. Resultados de la prueba de factor de potencia de aislamiento
TIP-UP FASE U/TIERRA al generador de la unidad gas núm. 4

EN G	GND	UST	Test kV	mA	Watts	Cap (pF)	%PF	Tip-Up
A	B,C	-	2 000	314,22	142,04	83234,1	4,52	0,52
A	B,C	-	4 000	314,45	143,59	83292,0	4,57	
A	B,C	-	6 000	314,50	146,19	83342,4	4,65	
A	B,C	-	8 000	315,68	159,15	83666,8	5,04	

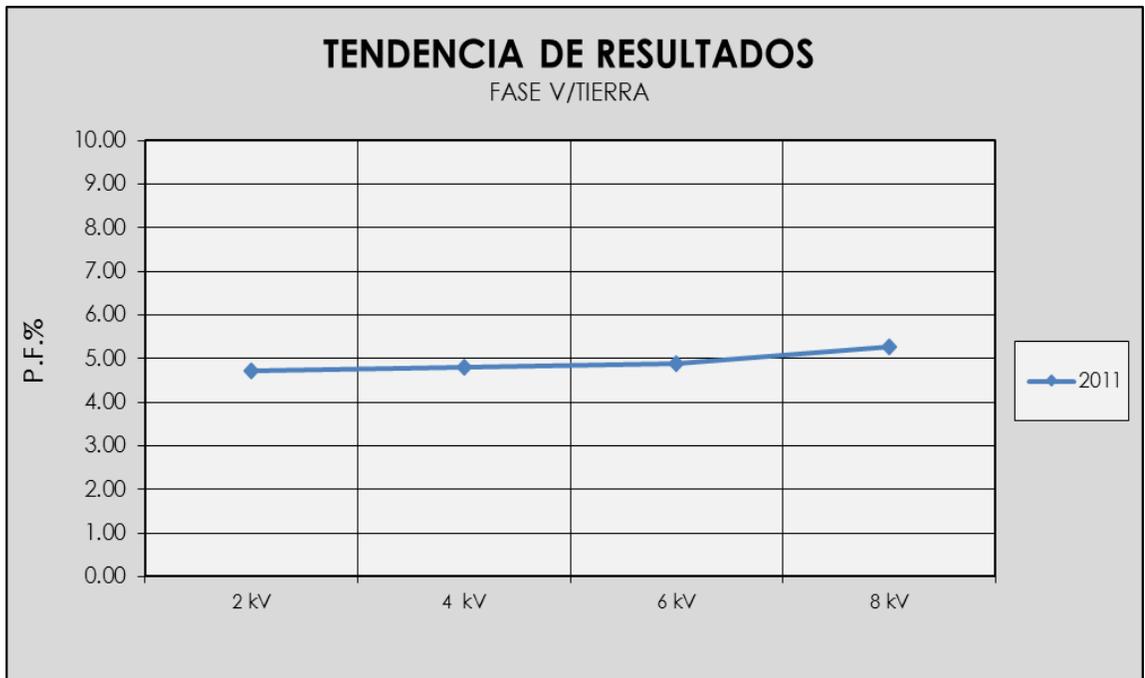


Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. Resultados de la prueba de factor de potencia de aislamiento TIP-UP FASE V/TIERRA al generador de la unidad gas núm.

4

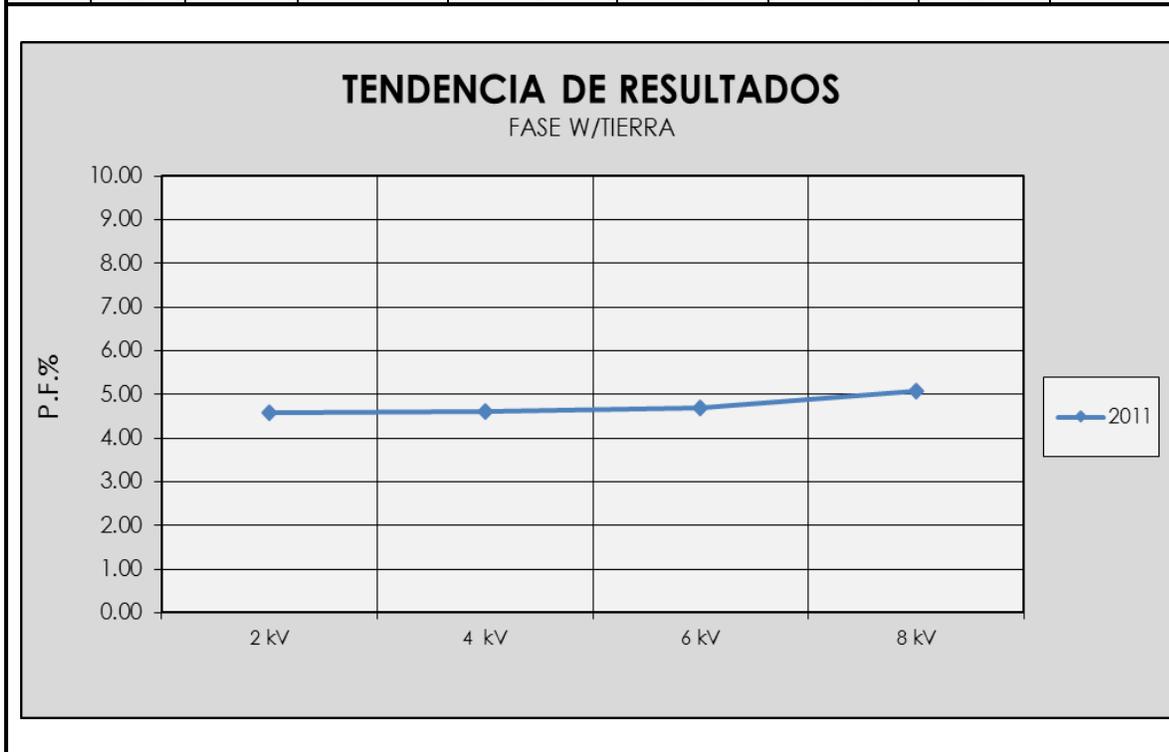
ENG	GND	UST	Test kV	mA	Watts	Cap (pF)	%PF	Tip-Up
B	C,A	-	2.000	311.20	147.05	82463.9	4.73	0.55
B	C,A	-	4.000	311.38	149.53	82533.0	4.80	
B	C,A	-	6.000	311.78	152.17	82594.4	4.88	
B	C,A	-	8.000	313.03	165.21	82928.7	5.28	



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. Resultados de la prueba de factor de potencia de aislamiento
TIP-UP FASE W/TIERRA al generador de la unidad gas núm. 4

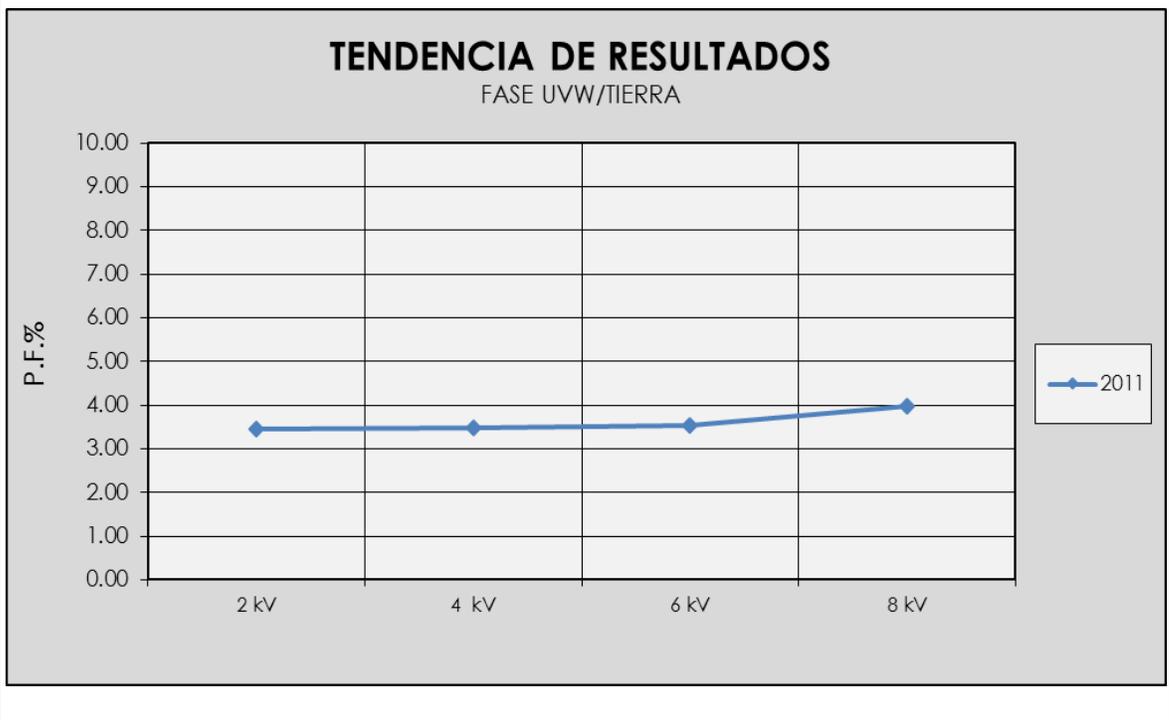
EN G	GND	UST	Test kV	mA	Watts	Cap (pF)	%PF	Tip-Up
C	A,B	-	2 000	312,06	143,29	82663,2	4,59	0,48
C	A,B	-	4 000	312,28	144,08	82735,0	4,61	
C	A,B	-	6 000	312,59	146,26	82769,0	4,68	
C	A,B	-	8 000	313,66	158,90	83101,5	5,07	



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. Resultados de la prueba de factor de potencia de aislamiento TIP-UP FASE UVW/TIERRA al generador de la unidad gas núm. 4

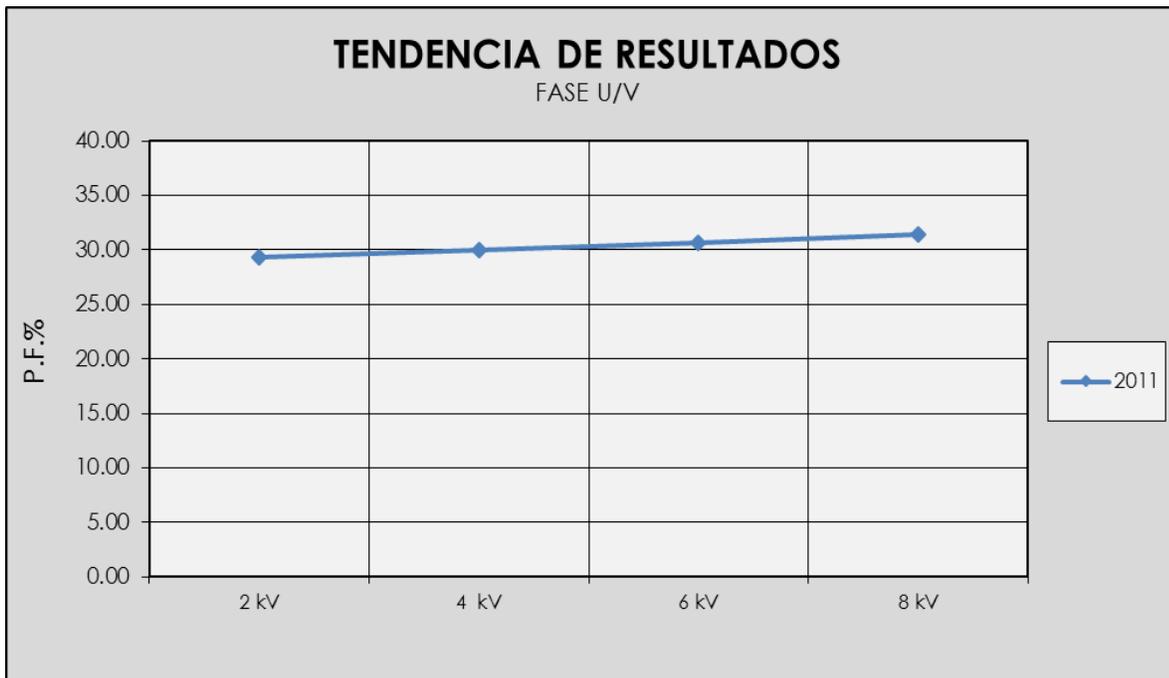
EN G	GND	UST	Test kV	mA	Watts	Cap (pF)	%PF	Tip-Up
A,B, C	-	-	2 000	899,49	309,17	238361.8	3,44	0,52
A,B, C	-	-	4 000	901,00	313,49	238640.7	3,48	
A,B, C	-	-	6 000	901,19	319,28	238772.5	3,54	
A,B, C	-	-	8 000	905,07	358,4	239740.4	3,96	



Fuente: elaboración propia.

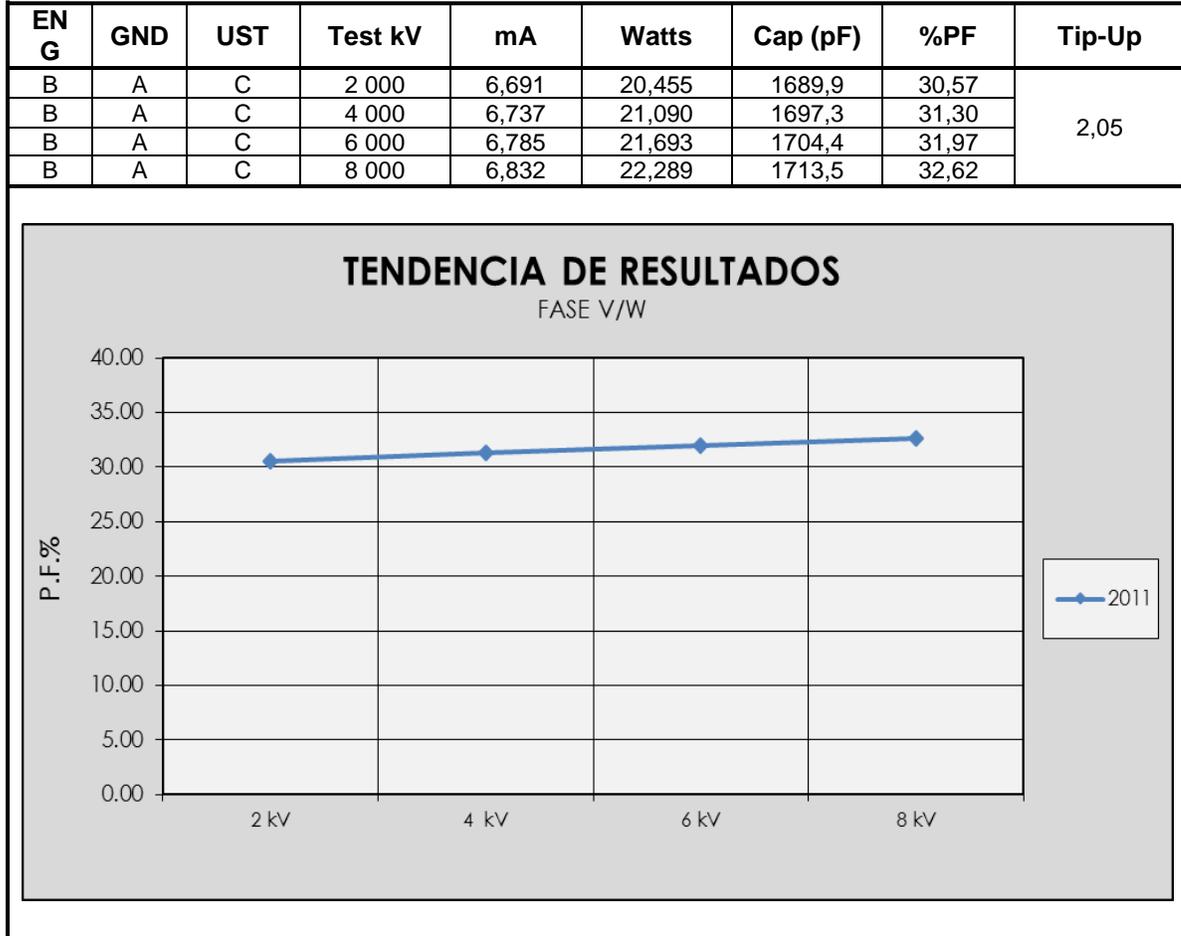
Tabla XXVII. Resultados de la prueba de factor de potencia de aislamiento TIP-UP FASE U/V al generador de la unidad gas núm.

ENG	GND	UST	Test kV	mA	Watts	Cap (pF)	%PF	Tip-Up
A	C	B	2 000	6,6,18	19,400	1679,1	29,31	2,10
A	C	B	4 000	6,664	19,964	1687,0	29,96	
A	C	B	6 000	6,706	20,527	1693,7	30,61	
A	C	B	8 000	6,760	21,232	1702,1	31,41	



Fuente: elaboración propia.

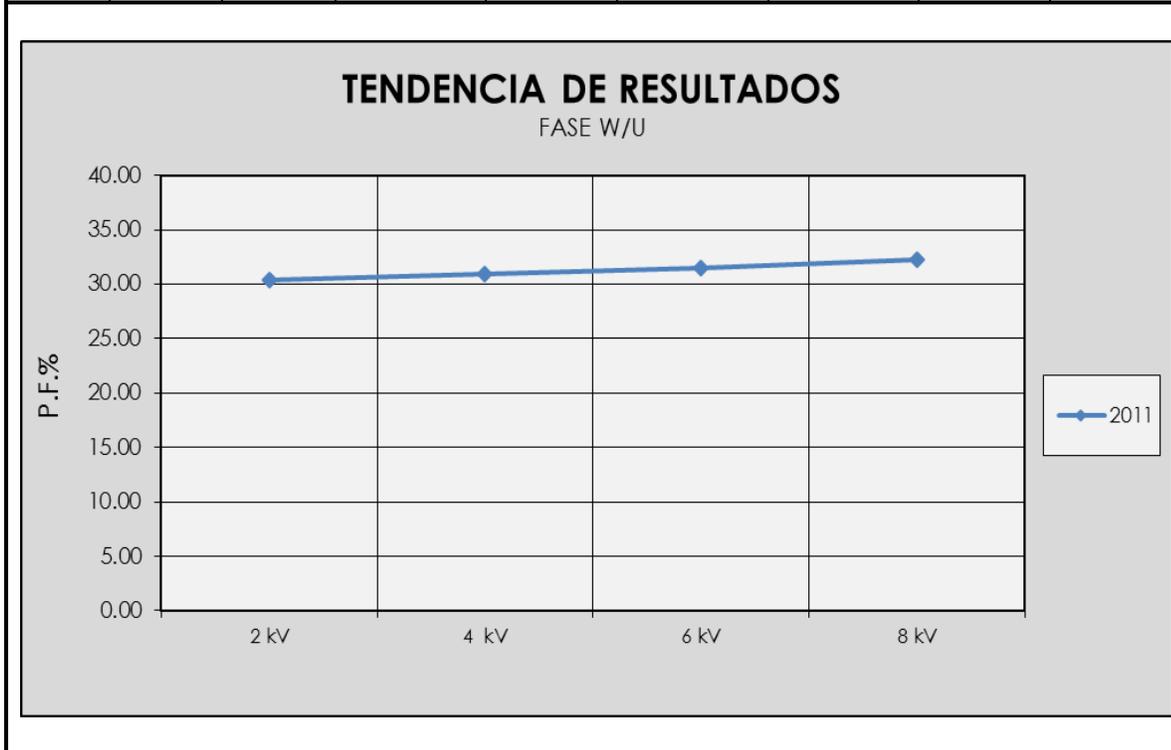
Tabla XXVIII. Resultados de la prueba de factor de potencia de aislamiento TIP-UP FASE V/W al generador de la unidad gas núm. 4



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. **Resultados de la prueba de factor de potencia de aislamiento TIP-UP FASE W/U al generador de la unidad gas núm. 4**

ENG	GND	UST	Test kV	mA	Watts	Cap (pF)	%PF	Tip-Up
C	B	A	2 000	6,718	20,390	1697,9	30,35	1,88
C	B	A	4 000	6,765	20,897	1704,8	30,89	
C	B	A	6 000	6,803	21,443	1711,1	31,52	
C	B	A	8 000	6,853	22,090	1719,6	32,23	

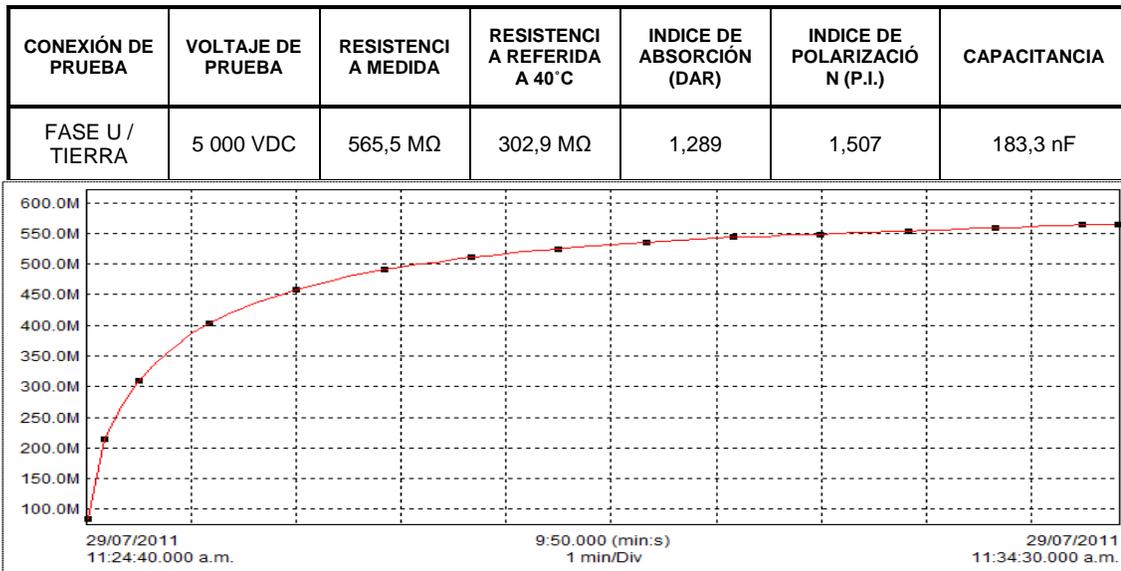


Fuente: elaboración propia.

2.1.2.3. Prueba de resistencia de aislamiento de devanados del estator (megger)

Se realizaron pruebas de resistencia de aislamiento para los devanados del estator según IEEE std 43-2000 *Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery*.

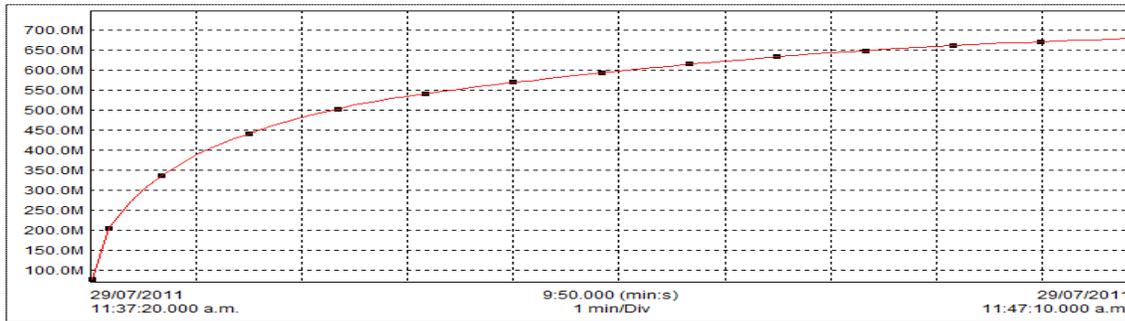
Tabla XXX. Resultados de la prueba de resistencia de aislamiento U/TIERRA de la unidad generadora gas núm. 4



Fuente: elaboración propia,

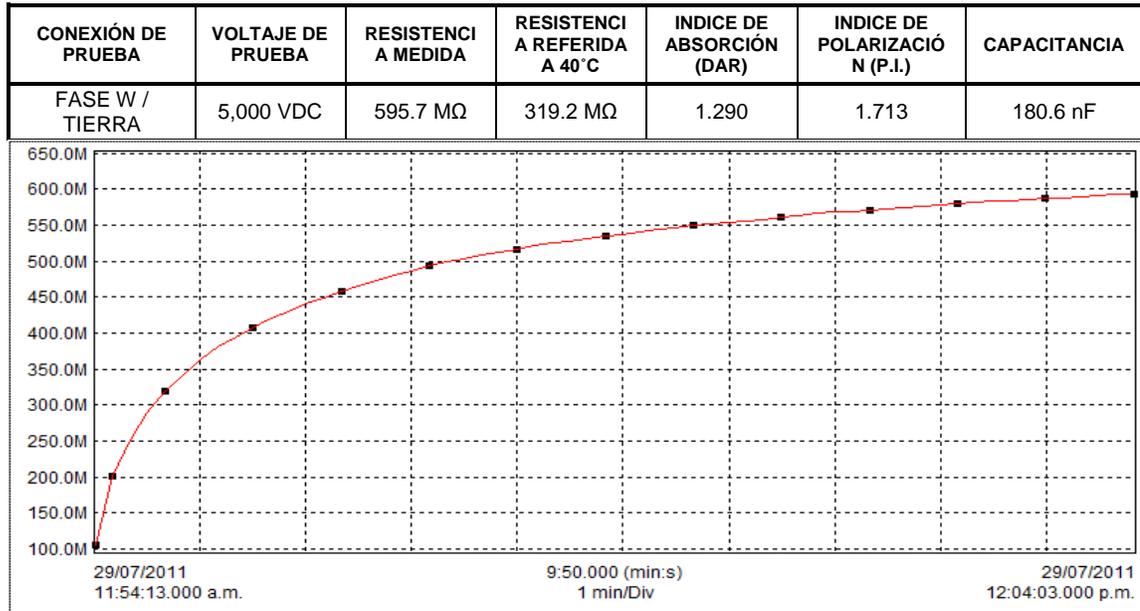
Tabla XXXI. **Resultados de la prueba de resistencia de aislamiento V/TIERRA de la unidad generadora gas núm. 4**

CONEXIÓN DE PRUEBA	VOLTAJE DE PRUEBA	RESISTENCIA A MEDIDA	RESISTENCIA REFERIDA A 40°C	INDICE DE ABSORCIÓN (DAR)	INDICE DE POLARIZACIÓN (P.I.)	CAPACITANCIA
FASE V / TIERRA	5 000 VDC	680,4 MΩ	364,6 MΩ	1,335	1,822	185,8 nF



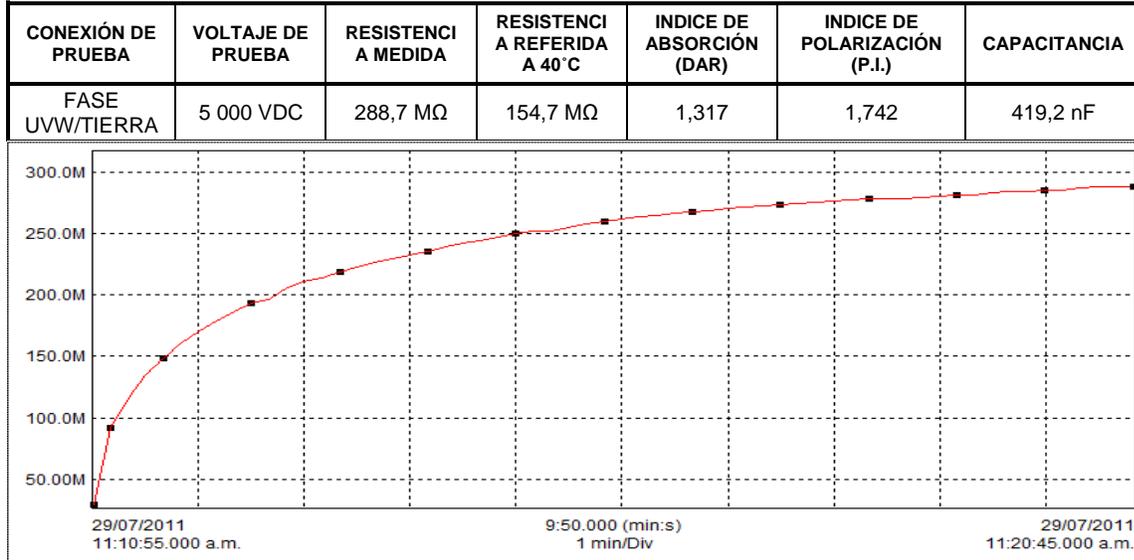
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXII. **Resultados de la prueba de resistencia de aislamiento W/TIERRA de la unidad generadora gas núm. 4**



Fuente: elaboración propia.

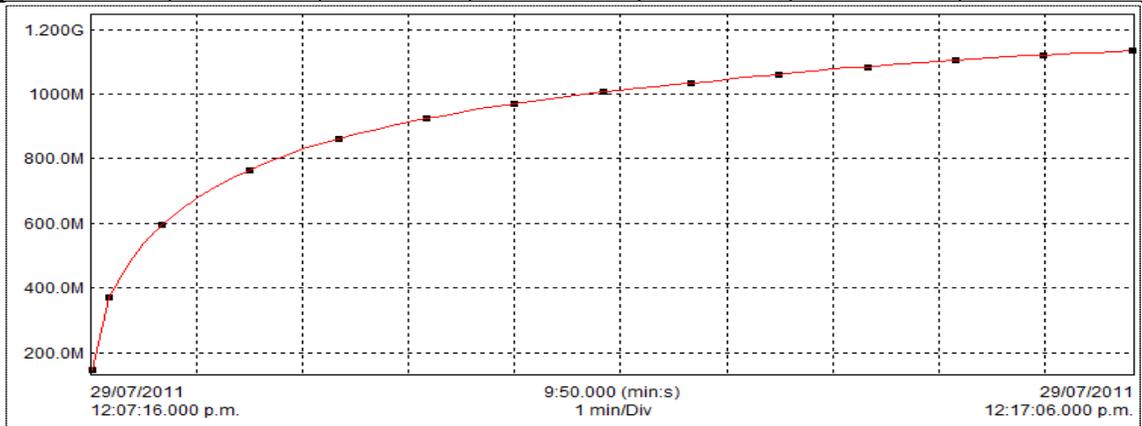
Tabla XXXIII. Resultados de la prueba de resistencia de aislamiento UVW/TIERRA de la unidad generadora gas núm. 4



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIV. **Resultados de la prueba de resistencia de aislamiento U/V de la unidad generadora gas núm. 4**

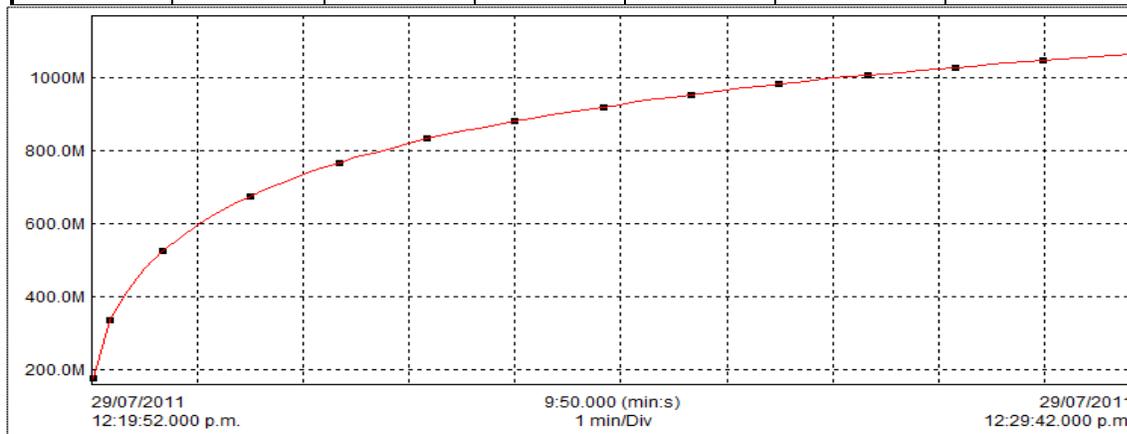
CONEXIÓN DE PRUEBA	VOLTAJE DE PRUEBA	RESISTENCIA A MEDIDA	RESISTENCIA REFERIDA A 40°C	INDICE DE ABSORCIÓN (DAR)	INDICE DE POLARIZACIÓN (P.I.)	CAPACITANCIA
FASE U / V	5 000 VDC	1,136 GΩ	0,609 MΩ	1,321	1,722	75,60 nF



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXV. **Resultados de la prueba de resistencia de aislamiento V/W de la unidad generadora gas núm. 4**

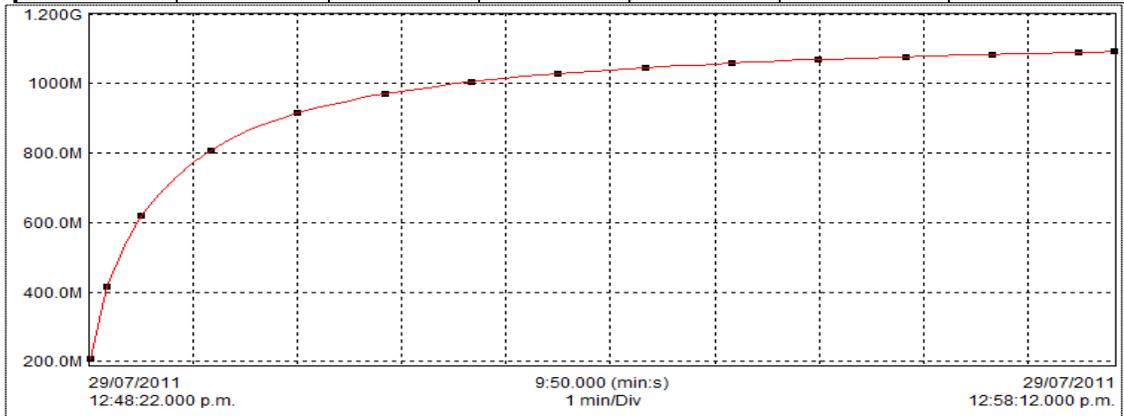
CONEXIÓN DE PRUEBA	VOLTAJE DE PRUEBA	RESISTENCIA A MEDIDA	RESISTENCIA REFERIDA A 40°C	INDICE DE ABSORCIÓN (DAR)	INDICE DE POLARIZACIÓN (P.I.)	CAPACITANCIA
FASE V / W	5 000 VDC	1,067 GΩ	0,572 MΩ	1,299	1,841	75,84 nF



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVI. **Resultados de la prueba de resistencia de aislamiento W/U de la unidad generadora gas núm. 4**

CONEXIÓN DE PRUEBA	VOLTAJE DE PRUEBA	RESISTENCIA A MEDIDA	RESISTENCIA REFERIDA A 40°C	INDICE DE ABSORCIÓN (DAR)	INDICE DE POLARIZACIÓN (P.I.)	CAPACITANCIA
FASE W /U	5 000 VDC	1,101 GΩ	0,590 MΩ	1,319	1,445	75,03 nF



Fuente: elaboración propia.

2.1.2.4. Prueba de resistencia óhmica de devanados

Se realizaron pruebas resistencia óhmica a las bobinas del estator de las fases U, V, W.

Tabla XXXVII. **Resultados de la prueba de resistencia óhmica a los devanados del generador eléctrico de la unidad generadora gas núm.4**

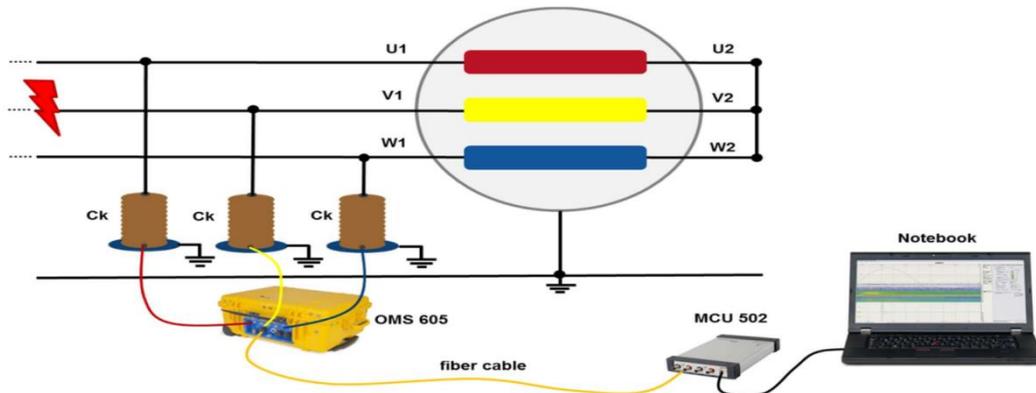
Resistencia	Fase U	Fase V	Fase W
Medida	11,110 mΩ	11,100 mΩ	11,130 mΩ
Corregida a 20°C	10,650 mΩ	10,640 mΩ	10,669 mΩ

Fuente: elaboración propia.

2.1.2.5. Prueba de descargas parciales

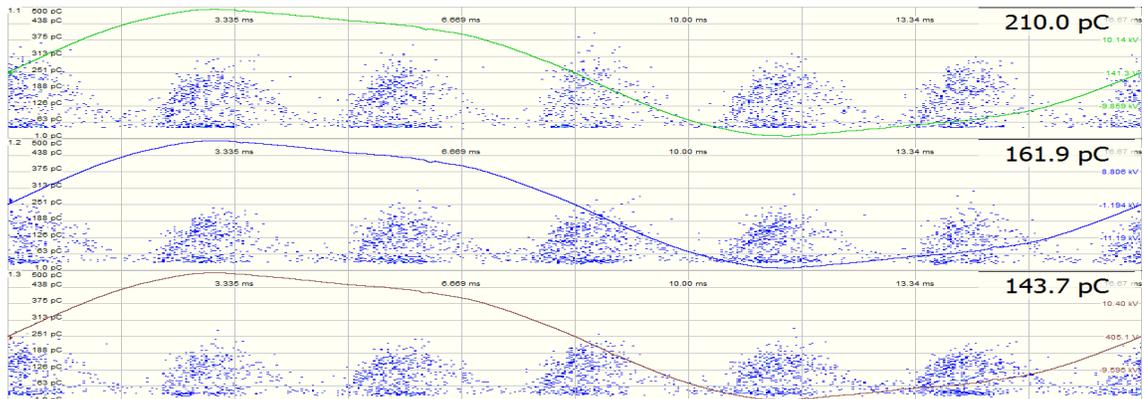
Se realizaron pruebas de descargas parciales a los devanados del estator según IEEE std 1434-2000, *Trial-Use Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery*.

Figura 27. **Configuración instrumental de la prueba de descargas parciales**



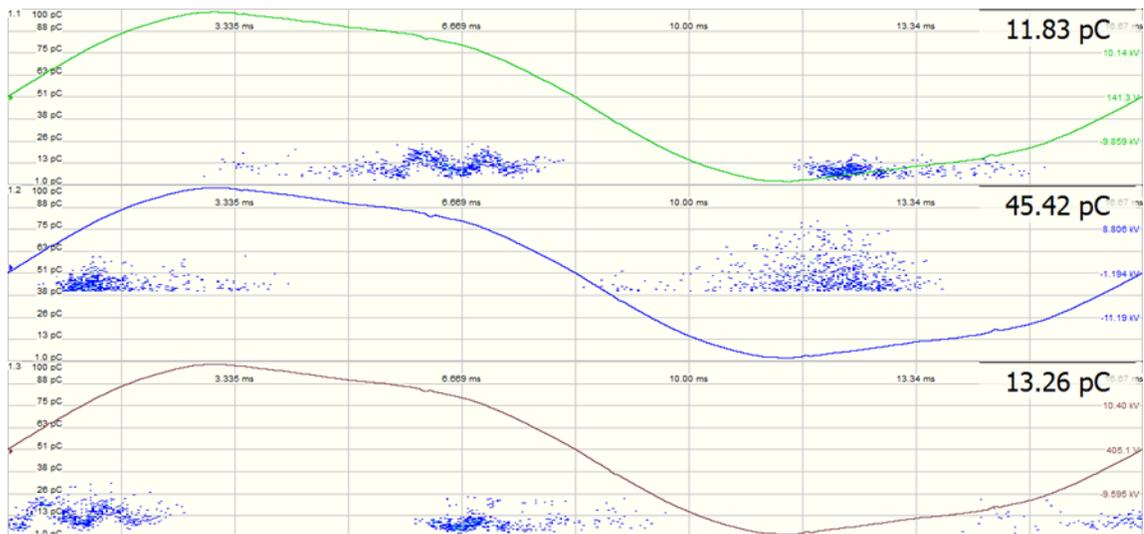
Fuente: CENTRAL TÉRMICA. *Informe de mantenimiento predictivo generador eléctrico gas núm. 4. p. 04*

Figura 28. **Resultado de prueba de descargas parciales: ruido de excitador**



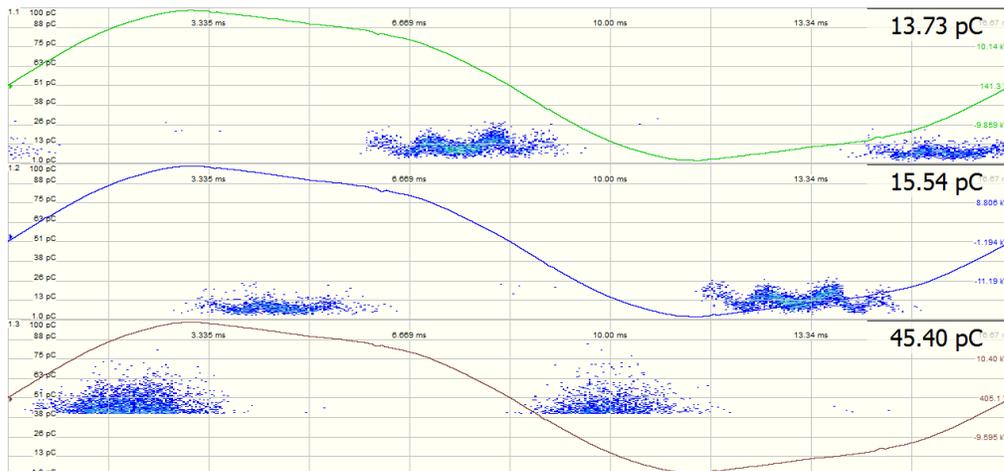
Fuente: CENTRAL TÉRMICA. *Informe de mantenimiento predictivo generador eléctrico gas* núm. 4. p. 13.

Figura 29. **Resultado de prueba de descargas parciales: descarga interna (micro huecos) o descarga de superficie en la fase V**



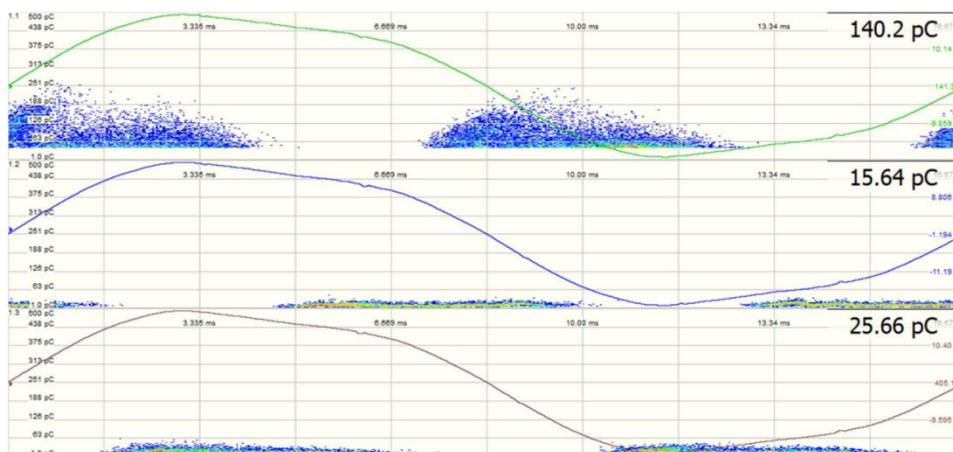
Fuente: CENTRAL TÉRMICA. *Informe de mantenimiento predictivo generador eléctrico gas* núm. 4. p. 14.

Figura 30. Resultados de prueba de descargas parciales: descarga interna (micro huecos) o descarga superficial en la fase W



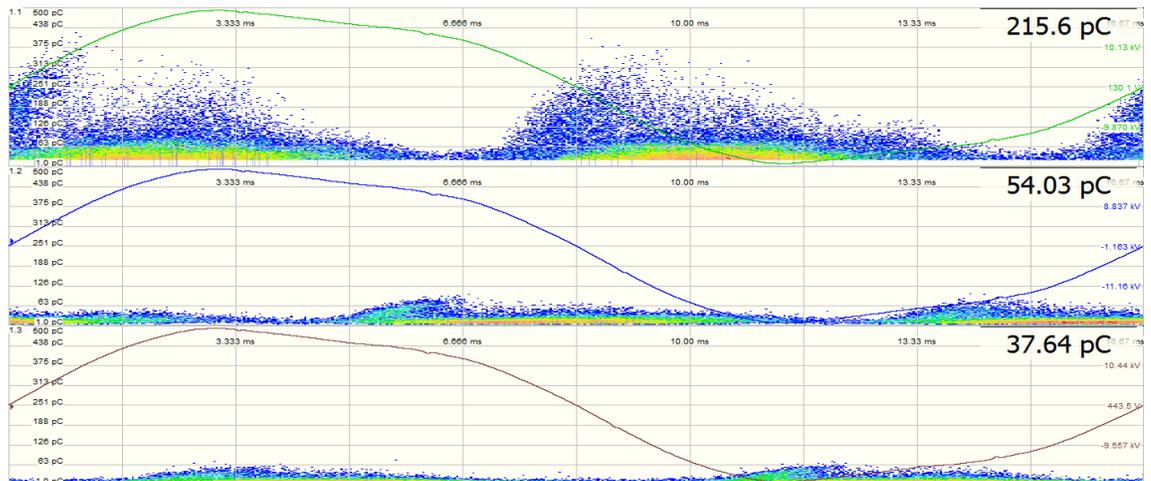
Fuente: CENTRAL TÉRMICA. *Informe de mantenimiento predictivo generador eléctrico gas* núm. 4. p. 13.

Figura 31. Resultados de prueba de descargas parciales: descargas similares a la superficie del devanado final y micro huecos en la fase U



Fuente: CENTRAL TÉRMICA. *Informe de mantenimiento predictivo generador eléctrico gas* núm. 4. p. 15.

Figura 32. **Resultados de prueba de descargas parciales: descargas similares a la descarga final del arrollamiento en la fase U**



Fuente: CENTRAL TÉRMICA. *Informe de mantenimiento predictivo generador eléctrico gas*
núm. 4. p. 15.

3. FASE ENSEÑANZA APRENDIZAJE

3.1. Objetivo del curso electricidad básica

Este curso tiene como objetivo comprender los conceptos fundamentales de la electricidad en la industria. Explicando de una manera sencilla la teoría básica con ejercicios prácticos y una evaluación final que permita apreciar los conocimientos adquiridos para una formación posterior más avanzada.

3.2. Contenido del curso

El contenido del curso de electricidad básica que se desarrollará es el siguiente:

- Definición de electricidad.
- Magnitudes fundamentales de la electricidad.
- Ley de Ohm.
- Conexión de resistencias en serie o paralelo.
- Leyes de Kirchhoff.
- Potencia y energía.
- Corriente alterna.
- Protecciones eléctricas.
- El transformador.
- El relé y el contactor.
- Temporizadores.
- Electroválvulas.

3.2.1. Definición de electricidad

Es el conjunto de fenómenos físicos relacionados con la presencia y flujo de cargas eléctricas. Se manifiesta en una gran variedad de fenómenos como los rayos, la electricidad estática, la inducción electromagnética o el flujo de corriente eléctrica. Es una forma de energía tan versátil que tiene un sinnúmero de aplicaciones.

3.2.2. Magnitudes fundamentales de la electricidad

Las magnitudes fundamentales de la electricidad son las siguientes:

3.2.2.1. Intensidad de corriente

Es la carga eléctrica por unidad de tiempo que recorre un material y su unidad de medida es el amperio (A), esta teoría se debe a André Marie Ampère.

$$I=q/t$$

3.2.2.2. Resistencia

Es la mayor o menor capacidad de un material para permitir el paso de la corriente eléctrica y su unidad de medida es el Ohm (Ω), esta teoría se debe a Jorge Simon Ohm.

3.2.2.3. Voltaje o diferencia de potencial

Es la energía que es capaz de dar un generador o una batería a cada coulombio de carga para que recorra el circuito y su unidad de medida es el Voltio (V), esta teoría se debe a Alessandro Volta.

3.2.3. Ley de Ohm

La ley de Ohm dice que la intensidad de la corriente eléctrica que circula por un conductor eléctrico es directamente proporcional a la diferencia de potencial aplicada e inversamente proporcional a la resistencia del mismo, se puede expresar matemáticamente de la siguiente manera:

$$I=V/R$$

Donde:

I = Intensidad (amperios)

V = Diferencia de potencial (voltios)

R = Resistencia (ohmios)

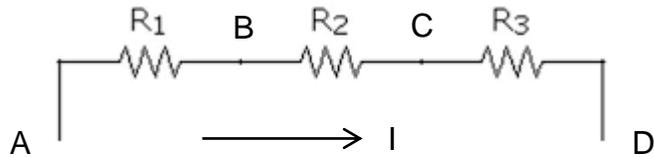
3.2.4. Conexión de resistencias en serie o paralelo

A continuación se describen las diferentes resistencias en serie o paralelo que existen.

3.2.4.1. Resistencias en serie

Dos o más resistencias se dice que están en serie cuando cada una de ellas se sitúa a continuación de la anterior a lo largo del hilo conductor, la intensidad de corriente que circula por cada una de ellas es la misma.

Figura 33. **Resistencias en serie**



Fuente: Resistencia en serie. <https://www.fiscalab.com/apartado/asociacion-de-resistencias#contenidos>. Consulta: 25 de febrero de 2018.

Si se aplica la ley de Ohm a cada una de las resistencias de la figura anterior obtenemos que:

$$V_A - V_B = I \cdot R_1 \quad ; \quad V_B - V_C = I \cdot R_2 \quad ; \quad V_C - V_D = I \cdot R_3$$

Si se realiza una suma a cada una de las magnitudes de las tres ecuaciones, observamos que:

$$\begin{aligned} V_A - V_B + V_B - V_C + V_C - V_D &= I \cdot R_1 + I \cdot R_2 + I \cdot R_3 \Rightarrow \\ V_A - V_D &= I \cdot (R_1 + R_2 + R_3) \Rightarrow \end{aligned}$$

Si se toma en cuenta que $R = (R_1 + R_2 + R_3)$ queda de la siguiente manera

$$V_A - V_D = I \cdot R$$

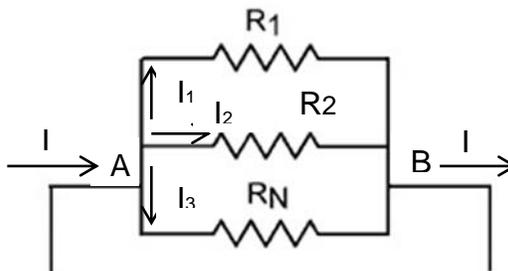
Por lo tanto, como se observa que las tres resistencias en serie anteriores son equivalentes a una única resistencia cuyo valor es la suma de las tres anteriores.

3.2.4.2. Resistencias en paralelo

Cuando las resistencias se encuentran en paralelo, la suma de las intensidades de corriente que circulan por cada una de las resistencias es equivalente a la intensidad antes y después de la bifurcación.

La diferencia de potencial es la misma entre los extremos de todas las resistencias.

Figura 34. Resistencias en paralelo



Fuente: Resistencias en paralelo. <https://www.fisicalab.com/apartado/asociacion-de-resistencias#contenidos>. Consulta: 15 de marzo de 2018.

Si se dispone de n resistencias en paralelo todas las resistencias poseen la misma diferencia de potencial en sus extremos y la intensidad de entrada I se divide entre cada una de las ramas de tal forma que:

$$I=I_1+I_2+\dots+I_N$$

Si se aplica la ley de Ohm en cada una de las resistencias del circuito:

$$V_A-V_B/R_1=I_1 \quad ; \quad V_A-V_B/R_2=I_2 \quad ; \quad V_A-V_B/R_3=I_3$$

Sabiendo que la suma de las intensidades de cada resistencia es la intensidad antes de entrar y salir del conjunto formado por las tres resistencias:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = (V_A - V_B) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) \Rightarrow$$

$$I = (V_A - V_B) / R$$

De aquí se puede deducir que una asociación de resistencias en paralelo es equivalente a una única resistencia R cuyo valor es inferior a cada una de las que se asocia y se cumple que:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

3.2.5. Leyes de Kirchhoff

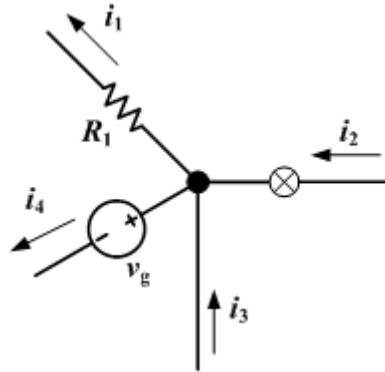
A continuación se describe todo lo que está relacionado con las Leyes de Kirchhoff.

3.2.5.1. Ley de corrientes de Kirchhoff

Esta ley también es llamada ley de nodos o primera Ley de Kirchhoff y es común que se use la sigla LCK para referirse a esta ley. La ley de corrientes de Kirchhoff dice que:

La ley de corriente eléctrica de Gustav Kirchhoff establece que la suma algebraica de las corrientes que entran a un punto en particular deben ser 0, o dicho de otra manera, en cualquier nodo, la suma de las corrientes que entran en ese nodo es igual a la suma de las corrientes que salen.

Figura 35. **Representación simplificada de las corrientes en un circuito**



Fuente: Representación simplificada de las corrientes de un circuito.

https://es.wikiversity.org/wiki/Ley_de_Corriente_de_Kirchhoff. Consulta 10 de marzo de 2018.

Se observan cuatro corrientes dos entran y dos salen del nodo, cuatro corrientes están existiendo actualmente en el nodo, pero para propósito del análisis del circuito generalmente se considera que actualmente las corrientes positivas fluyen hacia afuera a través de la unión y las corrientes negativas fluyen hacia la unión, hacer esto nos permite escribir la ecuación de la Ley de Kirchhoff como ejemplo:

$$\sum_n i_n = i_1 + i_2 + i_3 + i_4 = 0$$

La ley se basa en el principio de la conservación de la carga donde la carga en culombios es el producto de la corriente en amperios y el tiempo en segundos.

Por definición un nodo es un punto de una red eléctrica en el cual convergen tres o más conductores.

Esta primera ley confirma el principio de la conservación de las cargas eléctricas.

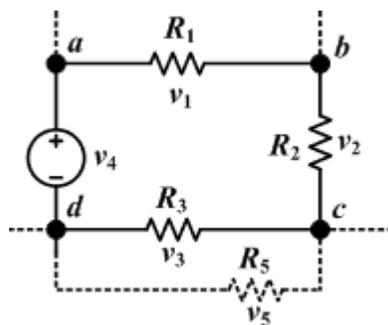
La Ley de corriente de Kirchhoff como está escrita es aplicable solamente a circuitos de corriente continua y cada nodo se usa para formar una ecuación que son resueltas simultáneamente, y la solución de ecuaciones simultáneas entregan el voltaje en cada nodo. La corriente que entra en un nodo es la misma que sale de él.

3.2.5.2. Ley de voltaje de Kirchhoff

Esta ley es también llamada segunda Ley de Kirchhoff, regla de bucle o malla de Kirchhoff.

La ley de voltaje de Kirchhoff indica que la suma de voltajes alrededor de una trayectoria o circuito cerrado debe ser cero.

Figura 36. Representación simplificada de los voltajes en un circuito



Fuente: Representación simplificada de las voltajes en un circuito.

https://es.wikiversity.org/wiki/Ley_de_Voltaje_de_Kirchhoff. Consulta: 10 de marzo de 2018.

Se puede observar cinco voltajes: V_4 a través de una fuente de alimentación y los cuatro voltajes V_1 , V_2 , V_3 y V_5 a través de las resistencias R_1 , R_2 , R_3 y R_5 , respectivamente. El voltaje de alimentación y las resistencias R_1 , R_2 y R_3 componen una ruta de circuito cerrado, de este modo la suma de los voltajes v_4 , v_1 , v_2 y v_3 debe ser 0.

$$\sum_n V_n = V_4 + V_1 + V_2 + V_3 = 0$$

La resistencia R_5 está por fuera del bucle cerrado, y por eso no desempeña ningún papel en el cálculo de la Ley de voltaje de Kirchhoff.

Ahora si se toma el punto d como punto de referencia y arbitrariamente se selecciona su voltaje a cero, se observa como el voltaje cambia mientras que se recorre el circuito hacia la derecha. Yendo del punto d al punto a , a través de la fuente de voltaje, se experimenta un aumento del voltaje de V_4 voltios. Si se analiza desde el punto a al punto b , se cruza un resistor. Se observa claramente en el diagrama que, puesto que hay solamente una fuente de voltaje, la corriente debe fluir de ella desde el terminal positivo a su terminal negativo, siguiendo una trayectoria hacia la derecha. Así de la Ley de Ohm, se observa que el voltaje cae del punto a al punto b a través del resistor R_1 . Asimismo, el voltaje cae a través de los resistores R_2 y R_3 . Habiendo cruzado R_2 y R_3 , se llega detrás del punto d , donde el voltaje es cero. Se experimenta así un aumento en voltaje y tres caídas de voltajes mientras que se atraviesa el circuito. La implicación de la Ley del Voltaje de Kirchhoff es que, en un circuito simple con solamente una fuente de voltaje y cualquier número de resistores, la caída de voltaje a través de los resistores es igual al voltaje aplicado por la fuente de voltaje:

$$V_4 = V_1 + V_2 + V_3$$

3.2.6. Potencia y energía eléctrica

A continuación se describe la potencia y energía eléctrica.

3.2.6.1. Potencia eléctrica

Es la relación de paso de energía de un flujo por unidad de tiempo es decir, la cantidad de energía entregada o absorbida por un elemento en un momento determinado. La unidad en el Sistema Internacional de Unidades es el vatio o *watt* (W).

Cuando se trata de corriente continua (CC) la potencia eléctrica desarrollada en un cierto instante por un dispositivo de dos terminales, es el producto de la diferencia de potencial entre dichos terminales y la intensidad de corriente que pasa a través del dispositivo. Por esta razón la potencia es proporcional a la corriente y a la tensión. Esto es:

$$P = V \cdot I$$

Dónde:

I = al valor instantáneo de la intensidad de corriente.

V = al valor instantáneo del voltaje.

Si I se expresa en amperios y V en voltios, P estará expresada en watts.

Cuando el dispositivo es una resistencia de valor R o se puede calcular la resistencia equivalente del dispositivo, la potencia también puede calcularse como:

$$P = R \cdot I^2 = V^2 / R$$

Siempre hay que tomar en cuenta que a mayor resistencia, menor corriente.

3.2.6.2. Energía eléctrica

Se denomina energía eléctrica a la forma de energía que resulta de la existencia de una diferencia de potencial entre dos puntos, lo que permite establecer una corriente eléctrica entre ambos cuando se los pone en contacto por medio de un conductor eléctrico. La energía eléctrica puede transformarse en muchas otras formas de energía, tales como la energía lumínica o luz, la energía mecánica y la energía térmica.

La energía eléctrica se manifiesta como corriente eléctrica, es decir, como el movimiento de cargas eléctricas negativas, o electrones, a través de un cable conductor metálico como consecuencia de la diferencia de potencial que un generador esté aplicando en sus extremos.

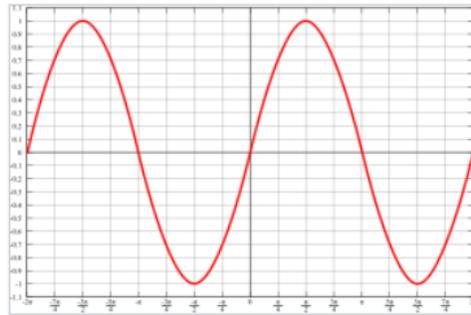
Cada vez que se acciona un interruptor, se cierra un circuito eléctrico y se genera el movimiento de electrones a través del cable conductor. Las cargas que se desplazan forman parte de los átomos de la sustancia del cable, que suele ser metálica, ya que los metales al disponer de mayor cantidad de electrones libres que otras sustancias son los mejores conductores de la electricidad. La mayor parte de la energía eléctrica que se consume en la vida diaria proviene de la red eléctrica a través de las tomas llamadas comúnmente enchufes o tomacorrientes, a través de los que llega la energía suministrada por las compañías eléctricas a los distintos aparatos eléctricos como lavadora, radio, televisor, entre otros.

3.2.7. Corriente alterna

Se denomina corriente alterna (CA) a la corriente eléctrica en la que la magnitud y el sentido varían cíclicamente.

La forma de oscilación de la corriente alterna más comúnmente utilizada es la oscilación sinusoidal con la que se consigue una transmisión más eficiente de la energía, debido a que se puede transmitir a largas distancias a menor costo y pérdidas eléctricas por lo que al hablar de corriente alterna se sobrentiende que se refiere a la corriente alterna sinusoidal.

Figura 37. **Forma de onda sinusoidal**



Fuente: Forma de onda sinusoidal. https://es.wikipedia.org/wiki/Corriente_alterna. Consulta: 10 de marzo de 2018.

Sin embargo, en ciertas aplicaciones se utilizan otras formas de oscilación periódicas, tales como la triangular o la cuadrada.

3.2.8. Protecciones eléctricas

Toda instalación eléctrica tiene que estar dotada de una serie de protecciones que la hagan segura, tanto desde el punto de vista de los conductores y los aparatos a ellos conectados, como de las personas que han de trabajar con ella.

Existen muchos tipos de protecciones, que pueden hacer a una instalación eléctrica completamente segura ante cualquier contingencia, pero debido a la

complejidad de estas, para el presente documento únicamente se hará referencia a las protecciones contra cortocircuito para instalaciones de bajo voltaje: de alumbrado, domesticas, de fuerza, redes de distribución y circuitos auxiliares.

3.2.8.1. Protección contra cortocircuito

Se denomina cortocircuito a la unión de dos conductores o partes de un circuito eléctrico, con una diferencia de potencial o tensión entre sí, sin ninguna impedancia eléctrica entre ellos.

Este efecto según la Ley de Ohm, al ser la impedancia cero, hace que la intensidad tienda a infinito, con lo cual pelagra la integridad de conductores y máquinas debido al calor generado por dicha intensidad, debido al efecto Joule.

En la práctica, la intensidad producida por un cortocircuito, siempre queda amortiguada por la resistencia de los propios conductores que, aunque muy pequeña, nunca es cero.

En todas las normativas existentes en el origen de todo circuito eléctrico deberá colocarse un dispositivo de protección, de acuerdo con la intensidad de cortocircuito que pueda presentarse en la instalación. No obstante se admite una protección general contra cortocircuitos para varios circuitos derivados.

Los dispositivos más empleados para la protección de instalaciones eléctricas de bajo voltaje son:

- Fusibles calibrados (también llamados cortacircuitos)
- Interruptor termomagnético

3.2.8.1.1. Fusibles

Estos dispositivos interrumpen un circuito eléctrico debido a que una sobre corriente quema un filamento conductor ubicado en el interior, por lo que deben ser reemplazados después de cada actuación para restablecer el circuito. Los fusibles se emplean para protección contra cortocircuitos y sobrecargas.

Figura 38. Fusibles



Fuente: Fusibles. <http://faradayos.blogspot.com/2014/02/fusibles-clasificacion-tipos-caracteristicas.html>. Consulta: 10 de marzo de 2018.

3.2.8.1.2. Interruptor termomagnético

Es un dispositivo capaz de interrumpir la corriente eléctrica de un circuito cuando ésta sobrepasa ciertos valores máximos. Su funcionamiento se basa en dos de los efectos producidos por la circulación de corriente en un circuito: el magnético y el térmico. El dispositivo consta, por tanto, de dos partes, un electroimán y una lámina bimetálica, conectadas en serie y por las que circula la corriente que va hacia la carga.

Al circular la corriente por el electroimán crea una fuerza que mediante un dispositivo mecánico, tiende a abrir los contactos, pero sólo podrá abrirlo si la intensidad de la corriente que circula por la carga sobrepasa el límite fijado que suele ser de aproximadamente unas 25 milésimas de segundo, lo cual lo hace

muy seguro por su velocidad de reacción y es donde protege de los cortocircuitos porque se produce un aumento muy rápido y elevado de corriente.

La otra parte está constituida por una lámina bimetálica que al calentarse por encima de un determinado límite, sufre una deformación provocando la apertura de los contactos y es donde protege de corrientes que, aunque son superiores a las permitidas por la instalación, no llegan al nivel de intervención del dispositivo magnético. Esta situación es típica de una sobrecarga, donde el consumo va aumentando conforme se van conectando aparatos.

Los interruptores termomagnéticos además de esta desconexión automática, están provistos de una palanca que permite la desconexión manual de la corriente y el rearme del dispositivo automático cuando se ha producido una desconexión. No obstante, este rearme no es posible si persisten las condiciones de sobrecarga o cortocircuito.

Las características que definen un interruptor termomagnético son el amperaje, el número de polos, el poder de corte y el tipo de curva de disparo.

Al igual que los fusibles, los interruptores termomagnéticos protegen la instalación contra sobrecargas y cortocircuitos.

Figura 39. **Interruptor termomagnético**



Fuente: Interruptor termomagnético, <https://www.lowes.com.mx/home/3310-interruptor-termomagnetico-2x15a.html>. Consulta: 10 de marzo de 2018.

3.2.9. El transformador

Se denomina transformador a un dispositivo eléctrico que permite aumentar o disminuir la tensión en un circuito eléctrico de corriente alterna, manteniendo la potencia. La potencia que ingresa al equipo, en el caso de un transformador ideal (esto es, sin pérdidas), es igual a la que se obtiene a la salida. Las máquinas reales presentan un pequeño porcentaje de pérdidas, dependiendo de su diseño y tamaño, entre otros factores.

El transformador es un dispositivo que convierte la energía eléctrica alterna de un cierto nivel de tensión, en energía alterna de otro nivel de tensión, basándose en el fenómeno de la inducción electromagnética. Está constituido por dos bobinas de material conductor, devanadas sobre un núcleo cerrado de material ferromagnético, pero aisladas entre sí eléctricamente. La única conexión entre las bobinas la constituye el flujo magnético común que se establece en el núcleo. El núcleo, generalmente, es fabricado bien sea de hierro o de láminas apiladas de acero eléctrico, aleación apropiada para optimizar el

flujo magnético. Las bobinas o devanados se denominan primario y secundario según correspondan a la entrada o salida del sistema en cuestión, respectivamente. También existen transformadores con devanado terciario, de menor tensión que el secundario.

La tensión inducida en el devanado secundario depende directamente de la relación entre el número de espiras del devanado primario y secundario y de la tensión del devanado primario. Dicha relación se denomina relación de transformación.

La relación de transformación indica el aumento o decremento que sufre el valor de la tensión de salida con respecto a la tensión de entrada, esto quiere decir, la relación entre la tensión de salida y la de entrada.

La relación de transformación (m) de la tensión entre el bobinado primario y el bobinado secundario depende de los números de vueltas que tenga cada uno. Si el número de vueltas del secundario es el triple del primario, en el secundario habrá el triple de tensión.

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{V_p}{V_s} = \frac{I_s}{I_p} = m$$

Figura 40. **Transformador**



Fuente: Transformador. <https://es.wikipedia.org/wiki/Transformador>. Consulta: 10 de marzo de 2018.

3.2.10. El relé y el contactor

Fue inventado por Joseph Henry en 1835. La teoría básica de un relé nos dice que es un dispositivo electromagnético que funciona como un interruptor controlado por un circuito eléctrico en el que, por medio de una bobina y un electroimán, se acciona un juego de uno o varios contactos ya sea normalmente abiertos o cerrados que permiten operar otros circuitos eléctricos independientes.

Dado que el relé es capaz de controlar un circuito de salida de mayor potencia que el de entrada, puede considerarse en un amplio sentido como un amplificador eléctrico. Como tal se emplearon en telegrafía, haciendo la función de repetidores que generaban una nueva señal con corriente procedente de

pilas locales a partir de la señal débil recibida por la línea. Se les llamaba relevadores.

Existen multitud de tipos distintos de relés, dependiendo del número de contactos, de su intensidad admisible, del tipo de corriente de accionamiento, del tiempo de activación y desactivación, entre otros. La diferencia entre un relé y un contactor se da dependiendo de la potencia que se quiera controlar en un circuito eléctrico, para potencias grandes se utilizan los contactores debido a la robustez de sus contactos.

Figura 41. **Relé y contactor**



Fuente: Relé y contador. <https://www.svetsuciastok.sk/sk/rele-1/elektromagneticke-rele/cievka-24v/rele-g2rk-1-24vdc-5a-250vac-2cievky.html>. Consulta: 10 de marzo de 2018.

3.2.11. Temporizadores

Un temporizador es un aparato con el que regula la conexión o desconexión de un circuito eléctrico después de que se ha programado un tiempo. El elemento fundamental del temporizador es un contador binario, encargado de medir los pulsos suministrados por algún circuito oscilador, con

una base de tiempo estable y conocida. El tiempo es determinado por una actividad o proceso que se necesite controlar.

Se diferencia del relé en que los contactos del temporizador no cambian de posición instantáneamente. Podemos clasificar los temporizadores en:

De conexión: el temporizador recibe tensión y mide un tiempo hasta que libera los contactos.

De desconexión: cuando el temporizador deja de recibir tensión al cabo de un tiempo, libera los contactos.

Hay diversos tipos de temporizadores desde los que son usados en el hogar para cocinar, hasta los que son usados en la automatización de procesos industriales y cada uno sirve para algún proceso en específico.

Figura 42. **Temporizador**



Fuente:Temporizador. <https://bricos.com/2012/11/temporizadores-clases-y-funcionamiento/>.

Consulta: 10 de marzo de 20108.

Existe variedad de clases de temporizadores y cada una está diseñado para una aplicación específica, como ejemplo se mencionan los siguientes: temporizadores térmicos, temporizadores neumáticos, temporizadores electrónicos y temporizadores magnéticos.

3.2.12. Electroválvulas

Una electroválvula es una válvula electromecánica, diseñada para controlar el paso de un fluido por un conducto o tubería. Generalmente no tiene más que dos posiciones: abierto y cerrado.

Están diseñadas para utilizarse con agua, gas, aire, gas combustible, vapor, entre otros. Estas válvulas pueden ser de dos hasta cinco vías y dependiendo del fluido en el que se vayan a utilizar es el material de fabricación de la válvula. Pueden estar fabricadas en latón, acero inoxidable o PVC.

Una electroválvula tiene dos partes fundamentales: el solenoide y la válvula. El solenoide convierte energía eléctrica, mediante magnetismo, en energía mecánica para actuar la válvula.

Figura 43. **Electroválvula**



Fuente: Electroválvula.

https://www.google.com.gt/search?q=electrovalvula&dcr=0&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ved=0ahUKEwiQ7Pn7_YfXAhXD7SYKHfsiBlcQsAQISA&biw=1200&bih=671. Consulta: 10 de marzo de 2018.

En válvulas de 2 vías, normalmente se utilizan las que funcionan con tres modalidades diferentes, dependiendo del uso que están destinadas a operar y pueden ser de acción directa, acción indirecta y acción mixta o combinada, además pueden ser normalmente cerrada (N.C.) o normalmente abierta (N.A.), esto dependiendo de la función que va a realizar ya sea que esté cerrada y cuando reciba la señal a la solenoide abra durante unos segundos, o que esté abierta y cuando reciba la señal la solenoide corte el flujo.

4. ANÁLISIS FINANCIERO

4.1. Antecedentes

La unidad generadora de energía eléctrica denominada comercialmente como gas núm. 3, inició operaciones el 10 de septiembre de 1976 con una capacidad nominal de 25 MW. Esta unidad fue diseñada para efectuarles overhaul cada 8 000 horas de operación.

A esta unidad se le efectuó un mantenimiento correctivo al rotor del generador eléctrico en 1998, posteriormente en el 2007 fue enviado a fábrica el generador de gases y turbina libre para overhaul.

En el mes de noviembre del 2010 el generador eléctrico de la unidad de gas núm. 3 presentó fallas en el sistema general de aislamiento, quedando indisponible para su operación.

Para llevar a cabo el presente Ejercicio Profesional Supervisado se efectuaron protocolos completos de pruebas eléctricas al Rotor y Estator del mismo, concluyendo lo siguiente: El sistema general de aislamiento de este generador no se encuentra en condición aceptable para mantenerlo en servicio, debido a los resultados obtenidos de factor de potencia, capacitancia y resistencia de aislamiento de devanados del estator principal del generador.

Se cuenta con otra unidad generadora de energía eléctrica denominada comercialmente como gas núm. 4, esta se encuentra indisponible y declarada fuera de servicio desde el 2000 por problemas en todos sus componentes

mecánicos como del sistema de control en general, cuenta con un generador eléctrico al que también se le realizaron pruebas eléctricas de las cuales se obtuvieron valores aceptables, es físicamente igual y de las mismas características que el de la unidad de gas núm. 3, por lo que para el presente análisis costo-beneficio se contemplará su reutilización.

4.2. Análisis costo-beneficio:

La Central Térmica Escuintla actualmente se encuentran en condición de disponibilidad ante el administrador del mercado mayorista para cubrir cualquier contingencia que se pueda presentar en el sistema nacional interconectado, así también las unidades generadoras de energía eléctrica disponibles son utilizadas comercialmente por el INDE para la declaración del bloque de potencia para cubrir desvíos de potencia al momento que alguna de las unidades generadoras de las centrales del INDE quede indisponible por fallas o mantenimientos programados, teniendo el INDE una economía ya que no se tendrían desvíos de potencia negativos que en el mercado SPOT tienen un costo de US\$8,90/kWh.

4.2.1. Sistemas y equipos a intervenir para la rehabilitación de la unidad generadora gas núm. 3

Tabla XXXVIII. **Sistemas y equipos**

Núm.	SISTEMAS Y EQUIPOS	PERSONAL INTERNO	CONTRATACIÓN EXTERNA	COSTO	TIEMPO DE EJECUCIÓN
1	Lubricación	X		Q. 7 000,00	7 días hábiles
2	Combustible	X		Q. 5 000,00	3 días hábiles
3	Aire de asistencia	X		Q. 2 000,00	2 días hábiles
4	Casa de aire	X		Q. 2 000,00	2 días hábiles
5	Sistema de control		X	Q.250,000,00 aprox. Si presentarán problemas al momento de arrancar	Gestión Invitación a Cotizar contratación de técnico especialista. 5 meses
6	Regulación de voltaje		X		
7	Sistema de vibraciones y alineación		X		
8	Traslado y montaje de generador eléctrico		X	Q. 90, 000,00	10 días hábiles
9	Protecciones de turbina	X		Q. 2 000,00	10 días hábiles
10	Mantenimiento preventivo generador eléctrico	X		Q. 20 000,00	25 días hábiles.

Continuación de la tabla XXXVIII.

11	Mantenimiento predictivo transformador de potencia		X	Q. 80 000,00	2 días hábiles
12	Mantenimiento predictivo transformadores de medición y protección		X		
13	Mantenimiento predictivo interruptor de potencia		X		
14	Mantenimiento predictivo Seccionador de barra		X		
15	Mantenimiento predictivo generador eléctrico		X	Q. 10,000,00	1 día hábil

Fuente: elaboración propia.

El costo para la rehabilitación de la unidad generadora de energía eléctrica gas núm. 3 ascendería a la cantidad de Q. 468 000,00 para la adquisición de repuestos, insumos y contratación de servicios.

El costo que representa para el Instituto Nacional de Electrificación (INDE) si no cumple con 23 MW que la unidad de gas núm. 3 podría aportar en los contratos que tiene vigentes de venta de energía eléctrica y teniendo que comprarlos en el mercado SPOT sería:

Precio de venta del kWh mes en el mercado SPOT= US\$ 8,90

Tasa de cambio de 1 dólar = Q.7,29

Compra de potencia en el mercado SPOT que la unidad de gas núm. 3 podría aportar = 23MW

US\$ 8,90 kWh mes X 1 000 = US\$ 8 900.00 MWh mes

US\$ 8 900,00 MWh mes X 23 MW = US\$ 204 700 mes / 30 días = US\$ 6 823,33 diarios.

El desembolso diario que tendría que hacer el INDE por compra de potencia en el mercado SPOT sería:

US\$ 6 823,33 X 7,29 = Q. 49 742,07 diarios.

Si el INDE toma la decisión de invertir en la rehabilitación de la unidad de gas núm. 3 el tiempo de recuperación de la inversión sería:

Recuperación de la inversión = Q. 468 000,00 / Q. 49 742,07 diarios = 9,40 días

Es evidente que si se toma la decisión de rehabilitar la unidad de gas núm. 3 reutilizando el generador eléctrico de la unidad de gas núm. 4, se recuperaría la inversión en aproximadamente diez días, estando la máquina disponible y cubriendo desvíos de potencia negativos, por lo que es factible habilitar dicha unidad generadora.

CONCLUSIONES

1. Los resultados obtenidos de la prueba de factor de potencia se encuentran totalmente fuera de los valores recomendados, debido a la condición del sistema de aislamiento según IEEE 286-2000, por lo que no fue posible concluir este protocolo de pruebas.
2. Los resultados obtenidos de la prueba de capacitancia de devanados de entre fases y fase a tierra quedan de referencia para futuras pruebas.
3. Los resultados obtenidos de la prueba de resistencia de aislamiento de la fase C-tierra y entre fases ABC-tierra están fuera de los valores recomendados, debido a la condición del sistema de aislamiento (corto circuito) según IEEE 286-2000.
4. Los resultados obtenidos de la prueba de índice de polarización de las fases B-tierra, C-tierra, ABC-tierra y entre fases B-C se encuentran fuera de valores recomendados debido a la condición del sistema de aislamiento según IEEE 286-2000.
5. Los resultados obtenidos de la prueba de resistencia óhmica se consideran en condición aceptable.
6. El sistema general de aislamiento del generador eléctrico de la unidad de gas núm 3, no se encuentra en condición aceptable para operación, debido a los resultados obtenidos en los protocolos de pruebas realizados.

7. Los resultados obtenidos en general de la prueba de factor de potencia entre fases y fases a tierra no se presentan variaciones significativas, además registran valores aceptables en el rango recomendado según IEEE 286-2000, se considera condición satisfactoria.
8. Los resultados obtenidos de la prueba de capacitancia de devanados de entre fases y fase a tierra quedan de referencia para futuras pruebas.
9. Los resultados obtenidos de resistencia de aislamiento de devanados con respecto de fase a tierra y entre fases registran resultados aceptables del valor mínimo recomendado en IEEE 43-2000, se considera condición satisfactoria.
10. Los resultados obtenidos de índice de polarización (P.I.) de devanados, registran valor mayor al mínimo recomendado en IEEE 43-2000, se considera condición satisfactoria.
11. Los resultados obtenidos de la prueba de resistencia óhmica de devanados quedan de referencia para futuras pruebas.
12. Los resultados obtenidos de la prueba de descargas parciales muestran descargas superficiales en el arrollamiento final de la fase U y las descargas internas (micro huecos) en todas las fases, sin embargo, son niveles relativamente bajos comparados con otros generadores eléctricos de similares características y año de fabricación.
13. El sistema general de aislamiento del generador eléctrico de la unidad de gas núm. 4, se encuentra en condición aceptable para operación, por lo que es factible reutilizarlo para la puesta en operación de la unidad generadora de energía eléctrica gas núm. 3.

RECOMENDACIONES

1. No operar este generador con estos valores del sistema de aislamiento de devanados del estator.
2. Realizar inspección interna del conexionado y el sistema general de aislamiento de este generador.
3. Conectar resistencias o calefactores durante el generador eléctrico se encuentre fuera de servicio.
4. Verificar que el sistema de calefacción o resistencias del generador se encuentren en estado óptimo y conectado siempre que este fuera de servicio, para evitar cualquier ingreso de humedad y condensación de líquidos.
5. Verificar el estado de los filtros de aire de ventilación del generador eléctrico y cuantificar la periodicidad de limpieza o reemplazo, evitando así el ingreso de desecho orgánico, partículas de carbón, humedad, entre otras, hacia los devanados, siendo una de las causas raíz del aumento de corrientes de fuga por contaminación superficial, estrés eléctrico, descargas parciales y arborescencia eléctrica.
6. Programar protocolo de pruebas según el programa de mantenimiento anual normalizado por EGEE-INDE, para verificar tendencia de resultados y programar mantenimientos.

BIBLIOGRAFÍA

1. Comisión Federal de Electricidad. *Procedimientos de pruebas de campo de equipo de potencia*. México: 2003. 1-4, 2-80 p.
2. Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Norma ieee std 43-2000, *recommended practice for testing insulation resistance of electric machinery*. 9-23 p.
3. ——— . Norma ieee std 286-2000, *recommended practice for measurement of power factor tip-up of electric machinery stator coil insulation*. 8-35 p.
4. ——— . Norma ieee std 1434-2000, *trial-use guide to the measurement of partial discharges in rotating machinery*. 9-50 p.
5. MELÉNDEZ NARANJO, José Gustavo. *Desarrollo de un plan de pruebas eléctricas para el mantenimiento predictivo de generadores sincrónicos*. Trabajo de graduación de Ing. Eléctrica. Facultad de Ingeniería, Universidad de Costa Rica, 2009. 4-38 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. **Corrección por temperatura de la resistencia del aislamiento**

La temperatura juega un papel importante a la hora de realizar mediciones de la resistencia del aislamiento, dado que esta varía de manera inversa a la temperatura del devanado, por lo tanto, una práctica recomendable es la de realizar las mediciones del aislamiento a una temperatura definida. Normalmente las mediciones se realizan después de que la máquina haya estado un tiempo prudente fuera de servicio, lapso necesario para que alcance una temperatura cercana a la del ambiente, en el país no se presentan cambios drásticos de temperatura por lo que las mediciones normalmente van se van a comparar unas con otras, para casos especiales se tiene con una herramienta de corrección de temperatura usando la siguiente ecuación:

$$R_c = K_T R_T$$

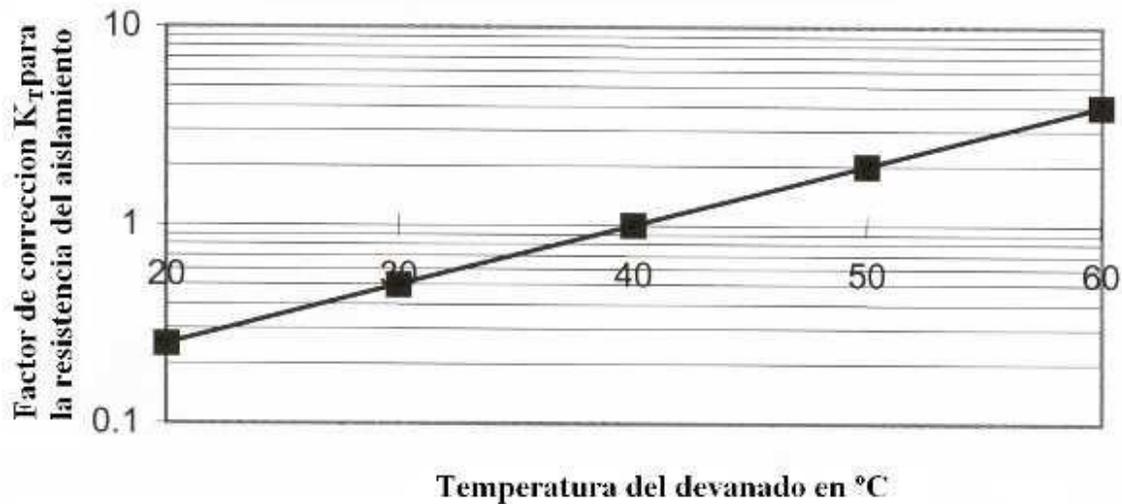
Donde:

R_c = es la resistencia del aislamiento (en megohms) corregida a 40 °C.

K_T = el coeficiente de corrección a la temperatura T °C.

R_T = es la resistencia del aislamiento medida (en megohms) a la temperatura T °C.

Una aproximación del factor de corrección K_T se puede obtener por medio de la siguiente figura la que indica que la resistencia se reduce a la mitad cada 10 °C de incremento en la temperatura del devanado.



Fuente: IEEE Std 43-2000, IEEE *Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery*. p. 11.

Se debe hacer la salvedad que este coeficiente puede no ser muy exacto para aislamientos que no reduzcan a la mitad su valor con un aumento de 10 °C.

Para estos casos se recomienda graficar los datos de la resistencia del aislamiento en una escala logarítmica versus la temperatura del devanado en ese momento bajo una escala lineal, lo que resulta en un gráfico semi-logarítmico, con el cual se puede extrapolar para obtener el valor corregido a 40 °C.

Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. **Equipo utilizado para las mediciones eléctricas**

DESCRIPCION	MARCA	MODELO	IMÁGEN
Analizador multifuncional		CPC 100	
Reactor de compensación		CP CR500	
Modulo de factor de potencia de aislamiento		CP TD1	
Analizador de Aislamiento		M4100 4G	
Inductor Resonador		Type C	
<u>Megohmmetro 5kV</u>		5060	

Fuente: Plus Energy Engineering, S.A. *Propietario.*

Anexo 2. Equipo conectado en sitio realizando protocolos de pruebas eléctricas a los generadores de las unidades de gas núm. 3 y 4



Fuente: Central Térmica Escuintla, municipio Escuintla, departamento Escuintla.

Anexo 3. **Certificado de calibración de equipo CPC100 marca OMICRON**

OMICRON

Certificate of Calibration and Conformance


OMICRON
 electronics GmbH
 Oberes Reud 1
 A-6833 Hainz, Austria
 Tel: +43 59495
 Fax: +43 59495 9999
 info@omicronenergy.com
 www.omicronenergy.com

Conformance
 OMICRON electronics GmbH certifies that the product detailed below (Device Type, Serial No) has been designed, manufactured, tested, adjusted and calibrated to the highest quality standards of workmanship and materials in compliance with a quality system registered to ISO 9001:2008 (SGS Austria Control-Co GmbH, certificate number CH10/1019).

The product conforms to all specifications published in the manual and has **passed all tests successfully.**

More detailed test data can be found on the enclosed CD/DVD in the directory Report. Warranty (duration two years for new devices, six months for repairs) and calibration are valid as per Date of Issue.

Traceability Information
 Traceability is to national standards administered by EURAMET and ILAC members (e.g. ÖKD, DKD, NIST, NATA, NPL, PTB, BNM etc.) or other recognized standard laboratories. Some measurements are traceable to natural physical constants, consensus standards or ratio type measurements.

Device Type **CPC100**
SNo **QH797X**
Option **A, V1**
Calibration Date **2016-02-10**

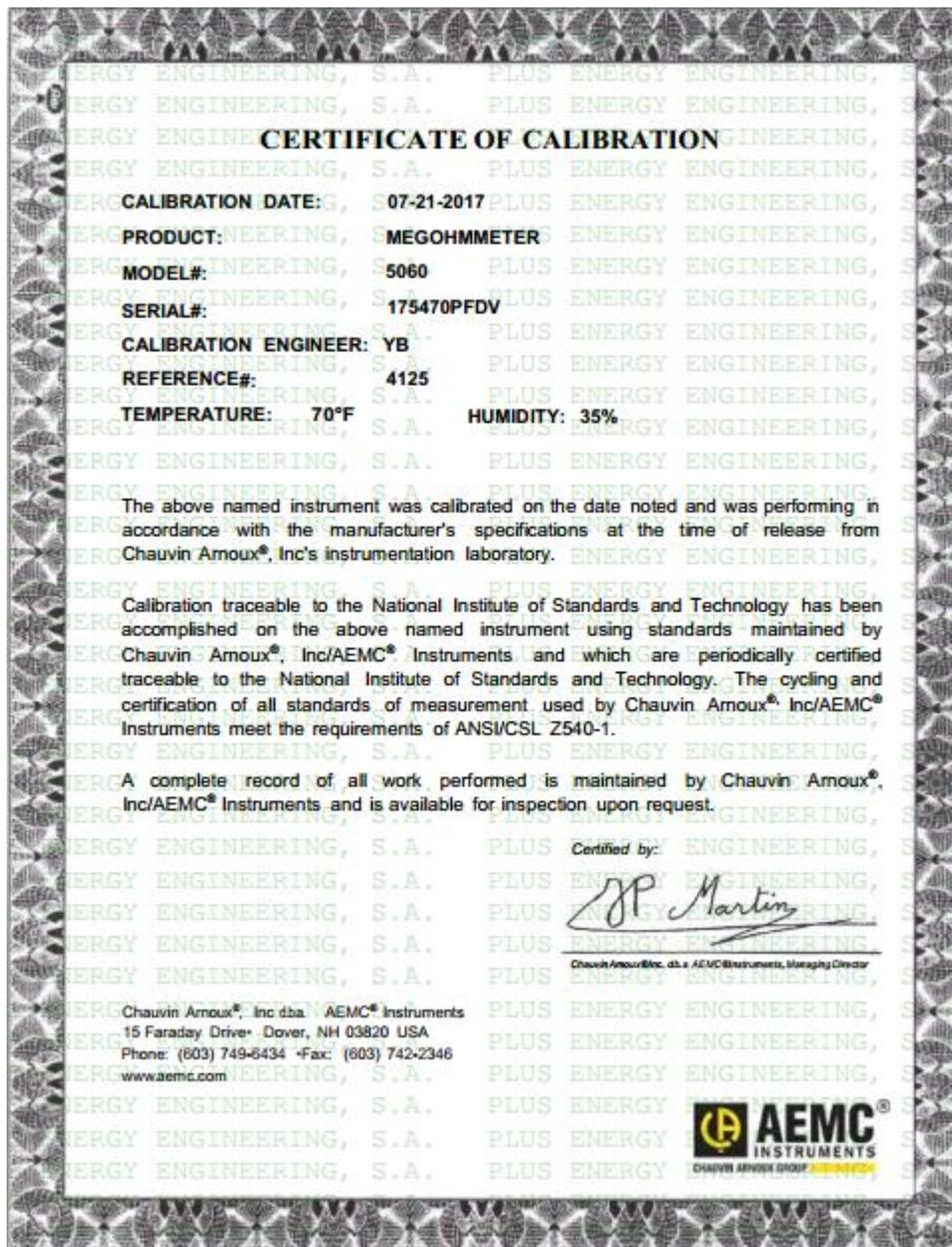
Test Equipment		Company	Trace No	Serial No	Due date
Model	Type				
864U	Current Transducer	Danfysik	06-141	10012086	2016-06-12
3458A	DMM	Agilent	10-113	MY45045114	2016-03-16
1689	Shunt	Tinsley	11-084	1259905	2016-06-16
1682	Shunt	Tinsley	06-105	265724	2016-10-02
0221	Signal Source	Keithley Instr. Germany	09-201	1258531	2017-07-09

Date of Issue **2016-02-15**

Manager Operations *Günther Kolb*
Testengineer *Thomas Reif*
Günther Kolb **Thomas Reif**

Fuente: Plus Energy Engineering, S.A. *Propietario.*

Anexo 6. **Certificado de calibración de equipo Megohmmeter 5060 marca AEMC**



Fuente: Plus Energy Engineering, S.A. *Propietario.*