

**METODOLOGÍA PARA ESPECIFICAR UN NUEVO DEVANADO DEL ESTATOR DE UN
GRAN GENERADOR, CASO SALVAJINA.**

ERICSON ANDRÉS PLAZAS MARTÍNEZ.

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE PREGRADO ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA
INGENIERÍA ELÉCTRICA
SANTIAGO DE CALI
2015**

**METODOLOGÍA PARA ESPECIFICAR UN NUEVO DEVANADO DEL ESTATOR DE UN
GRAN GENERADOR, CASO SALVAJINA.**

ERICSON ANDRÉS PLAZAS MARTÍNEZ.

**Trabajo de tesis presentado como requisito
para optar al título de Ingeniero Electricista.**

Directores.

**Gladys Caicedo Delgado
Ingeniera Electricista, Ph. D.**

**Francisco Javier Murcia Polo
Ingeniero Electricista, M.Sc.**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE PREGRADO ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA
INGENIERÍA ELÉCTRICA
SANTIAGO DE CALI
2015**

Nota de aceptación

Firma del Jurado 1

Firma del Jurado 2.

DEDICATORIA

Le dedico la culminación de este trabajo a mi esposa Alejandra Florez por todo el apoyo y toda la fuerza que me brindó durante toda mi carrera.

A mi madre, Luz Dary Martínez; hermano; Jorge A. Plazas y mi padrastro Edwin Jurado por su continuo apoyo, cariño y esperanza.

A todos mis amigos y compañeros que me ayudaron a forjar como persona

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la vida, mostrarme el camino del amor y felicidad.

A mi esposa Alejandra Florez por blindarme todo su amor, comprensión y apoyo.

A mi Hermano, madre y padrastro por su continuo apoyo.

A mis amigos y compañeros que me apoyaron y acompañaron durante esa etapa.

Al Ingeniero Francisco Javier Murcia Polo por su apoyo para el desarrollo de este trabajo.

Al Ingeniero Javier Valencia Ocampo por su continuo acompañamiento, liderazgo y apoyo en la realización de este trabajo.

A la profesora Gladys Caicedo Delgado por su continuo acompañamiento en la realización de este proyecto, sus enseñanzas y consejos que ocasionaron un cambio positivo y enorme en mí.

A todos los profesores y compañeros que me acompañaron en este proceso.

CONTENIDO BREVE

1. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL ESTATOR DE LA UNIDAD 2 DE SALVAJINA.....	20
2. PRUEBAS Y DIAGNOSTICO DEL NÚCLEO ESTATÓRICO.....	53
3. PRUEBAS Y DIAGNÓSTICO DEL DEVANADO ESTATÓRICO.	85
4. EVALUACIÓN PARA CAMBIO DE CONFIGURACIÓN DEL DEVANADO.....	151
5. DETERMINACIÓN DE LOS REQUISITOS TÉCNICOS DEL NUEVO DEVANADO SEGÚN NORMAS INTERNACIONALES Y ÚLTIMOS AVANCES TECNOLÓGICOS.	158
6. ACUERDOS CON EL FABRICANTE Y LÍMITES TÉCNICOS GARANTIZADOS.	169
7. RESULTADOS OBTENIDOS.	172
8. CONCLUIONES.....	173
9. BIBLIOGRAFÍA	174

CONTENIDO

1. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL ESTATOR DE LA UNIDAD 2 DE SALVAJINA.....	20
1.1 DATOS PRINCIPALES DEL GENERADOR.....	20
1.2 NÚCLEO DEL ESTATOR.	21
1.2.1 Descripción Física del Núcleo.....	21
1.3 DEVANADO DEL ESTATOR (DEVANADO INDUCIDO).	25
1.3.1 Detalles constructivos.....	25
1.3.1.1 Transposición Roebel.....	33
1.3.2 Nivel de voltaje de las barras estatóricas del generador.	35
1.3.3 Sistema de aislamiento del devanado.	39
1.3.3.1 Aislamiento entre hilos.....	41
1.3.3.2 Aislamiento a tierra (aislamiento principal).....	41
1.3.3.2.1 Diseño eléctrico del aislamiento a tierra.	41
1.3.3.2.2 Diseño térmico del aislamiento a tierra.....	42
1.3.3.2.3 Diseño mecánico del aislamiento a tierra.....	42
1.3.3.3 Cuñas del estator.....	43
1.4 ANTECEDENTES.	47
1.4.1 Datos Operativos.....	47
1.4.1.1 Horas de operación.	47
1.4.1.2 Número de arranques.	48
1.4.1.3 Disponibilidad histórica.	48
1.4.1.4 Generación acumulada.....	49
1.4.1.5 Cambio de cinta semiconductora.	49
1.4.1.6 Histórico de fallas a tierra del estator.....	49
2. PRUEBAS Y DIAGNOSTICO DEL NÚCLEO ESTATÓRICO.	53
2.1 INSPECCIÓN VISUAL.....	53
2.1.1 Objetivos de la inspección visual.	53
2.1.2 Procedimiento de la inspección visual.	53
2.1.2.1 Laminaciones del núcleo.	54
2.1.2.2 Orificios del estator.	55
2.1.2.3 Ductos de ventilación.	55
2.1.2.4 Depósitos de óxido de hierro.....	56
2.1.2.5 Bujes de alta tensión del devanado estatórico.	56
2.1.2.6 Ductos de ventilación en los bujes.	57
2.1.2.7 Aisladores Stand-off.	57
2.1.2.8 Pernos de sujeción del núcleo.	58
2.1.2.9 Resistencias de calefacción.....	58
2.1.2.10 Pernos de apoyo de los ventiladores y deflectores de aire.	58
2.1.2.11 Intercambiadores de calor.....	58
2.1.2.12 Separadores de bobinas.	59
2.1.2.13 Amarras.	59
2.1.3 Resumen y principales puntos de interés de la inspección visual.....	59

2.2	RESULTADOS DE LA INSPECCIÓN VISUAL AL NÚCLEO ESTATÓRICO.....	61
2.2.1	<i>Análisis de los resultados y acciones correctivas.</i>	65
2.3	PRUEBAS ELECTROMAGNÉTICAS.....	66
2.3.1	<i>Objetivos de las pruebas electromagnéticas.</i>	67
2.3.2	<i>Precauciones de las pruebas electromagnéticas.</i>	68
2.3.3	<i>Prueba HFRT (High Flux Ring Test).</i>	69
2.3.3.1	Bobina de magnetización.	69
2.3.3.1.1	Diseño de la bobina de magnetización.	69
2.3.3.2	Espira sonda.	70
2.3.3.2.1	Calculo para la espira sonda.	71
2.3.3.3	Preparación de la prueba HFRT.	71
2.3.3.4	Procedimiento de la prueba HFRT.	71
2.3.3.5	Criterios de decisión para la prueba HFRT.	72
2.3.4	<i>Prueba Core loop.</i>	72
2.3.4.1	Bobina de magnetización.	72
2.3.4.1.1	Calculo de la bobina de magnetización.	73
2.3.4.2	Espira sonda.	75
2.3.4.2.1	Calculo de la espira sonda.	75
2.3.4.3	Preparación de la prueba Core Loop.	76
2.3.4.4	Procedimiento de la prueba Core Loop.	76
2.3.4.5	Criterios de decisión para la prueba Core Loop.	76
2.4	RESULTADO Y ANÁLISIS DE LA PRUEBA CORE LOOP REALIZADA EN SALVAJINA.	76
2.4.1	<i>Prueba EL-CID (Electromagnetic Core Imperfection Detection).</i>	77
2.4.1.1	Cálculo de la bobina de magnetización.	77
2.4.1.2	Procedimiento de la prueba EL-CID.	77
2.4.1.3	Criterio de decisión para la prueba EL-CID.	78
2.5	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA PRUEBA EL-CID REALIZADA EN SALVAJINA.	78
2.6	PROCESO DE REPARACIÓN DEL NÚCLEO.....	80
2.6.1	<i>Limpieza 1.</i>	80
2.6.2	<i>Aplicación de resina.</i>	80
2.6.3	<i>Rectificar núcleo.</i>	80
2.6.4	<i>Limpieza 2.</i>	82
2.6.5	<i>Separación de las láminas.</i>	82
2.6.6	<i>Inspección.</i>	82
2.6.7	<i>Aplicación de resina epóxica.</i>	83
2.6.8	<i>Aplicar con barniz.</i>	83
3.	PRUEBAS Y DIAGNÓSTICO DEL DEVANADO ESTATÓRICO.....	85
3.1	PRUEBA INSPECCIÓN VISUAL.....	86
3.1.1	<i>Descargas superficiales.</i>	86
3.1.2	<i>Objetivos de la inspección visual.</i>	86
3.1.3	<i>Procedimiento de la inspección visual.</i>	86
3.1.3.1	Degradación del aislamiento debido al envejecimiento térmico.....	88
3.1.3.2	Contaminación.	88
3.1.3.3	Agrietamiento.....	88

3.1.3.4	Descargas corona.	88
3.1.3.5	Principales puntos de inspección.....	89
3.2	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA INSPECCIÓN VISUAL REALIZADA AL DEVANADO DEL GENERADOR.	91
3.3	PRUEBA DE INSPECCIÓN DE AFLOJAMIENTO DE CUÑAS.	94
3.3.1	<i>Objetivos de la Prueba de inspección de aflojamiento de cuñas.....</i>	95
3.3.2	<i>Precauciones de la prueba.....</i>	95
3.3.3	<i>Preparación de la prueba.</i>	95
3.3.4	<i>Procedimiento de la inspección de aflojamiento de cuñas usando un equipo especial.</i>	96
3.3.5	<i>Procedimiento de la inspección manual de aflojamiento de cuñas.</i>	97
3.3.5.1	Cuñas muy flojas, inexistentes o fisuradas.	97
3.3.5.2	Cuñas poco flojas.....	98
3.3.5.3	Presencia de pequeños vacíos. De acuerdo al criterio personal se marcan con “P”. 98	
3.3.5.4	Ajuste apretado.	98
3.3.5.5	Muy apretada.	98
3.3.5.6	Criterios de decisión de la inspección de aflojamiento de cuñas.....	98
3.4	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA INSPECCIÓN DE AFLOJAMIENTO DE CUÑAS, REALIZADO AL GENERADOR.....	99
3.5	PRUEBA DE LA RESISTENCIA ÓHMICA DEL DEVANADO:	100
3.5.1	<i>Objetivos de la prueba de resistencia óhmica.</i>	100
3.5.2	<i>Precauciones de la prueba de resistencia óhmica.</i>	100
3.5.3	<i>Preparación de la prueba de resistencia óhmica.</i>	100
3.5.3.1	Método directo.	101
3.5.3.2	Método de caída de tensión.....	101
3.5.4	<i>Procedimiento de la prueba de resistencia óhmica.</i>	102
3.5.5	<i>Criterios de decisión de la prueba de resistencia óhmica.....</i>	102
3.5.6	<i>Resultados y análisis de la prueba de resistencia óhmica realizada en el generador.</i>	103
3.6	PRUEBA DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO DEL DEVANADO ESTATÓRICO.....	105
3.6.1	<i>Componentes de corriente.....</i>	105
3.6.1.1	Corriente capacitiva.....	106
3.6.1.2	Corriente de absorción.	106
3.6.1.3	Corriente de conducción.	107
3.6.2	<i>Factores que afectan la medida de la resistencia de aislamiento.....</i>	107
3.6.2.1	Efectos de la condición de la superficie en la resistencia de aislamiento.	107
3.6.2.2	Efectos de la humedad en la resistencia de aislamiento.	107
3.6.2.3	Efectos de la temperatura en la resistencia de aislamiento.	108
3.6.2.4	Efectos de la magnitud del potencial en la resistencia de aislamiento.....	109
3.6.2.5	Efectos de la duración de la prueba en la resistencia de aislamiento.....	110
3.6.2.6	Efecto de la presencia de carga en la resistencia de aislamiento.	111
3.6.3	<i>Objetivos de la prueba de resistencia de aislamiento.....</i>	111
3.6.4	<i>Precauciones para la prueba de resistencia de aislamiento.</i>	111
3.6.5	<i>Preparación de la prueba de resistencia de aislamiento.</i>	112
3.6.6	<i>Procedimiento de la prueba de resistencia de aislamiento.....</i>	112
3.6.6.1	Nivel de tensión para la prueba.	112
3.6.6.2	Medida de la resistencia de aislamiento a todo el devanado.....	113

3.6.6.3	Medida de la resistencia de aislamiento por fase.....	114
3.6.6.4	Índice de polarización I.P.	115
3.6.6.5	Índice de absorción I.A.	116
3.6.7	<i>Criterios de decisión para la prueba de resistencia de aislamiento.</i>	116
3.6.7.1	Criterio de una buena resistencia de aislamiento.....	116
3.6.7.2	Criterio del índice de polarización.	117
3.6.7.3	Criterio de índice de absorción I.A.....	118
3.6.8	<i>Resultados y análisis de la prueba realizada en el generador.</i>	119
3.7	PRUEBA DE FACTOR DE POTENCIA Y FACTOR DE POTENCIA TIP-UP.	120
3.7.1	<i>Factor de potencia Tip-Up.</i>	122
3.7.2	<i>Factores que afectan los resultados de la prueba del factor de potencia.</i>	123
3.7.2.1	Efecto de la temperatura en la prueba del factor de potencia.	123
3.7.2.2	Efecto de pruebas anteriores sobre la prueba de factor de potencia.....	123
3.7.2.3	Efecto de la longitud de la bobina y el electrodo de prueba sobre la prueba de factor de potencia.	123
3.7.2.4	Efectos de la cinta gradiente en el resultado de la prueba Tip-Up.	124
3.7.3	<i>Objetivos de la prueba Factor de potencia y Tip-Up.</i>	124
3.7.4	<i>Precauciones de la prueba Factor de potencia y Tip-Up.</i>	125
3.7.5	<i>Preparación de la prueba de factor de potencia y Tip-Up.</i>	125
3.7.6	<i>Procedimiento para la prueba de factor de potencia y Tip-Up.</i>	126
3.7.6.1	Secuencia para la medición del factor de potencia.	126
3.7.6.1.1	Modo GST (GND).	126
3.7.6.1.2	Modo UST.	126
3.7.7	<i>Criterios de decisión para la prueba de factor de potencia y Tip-Up.</i>	127
3.7.8	<i>Resultados y análisis de la prueba realizada al generador.</i>	127
3.8	PRUEBA DE ALTA TENSIÓN DC O HI-POT.	129
3.8.1	<i>Factores que influyen en la prueba de alta tensión D.C.</i>	129
3.8.1.1	Efecto de la humedad en la prueba Hi-pot.	130
3.8.1.2	Efecto de la contaminación superficial en la prueba Hi-pot.	130
3.8.1.3	Efecto de Resinas sin curar y otros revestimientos en la prueba Hi-pot.....	130
3.8.2	<i>Objetivos de la prueba Hi-pot.</i>	130
3.8.3	<i>Precauciones de la prueba Hi-pot.</i>	130
3.8.4	<i>Procedimiento de prueba Hi-pot como prueba de calidad.</i>	131
3.8.4.1	Criterios de decisión de la prueba Hi-pot como prueba de calidad.	131
3.8.5	<i>Procedimiento de prueba Hi-pot: Prueba de sobre voltaje controlado.</i>	131
3.8.5.1	Preparación de la prueba de sobre voltaje controlado.....	132
3.8.5.2	Procedimiento de prueba Hi-pot: Prueba con tensión escalonada de tiempo uniforme.	132
3.8.5.2.1	Criterios de decisión de la prueba con tensión escalonada de tiempo uniforme.	133
3.8.6	<i>Procedimiento de prueba Hi-pot: Prueba de voltaje en rampa.</i>	134
3.8.6.1.1	Criterios de decisión para la prueba de voltaje en rampa.	135
3.9	PRUEBA DE IMPULSO.	138
3.9.1	<i>Objetivos de la prueba de impulso.</i>	139
3.9.2	<i>Precauciones de la prueba de impulso.</i>	139
3.9.3	<i>Preparación de la prueba de impulso.</i>	140

3.9.4	<i>Procedimiento de la prueba de impulso.</i>	140
3.9.5	<i>Criterios de decisión para la prueba de impulso.</i>	141
3.10	PRUEBA DE DESCARGAS PARCIALES (DP).	143
3.10.1	<i>Detección de pulsos eléctricos.</i>	144
3.10.2	<i>Detección de radio frecuencia (RF).</i>	144
3.10.3	<i>Factor de potencia Tip-Up.</i>	144
3.10.4	<i>Detección de ozono.</i>	144
3.10.5	<i>Detección acústica y ultrasónica.</i>	145
3.10.6	<i>Detección por medio de sondas electromagnéticas.</i>	145
3.10.7	<i>Prueba de Descargas de ranura (DR).</i>	145
3.10.8	<i>Prueba de detección de descargas parciales internas y descargas corona.</i>	146
3.11	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA PRUEBA REALIZADA EN EL GENERADOR.	146
3.11.1	<i>Registro histórico de ozono.</i>	146
3.11.2	<i>Resultados prueba de DP usando una sonda electromagnética.</i>	147
4.	EVALUACIÓN PARA CAMBIO DE CONFIGURACIÓN DEL DEVANADO.	151
4.1.1	<i>Devanado propuesto por TOSHIBA.</i>	151
4.1.2	<i>Devanado propuesto por ANDRITZ.</i>	152
4.1.3	<i>Devanado propuesto por OSLINGER.</i>	154
4.1.4	<i>Conclusiones sobre los diseños propuestos.</i>	156
5.	DETERMINACIÓN DE LOS REQUISITOS TÉCNICOS DEL NUEVO DEVANADO SEGÚN NORMAS INTERNACIONALES Y ÚLTIMOS AVANCES TECNOLÓGICOS.	158
5.1	NORMAS, PROCEDIMIENTOS Y/O PRÁCTICAS RECOMENDADAS QUE DEBE SEGUIR EL FABRICANTE.	158
5.2	CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL NUEVO DEVANADO.	160
5.2.1	<i>Incremento de temperatura a carga nominal y a 15% de sobrecarga.</i>	160
5.2.2	<i>Generación de ozono.</i>	160
5.2.3	<i>Variación de tensión y frecuencias nominales.</i>	161
5.2.4	<i>Desbalance de corriente de fase (I₂).</i>	161
5.2.5	<i>Cortocircuito en los terminales.</i>	161
5.3	EXIGENCIAS TÉCNICAS DE MATERIALES Y FORMAS CONSTRUCTIVAS DE LOS ELEMENTOS DEL NUEVO DEVANADO.	161
5.3.1	<i>Aislamiento principal.</i>	161
5.3.2	<i>Sistema semiconductor en la sección recta.</i>	162
5.3.3	<i>Conductores.</i>	162
5.3.4	<i>Sistema de graduación de campo eléctrico en las cabezas de bobina.</i>	162
5.3.5	<i>Esfuerzo dieléctrico.</i>	162
5.3.6	<i>Materiales de relleno.</i>	163
5.3.7	<i>Cuñas.</i>	163
5.3.8	<i>Elastómeros para fijación de la bobinas.</i>	163
5.3.9	<i>Acabado final de las barras.</i>	164
5.3.10	<i>Cabezas de bobina.</i>	164
5.3.11	<i>Amarras.</i>	164
5.3.12	<i>Anillos de sujeción del devanado.</i>	164
5.3.13	<i>Soldadura.</i>	164

5.3.14	<i>Terminales del neutro.</i>	164
5.3.15	<i>Ubicación de los RTD's.</i>	165
5.3.16	<i>Protecciones del generador.</i>	165
5.3.17	<i>Puentes de interconexión de grupos de bobinas, anillos, conexión serie entre ramas y terminales de salida.</i>	165
5.4	PARÁMETROS TÉCNICOS A GARANTIZAR.	165
5.4.1	<i>Parámetros eléctricos.</i>	166
5.4.2	<i>Parámetros térmicos.</i>	167
5.4.3	<i>Parámetros mecánicos.</i>	167
5.5	OBSERVACIONES GENERALES.	167
6.	ACUERDOS CON EL FABRICANTE Y LÍMITES TÉCNICOS GARANTIZADOS.	169
6.1	CONDICIONES PARA CAMBIO EN LAS ESPECIFICACIONES.	169
6.2	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS GARANTIZADAS POR EL FABRICANTE.	169
6.2.1	<i>Parámetros eléctricos.</i>	169
6.2.2	<i>Parámetros térmicos.</i>	170
6.2.3	<i>Parámetros Mecánicos.</i>	170
7.	RESULTADOS OBTENIDOS.	172
8.	CONCLUIONES.	173
9.	BIBLIOGRAFÍA	174

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Vista superior del núcleo.	22
Figura 2. Sección del núcleo del estator.	23
Figura 3. Dimensiones de la chapa magnética.	24
Figura 4. Detalles de la ranura del núcleo del estator.....	24
Figura 5. Detalle del devanado (Salida de fases).	26
Figura 6. Configuración del devanado del generador de la central hidroeléctrica de Salvajina.....	27
Figura 7. Vista lateral de la barra "Top normal".	28
Figura 8. Vista lateral de la barra "Top brazo largo".	29
Figura 9. Secciones de corte de las barras "Top normal".....	30
Figura 10. Secciones de corte de las barras "Top brazo largo".	30
Figura 11. Vista lateral de la barra "Bottom Normal".	31
Figura 12. Vista lateral de la barra Bottom brazo largo.	32
Figura 13. Secciones de corte de las barras "Bottom normal".	33
Figura 14. Secciones de corte de las barras "Bottom brazo largo".	33
Figura 15. Transposición Roebel de 360°.	34
Figura 16. Detalles del sistema de aislamiento en el devanado del estator de los generadores de Salvajina.	40
Figura 17. Sistema de acuñado convencional.	43
Figura 18. Posición de las cuñas en montaje.....	44
Figura 19. Cuña No. 4 del núcleo del estator.....	44
Figura 20. Cuña No. 5 del núcleo del estator.....	44
Figura 21. Cuña No. 6 del núcleo del estator.....	45
Figura 22. Cuña No. 7 del núcleo del estator.....	45
Figura 23. Cuña No. 8 del núcleo del estator.....	46
Figura 24. Cuña No. 9 del núcleo del estator.....	46
Figura 25. Horas de marcha totales por año.....	48
Figura 26. Salidas de línea de la unidad 2.	48
Figura 27. Horas paradas de la unidad 2.	49
Figura 28. Ejemplo de láminas dobladas durante la extracción de la bobina.	54
Figura 29. Corte transversal de la salida de un generador que tiene bujes de alta tensión y aisladores Standoff.	56
Figura 30. Aisladores Stand-off.	57

Figura 31. Puntos de inspección visual del estator.....	61
Figura 32. Proceso de limpieza del núcleo por EPSA e IA S.A.....	66
Figura 33. Limpieza del núcleo.....	66
Figura 34. Esquema de prueba HFRT.	72
Figura 35. Datos del núcleo para la prueba Core Loop.....	74
Figura 36. Esquema de prueba Core Loop.....	75
Figura 37. Esquema de prueba EL-CID.....	78
Figura 38. Corriente máxima por ranura.....	79
Figura 39. Secuencia de trabajo para reparar núcleo.....	80
Figura 40. Forma de sujetar la fresadora.....	81
Figura 41. Separación de láminas.....	82
Figura 42. Cuña para prensar el paquete de láminas.....	83
Figura 43. Proceso de prensado con cuñas.....	83
Figura 44. Forma de aplicar el barniz.....	84
Figura 45. Zonas de inspección visual del devanado.....	87
Figura 46. Zonas de inspección visual del devanado.....	87
Figura 47. Presencia de polvo blanco resultado de descargas corona.....	88
Figura 48. Forma para realizar el mapeo de cuñas manualmente.....	96
Figura 49. Detector del Ajuste de Cuñas WTD-501 de Adwel.....	96
Figura 50. Forma de realizar la inspección de aflojamiento de cuñas, con un WTD-501..	97
Figura 51. Esquema de conexión para la prueba de resistencia del devanado del estator por medio del método directo.....	101
Figura 52. Esquema de conexión para la prueba de resistencia del devanado del estator por el método de caída de tensión.....	101
Figura 53. Registro histórico de la resistencia óhmica del devanado.....	104
Figura 54. Componentes de la corriente volumétrica.....	106
Figura 55. Variación aproximada con la temperatura del factor de corrección para máquinas rotativas.....	109
Figura 56. Variación típica de la resistencia de aislamiento con el tiempo para aislamiento clase b, en devanados de AC.....	110
Figura 57. Circuito de prueba devanado completo.....	113
Figura 58. Esquema de prueba fase por fase.....	114
Figura 59. Ejemplo de curvas características de diferentes sistemas aislantes.....	115
Figura 60. Componentes de la corriente de aislamiento con una tensión A.C.....	121

Figura 61. Relación entre Cos (θ) y Tan (δ).....	121
Figura 62. Comportamiento de las bobinas ante la presencia de huecos.....	122
Figura 63. Esquema de prueba a bobina sola fuera del estator.....	124
Figura 64. Circuito de prueba del FP y Tip-UP.	126
Figura 65. Registro histórico del FP.	129
Figura 66. Registro histórico del factor de potencia Tip-Up.....	129
Figura 67. Devanado aparenta buenas condiciones al inicio y luego hay peligro de ruptura.	133
Figura 68. La disminución repentina de corriente indica una inminente falla del aislamiento.	133
Figura 69. Ejemplo de grafica de la prueba realizada a las tres fases.....	134
Figura 70. Resultado típico de la prueba en rampa de un devanado en buen estado con aislamiento epoxi-mica.	135
Figura 71. Resultado típico de la prueba en rampa de un devanado en buen estado con aislamiento asfalto-mica.	135
Figura 72. Curva I-V de falla localizada prueba de alta tensión DC.....	136
Figura 73. Curva I-V de aislamiento envejecido o con deterioro general.....	136
Figura 74. Curva I-V de devanado con alta humedad.	137
Figura 75. Curva I-V de devanado sin curar.	137
Figura 76. Curva I-V de devanado con terminales muy contaminados.....	137
Figura 77. Curva I-V de devanado con grieta en el aislamiento a tierra.	138
Figura 78. Curva I-V de devanado con aislamiento delaminado.....	138
Figura 79. Circuito de la prueba de impulso.....	140
Figura 80. Ejemplos de presencia de falla durante la prueba de impulso.....	141
Figura 81. Comparación de las fases 1-2 con la 3 conectada a tierra. Fase 3 abierta....	142
Figura 82. Comparación de las fases 1-2 o 2-3, con la que sobra a tierra. Fase 2 abierta.	142
Figura 83. Cortocircuito entre fases.	142
Figura 84. Cortocircuito sólido entre hilos.	142
Figura 85. Tierra parcial.....	142
Figura 86. Cortocircuito entre bobinas.	142
Figura 87. Tierra sólida.	143
Figura 88. Cortocircuito entre grupos.	143
Figura 89. Bobina invertida.....	143
Figura 90. Registro histórico del nivel de ozono presente en la máquina.....	147

Figura 91. Comparativo DP's Fase R, bobina 1.....	148
Figura 92. Comparativo DP's Fase R, bobina 2.....	148
Figura 93. Comparativo DP's Fase S, bobina 1.....	149
Figura 94. Comparativo DP's Fase S, bobina 2.....	149
Figura 95. Comparativo DP's Fase T, bobina 1.....	150
Figura 96. Comparativo DP's Fase T, bobina 2.....	150
Figura 97. Esquema de conexión por fase. Devanado TOSHIBA.....	151
Figura 98. Esquema de conexión de todas las fases. Devanado TOSHIBA.....	151
Figura 99. Armónicos de F.M.M. por fase. Devanado TOSHIBA.....	152
Figura 100. Armónicos de F.M.M. resultante. Devanado TOSHIBA.....	152
Figura 101. Esquema de conexión por fase. Devanado ANDRITZ.....	153
Figura 102. Esquema de conexión de todas las fases. Devanado ANDRITZ.....	153
Figura 103. Armónicos de F.M.M. por fase. Devanado ANDRITZ.....	154
Figura 104. Armónicos de F.M.M. resultante. Devanado ANDRITZ.....	154
Figura 105. Esquema de conexión por fase. Devanado OSLINGER.....	155
Figura 106. Esquema de conexión de todas las fases. Devanado OSLINGER.....	155
Figura 107. Armónicos de F.M.M. por fase. Devanado OSLINGER.....	156
Figura 108. Armónicos de F.M.M. resultante. Devanado OSLINGER.....	156
Figura 109. Factores de devanado Paso Y=6, Y=7, Y=8.....	157

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Localización de los medidores de temperatura en las ranuras.	21
Tabla 2. Nivel de voltaje de las barras.	35
Tabla 3. Primer falla a tierra U-2.....	49
Tabla 4. Segunda falla a tierra U-2.....	50
Tabla 5. Tercer falla a tierra U-2.....	50
Tabla 6. Cuarta falla a tierra U-2.	50
Tabla 7. Quinta falla a tierra U-2.....	51
Tabla 8. Sexta falla a tierra U-2.....	51
Tabla 9. Séptima falla a tierra U-2.....	51
Tabla 10. Guía para la inspección visual.	60
Tabla 11. Resultado de la inspección Visual del núcleo estatórico.	62
Tabla 12. Análisis resultado visual al núcleo.....	66
Tabla 13. Pruebas electromagnéticas al núcleo.	67
Tabla 14. Pruebas para diagnosticar el devanado estatórico.....	85
Tabla 15. Principales puntos para la inspección visual del devanado.	89
Tabla 16. Resultado inspección visual del devanado. Cabeza superior.	92
Tabla 17. Resultado inspección visual del devanado. Cabeza inferior.	93
Tabla 18. Resumen del estado de las cuñas de la unidad de generación 2 de Salvajina.	99
Tabla 19. Parámetros de la prueba de resistencia óhmica del devanado.....	103
Tabla 20. Resultado de la prueba de resistencia óhmica del devanado.	103
Tabla 21. Análisis de los resultados de la prueba de resistencia óhmica del devanado.	104
Tabla 22. Registro histórico de la prueba de resistencia óhmica del devanado.	104
Tabla 23. Factor de corrección por temperatura Kt.	109
Tabla 24. Tensión de prueba para la medición de resistencia de aislamiento.....	113
Tabla 25. Resistencia de aislamiento mínima a 40 °C.	116
Tabla 26. Valores mínimos recomendados de I.P.	118
Tabla 27. Evaluación del índice de absorción.....	119
Tabla 28. Parámetros de la prueba de aislamiento.	119
Tabla 29. Valores de resistencia de aislamiento de las tres fases obtenidos en la prueba.	120
Tabla 30. Índices obtenidos de la prueba de aislamiento.....	120
Tabla 31. Criterio de aceptación para el factor de potencia y Tip-UP según Doble Engineering Dompny.	127

Tabla 32. Criterio de aceptación según [17].....	127
Tabla 33. Resultados del Factor de potencia y Tip-Up.....	128
Tabla 34. Valores aceptados de corriente de las DP's	145
Tabla 35. Normas requeridas.	159
Tabla 36. Límite de corriente de secuencia negativa frente un desbalance de corriente.	161
Tabla 37. Parámetros eléctricos exigidos por EPSA ESP para el nuevo devanado.....	166
Tabla 38. Parámetros térmicos exigidos por EPSA ESP para el nuevo devanado	167
Tabla 39. Parámetros mecánicos exigidos por EPSA ESP para el nuevo devanado.....	167
Tabla 40. Parámetros eléctricos garantizados por el fabricante.....	169
Tabla 41. Parámetros térmicos garantizados por el fabricante.	170
Tabla 42. Parámetros mecánicos garantizados por el fabricante.....	170
Tabla 43. Nivel de ozono garantizado.	171

RESUMEN.

La Central Hidroeléctrica Salvajina cuenta con una capacidad de 300 MVA, se encuentra localizada en el Departamento del Cauca a 440 km, al Sur-Occidente de Bogotá y a 60 km de la ciudad Cali, entró en operación comercial en el año de 1985.

En este trabajo se realizó el estudio del cambio de devanado del generador de 100MVA de la Central Hidroeléctrica Salvajina con el fin de establecer una metodología para especificar un nuevo devanado de un gran generador, igualmente se muestran los estudios para el posible cambio de diseño del devanado y todas las pruebas necesarias para realizar un completo diagnóstico del estado global del estator basándose en normas internacionales o metodologías aceptadas a nivel internacional.

Se estudio las pruebas históricas realizadas al estator y su devanado para plantear el estado del estator y poder realizar un pliego de especificaciones técnicas basado en normas internacionales que garanticen la solución al problema raíz.

Una vez realizado el diagnóstico, se procede a elaborar el pliego de especificaciones técnicas exigidas por la Empresa de Energía del Pacífico S.A. (EPSA), por último se compara con el pliego de especificaciones técnicas garantizadas por el fabricante.

INTRODUCCIÓN.

La Central Hidroeléctrica Salvajina tiene tres generadores marca Toshiba de 100 MVA, 13.8 kV. Esta Central aporta el 30% de la generación de EPSA (295 MW). Estos generadores han presentado en sus 28 años de operación 23 fallas a tierra del estator, las cuales al transcurrir el tiempo se han ido incrementando. Por ejemplo, en los últimos cinco años se han presentado 12 fallas, que equivalen al 50% de todas las fallas. En los últimos dos años esta falla a tierra del estator aumentó su frecuencia a una cada nueve meses.

Además, los costos de reparación de estas fallas también se han incrementado, debido a que se deben cambiar cada vez mayor cantidad de barras. En las dos últimas reparaciones se cambiaron 132, que representó el 22% del devanado y representó un costo de COL\$1.030'000.000.

Los grandes generadores eléctricos son uno de los principales pilares del desarrollo de la sociedad. En el caso de grandes generadores hidroeléctricos además de aportar una importante generación de energía eléctrica, muchos regulan el caudal de los ríos, abastecen los acueductos y atraen turismo a la zona, ayudando así al crecimiento económico y al desarrollo local y nacional.

Es por lo anterior que se debe garantizar un correcto funcionamiento de los generadores cuando se ven sometidos a reparaciones grandes o rediseños, para esto se requiere diagnosticar asertivamente el estado general del generador y realizar las especificaciones técnicas acertadas que garanticen su correcto funcionamiento.

Especificar un nuevo devanado del estator para un generador de 28 años, como el de Salvajina, implica varios retos: mantener o aumentar la potencia activa entregada por el generador, seleccionar los mejores materiales conductores y aislantes que permitan disminuir las horas de mantenimiento, dadas las condiciones actuales de despacho de las unidades de generación, y reutilizar el mismo núcleo del estator y sistema de refrigeración.

Por esto, en el presente proyecto se desarrollará una metodología para especificar un nuevo devanado del estator de un gran generador. Lo cual permitirá registrar todo este conocimiento tan especializado y podrá utilizarse en un futuro por los agentes generadores de energía.

La metodología propuesta en este documento para realizar las especificaciones técnicas que debe cumplir un devanado estatórico nuevo de un gran generador, se muestra en la distribución de los capítulos de la siguiente forma:

Capítulo 1 "CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL ESTATOR DE LA UNIDAD 2 DE SALVAJINA": La razón de este capítulo está en la necesidad de caracterizar el estator y principalmente el devanado del mismo, con el fin de garantizar como mínimo los parámetros técnicos originales y buscar posibles mejoras del diseño original.

Capítulo 2 y 3 "PRUEBAS Y DIAGNOSTICO DEL NÚCLEO ESTATÓRICO" y " PRUEBAS Y DIAGNÓSTICO DEL DEVANADO ESTATÓRICO": La razón de estos capítulos radica en la necesidad de efectuar un correcto diagnostico del estator general para corregir las

fallas presentes en el mismo y centrar el cambio del devanado en la mejora de los puntos críticos para evitar, en un futuro, los mismos problemas. En estos capítulos se muestran los procedimientos de las pruebas y los criterios de aceptación de las mismas, basados en procedimientos aceptados y normas internacionales.

Capítulo 5 "DETERMINACIÓN DE LOS REQUISITOS TÉCNICOS DEL NUEVO DEVANADO SEGÚN NORMAS INTERNACIONALES Y ÚLTIMOS AVANCES TECNOLÓGICOS". La razón de este capítulo es establecer las condiciones de operación que se deben garantizar en el nuevo devanado, las normas aceptadas y por último ejemplificar el pliego de características técnicas exigidas al fabricante.

El capítulo 4 "EVALUACIÓN PARA CAMBIO DE CONFIGURACIÓN DEL DEVANADO" se muestra como un ejemplo de estudio para evaluar de forma teórica el cambio de diseño del devanado, enfocándose en la forma de f.em. de cada tipo de devanado..

El capítulo 6 "ACUERDOS CON EL FABRICANTE Y LÍMITES TÉCNICOS GARANTIZADOS" se muestra como un ejemplo de los cambios que se pueden aceptar a las especificaciones técnicas exigidas, de igual forma se muestran las condiciones que se deben cumplir para aceptar cambios a las especificaciones exigidas.

METODOLOGÍA USADA

La Metodología usada para el desarrollo del presente documento fue la siguiente:

1. Estudiar las características técnicas el devanado del estator existente
 - Estudiar el manual de montaje y mantenimiento del devanado del generador suministrado por el fabricante, con el fin de obtener las características técnicas del devanado original.
2. Realizar el diagnóstico del devanado del Generador de Salvajina para justificar su cambio.
 - Descripción de las pruebas a realizar, sus objetivos y el procedimiento a seguir.
 - Realizar y analizar las pruebas al devanado del estator: Factor de potencia del aislamiento, resistencia de aislamiento, cálculo del índice de polarización y absorción, etc. Esto para realizar el diagnóstico del devanado actual.
3. Evaluar técnicamente el cambio del diseño del devanado del estator.
 - Analizar las características técnicas de tres diseños diferentes para el nuevo devanado del estator.
 - Evaluar las diferencias entre las características de los tres diseños establecer la especificación del nuevo devanado.
4. Estudiar las normas internacionales sobre especificaciones del devanado del estator de grandes generadores sincrónicos y realizar las especificaciones internacionales para un devanado del estator de la unidad de generación 2 de la Central Hidroeléctrica Salvajina.
 - Revisar las normas existentes sobre las especificaciones de devanados del estator de grandes generadores. Con el fin de establecer una tabla comparativa que permita identificar los nuevos límites técnicos de estos devanados. (Evolución de los materiales).
 - De acuerdo a los límites técnicos actuales se realizan los pliegos de especificaciones técnicas.
 - Acuerdos sobre los límites técnicos que debe cumplir el fabricante original para el nuevo devanado. Debe obtenerse una tabla con los ajustes de los nuevos límites técnicos.
 - Cumpliendo con las normas, los límites técnicos y seleccionando el mejor diseño. se realizan las especificaciones técnicas que debe cumplir un nuevo devanado del estator de un gran generador de Salvajina.
5. Acuerdos con el fabricante para determinar los nuevos límites de cumplimiento para el caso de un generador antiguo.
 - De acuerdo con los límites técnicos y las exigencias de las normas internacionales se establece un acuerdo con el fabricante para determinar los límites de cumplimiento que debe de tener el devanado nuevo de un generador antiguo.

1. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL ESTATOR DE LA UNIDAD 2 DE SALVAJINA.

En este capítulo se muestran las características técnicas y parámetros principales de la unidad de generación No. 2 de la central Hidroeléctrica de Salvajina. Luego se presenta una descripción detallada de cada uno de los elementos que componen el estator. Además se muestran los antecedentes operativos de la máquina, así como los registros de fallas y los datos operativos.

A continuación se describen las características técnicas y parámetros principales del generador No. 2 de la central Hidroeléctrica de Salvajina.

1.1 Datos Principales del Generador.

Fabricante.....	TOSHIBA-JAPON
Norma.....	ANSI C50.10-1977
Potencia nominal.....	100 MVA
Tensión nominal.....	13.800 ± 5% V
Corriente nominal.....	4184 A
Frecuencia.....	60 Hz
Factor de potencia.....	0.9
Número de polos.....	40
Tipo de bobina.....	Barra Roebel
Paso de bobina.....	1-9-16
Devanado.....	Ondulado progresivo (Derecho) a doble capa
Clase de aislamiento.....	B
Tipo de refrigeración.....	aire-agua
Velocidad.....	180 r.p.m.
Conexión.....	Doble estrella
Tensión de excitación.....	300 V
Corriente de excitación nominal.....	1174 A
Corriente de excitación máxima.....	1220 A
Número de ranuras.....	300
Medidores de temperatura estator.....	15 RTDs Cu-10 (10Ω, 25°C)
Año fabricación.....	1982
Año puesta en servicio.....	1985

A continuación se presentan los parámetros eléctricos del generador.

Relación de cortocircuito RCC.....	1,301
Reactancia en eje directo saturada Xds.....	0,769 p.u.
Reactancia en eje directo no saturada Xdu.....	0,832 p.u.
Reactancia de secuencia negativa X2.....	0,2186 p.u.
Reactancia de secuencia cero Xo.....	0,15 p.u.
Reactancia transitoria en eje directo Xd'.....	0,2802 p.u.
Reactancia subtransitoria en eje directo Xd''.....	0,2144 p.u.
Reactancia subtransitoria en cuadratura Xq''.....	0,2308 p.u.
Reactancia de dispersión Xl.....	0,1192 p.u.
Constante de tiempo de armadura Ta.....	0,268
Factor de desviación de forma de onda.....	1,22%

TIF balanceado.....	57,3
TIF residual.....	31,3
Resistencia del devanado de armadura por fase.....	0,00456 Ω

En la Tabla 1, se presentan las ranuras del estator donde se encuentran instalados los sensores de temperatura (RTDs). Lo cual debe tenerse en cuenta durante el montaje del nuevo devanado.

Tabla 1. Localización de los medidores de temperatura en las ranuras.

Detector	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	D15
Ranura	5	17	53	79	84	113	132	153	165	192	204	225	237	264	277

Tomado de [42].

1.2 Núcleo del Estator.

El núcleo es el elemento que contiene las ranuras donde se alojan los conductores del devanado del inducido, este núcleo concentra el campo magnético creado por el rotor disminuyendo las pérdidas por dispersión magnética, optimizando así la fuerza electromotriz inducida en los conductores del devanado del estator [1][2].

El núcleo está compuesto por chapas laminadas de acero de silicio de pequeño espesor, las cuales son apiladas hasta generar el cuerpo del núcleo. Estas láminas ofrecen una baja reluctancia a los campos magnéticos en el estator. Sus chapas son barnizadas para brindar un aislamiento eléctrico y evitar la circulación de corrientes Foucault. Un buen material de aislamiento disminuye las pérdidas en el núcleo ferro magnético y ayuda a la eficiencia de la máquina. Si hay chapas en corto habrá una circulación de corrientes, lo cual aumentaría las pérdidas y reducirán la eficiencia del generador [3].

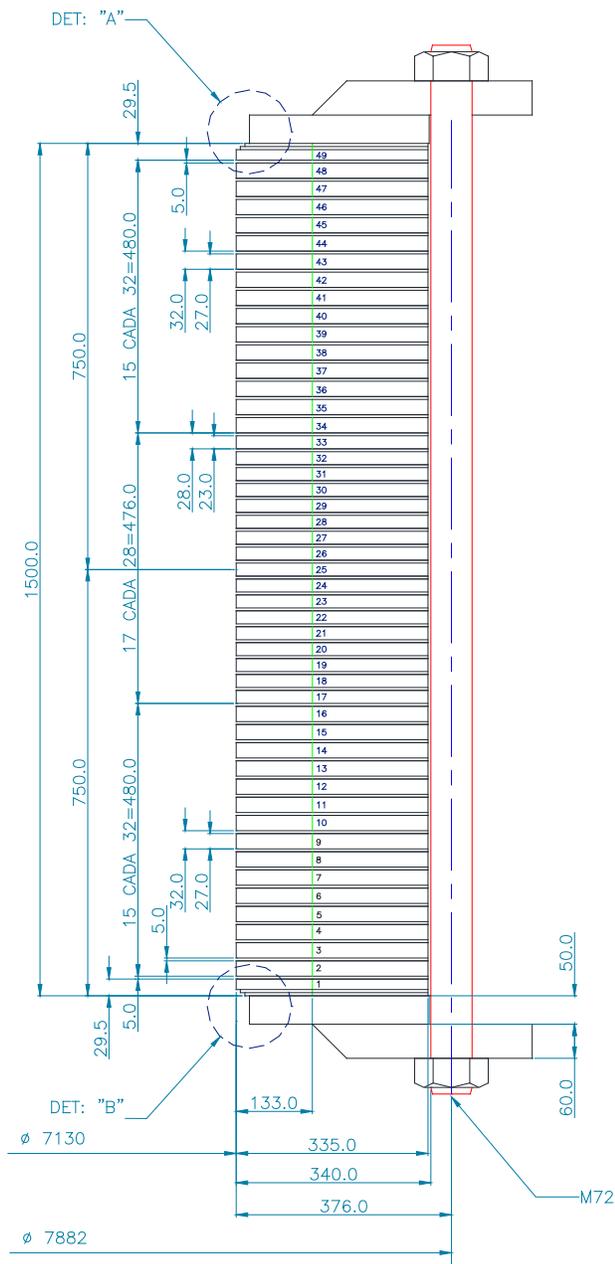
1.2.1 Descripción Física del Núcleo.

El núcleo tiene un diámetro interno de 7130mm y un diámetro externo de 7800mm. La carcasa está dividida en 4 secciones para facilitar el transporte, las divisiones se encuentra en las ranuras 47, 119, 197 y 269. El núcleo está conformado por 24 secciones. Ver Figura 1.

Cada sección se compone de 49 bloques laminados apilados, los cuales tienen diferentes medidas a lo largo. Los dos bloques de los extremos miden 29.5mm, los siguientes 15 bloques al igual que los últimos 15 excluyendo los extremos, miden 27mm cada uno y los 17 bloques intermedios restantes miden 23mm cada uno.

En la Figura 2, se ilustra la sección transversal del núcleo, el cual tiene una longitud total de 1500mm, de los cuales 1260mm corresponden a los bloques apilados y 240mm corresponden a los canales de ventilación.

Figura 2. Sección del núcleo del estator.



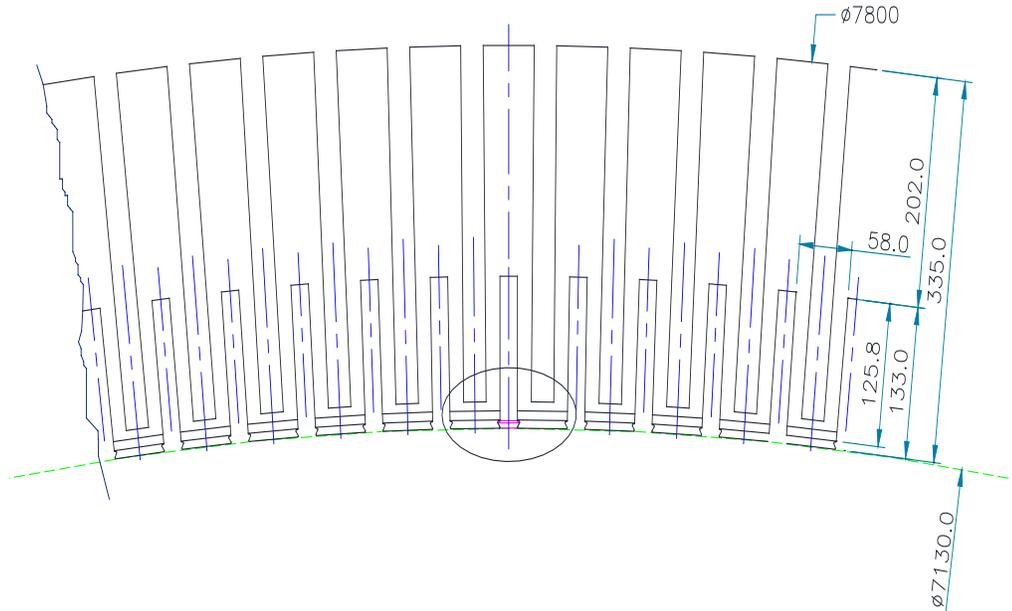
Tomado de [27].

A continuación se consolidan los datos geométricos más importantes del núcleo del estator:

Diámetro exterior del núcleo.....7800mm (espesor del enchapado: 335mm).
 Diámetro interior del estator.....7130mm.
 Longitud del núcleo.....1500mm.
 Número de canales ventilación.....48.
 Alto del canal de ventilación.....5mm.

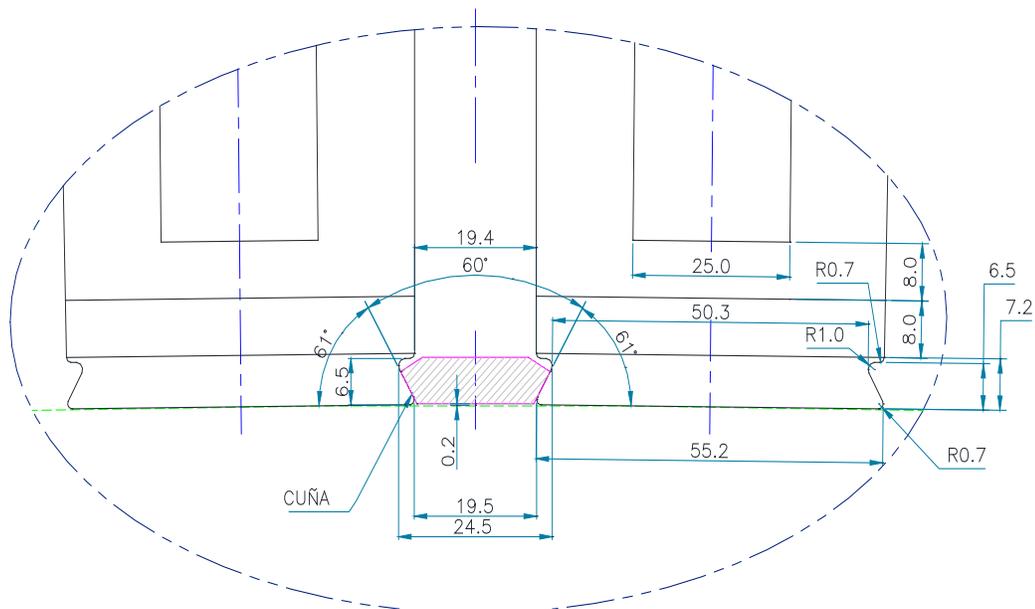
De igual forma en las Figura 3 y Figura 4, se ilustran las dimensiones de las chapas y las ranuras respectivamente. El núcleo tiene un total de 300 ranuras, las cuales son de forma rectangular abierta como se aprecia en la Figura 4.

Figura 3. Dimensiones de la chapa magnética.



Tomado de [28].

Figura 4. Detalles de la ranura del núcleo del estator.



Tomado de [28].

1.3 Devanado del Estator (Devanado Inducido).

En el caso de grandes generadores, el devanado del estator está compuesto de varias bobinas por fase distribuidas en ranuras al rededor de la superficie interna del estator, cada bobina está conformada por 2 barras preformadas de varios hilos aislados entre sí y normalmente transpuestos a lo largo de la barra (transposición tipo Roebel). El devanado en sí mismo está distribuido y encordado alrededor del estator; desde el punto de vista de la forma de las bobinas, el devanado puede clasificarse en ondulado o imbricado y dependiendo de su configuración, los armónicos superiores de f.e.m. afectarán en mayor o menor medida la forma de onda de la *f.e.m.* inducida en el devanado [47][48].

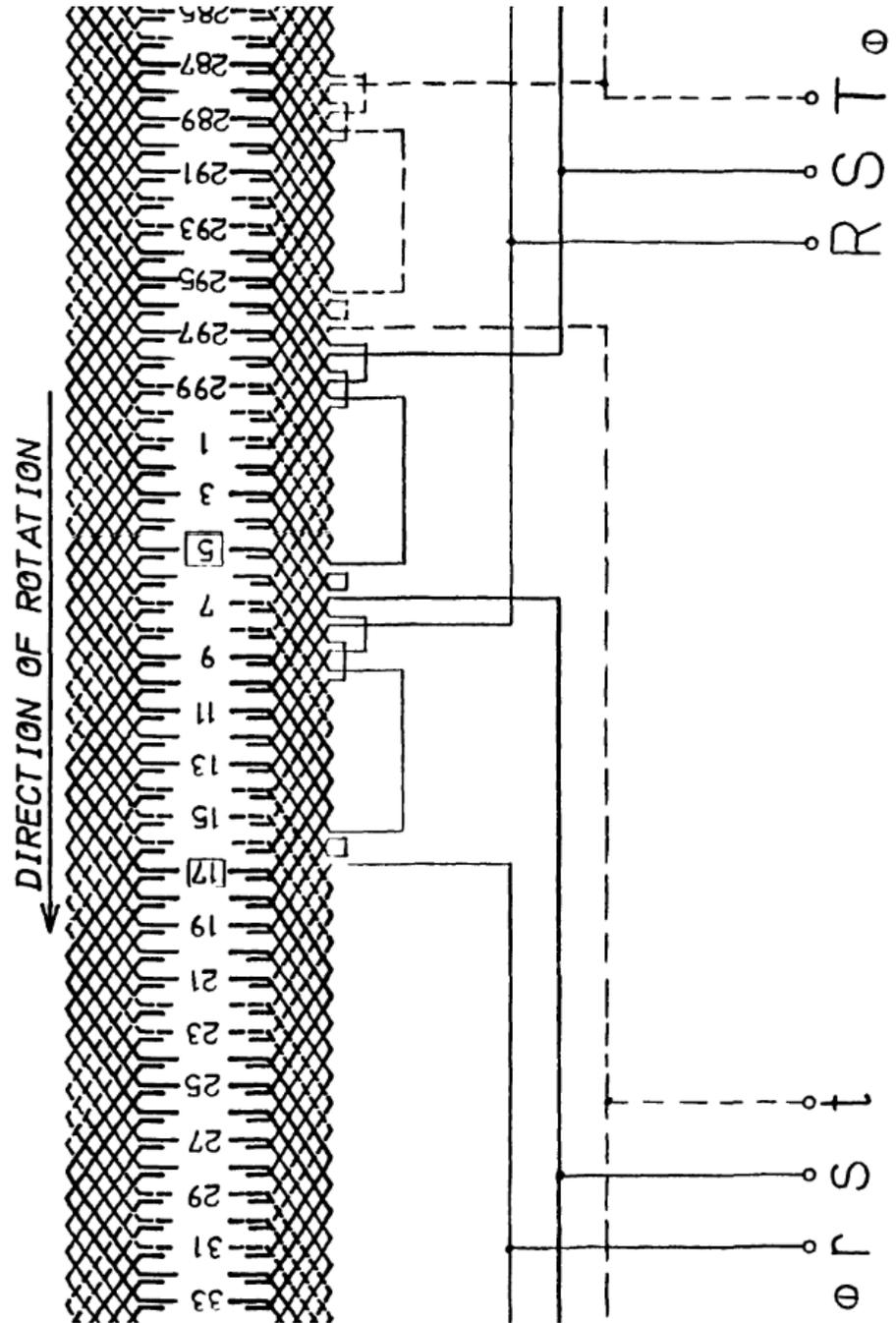
1.3.1 Detalles constructivos.

En el caso del generador de la Central Hidroeléctrica Salvajina, el devanado del estator es de tipo ondulado, doble capa, no congruente con transposición tipo Roebel de 360°; su configuración se muestra en las Figura 5 y Figura 6. El conductor, está conformado por varios hilos rectangulares al que se le denomina barra. Existen dos razones por las cuales la barra se construye con varios hilos y no por un solo conductor, estas se describen a continuación.

Desde el punto de vista mecánico, para transportar toda la corriente necesaria en un gran generador usando un solo conductor sería necesario uno de gran sección transversal el cual sería muy difícil de doblar para lograr la forma de la bobina [3].

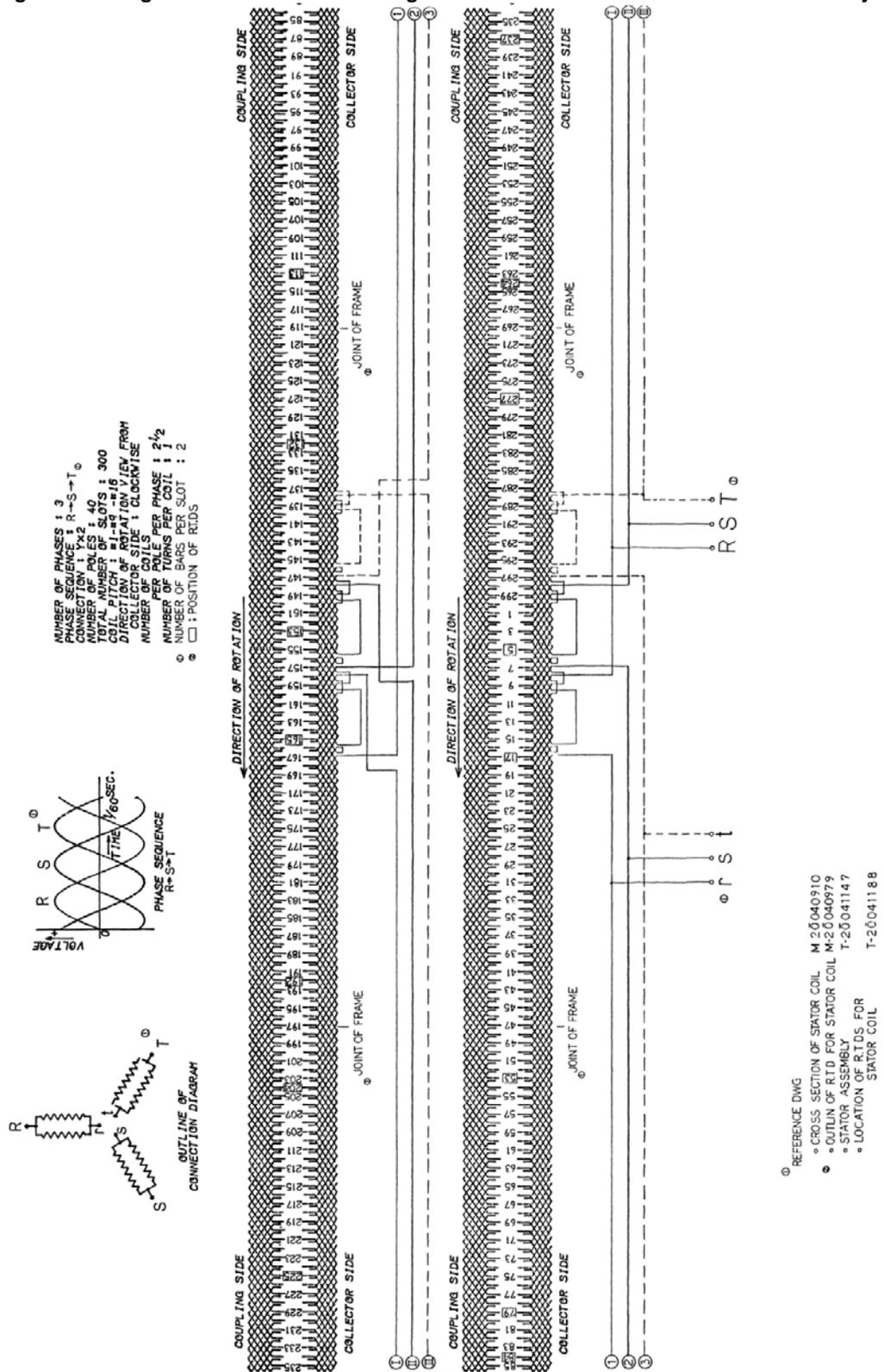
Desde el punto de vista eléctrico se conoce que en un conductor cuya sección transversal es suficientemente grande, la corriente tenderá a fluir en su periferia, este fenómeno es conocido como efecto piel [3]. La mayor parte de la de corriente fluye entre la superficie y una profundidad de 8.5mm en el conductor, esto es conocido como profundidad de la piel. Si un conductor tiene un espesor mayor a 8.5mm, no habrá una circulación de corriente en su centro. Lo que implica que no se estará aprovechando la totalidad del conductor. Esto se refleja como una resistencia AC efectiva, la cual es mayor que la resistencia DC, lo que genera mayores pérdidas I^2R en comparación a una barra hecha con varios hilos donde el efecto piel se anula [3].

Figura 5. Detalle del devanado (Salida de fases).



Tomado de [29].

Figura 6. Configuración del devanado del generador de la central hidroeléctrica de Salvajina.



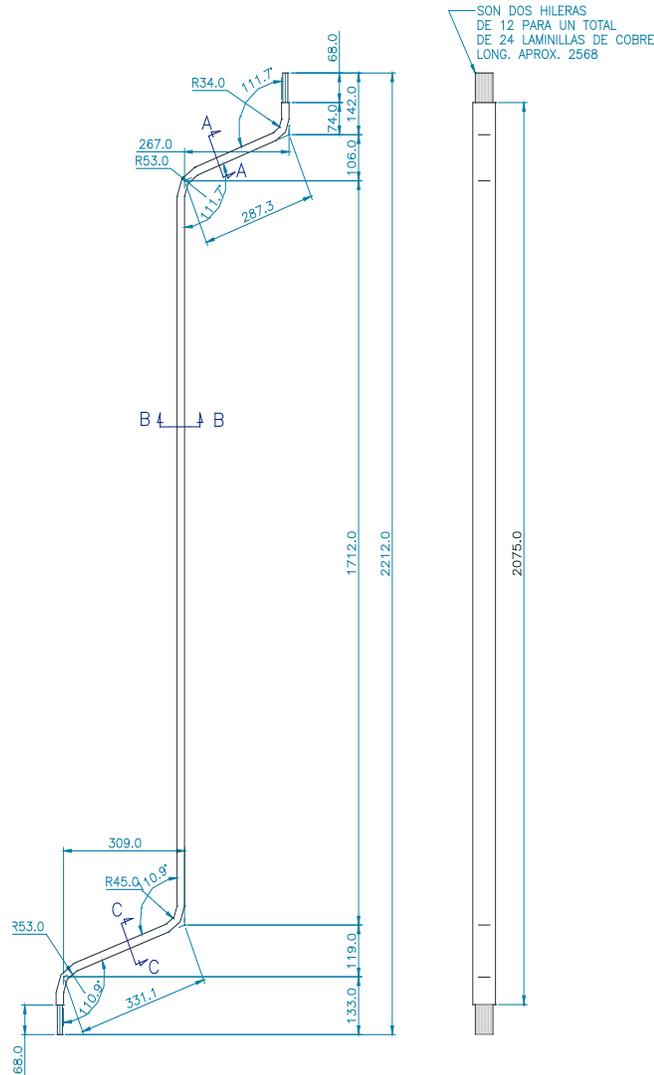
Tomado de [29].

El devanado del estator de Salvajina por ser de doble capa tiene dos tipos de barras, las cuales son barras Top (superior) y barras Bottom (inferior).

Debido al dimensionamiento del devanado, este posee dos tipos de barras Top las cuales son: "Top normal" y "Top brazo largo". Ambas tienen 24 hilos dispuestos en dos hileras e igual sección transversal en la parte activa, es decir la parte que está insertada en la ranura del núcleo. Sin embargo en las cabezas de bobina esta sección varía ligeramente.

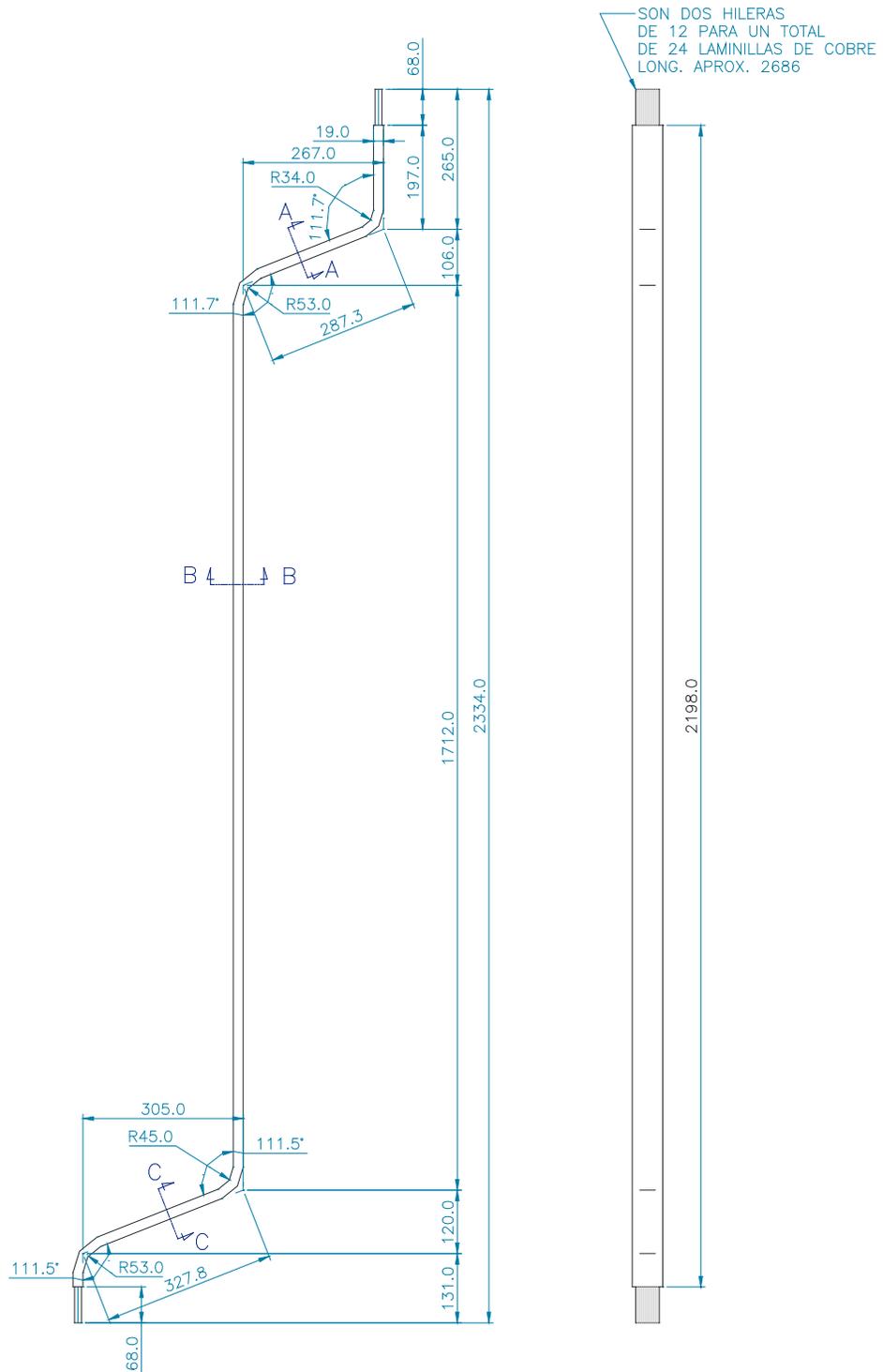
En las Figura 7 y Figura 8 se muestran los detalles constructivos de las barras "Top normal" y "Top brazo largo", los cortes ilustrados en las secciones A, B y C de ambas figuras, se muestran en las Figura 9 y Figura 10 respectivamente.

Figura 7. Vista lateral de la barra "Top normal".



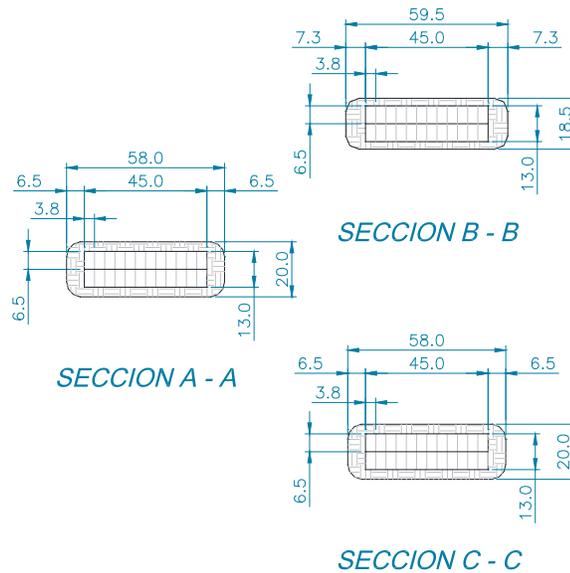
Tomado de [30].

Figura 8. Vista lateral de la barra "Top brazo largo".



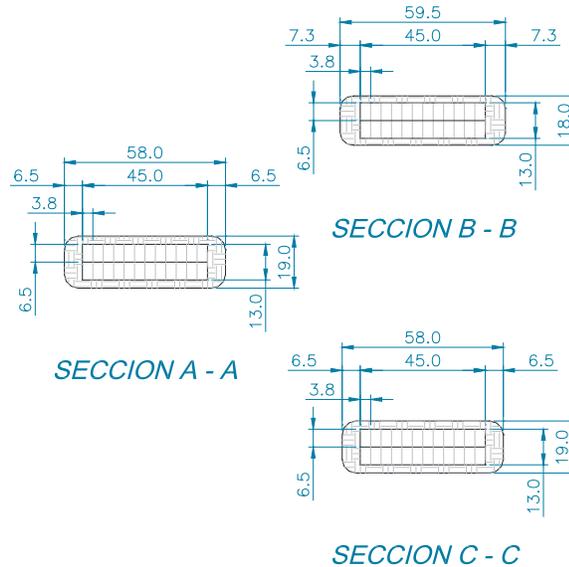
Tomado de [31].

Figura 9. Secciones de corte de las barras "Top normal".



Tomado de [30].

Figura 10. Secciones de corte de las barras "Top brazo largo".

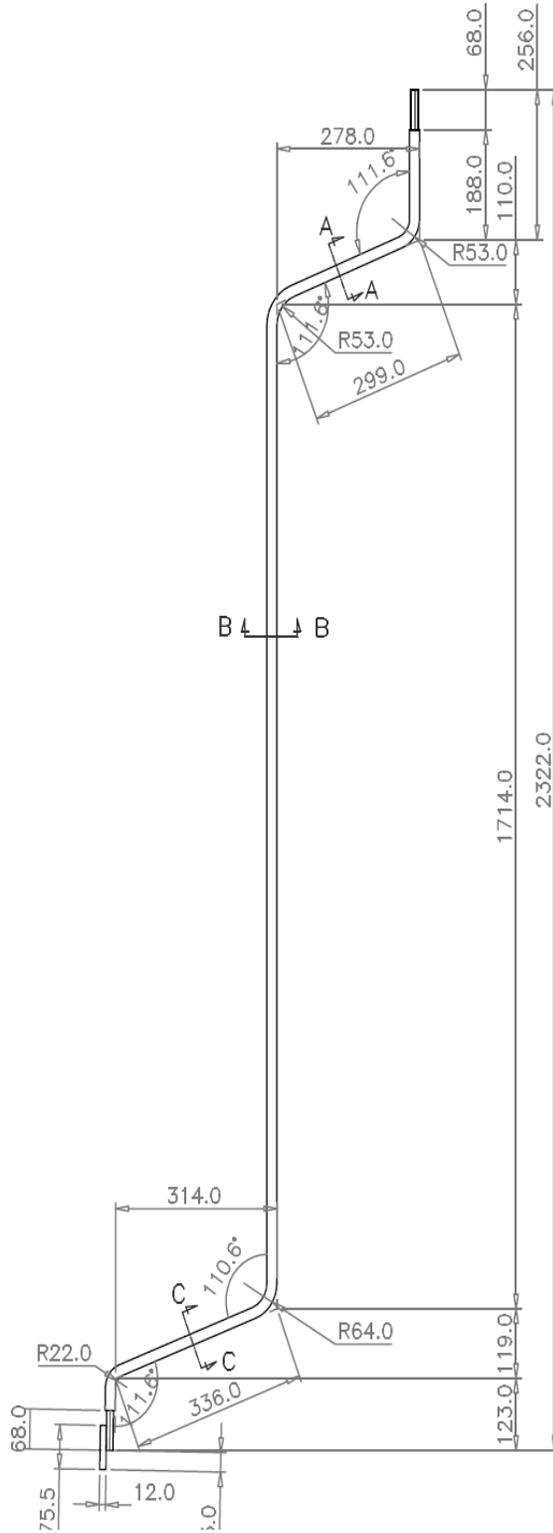


Tomado de [31].

Igualmente este devanado por su dimensionamiento tiene dos tipos de barra Bottom (inferior) las cuales son: "Bottom normal" y "Bottom brazo largo". Ambas tienen 30 hilos dispuestos en dos hileras e igual sección transversal en la parte activa. Sin embargo en las cabezas de bobina esta sección varía ligeramente.

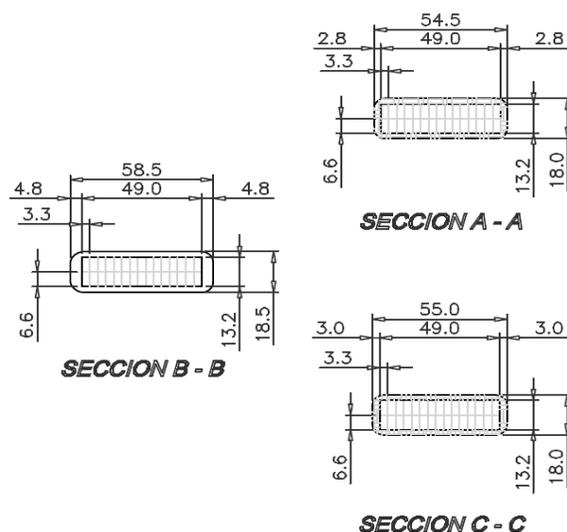
En las Figura 11 y Figura 12 se muestran los detalles constructivos de las barras "Bottom normal" y "Bottom brazo largo", los cortes ilustrados en las secciones A, B y C de ambas figuras, se muestran en las Figura 13 y Figura 14 respectivamente.

Figura 12. Vista lateral de la barra Bottom brazo largo.



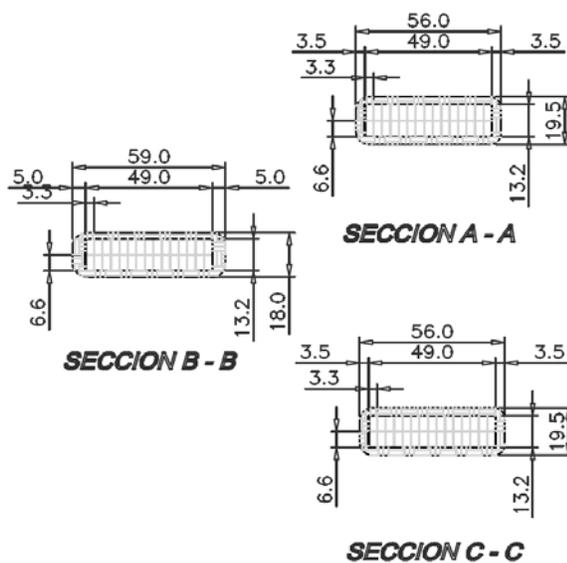
Tomado de [33].

Figura 13. Secciones de corte de las barras "Bottom normal".



Tomado de [33].

Figura 14. Secciones de corte de las barras "Bottom brazo largo".



Tomado de [33].

1.3.1.1 Transposición Roebel.

A continuación se explica brevemente la necesidad de transponer los hilos de cobre que componen cada barra del devanado.

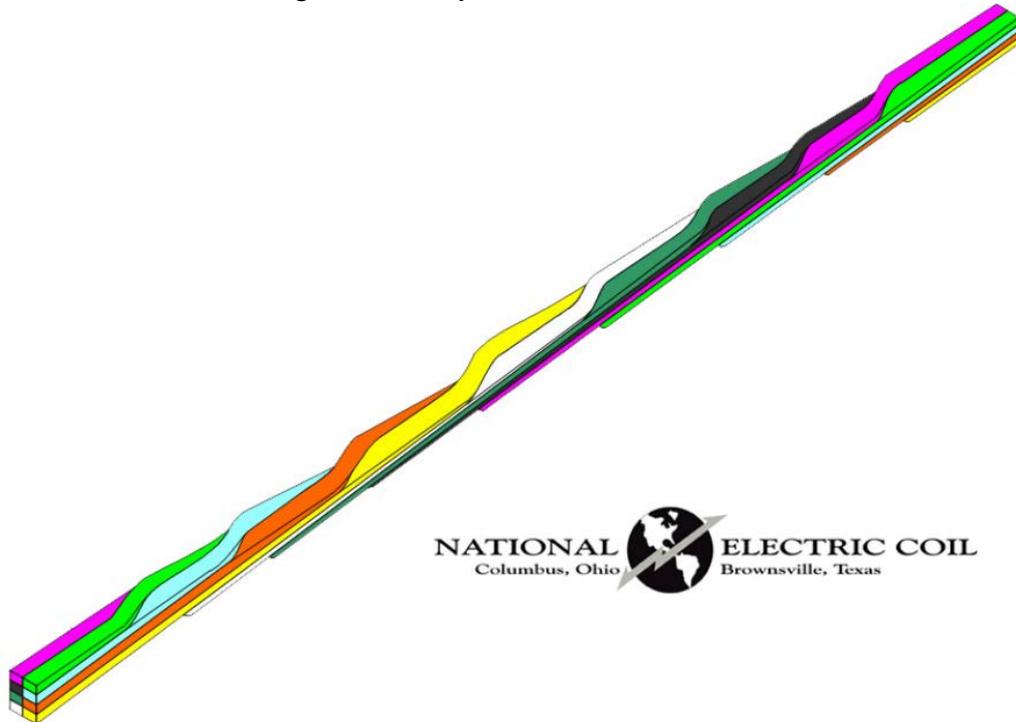
El flujo magnético es más alto en la parte de la barra que está más próxima al rotor que en la parte inferior de la barra, la cual está más alejada del rotor. En consecuencia, si los hilos en la bobina conservaran siempre la misma posición dentro de la barra, los hilos más cercanos al rotor tendrían un voltaje inducido mayor que los hilos más alejados del rotor.

En bobinados cuyas barras tienen múltiples hilos aislados entre ellos en la parte activa del núcleo, estos hilos se suelen unir en cada extremo de la barra. Si los hilos se conectan entre sí, se presentará una diferencia de potencial inducido causado por los diferentes niveles de flujo al cual está expuesta la barra. Entonces, por la ley de Ohm aparecerá una corriente axial que fluirá hacia arriba y hacia abajo en la barra. Puesto que la resistencia del cobre es baja, el flujo de corriente será sustancial y esto aumentará las pérdidas I^2R , lo que reduce la eficiencia y aumenta la temperatura del cobre [3].

En una transposición Roebel cada hilo de cobre ocupa a lo largo de la ranura cada posición posible en la barra. Es decir, un hilo que se encuentra inicialmente en la posición superior izquierda, después de varios centímetros a lo largo de la barra se desplaza a una posición inferior izquierda y continúa así hasta que eventualmente alcanza su posición original. A esto se le llama transposición Roebel de 360° . Si la transposición de 360° se realiza en el núcleo del estator, donde el flujo magnético es más alto, una sola hebra habrá estado en cada posición radial a lo largo de la ranura de tal forma que la tensión inducida total en este hilo será entonces la misma que la tensión inducida en todos los otros hilos que fueron transpuestos. Por lo tanto se pueden conectar de forma segura todos los hilos en ambos extremos de la barra y no dará lugar a corrientes axiales circulantes [3].

Existen maneras diferentes para llevar a cabo la transposición. La manera más popular es hacer que los hilos se muevan de derecha a izquierda y de arriba abajo como se muestra en la Figura 15.

Figura 15. Transposición Roebel de 360° .



Tomado de National Electric Coil.



Algunos fabricantes prefieren una transposición de 540° o incluso 720°. La transposición puede ocurrir también al final de la barra, ya que los campos magnéticos también se encuentran presentes allí. El objetivo de hacer la transposición es mejorar la eficiencia del bobinado del estator y reducir la temperatura durante su funcionamiento [3].

1.3.2 Nivel de voltaje de las barras estáticas del generador.

En el devanado del estator de un generador como el de Salvajina, las barras se encuentran a diferentes niveles de potencia, esto se debe a que la f.e.m. total de cada fase es la contribución “fasorial” de cada bobina que pertenece a la fase y dado que el punto neutro del devanado está conectado a tierra, obliga que la f.e.m. se distribuya a lo largo de la fase. En la Tabla 2 se muestran los niveles de voltaje de cada una de las barras distribuidas en las 300 ranuras del estator del generador.

Tabla 2. Nivel de voltaje de las barras.

N° de ranura.	Nivel de voltaje (V).		Fases.	N° de ranura.	Nivel de voltaje (V).		Fases.
	Barra Bottom.	Barra Top.			Barra Bottom.	Barra Top.	
1	7967,43	4700,79	ST	51	7330,04	4382,09	TR
2	6373,95	3187,87	SS	52	5736,55	2230,88	TT
3	4780,46	1593,49	SS	53	4143,07	637,39	TT
4	3107,3	6453,62	RR	54	2151,21	7409,71	SS
5	1513,81	4860,13	RR	55	557,72	5816,23	SS
6	7808,09	3266,65	TR	56	7489,39	4222,74	RS
7	6214,6	1752,84	TT	57	5895,9	2071,53	RR
8	4621,11	159,35	TT	58	4302,41	478,05	RR
9	1673,16	7887,86	SS	59	2310,56	7250,36	TT
10	79,67	6294,27	SS	60	717,07	5656,88	TT
11	7967,43	4700,79	RS	61	7330,04	4063,39	ST
12	6373,95	3186,97	RR	62	5736,55	2230,88	SS
13	4780,46	1593,49	RR	63	4143,07	637,39	SS
14	1832,51	7728,41	TT	64	2151,21	7409,71	RR
15	239,02	6134,92	TT	65	557,72	5816,23	RR
16	7808,09	4541,44	ST	66	7170,69	4222,74	TR
17	6214,6	1652,84	SS	67	5577,2	2390,23	TT
18	4621,11	159,35	SS	68	3983,72	796,94	TT
19	1673,16	7887,76	RR	69	2310,56	7250,36	SS
20	79,67	6294,27	RR	70	717,07	5656,88	SS
21	7648,74	4700,79	TR	71	7330,04	4063,39	RS
22	6055,25	1912,18	TT	72	5736,55	2230,88	RR
23	4461,76	318,7	TT	73	4143,07	637,39	RR
24	1832,51	7728,41	SS	74	2469,9	7091,02	TT
25	239,02	6134,92	SS	75	876,42	5497,53	TT
26	7808,09	4541,44	RS	76	7170,69	3904,04	ST

Tabla 2. (Continuación).

27	6214,6	1752,84	RR	77	5577,2	2390,23	SS
28	4621,11	159,35	RR	78	3983,72	796,74	SS
29	1991,86	7569,06	TT	79	2310,56	7250,36	RR
30	398,37	5975,58	TT	80	717,07	5656,88	RR
31	7648,74	4382,09	ST	81	7011,34	4063,39	TR
32	6055,25	1912,18	SS	82	5417,85	2549,58	TT
33	4461,76	318,7	SS	83	3824,37	3824,37	TT
34	1832,51	7728,41	RR	84	2469,9	7091,02	SS
35	239,02	6134,92	RR	85	876,02	5497,53	SS
36	7489,39	4541,44	TR	86	7170,69	3904,04	RS
37	5995,9	2071,53	TT	87	5577,2	2390,23	RR
38	4302,41	478,05	TT	88	3983,72	796,74	RR
39	1991,86	7569,06	SS	89	2629,25	6931,67	TT
40	398,37	5975,58	SS	90	1035,77	5338,18	TT
41	7648,74	4382,09	RS	91	7011,34	3744,69	ST
42	6055,25	1912,18	RR	92	5417,85	2549,58	SS
43	4461,76	318,7	RR	93	3824,37	956,09	SS
44	2151,21	7409,71	TT	94	2469,9	7091,02	RR
45	557,72	5816,23	TT	95	876,42	5497,53	RR
46	7489,39	4222,74	ST	96	6851,99	3904,04	TR
47	5895,9	2071,53	SS	97	5258,51	2708,93	TT
48	4302,41	478,05	SS	98	3665,02	1115,44	TT
49	1991,86	7569,06	RR	99	2629,25	6931,67	SS
50	398,37	5975,58	RR	100	1035,77	5338,18	SS
101	7011,34	3744,69	RS	151	7967,43	4700,79	ST
102	5417,85	2549,58	RR	152	6373,95	3186,97	SS
103	3824,37	956,09	RR	153	4780,46	1593,49	SS
104	2788,6	6772,32	TT	154	3107,3	6453,62	RR
105	1195,12	5178,83	TT	155	1513,81	4860,13	RR
106	6851,99	3585,35	ST	156	7808,09	3266,65	TR
107	5258,51	2708,93	SS	157	6214,6	1752,84	TT
108	3665,02	1115,44	SS	158	4621,11	159,35	TT
109	2629,25	6931,67	RR	159	1673,16	7887,76	SS
110	1035,77	5338,18	RR	160	79,67	6294,27	SS
111	6692,64	3744,69	TR	161	7967,43	4700,79	RS
112	5099,16	2868,28	TT	162	6373,95	3186,97	RR
113	3505,67	1274,79	TT	163	4780,46	1593,49	RR
114	2788,6	6772,32	SS	164	1832,51	7728,41	TT
115	1195,12	5178,83	SS	165	239,02	6134,92	TT

Tabla 2. (Continuación).

116	6851,99	3585,35	RS	166	7808,09	4541,44	ST
117	5258,51	2708,93	RR	167	6214,6	1752,84	SS
118	3665,02	1115,44	RR	168	4621,11	159,35	SS
119	2947,95	6612,97	TT	169	1673,16	7887,76	RR
120	1354,46	5019,46	TT	170	79,67	6294,27	RR
121	6692,64	3426	ST	171	7648,74	4700,79	TR
122	5099,16	2868,28	SS	172	6055,25	1912,18	TT
123	3505,67	1274,79	SS	173	4461,76	318,7	TT
124	2788,6	6772,32	RR	174	1832,51	7728,41	SS
125	1195,12	5178,83	RR	175	239,02	6134,92	SS
126	6533,3	3585,35	TR	176	7808,09	4541,44	RS
127	4939,81	3027,62	TT	177	6214,6	1752,84	RR
128	3346,32	1434,14	TT	178	4621,11	159,35	RR
129	2947,95	6612,97	SS	179	1991,86	7569,06	TT
130	1354,46	5019,48	SS	180	398,37	5975,58	TT
131	6692,64	3426	RS	181	7648,74	4382,09	ST
132	5099,16	2868,28	RR	182	6055,25	1912,18	SS
133	3505,67	1274,79	RR	183	4461,76	318,7	SS
134	3107,3	6453,62	TT	184	1832,51	7728,41	RR
135	1513,81	4860,13	TT	185	239,02	6134,92	RR
136	6533,3	3266,65	ST	186	7489,39	4541,44	TR
137	4939,81	3027,62	SS	187	5895,9	2071,53	TT
138	3346,32	1434,14	SS	188	4302,41	478,05	TT
139	2947,95	6612,97	RR	189	1991,86	7569,06	SS
140	1354,46	5019,48	RR	190	398,37	5975,58	SS
141	7947,47	3426	TR	191	7648,74	4382,09	RS
142	6373,95	3186,97	TT	192	6055,25	1912,18	RR
143	4780,46	1593,49	TT	193	4461,76	318,7	RR
144	3107,3	6453,62	SS	194	2151,21	7409,71	TT
145	1513,91	4860,13	SS	195	557,72	5816,23	TT
146	6333,3	3266,65	RS	196	7489,39	4222,74	ST
147	4939,81	3027,62	RR	197	5895,9	2071,53	SS
148	3346,32	1434,14	RR	198	4302,41	478,05	SS
149	1673,16	7887,76	TT	199	1991,86	7569,06	RR
150	79,67	6294,27	TT	200	398,37	5975,58	RR
201	7330,04	4382,09	TR	251	7011,34	3744,69	RS
202	5736,55	2230,88	TT	252	5417,85	2549,58	RR
203	4143,07	637,39	TT	253	3824,37	956,09	RR

Tabla 2. (Continuación).

204	2151,21	7409,71	SS	254	2788,6	6772,32	TT
205	557,72	5816,23	SS	255	1195,12	5178,83	TT
206	7489,39	4222,74	RS	256	6851,99	3585,35	ST
207	5895,9	2071,53	RR	257	5258,51	2708,93	SS
208	302,41	478,05	RR	258	3665,02	1115,44	SS
209	2310,56	7250,36	TT	259	2629,25	6931,67	RR
210	717,07	5656,88	TT	260	1035,77	5338,18	RR
211	7330,04	4063,39	ST	261	6692,64	3744,69	TR
212	5736,55	2230,88	SS	262	5099,16	2868,28	TT
213	4143,07	637,39	SS	263	3505,67	1274,79	TT
214	2151,21	7409,71	RR	264	2788,6	6772,32	SS
215	557,72	5816,23	RR	265	1195,12	5178,83	SS
216	7170,69	4222,74	TR	266	6851,99	3585,35	RS
217	5577,2	2390,23	TT	267	5258,51	2708,93	RR
218	3983,72	796,74	TT	268	3665,02	1115,44	RR
219	2310,56	7250,36	SS	269	2947,95	6612,97	TT
220	717,07	5656,88	SS	270	1354,96	5019,48	TT
221	7330,04	4063,39	RS	271	6692,64	3426	ST
222	5736,55	2230,88	RR	272	5099,16	2868,28	SS
223	4143,07	637,39	RR	273	3505,67	1274,79	SS
224	2469,9	7091,02	TT	274	2788,6	6772,32	RR
225	876,42	5497,53	TT	275	1195,12	5178,83	RR
226	7170,69	3904,04	ST	276	6533,3	3585,35	TR
227	5577,2	2390,23	SS	277	4939,81	3027,62	TT
228	3983,72	796,74	SS	278	3946,32	1434,14	TT
229	2310,56	7250,36	RR	279	2947,95	6612,97	SS
230	717,07	5656,88	RR	280	1354,46	5019,48	SS
231	7011,34	4063,39	TR	281	6692,64	3426	RS
232	5417,85	2549,58	TT	282	5099,16	2868,28	RR
233	3824,37	956,09	TT	283	3505,67	1274,79	RR
234	2469,9	7091,02	SS	284	3107,3	6453,62	TT
235	876,42	5497,53	SS	285	1513,81	4860,13	TT
236	7170,69	3904,04	RS	286	6533,3	3266,65	ST
237	5577,2	2390,23	RR	287	4939,81	3027,62	SS
238	3983,72	796,74	RR	288	3346,32	1434,14	SS
239	2629,25	6931,67	TT	289	2947,95	6612,97	RR
240	1035,77	5338,18	TT	290	1354,46	5019,48	RR
241	7011,34	3744,69	ST	291	7967,43	3426	TR

Tabla 2. (Continuación).

242	5417,85	2549,58	SS	292	6373,95	3186,97	TT
243	3424,37	956,09	SS	293	7480,46	1593,49	TT
244	2469,9	7091,02	RR	294	3107,3	6453,42	SS
245	876,42	5497,53	RR	295	1513,81	4860,13	SS
246	6851,99	3904,04	TR	296	6533,3	3266,65	RS
247	5258,51	2708,93	TT	297	4939,81	3027,62	RR
248	3665,02	1115,44	TT	298	3346,32	1434,14	RR
249	2629,25	6931,67	SS	299	1673,16	7887,76	TT
250	1035,77	5338,18	SS	300	79,67	6294,27	TT

Tomada de: documentos de prueba de Salvajina

1.3.3 Sistema de aislamiento del devanado.

El sistema de aislamiento del devanado del estator contiene varios componentes y características diferentes, que en conjunto se encargan de garantizar que:

- No se presente cortocircuito en los circuitos eléctricos del generador.
- Exista una buena transferencia de calor desde el conductor hasta el núcleo, que en este caso actuaría como un disipador de calor.
- Que los conductores no vibren a causa de las fuerzas magnéticas.

Los principales componentes que conforman el sistema aislante en un generador son:

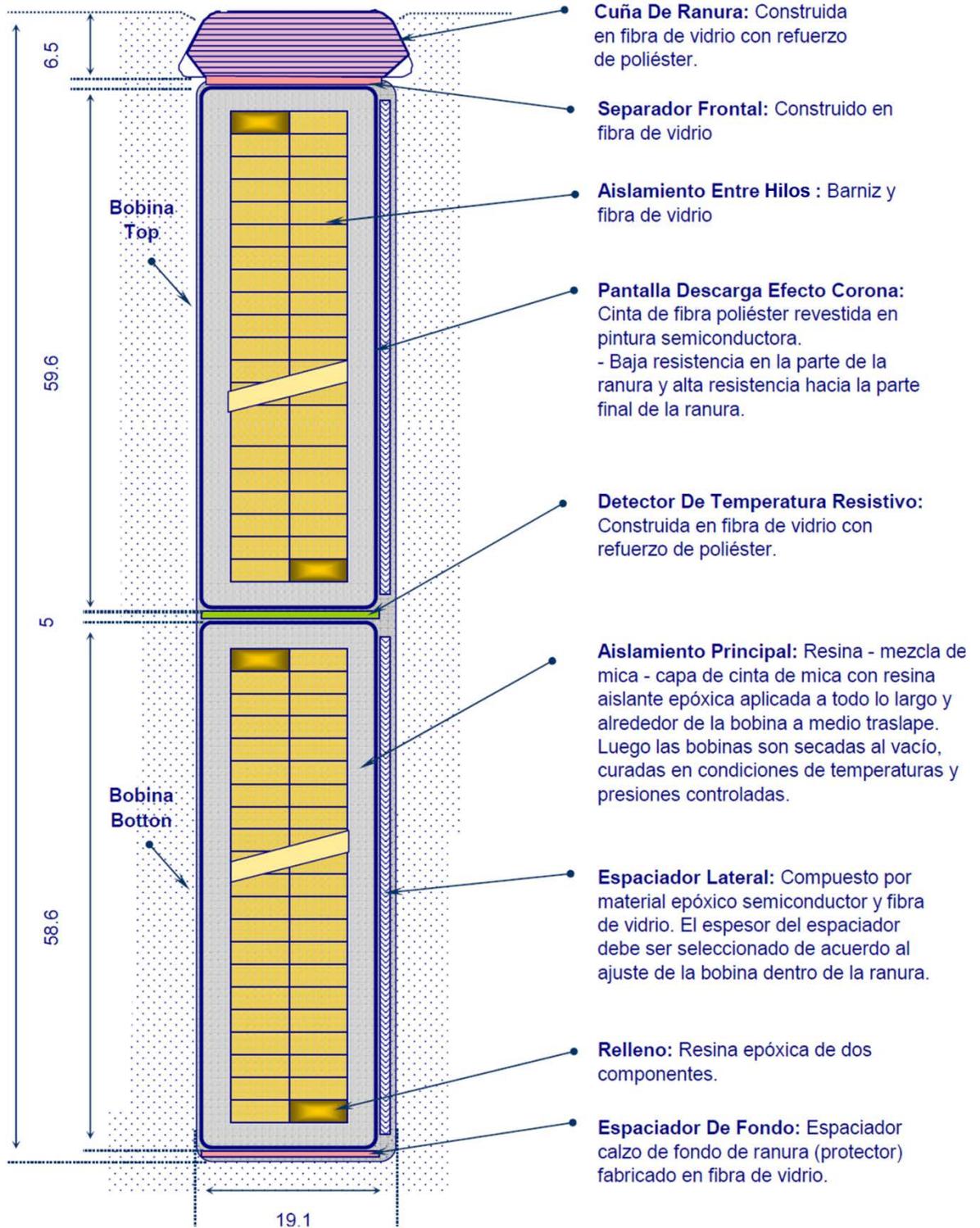
- Aislamiento entre hilos o Strands.
- Aislamiento entre espira.
- Aislamiento a tierra.

La principal función de un sistema de aislamiento es separar los componentes que se encuentran a diferentes potenciales o pertenecen a diferentes circuitos. Además mejoran la resistencia de la estructura del bobinado, actúa como un conductor de calor entre el bobinado y el entorno y protege al bobinado de factores externos como la suciedad y los productos químicos.

En la Figura 16 se muestra el sistema aislante actual del devanado del generador de la central Hidroeléctrica de Salvajina, el cual se compone de bobinas de una sola vuelta con hilos transpuestos por el método Roebel. El sistema aislante original es parecido al actual con diferencia en los materiales usados, ya que el devanado moderno se fabricó con aislamientos clase F y el devanado original contaba con aislamiento clase B de acuerdo al estándar ANSI/NEMA 1-2011.

A continuación se describe la función de cada elemento del sistema de aislamiento, así como sus esfuerzos mecánicos, térmicos, eléctricos y ambientales.

Figura 16. Detalles del sistema de aislamiento en el devanado del estator de los generadores de Salvajina.



Tomado de [34].

1.3.3.1 Aislamiento entre hilos.

Las razones eléctricas de hacer una barra con varios hilos, como se explicó anteriormente, requiere aislarlos entre ellos. El voltaje a través de los hilos es de unas pocas decenas de voltios; por lo tanto el aislamiento entre estos hilos puede ser muy delgado. Este aislamiento suele estar sujeto a daños durante el proceso de fabricación, por tal motivo es importante que tenga buenas propiedades mecánicas. Además, el aislamiento debe tener buenas propiedades térmicas, ya que están expuestos directamente al conductor, en el cual se generan las pérdidas I^2R lo que provoca que este aislamiento esté expuesto a las mayores temperaturas del estator. Así no se presenten cortos entre hilos en un devanado nuevo, estos pueden ocurrir durante su funcionamiento debido al envejecimiento que se presenta en el aislamiento. Algunos cortocircuitos entre hilos no causarían fallos en el devanado, pero si aumentarían las pérdidas y causarían aumentos locales de temperatura debido a las corrientes circulantes [3].

1.3.3.2 Aislamiento a tierra (aislamiento principal).

Es el componente que separa los conductores de cobre del núcleo del estator a tierra. Un fallo en este aislamiento normalmente desencadena un disparo del relé de falla a tierra del estator, lo que hace que el generador quede fuera de funcionamiento, por tal motivo este aislamiento es crítico para la máquina.

Si el fallo se produce cerca del neutro, muchos tipos de relé no detectarían la falla a tierra. Esto permite que exista una circulación de corriente desde el devanado hasta el núcleo del estator, lo que puede causar daños en el núcleo [3].

Para garantizar una vida útil larga al generador, el aislamiento a tierra debe funcionar correctamente. Para esto debe cumplir estrictamente los esfuerzos eléctricos, térmicos y mecánicos al cual estará sujeto, y para el cual está diseñado. A continuación se explica lo que se debe tener en cuenta para el diseño eléctrico, térmico y mecánico que debe tener el aislamiento a tierra.

1.3.3.2.1 *Diseño eléctrico del aislamiento a tierra.*

Las bobinas o barras conectadas al final del devanado estarán a tensión nominal de fase-tierra. Para el caso del generador de Salvajina, cuyo voltaje fase-fase es 13.8kV tendrá un máximo de 8kV entre los conductores de cobre y el núcleo del estator a tierra. Este voltaje alto requiere de un aislamiento a tierra de alto espesor, sin embargo esta tensión solo se encuentra en las barras que están conectadas a los terminales de fase; mientras que las barras conectas al neutro, prácticamente no presentan ningún voltaje a tierra durante el funcionamiento normal del generador. A pesar de esto, todas las máquinas están diseñadas para tener el mismo espesor de aislamiento en todas las bobinas.

Si se decidiera variar el espesor del aislamiento de acuerdo al nivel de tensión al cual va a estar expuesto, las ranuras del estator deberían ser de diferentes tamaños y podrían surgir problemas cuando una barra conectada al neutro quede en la parte superior de una barra de fin de fase. Es simplemente más fácil hacer todas las ranuras del mismo tamaño. Una ventaja de este diseño es, que al tener todas las bobinas el mismo espesor del aislamiento, se podrían cambiar las conexiones para invertir la línea con el neutro, lo cual puede extender la vida útil del devanado [3].

1.3.3.2.2 *Diseño térmico del aislamiento a tierra.*

El aislamiento a tierra del generador, es el componente principal para transmitir el calor de los conductores del devanado al núcleo, que en el caso de las máquinas rotativas actúa como disipador de calor. Por tal motivo el aislamiento a tierra debe tener una resistencia térmica muy baja, para evitar las altas temperaturas en el cobre.

Para lograr una baja resistencia térmica se requieren materiales con una alta conductividad térmica, y el aislamiento debe estar libre de burbujas de aire porque estos vacíos bloquean el flujo de calor.

Por lo tanto el aislamiento a tierra debe ser capaz de funcionar a altas temperaturas y debe ser fabricado de tal manera que se minimicen las formaciones de burbujas de aire en su interior [3].

1.3.3.2.3 *Diseño mecánico del aislamiento a tierra.*

Existen grandes fuerzas magnéticas que actúan sobre los conductores de cobre. Estas fuerzas magnéticas resultan principalmente de los dos campos generados por las corrientes que circulan en las barras *Top* y *Bottom* en cada ranura. Dichos campos interactúan entre ellos, ejerciendo una fuerza que hace que los conductores individuales de la bobina vibren principalmente hacia arriba y abajo en la ranura. La fuerza F en *Newton por metro (N/m)* que actúa sobre la bobina *Top* en dirección radial a una frecuencia de 120Hz para una corriente de 60Hz de una bobina de 1 metro de longitud viene dada por la Ecuación 1 [3].

$$F = \frac{KI^2}{d} \quad kN/m \quad \text{Ecuación 1.}$$

Donde I es la corriente eficaz a través de la barra, también se puede expresar cómo $I = nI_o$, de aquí I_o es la corriente eficaz de cada vuelta de la bobina, n es número de vueltas que componen la bobina; d es el ancho de la ranura del estator dado en metros y k es 0.96.

La corriente en la barra del estator está dada por la Ecuación 2 [3].

$$I = A \sin(\omega t) \quad \text{Ecuación 2.}$$

Donde A es la magnitud máxima de la corriente eficaz, ω es la frecuencia angular del sistema, la cual se puede expresar como $2\pi f$, f es la frecuencia del sistema (60Hz) y t es el tiempo, reemplazando la Ecuación 2 en la Ecuación 1, se obtiene la Ecuación 3 [3].

$$F = \frac{KA^2(1-\cos(2\omega t))}{2d} \quad kN/m \quad \text{Ecuación 3.}$$

Por lo tanto, existe una fuerza neta en la parte inferior de la ranura. Esta es una fuerza "DC" oscilante de dos veces la frecuencia del sistema, es decir 120Hz en la dirección circunferencial causada por la interacción del campo magnético del rotor con la corriente de la barra del estator. Esta fuerza circunferencial representa aproximadamente el 10% de la fuerza radial [3].

El aislamiento a tierra también debe ayudar a evitar que los conductores de cobre vibren en respuesta a las fuerzas magnéticas. Si el material aislante presenta burbujas de aire, estas podrían dejar vibrar a los conductores. Esto haría que los conductores se golpeen contra el aislamiento restante, de igual forma permitiría que los hilos de cobre se chocasen entre ellos; lo que lleva a la abrasión del aislamiento.

1.3.3.3 Cuñas del estator.

El principal propósito de las cuñas del estator es mecánico, su función es asegurar la barra de cobre en la ranura del estator en dirección radial. Estas cuñas deben tener una resistencia mecánica excepcional, así como la capacidad para mantener sus propiedades físicas y eléctricas en condiciones de alta temperatura.

En el caso del generador de la central hidroeléctrica de Salvajina, a lo largo de la ranura se colocan 10 cuñas, las cuales se dividen en seis estilos diferentes.

El sistema de acuñado del generador de la Central Hidroeléctrica Salvajina es convencional. El método convencional de asegurar las bobinas del estator fijamente en la ranura, es por medio de una pieza de acuñado, rellenos superiores y espaciadores laterales. El espesor de los rellenos exteriores se selecciona para que la bobina del estator quede apretada en la ranura y se hace a juicio de los trabajadores en base a su experiencia. Las desventajas del sistema de acuñado convencional son:

- Si la bobina del estator se afloja luego de un largo tiempo de operación, esta no quedará bien ajustada en la ranura y comenzará a vibrar debido a la fuerza electromagnética.
- Los ajustes de las bobinas en el estator son diferentes entre sí en el proceso de montaje debido a que la habilidad y experiencia de los trabajadores son diferentes.

En la Figura 17 se muestra el sistema de acuñado convencional que tiene el bobinado del estator del generador de Salvajina. Adicionalmente en la Figura 18 se muestra la ubicación de las cuñas a lo largo de la ranura y en las Figura 19 a Figura 24, se muestran las diferentes cuñas que se muestran en la Figura 18.

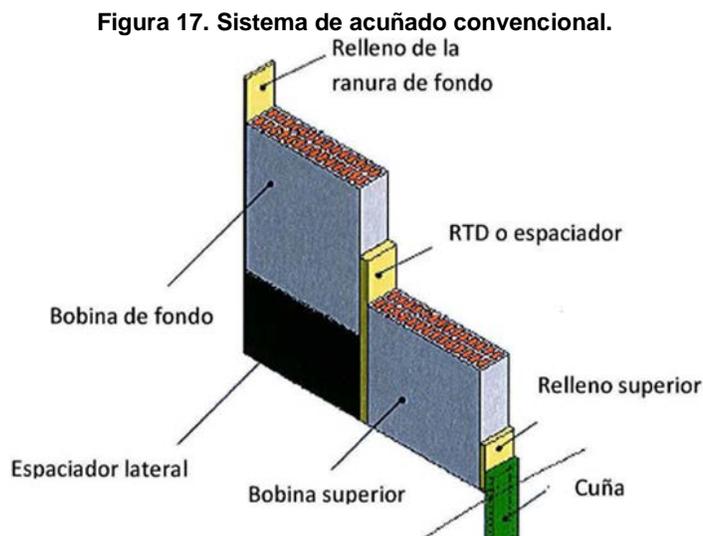
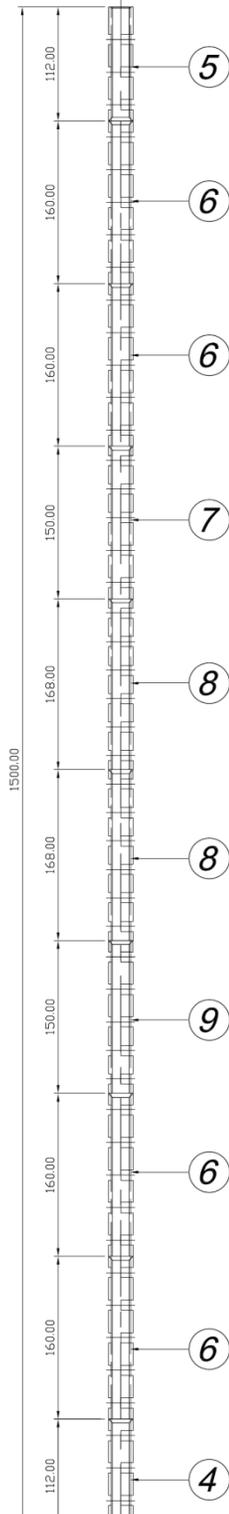
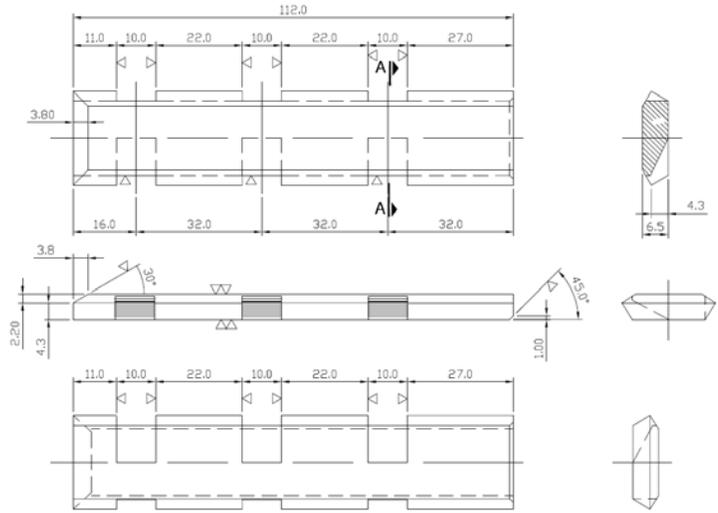


Figura 18. Posición de las cuñas en montaje.



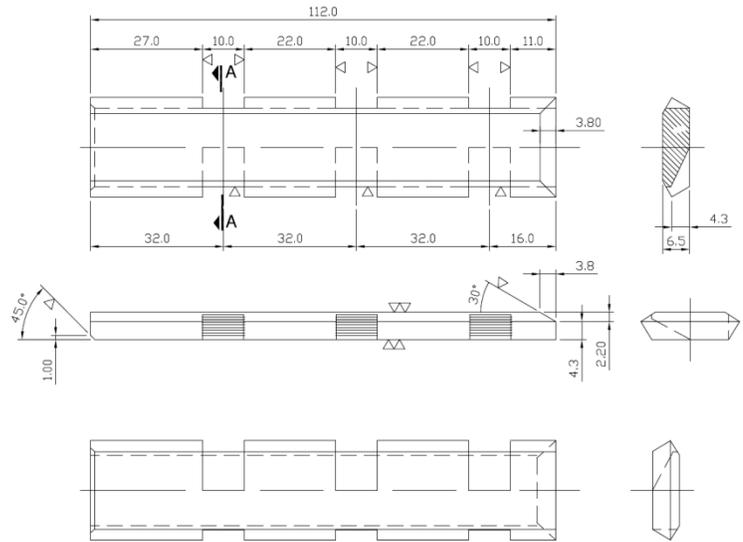
Tomado de [35].

Figura 19. Cuña No. 4 del núcleo del estator.



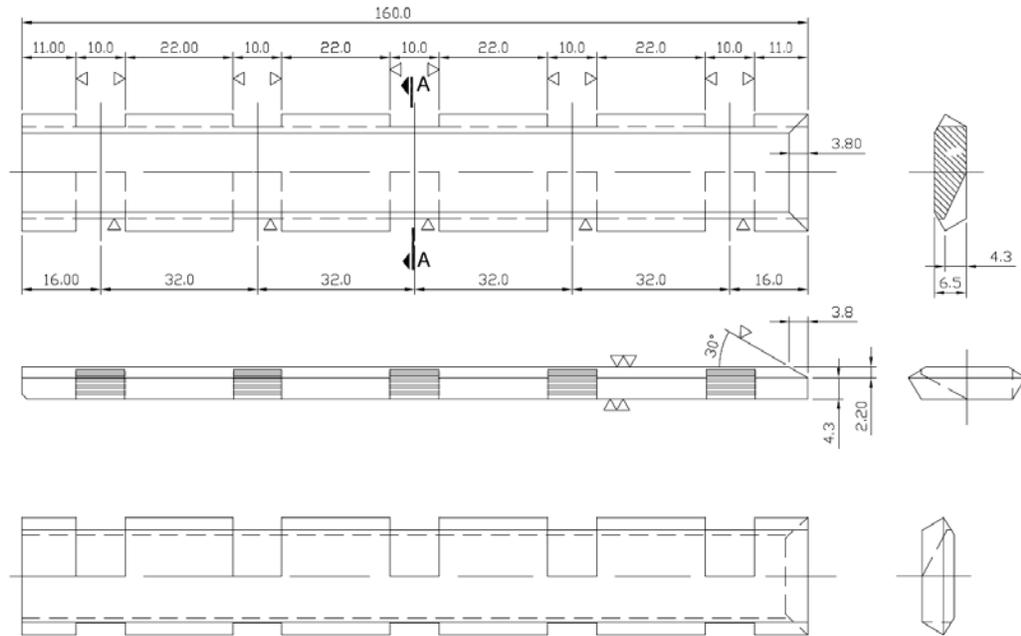
Tomado de [35].

Figura 20. Cuña No. 5 del núcleo del estator.



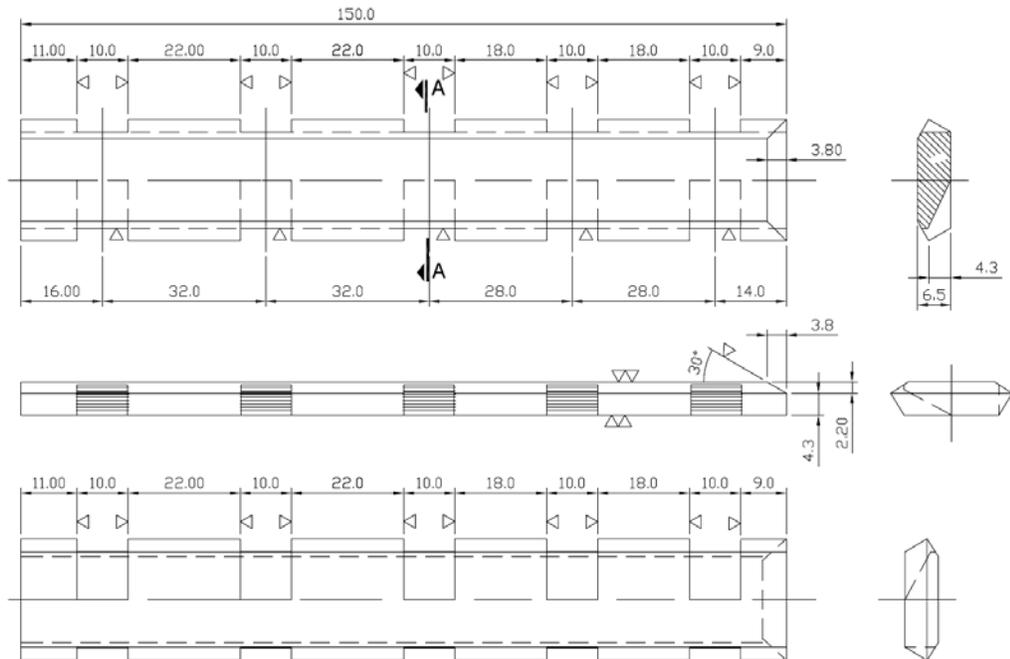
Tomado de [35].

Figura 21. Cuña No. 6 del núcleo del estator.



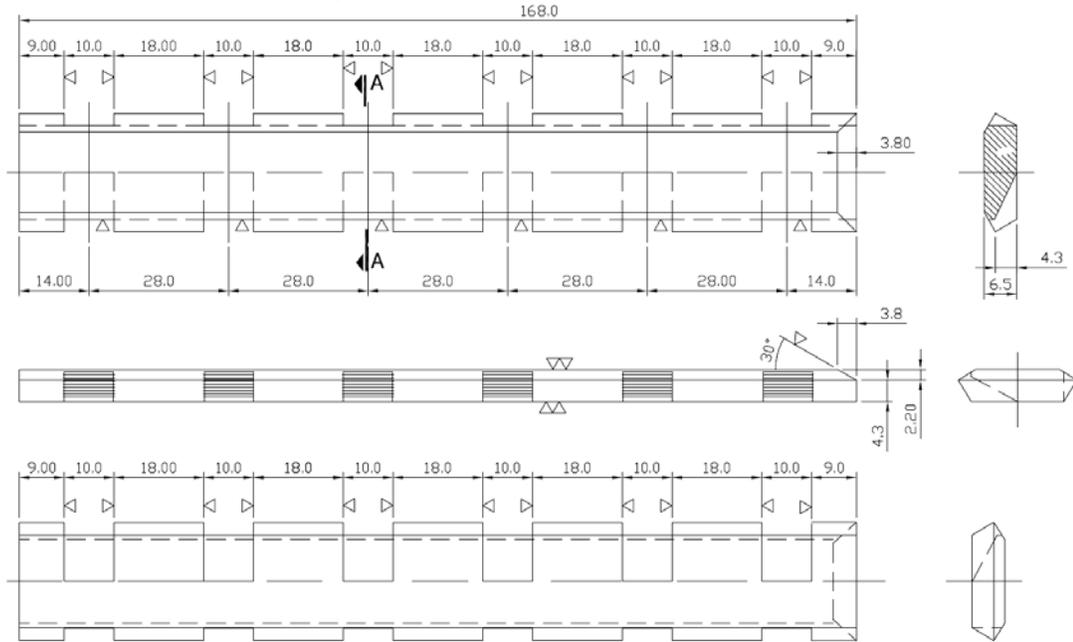
Tomado de [35].

Figura 22. Cuña No. 7 del núcleo del estator.



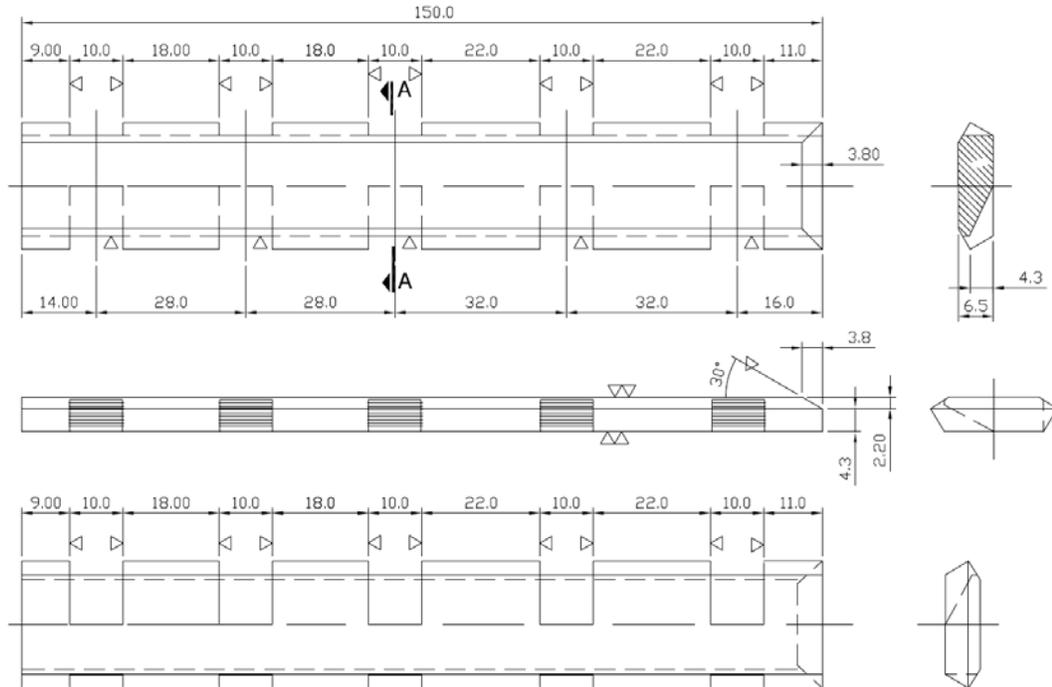
Tomado de [35].

Figura 23. Cuña No. 8 del núcleo del estator.



Tomado de [35].

Figura 24. Cuña No. 9 del núcleo del estator.



Tomado de [35].

1.4 Antecedentes.

El aislamiento sólido de las barras del devanado del estator de los generadores de la Central Hidroeléctrica Salvajina ha presentado un envejecimiento acelerado que ha ocasionado fallos a tierra (derivaciones a masa) del devanado del estator. Debido a lo anterior se ha reemplazado la capa semiconductora de las barras antes de que se cumpla el período de expectativa de vida normal para los devanados de alta tensión. Las mediciones de descargas parciales y de los niveles de ozono han corroborado el continuo envejecimiento acelerado [42].

En abril de 2002 se realizaron medidas de descargas parciales en los tres generadores, el estudio se puede resumir en:

Generador 1 Fase R.....Degradación de tipo superficial.
Generador 2 Fase S.....Degradación de tipo superficial, más fuerte que en el Grupo 1.
Generador 3 Fase R.....Delaminación interna del aislamiento principal.
Generador 3 Fase S.....Degradación de tipo superficial.

Posteriormente en la inspección visual del Generador 2 realizada en septiembre de 2003, se detectó un alto nivel de descargas parciales en la región de la salida de la ranura [42].

Como medida preventiva se reparó la cinta semiconductora de las bobinas, esto ha permitido extender la vida útil del devanado [42].

La empresa fabricante de los generadores estima que la causa de las fallas a tierra se inicia con la pérdida de fijación de las barras de fondo de ranura, debido a las vibraciones electromagnéticas. Luego se presenta la pérdida de la capa semiconductora y erosión del aislamiento principal de la barra hasta que ocurre la ruptura dieléctrica del aislamiento principal [42].

En abril de 2009 después de una falla a tierra en el estator del generador del grupo 2 se realizó el ensayo “EL CID” no evidenciando problemas en el núcleo del estator.

1.4.1 Datos Operativos.

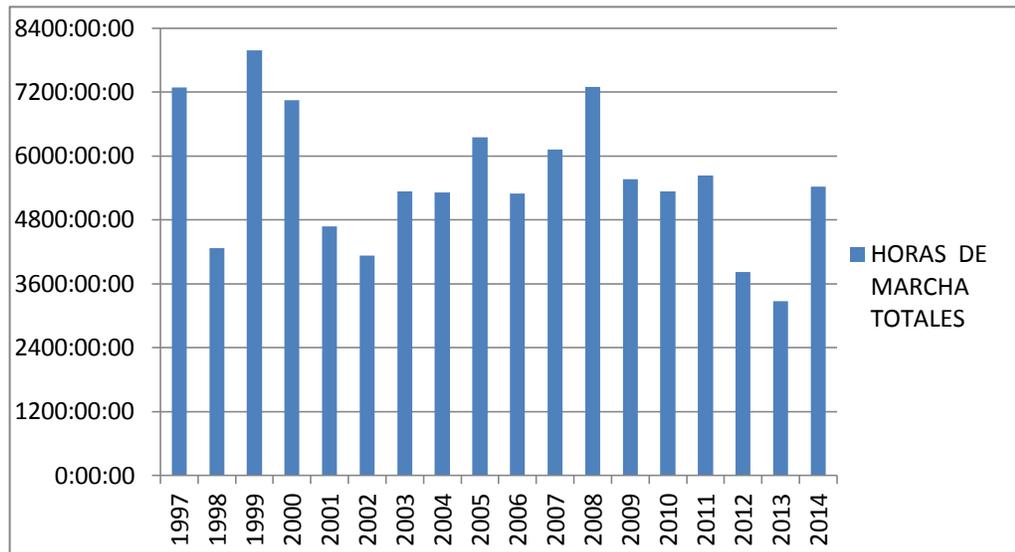
A continuación se describirán los datos históricos de operación antes del cambio de devanado de la unidad de generación 2 de la Central Hidroeléctrica Salvajina [42].

1.4.1.1 Horas de operación.

Hasta septiembre del año 2013 antes del cambio de devanado, el generador completó 171959:31:00 horas de operación. Para octubre del año 2014 el generador tiene un acumulado de 177454:50:00 horas de operación, lo que indica que el generador ha trabajado 5495:19:00 horas desde el cambio del devanado hasta la fecha indicada [42].

En la Figura 25 se muestra el comportamiento de las horas de marcha totales por año de la unidad de generación 2 de la Central Hidroeléctrica Salvajina. El dato del año 2014 se basa en las horas trabajadas hasta octubre del mismo año, se aprecia en la figura una tendencia de aumento de horas de operación después del cambio del devanado [42].

Figura 25. Horas de marcha totales por año.



1.4.1.2 Número de arranques.

Hasta octubre del año 2014 el generador ha tenido un total de 6977 arranques.

1.4.1.3 Disponibilidad histórica.

La disponibilidad de la unidad de generación 2 de la Central Hidroeléctrica Salvajina desde el año 1997 hasta el 2014 ha sido del 94.17%. En la Figura 26 se muestra el número de salidas de línea por razones diferentes a despacho, en la Figura 27 se muestra el número de horas que estuvo parado el generador debido a las salidas mostradas en la Figura 26. En la Figura 27 se evidencia que el año 2014 presenta el menor número de horas, en los últimos 14 años, que el generador estuvo parado por razones diferentes al despacho [42].

Figura 26. Salidas de línea de la unidad 2.

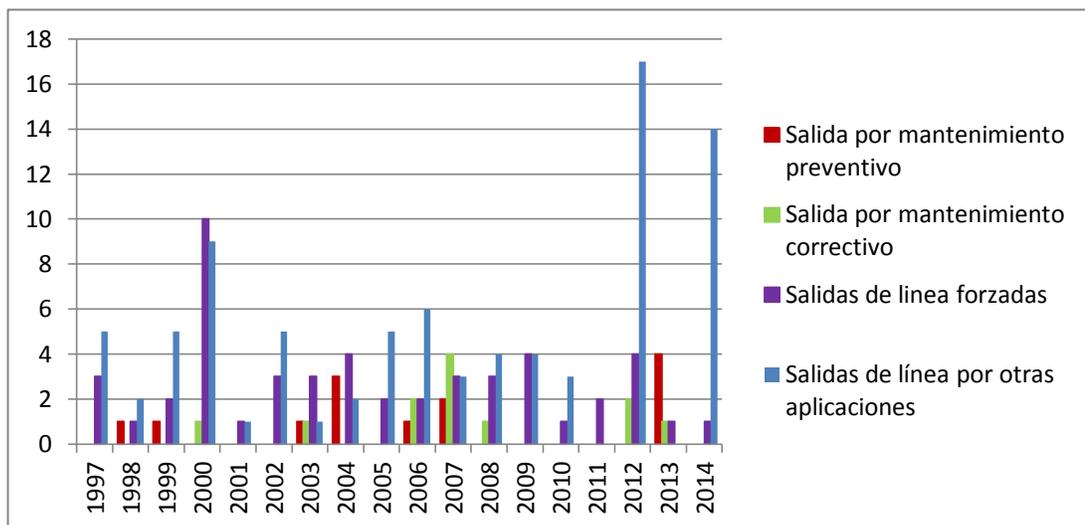
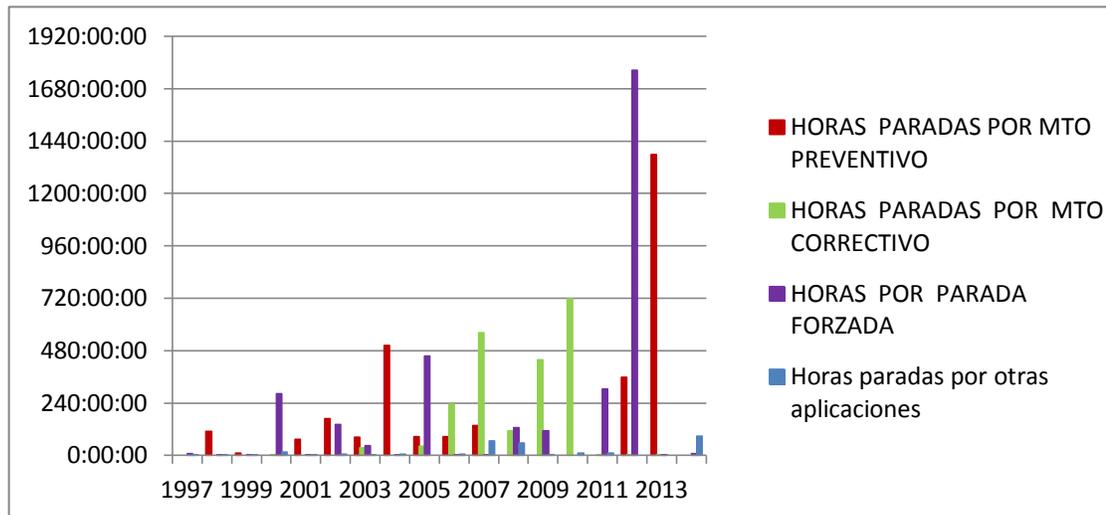


Figura 27. Horas paradas de la unidad 2.



1.4.1.4 Generación acumulada.

La generación acumulada de la unidad 2 de generación desde la puesta en servicio hasta junio de 2014 es de 11071115.4GW/h lo que representa el 38.4% de la generación total de la Central Hidroeléctrica Salvajina en el mismo laxo de tiempo [42].

1.4.1.5 Cambio de cinta semiconductora.

El cambio de la cinta semiconductora de la unidad 2 se realizó el 29 de abril de 1991, el ozono registrado antes del cambio fue de 0.55ppm y el ozono registrado después del cambio fue de 0.01ppm [42].

1.4.1.6 Histórico de fallas a tierra del estator.

El estator de la unidad de generación No. 2 presentó un total de 7 fallas a tierra. En las Tabla 3 a Tabla 9 se describen las fallas registradas, así como las barras que fueron cambiadas a causa de estas fallas, y los datos registrados en el momento de la ocurrencia [42].

Tabla 3. Primer falla a tierra U-2.

Primer Falla - Fecha: Mayo 22 de 2005.				Bobina Aterrizada: BOTTOM Ranura 141.			
Condición de operación del grupo al momento de la falla.							
Carga (Mw)	Carga (Mvar)	Tensión (kV)	Corriente (A)	Horas. Marcha Acumuladas	Horas. Marcha Después Ultimo Mantenimiento	Horas. Marcha Después Cambio Aislamiento	Lectura Ozono (al fallo)
80	27	14.2	3600	125900:32	1087:57	91783:04	0.7
Observaciones: Falla a tierra en la ranura141 barra Bottom de la fase "T". La tensión de la barra es de 7967.43 Volts. Tiempo de indisponibilidad: 9 días.							
Bobinas Cambiadas: Una Bottom fallada (Se retiran y cambian 16 bobinas Top asociadas a la Bottom) y 5 Top adicionales, las 159 – 169 – 299 – 19 -9							

Tabla 4. Segunda falla a tierra U-2.

Segunda Falla - Fecha: Junio 15 de 2005.				Bobina Aterrizada: BOTTOM Ranura 151.			
Condición de operación del grupo al momento de la falla.							
Carga (Mw)	Carga (Mvar)	Tensión (kV)	Corriente (A)	Horas. Marcha Acumuladas	Horas. Marcha Después Ultimo Mantenimiento	Horas. Marcha Después Cambio Aislamiento	Lectura Ozono (al fallo)
80	-1	14.0	3500	126353:44	1540:24	92236:16	0.7
<p>Observaciones: Falla a tierra en la ranura 151 barra Bottom de la fase "S". La tensión de la barra es de 7967.43 Volts. Tiempo de indisponibilidad: 6 días. (131:14 horas) Bobinas Cambiadas: Una Botttom fallada (Se retiran y cambian 16 bobinas Top asociadas a la Bottom)</p>							

Tabla 5. Tercer falla a tierra U-2.

Tercer Falla - Fecha: Agosto 04 de 2007.				Bobina Aterrizada: BOTTOM Ranura 236.			
Condición de operación del grupo al momento de la falla.							
Carga (Mw)	Carga (Mvar)	Tensión (kV)	Corriente (A)	Horas. Marcha Acumuladas	Horas. Marcha Después Ultimo Mantenimiento	Horas. Marcha Después Cambio Aislamiento	Lectura Ozono (al fallo)
80	5	13.4	3650	138975:26	582:38	104857:58	0.9
<p>Observaciones: Falla a tierra en la ranura 236 barra Bottom de la fase "R". La tensión de la barra es de 7170.69 Volts. Tiempo de indisponibilidad: 9 días (209:58 horas) Bobinas Cambiadas: Una Botttom fallada (Se retiran y cambian 16 bobinas Top asociadas a la Bottom)</p>							

Tabla 6. Cuarta falla a tierra U-2.

Cuarta Falla - Fecha: Septiembre 23 de 2007.				Bobina Aterrizada: BOTTOM Ranura 161.			
Condición de operación del grupo al momento de la falla.							
Carga (Mw)	Carga (Mvar)	Tensión (kV)	Corriente (A)	Horas. Marcha Acumuladas	Horas. Marcha Después Ultimo Mantenimiento	Horas. Marcha Después Cambio Aislamiento	Lectura Ozono (al fallo)
80	16	13.7	3620	139770:19	1378:01	105645:04	0.9
<p>Observaciones: Falla a tierra en la ranura 161 barra Bottom de la fase "R". La tensión de la barra es de 7967.69 Volts. Tiempo de indisponibilidad: 10 días (237:38 horas) Bobinas Cambiadas: Una Botttom fallada (Se retiran y cambian 16 bobinas Top asociadas a la Bottom) y una Top adicional, la 262.</p>							

Tabla 7. Quinta falla a tierra U-2.

Quinta Falla - Fecha: Marzo 27 de 2009.				Bobina Aterrizada: TOP Ranura 204.			
Condición de operación del grupo al momento de la falla.							
Carga (Mw)	Carga (Mvar)	Tensión (kV)	Corriente (A)	Horas. Marcha Acumuladas	Horas. Marcha Después Ultimo Mantenimiento	Horas. Marcha Después Cambio Aislamiento	Lectura Ozono (al fallo)
95	8	13.5	4280	150333:02	17205:44	116207:47	1.5
<p>Observaciones: Falla a tierra en la ranura 204 barra Top de la fase "S". La tensión de la barra es de 7409.71 Volts. Tiempo de indisponibilidad: 21 días (469:58 hrs). Se aprovechó para realizar recuñado.</p> <p>Bobinas Cambiadas: Dos Botttom adicionales, la 1 y 161 (Se retiran y cambian 32 bobinas Top asociadas a la Bottom) y cuatro Top adicionales, la 9 – 19 – 34 – 169</p>							

Tabla 8. Sexta falla a tierra U-2.

Sexta Falla - Fecha: Enero 12 de 2010.				Bobina Aterrizada: TOP Ranura 189.			
Condición de operación del grupo al momento de la falla							
Carga (Mw)	Carga (Mvar)	Tensión (kV)	Corriente (A)	Horas. Marcha Acumuladas	Horas. Marcha Después Ultimo Mantenimiento	Horas. Marcha Después Cambio Aislamiento	Lectura Ozono (al fallo)
95	5	14.0	4250	154170:35	3837:34	120045:21	1.0
<p>Observaciones: Falla a tierra en la ranura 189 barra Top de la fase "S". La tensión de la barra es de 7569.06 Volts. Tiempo de indisponibilidad: 29.9 días (716:63 hrs).</p> <p>Bobinas Cambiadas: Seis Botttom adicionales, las 11 – 171 – 176 – 177 – 181 - 161 (Se retiran y cambian 42 bobinas Top asociadas a las Bottom) y catorce Top adicionales, las 79 – 94 – 199 – 39 – 54 – 69 – 29 – 46 – 59 – 74 – 149 – 194 – 209 - 38</p>							

Tabla 9. Séptima falla a tierra U-2.

Séptima Falla - Fecha: Abril 10 de 2011.				Bobina Aterrizada: TOP Ranura 64.			
Condición de operación del grupo al momento de la falla.							
Carga (Mw)	Carga (Mvar)	Tensión (kV)	Corriente (A)	Horas. Marcha Acumuladas	Horas. Marcha Después Ultimo Mantenimiento	Horas. Marcha Después Cambio Aislamiento	Lectura Ozono (al fallo)
95	2	13.4	4350	161324:32	149:08	127199:17	0.7
<p>Observaciones: Falla a tierra en la ranura 64 barra Top de la fase "R". La tensión de la barra es de 7409.71 Volts. La falla no fue franca y se descubrió aplicando tensión AC y presentándose a los 1470 Vac. En prueba de descargas parciales se aterrizó la barra Top 274. Tiempo de Indisponibilidad: 12 días (304.67 Hrs).</p> <p>Bobinas Cambiadas: Una Top fallada, una Top fallada en la prueba de DP's la 46 y una Bottom adicional, la 291 (Se retiran y cambian 16 bobinas Top asociadas a las Bottom) y cinco Top adicionales, las 44 - 114 - 214 - 229 – 259.</p>							

Como se logra apreciar en las tablas anteriores, la indisponibilidad del generador debido a fallas a tierra tiene una tendencia de incremento, adicionalmente la cantidad de barras cambiadas por este tipo de falla ha aumentado. En total se cambiaron 183 barras en un laxo de 6 años, lo que representa el 61% de todo el devanado.

Adicional a las fallas a tierra, se ha detectado alta presencia de descargas parciales y aumento de ozono, así como el incremento del factor de potencia del aislamiento del devanado del generador evidenciando su deterioro. Los resultados de las pruebas donde se evidencia lo anterior se muestran con más detalle en el capítulo 3.

Por este motivo EPSA ESP quiere dar una solución directa a la degradación del devanado debido al alto esfuerzo dieléctrico (kV/mm) que origina un alto nivel de descargas parciales superficiales, para esto se decide realizar el cambio completo del devanado estático a partir de septiembre del año 2012.

2. PRUEBAS Y DIAGNOSTICO DEL NÚCLEO ESTATÓRICO.

En este capítulo se describen las diferentes pruebas que se realizan al estator para establecer un diagnóstico de su estado, de igual forma se muestran los resultados de las pruebas que se hicieron en la unidad 2 de generación de la Central Hidroeléctrica Salvajina.

A continuación se explica el procedimiento para realizar la inspección visual del núcleo y los ensayos electromagnéticos para encontrar imperfecciones en el aislamiento interlaminar. Las pruebas de inspección y electromagnéticas que se describirán a continuación y que se recomiendan realizar para el diagnóstico son:

- Inspección Visual. Prueba de inspección.
- Prueba HFRT (High Flux Ring Test). Prueba electromagnética.
- Prueba EL-CID Prueba electromagnética.
- Core Loop Test o prueba del toroide: Prueba electromagnética.

No es necesario realizar todas las pruebas electromagnéticas ya que su objetivo es el mismo, lo recomendado es realizar una de las pruebas a flujo nominal (HFRT o Core Loop test) y la prueba EL-CID, porque con las pruebas a flujo nominal se puede ver el comportamiento térmico del estator en condición de funcionamiento y así localizar la zona en falla, mientras que el CID permite localizar el punto en falla de forma más precisa. Sin embargo algunos expertos sugieren realizar solamente una prueba a flujo nominal.

2.1 Inspección Visual.

La inspección visual se realiza con el rotor extraído, esta puede hacerse de forma detallada examinando muchos de los elementos del estator, o puede realizarse de forma general y más rápida analizando los principales elementos. Una inspección “rápida” suele ser suficiente para realizar un diagnóstico aceptable, si no se sospecha de algún problema grave o leve en el estator, sin embargo cuando se sospecha de problemas notorias en el núcleo o inconvenientes ocasionados por problemas en el estator, como lo son vibraciones, objetos sueltos, etc. Se recomienda realizar una inspección detallada. En el Anexo A.1.1 se encuentran formatos guía para la realización de la inspección visual.

2.1.1 Objetivos de la inspección visual.

- Detectar imperfecciones en el núcleo que puedan ocasionar problemas de sobrecalentamiento durante la operación de la máquina.
- Detectar señales que indiquen posibles fallas como vibración, bobinas sueltas, etc.

2.1.2 Procedimiento de la inspección visual.

A continuación se describirán los elementos y las anomalías del estator que deben ser inspeccionados y qué características buscar en estos para un completo y profundo diagnóstico del estator.

2.1.2.1 Laminaciones del núcleo.

La inspección se realiza con el objetivo de detectar fallas en el aislamiento interlaminar del núcleo, las cuales pueden conducir a un fallo completo de la máquina. Este tipo de falla se presenta por primera vez como un oscurecimiento localizado del aislamiento, pintura, y barniz en una zona del interior del estator.

El fallo en el aislamiento interlaminar suele ser resultado de daños mecánicos ocasionados durante el montaje y desmontaje de elementos, objetos extraños en los ductos de ventilación o arcos eléctricos ocasionados por una falla en el devanado.

Durante la inspección se debe verificar si hay láminas flojas, buscar laminaciones centrales sueltas en el lado del entrehierro del núcleo principalmente en los extremos frontales, señales de vibración, erosión del aislamiento, laminaciones en corto y señales de calefacción. Los depósitos de polvo de óxido de hierro son una indicación de núcleo o cuñas sueltas [6].

En algunos casos las láminas se doblan durante la extracción de las bobinas como se muestra en la Figura 28. Si esto ocurre no se deben dejar dobladas porque se pueden producir cortos interlaminares, por lo tanto las láminas deben enderezarse con cuidado y cubrir las con barniz para que queden aisladas. Para un mejor resultado se deben seguir los pasos descritos en 2.6.

Figura 28. Ejemplo de láminas dobladas durante la extracción de la bobina.



Tomado de [20].

En raras ocasiones las láminas presentan un abultamiento cerca de los ductos de ventilación o en los extremos del núcleo, esto suele darse por un prensado débil del núcleo combinado con vibración de la bobina. Si no se corrige durante un overhaul (parada completa de la máquina para un mantenimiento o una reparación) las láminas se pueden seguir debilitando hasta el punto de fractura, además de producir sobrecalentamiento en el núcleo.

2.1.2.2 Orificios del estator.

Se entiende como orificios del estator cualquier apertura o agujero que este tenga por cuestiones de diseño, no se incluyen los ductos de ventilación del núcleo pero sí los otros ductos pertenecientes al circuito de enfriamiento. Se puede obtener información adicional sobre el estado de la máquina, inspeccionando los orificios y el marco del estator. Se debe buscar lo siguiente [20]:

- Decoloración excesiva y/o descamación de pintura en la carcasa, marco y orificios del estator, esto indica posible sobrecalentamiento resultado de sobrecarga o mala refrigeración.
- Si el generador es enfriado con hidrogeno la presencia de grandes cantidades de aceite o una mezcla de polvo con aceite, indica posibles problemas en el sellado del hidrogeno.
- Si se encuentra agua en la parte inferior de la máquina puede ser un indicativo de fuga en el intercambiador de calor.
- Grandes cantidades de polvo de hierro solo o mezclado con aceite suele ser indicativo que el núcleo está suelto.
- Tuercas, pernos, pequeñas piezas de hierro laminado u otros objetos sueltos encontrados en la máquina normalmente en la parte inferior de la carcasa, pueden ser señal de calentadores sueltos, láminas o aletas de refrigeración rotas u otras anomalías que requieran de atención necesaria.

2.1.2.3 Ductos de ventilación.

Los ductos de ventilación son los espacios que hay entre los bloques de láminas, su función es permitir la circulación del fluido refrigerante a través del devanado y de las laminaciones. Si los ductos están obstruidos se reduce la capacidad normal de la máquina provocando la aparición de puntos calientes. Este fenómeno es más notorio en hidrogenadores y otras máquinas de gran tamaño y poca velocidad.

Si la obstrucción de los ductos no es ocasionada por polvo normal sino por polvo de óxido, puede indicar que el núcleo está muy suelto.

La inspección visual se puede realizar con la ayuda de una fuente de luz frontal; si es posible se coloca la luz en la parte posterior del núcleo mientras se hace la inspección desde el interior.

Igualmente se debe verificar que los separadores localizados en los ductos no estén flojos o rotos, ya que pueden ser causantes de un núcleo flojo o de daños en el aislamiento de las bobinas o el aislamiento interlaminar en el caso que se encuentren rotos [6].

Si se sospecha de ductos obstruidos y no se ha extraído el rotor, se puede hacer la inspección con la ayuda de un boroscopio.

2.1.2.4 Depósitos de óxido de hierro.

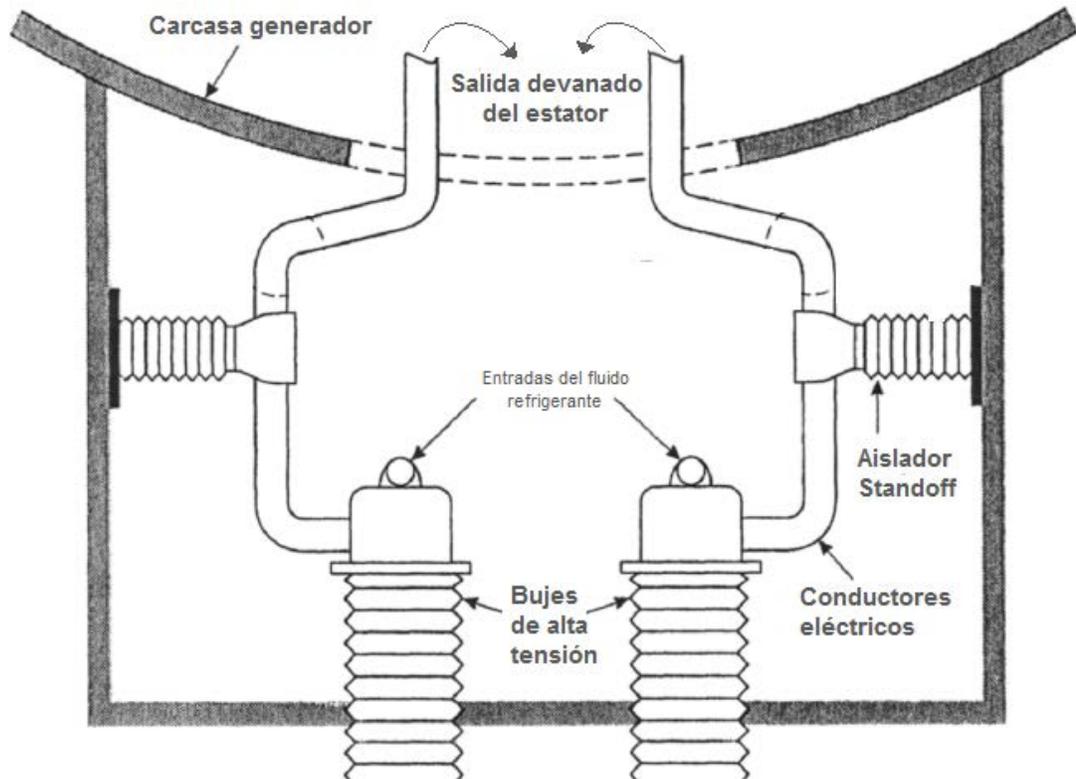
El óxido de hierro se presenta como polvo rojo, este se encuentra principalmente en los ductos de ventilación. El óxido puede quedar oculto cuando se mezcla con suciedad y aceite. Una forma de identificar rápidamente si hay o no óxido en una mezcla es someter una pequeña cantidad de la mezcla al campo de un imán, si la suciedad reacciona ante el campo es indicio de la presencia de óxido en la mezcla.

El óxido de hierro puede ser resultado de láminas y/o cuñas sueltas. Cuando existen cuñas sueltas el óxido se observa principalmente en la región de contacto entre la cuña y el hierro. En el caso de láminas sueltas el óxido se distribuye en secciones más grandes de la máquina concentrándose principalmente en los lugares adyacentes de los ductos de ventilación. En casos severos las grandes cantidades de óxido pueden obstruir estos ductos [20].

2.1.2.5 Bujes de alta tensión del devanado estatórico.

Los bujes de alta tensión son los que sostienen las barras a la salida del generador. Técnicamente no son bujes para alta tensión debido a que el voltaje de salida de los generadores es de media tensión, pero reciben este nombre debido a que soportan la tensión más alta que se presenta dentro del generador. Algunas veces no se utilizan bujes sino barras pasa-tapa que cumplen el mismo objetivo. En la Figura 29 se muestra un ejemplo del corte transversal de la posición de los bujes a la salida del generador.

Figura 29. Corte transversal de la salida de un generador que tiene bujes de alta tensión y aisladores Standoff.



Tomado de [20].

Los bujes o los pasa-tapas son susceptibles a daños derivados de cambios de carga bruscos, vibración excesiva, sobrecalentamiento de los cables y vibración normal durante largos periodos de tiempo. Los bujes de alta tensión del estator deben ser inspeccionados en busca de grietas, fugas de aceite y aflojamiento de sus componentes [20].

2.1.2.6 Ductos de ventilación en los bujes.

En algunos casos los bujes de alta tensión tienen ductos construidos en su interior para permitir la circulación de aire para ventilación. Es importante verificar que los ductos no estén obstruidos, en caso tal que estos se encuentren obstruidos o semi-obstruidos se pueden limpiar con la ayuda de un tubo Venturi [20].

2.1.2.7 Aisladores Stand-off.

Estos son aisladores que sirven como soporte de las barras, normalmente se encuentran donde las barras se conectan para formar la Y del bobinado y en algunos casos se utilizan para sostener las barras en la salida del generador como se muestra en la Figura 29. Los aisladores pueden ser de diversos materiales, y suelen ser como los mostrados en la Figura 30.

Figura 30. Aisladores Stand-off.



Tomado de [36]a.

Al igual que los bujes, los aisladores Stand-off están sometidos a fuerzas continuas debido a la vibración, a la expansión y contracción de los conductores. La inspección de estos aisladores debe hacerse en busca de grietas y componentes flojos. La superficie externa debe permanecer limpia para evitar caminos que puedan generar cortocircuitos a tierra [20].

2.1.2.8 Pernos de sujeción del núcleo.

En grandes máquinas el núcleo suele estar comprimido por medio de grandes pernos. Estos deben estar apretados con la presión sugerida por el fabricante, normalmente tienen una presión de 150 psi [20].

La presencia de grasa o polvo rojo sugiere que el perno se ha aflojado, por lo tanto debe ser apretado de nuevo al valor especificado por el fabricante, si no se conserva la presión sugerida se podrían generar daños en el núcleo o en el aislamiento [20].

2.1.2.9 Resistencias de calefacción.

Normalmente las grandes máquinas rotativas poseen resistencias instaladas para calefacción, suelen estar a los lados de la carcasa en la parte de las cabezas de bobina. Estas resistencias son utilizadas para mantener la humedad fuera de la máquina cuando está parada, por tal motivo es importante mantener los calentadores en buenas condiciones [20].

Durante la inspección se debe comprobar que no existan conexiones sueltas y comprobar el estado de los cables y los elementos de calefacción. En caso que no se tenga acceso visual, se puede hacer una prueba de resistencia desde la caja de terminales para determinar la continuidad del circuito [20].

2.1.2.10 Pernos de apoyo de los ventiladores y deflectores de aire.

La mayoría de las grandes máquinas tienen deflectores para dirigir el aire desde y hacia los ventiladores. Los deflectores son sometidos a distintas y diversas vibraciones, por esto es importante buscar fisuras en los deflectores, ya que si las presentan se podrían ocasionar graves daños en los bobinados o elementos giratorios, principalmente las aspas del ventilador durante el funcionamiento de la máquina [20].

2.1.2.11 Intercambiadores de calor.

Debido al flujo continuo del agua, esta tiende a obstruir los conductos con la corrosión y depósito de minerales. Una vez comenzado el proceso de obstrucción este avanza a un ritmo mayor y no solo se ve reducido el flujo del agua refrigerante, sino también los coeficientes de transferencia de calor se ven alterados debido a la acumulación de minerales en el interior del tubo. Por este motivo es importante hacer una inspección visual y tomar las acciones correctivas necesarias. Los principales signos de preocupación en los intercambiadores son: tubos de agua obstruidos y fugas de agua [20].

Los intercambiadores de calor que se encuentran dentro de la carcasa de la máquina están sometidos continuamente a vibración, por lo cual no es raro encontrar fugas durante la operación de la máquina.

Durante la inspección visual se pueden detectar las fugas al ver acumulaciones de agua al interior de la carcasa. Cuando los intercambiadores se encuentran en el interior de la máquina y estos no han sido inspeccionados durante varios años se puede realizar una prueba de presión [20].

2.1.2.12 Separadores de bobinas.

Los separadores de bobinas se utilizan para evitar el roce entre las bobinas, ya que si las bobinas se tocan, estas se rozarían al doble de la frecuencia de la red, Ver Ecuación 3. Igualmente existen diferentes contracciones y expansiones relacionadas con la temperatura, esto puede producir grandes daños y reducir la esperanza de vida del devanado. Para eliminar el movimiento de las bobinas se utilizan los separadores, normalmente estos están hechos de un material sólido y se mantiene en su lugar con la ayuda de las amarras. La condición de estas amarras determina la eficacia de los separadores.

A menudo los separadores tienden a aflojarse después de largos periodos de funcionamiento, en casos graves estos pueden caerse del devanado. El funcionamiento de la máquina con separadores flojos o ausentes reducirá la fiabilidad del bobinado.

La inspección visual del devanado se incluye la evaluación de la condición de las amarras y los separadores. Ver literal 3.1. Las señales de separadores sueltos incluyen: engrase (mezcla de polvo de abrasión o similar, con una sustancia viscosa), amarras secas, sueltas o rotas, polvo, signos de abrasión en las bobinas y partes faltantes de los separadores [20].

2.1.2.13 Amarras.

Los separadores se aseguran por medio de las amarras las cuales están hechas de fibra de vidrio, lino u otros materiales similares y se impregnan con resina para formar un lazo sólido.

Después de largos periodos de tiempo expuestos a altas temperaturas las amarras tienden a secarse y tornarse quebradizas haciendo que su estructura se deteriore, pierda volumen y se afloje permitiendo que las bobinas se muevan. Posteriormente las amarras continúan deteriorándose hasta el punto de permitir que los separadores se caigan. Es por esto que se deben inspeccionar cuidadosamente.

Amarras defectuosas pueden detectarse por depósitos de polvo, descamación u otros signos de deterioro. Si pocas amarras presentan deterioro, estas pueden ser tratadas con resina epóxica ligeramente viscosa. Pero si se encuentra un número importante de amarras en mal estado debe considerarse cambiar todas las amarras del devanado [20].

2.1.3 Resumen y principales puntos de interés de la inspección visual.

El procedimiento para realizar la inspección visual considerando los principales componentes, se puede hacer de acuerdo a la Tabla 10 [4], de esta forma se reduce el tiempo fuera de servicio de la máquina. En esta tabla se explica en detalle los lugares específicos a inspeccionar y qué anomalías se deben buscar. En la Figura 31 se indican los puntos de inspección referidos en esta tabla.

Tabla 10. Guía para la inspección visual.

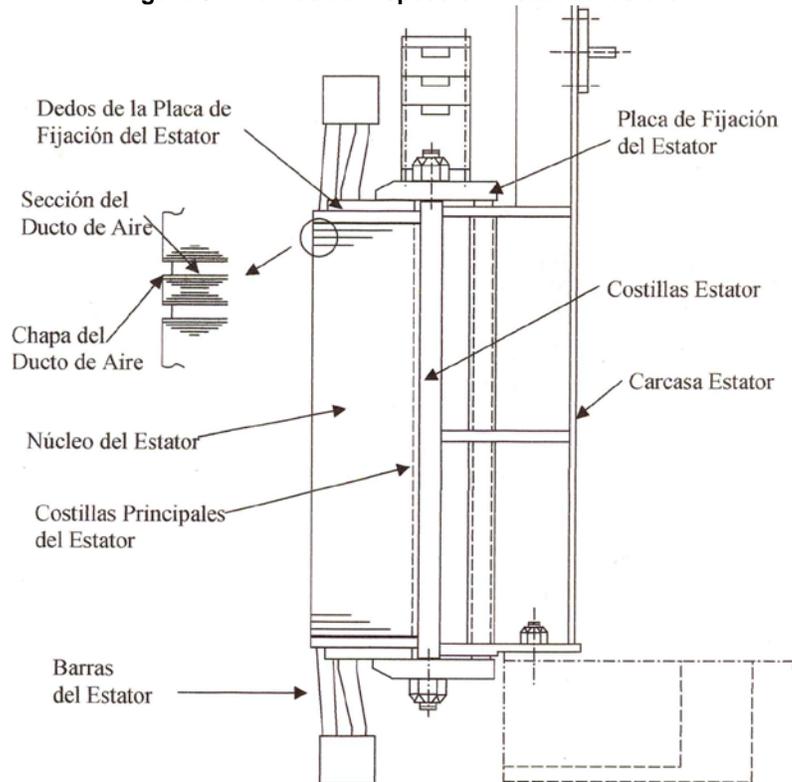
Paso.	Punto a Inspeccionar.	Anomalía.	¿Qué buscar?.	Característica.
1	Condición de la superficie del núcleo.	Óxido Rojo.	Presencia de óxido rojo en el interior y en la parte posterior de la superficie del núcleo. Calcular aproximadamente la cantidad o condición del óxido.	Normalmente el óxido proviene de la superficie del núcleo, incluyendo las divisiones de las secciones laminadas, placa y dedos de sujeción, chapa del ducto de aire y área cercana a las costillas del estator. Si se encuentran placas rojas sobre toda la superficie del núcleo, se deben tomar medidas inmediatas.
		Deformación.	Áreas de deformación de la superficie del núcleo cerca a las divisiones de los sectores del estator.	La áreas deformadas en la superficie del núcleo tienden a ocurrir cerca de las divisiones de los sectores del estator.
		Decoloración.	Presencia de ondulaciones de decoloración en todo el interior y en la parte posterior de la superficie del núcleo.	El barniz de la superficie inferior del núcleo se ha caído y se a decolorado, presentando síntomas de sobrecalentamiento. Degradación del barniz aislante.
		Ondulaciones del núcleo.	Presencia de ondulaciones del núcleo alrededor de la parte posterior.	Debido a la diferencia de temperatura entre la carcasa y el núcleo del estator, se originan esfuerzos de compresión que producen deformación en la circunferencia del núcleo y aparecen las ondulaciones en el núcleo.
		Óxido cerca de las costillas principales del estator.	Presencia de óxido rojo sobre la superficie donde las costillas principales del estator hacen contacto con la parte posterior del núcleo.	El óxido es producido en el espacio o intersticio entre las costillas principales del estator y la superficie posterior del núcleo.
2	Condición de la superficie en las divisiones del núcleo.	Óxido rojo.	Presencia de óxido sobre la superficie de la hendidura, donde el estator se divide.	Debido a la ondulación del núcleo y las fuerzas magnéticas, aparece una vibración magnética en la hendidura en el espacio entre las divisiones del estator. Estructuralmente, el óxido es difícil de encontrar, aun así, la inspección visual con espejo es requerida para el mantenimiento.
3	Dedos y placas de fijación del estator.	Óxido rojo, aflojamiento y recalentamiento.	Presencia de óxido, aflojamiento y recalentamiento cerca de los dedos en la parte superior e inferior de la placa de fijación. Desprendimiento del barniz aislante en la superficie en que los dedos tocan el núcleo.	Debido al deterioro, el barniz se desprende y el núcleo se envejece más rápido; por lo tanto la fuerza de ajuste ejercida por la placa de sujeción disminuye y aparece el óxido rojo cerca de los dedos de fijación.
4	Sección y chapa del ducto de aire.	óxido rojo, aflojamiento y recalentamiento	Presencia de óxido, la cual es producido en la sección del ducto de ventilación	Debido al deterioro, el barniz se desprende y el núcleo se envejece más rápido; por lo tanto la fuerza de ajuste ejercida por la placa de sujeción disminuye y aparece el óxido rojo cerca de los dedos de fijación
5	Costillas de laminado del estator.	Aflojamiento y fisuras y/o agrietamientos.	Presencia de aflojamiento y las fisuras o grietas por medio de la inspección visual y/o la prueba con martilleo.	Para el tipo en el que el ajuste de las láminas del núcleo son realizadas por las costillas principales del estator, se requiere una inspección especial.
6	Núcleo	Óxido rojo y aflojamiento.	Presencia de óxido y aflojamiento, por medio de la inspección visual y/ la prueba con martilleo.	Estructuralmente, cuando se desensamble el núcleo del estator, esta inspección es requerida.

Tabla 10. (Continuación).

7	Fuerza de ajuste de la placa de fijación.	Aflojamiento.	Presencia de aflojamiento por medio de una inspección especial.	En caso de que disminuya la fuerza de ajuste de la placa de fijación, es posible insertar un escoplo (una especie de cuña) entre la placa de fijación y el laminado del núcleo.
8	Carcasa del estator.	Fisuras o grietas.	Presencia o ausencia de fisuras o grietas por medio de inspección y/o pruebas no destructivas.	Deficientes pruebas o inspecciones técnicas no destructivas, cuando se soldó la carcasa del estator en el proceso del montaje.
9	Medida de la vibración magnética.	<ul style="list-style-type: none"> •Valor de la vibración magnética. •Ruido magnético después de excitar la máquina. •Ruido anormal. 	<p>Mida la vibración magnética colocando un vibro-metro en la superficie posterior del núcleo; Antes y después de excitar la máquina (Cerrar el interruptor de campo Escuchar el ruido Se debe medir la vibración antes y después de efectuar la revisión.</p>	<p>Una vez se origina la vibración magnética, esta se incrementa rápidamente, en caso de exceder la tolerancia permisible de vibración, debe realizarse medición periódica. Para medir la vibración con más precisión se debe realizar con la máquina fría y en tiempo frío.</p>

Tomado de [4].

Figura 31: Puntos de inspección visual del estator.



Tomado de [4].

2.2 Resultados de la Inspección visual al núcleo estatórico.

La inspección fue realizada por la firma IA S.A. el 2 de octubre del año 2013, se revisaron cada uno de los 49 bloques de chapas de cada ranura, en este caso solo se realizó la inspección al núcleo estatórico. Para realizar el diagnostico se buscaron ocho características específicas en estos bloques las cuales fueron:

- 1) Algunas chapas oxidadas al lado derecho de la ranura.
- 2) Algunas chapas oxidadas al lado izquierdo de la ranura.
- 3) Algunas chapas oxidadas al fondo de la ranura.
- 4) Algunas chapas oxidadas y dañadas parcialmente.
- 5) Guías de las cuñas frontales obstruidas.
- 6) Ducto de ventilación parcialmente obstruido.
- 7) Aristas de la ranura filosas, con rebabas o con protuberancias.
- 8) Residuos de resina o pintura en las ranuras.

Si un bloque presenta una o varias de estas anomalías, se registra en un cuadro especificando cual anomalía presenta escribiendo el número correspondiente a esta. En la Tabla 11 se presenta un resumen de la prueba, en esta tabla se muestra cuantas anomalías y de que clase se encontraron en cada ranura considerando ¿Cuántos bloques lo presentaba? Sin tener en cuenta específicamente cuales lo presentaba.

Tabla 11. Resultado de la inspección Visual del núcleo estatórico.

Ranura.	Problema observado.								Ranura.	Problema observado.							
	1	2	3	4	5	6	7	8		1	2	3	4	5	6	7	8
	Número de bloques que lo presentan (0-49).									Número de bloques que lo presentan (0-49).							
1	7	7	5	6		2		27	2	1	31	8		4	1		
2	1	2	25			2		28	2		11	8		5			
3			12	5	3		3	29	23	12	14	10		1	1		
4	1	1	17	9		3	1	30	1		5	10		1			
5	5		12	28		3	1	31	16		31	4		2			
6	24	5	23	19			3	32	20		22	4		1			
7	6	1	3	14			2	33	1		15	12		2			
8	26		7	7			2	34			4	1		1			
9	9	12	12	9		3	3	35	2	2	5	3					
10	3	3	8	15			3	36	2	1	4	4		8			
11	7	2		3		1	2	37			6	7		6			
12	6	5	19	10		3	1	38	49	49	49	7		5	1		
13	1	1	12	8	3		3	39	15	15	17	10		3			
14	2	3	24	10	1	2	3	40	1	1	1	4		1	1		
15	1	6	3	3			3	41	45	17	30	3		2			
16	5	17	13	2		2	3	42	1	1		4		6			
17	10	6	6	18	1	1	2	43	1		4	1		2			
18	12	8	20	30		1	1	44	4	1	1	5		1			
19	4	3	10	17	3	4	1	45	1	1	13	3		8			
20	4	3	3	5	1	1	1	46	2	1	2	5		2			
21	49	49	49	5	1		1	47	1		25	1		7			
22			7	3		1	2	48		3	3	4		4			
23	1	2	5	1		2	1	49			43	2	1	5			
24	1		8	4		1	1	50	3		2	1		4			
25	1		10	2		4		51		2	6						
26	8	1	13	2		4		52	3	1	7	3		1			

Tabla 11. (Continuación).

Ranura.	Problema observado.								Ranura.	Problema observado.							
	1	2	3	4	5	6	7	8		1	2	3	4	5	6	7	8
	Número de bloques que lo presentan (0-49).									Número de bloques que lo presentan (0-49).							
53			4	1	1				101	2	1	49		2			
54	28	8	1			8			102			36					
55			1	1					103	10		41				9	
56	3		6	2		3			104	2		49		2		3	
57			9	2		1			105	1		49				1	
58			7	4					106	1		42				1	
59		1	5	1		1			107	14		49		1		2	
60			10	2					108	2		48		2		2	
61	35	6	48		1		2		109	2		27		2		3	
62	3		37						110	6		49					
63	4	1	46				2		111	15	2	49					
64	48	13	47	10			8		112	7	7	48		2			
65	40	15	38	2					113	37		49		2		1	
66	6	2	45	1			4		114	24	5	46		2			
67	1		35		1		1		115			41		3		7	
68			46	1	1			3	116		1	34		3		6	
69	44	49	49						117	1		49		4		2	
70	1	8	44	1			1		118			40		3		1	
71	37	26	49				6	1	119	16		49		5		1	
72	7		41					5	120	1		49		3		2	
73		3	46				1	7	121			28	1	5	4	6	
74	15	41	43		2		5	2	122			39	4	2	6	1	
75	17	2	42		7		2	5	123			31	5		2	2	
76	3	2	45				11		124	2		19	9	1	11	2	
77	13		23					2	125			37	8		2	3	
78	7		42						126			27	8		10	7	
79			36			2		5	127			29	5	1	9		
80	2		44					26	128			29	11		11	1	
81	49	15	49						129			29	6		11	1	
82	22	2	44						130			27	7		9	2	
83	16	3	41				1		131			37	4		7	2	
84	10		36					8	132	2	1	28					
85	20	9	49						133			30	2		1		
86	3	7	46		2				134		6	22	1		3		
87	6		40		1				135	5		12	1		3		
88			17	1					136	49	49	49	1				
89	37	29	28				4		137			21	3		4		
90	42	1	46					1	138			15			4		
91	4		34		2				139	1	7	18			1		
92	37		39						140	8	2	14	1		8		
93			49					1	141	15	1	24	7		8		
94	18		47		1		1		142			16	2		4	2	
95			49		1				143	19		36	8		8		
96	49	47	44				1		144	10		18	5		8		
97	7	1	49						145	1		11	4		7		
98	6		48				1		146	1	3	10	10		7	2	
99	7	2	39					1	147		13	12	3		4		
100	14		49						148		7	23	1		5	1	

Tabla 11. (Continuación).

Ranura.	Problema observado.								Ranura.	Problema observado.							
	1	2	3	4	5	6	7	8		1	2	3	4	5	6	7	8
	Número de bloques que lo presentan (0-49).									Número de bloques que lo presentan (0-49).							
149	32	26	4	6	1	9			197	2		4			1	2	
150	1	2	9	2	1	4			198		1	2			1	2	
151	41	21	18			3			199			3		2	4	4	
152	20		7	1		9			200	1		2	1				
153	4		12	13					201			1					5
154	4	6	5	5	1	4	1		202			5			1	1	3
155	10	3		10				6	203			1			1		2
156		7	11	16		2			204				1		2	1	
157	9	3	7	8		2	1		205		2	5		5	2		1
158	8		11	7				2	206	11				4			1
159	8	9	21	7		5	2		207			4					1
160	13	18	16	6		1	1		208			5	1	3	2	2	3
161	5	2	31	2	2				209			17	6	1	3	2	3
162	5	12	21	7	2	3	5		210	2	2	21	3	3			2
163	12	11	18	2				1	211	2	3	13	3				9
164	12	8	21	3		1			212	2	1	23	2	3			3
165	23	7	12	1		3			213	1		7	1				4
166			46	2					214		3	23					3
167			41	5					215		1	7	4				1
168			49						216	49	49	49	3				
169			40	6			1		217	3		23	2		1		5
170			44	1		1	3		218	5		4	2		2		1
171		46		3					219	49	4	49	2		4	1	
172			48			1	1		220	5	2	29		1	1	1	1
173			21	3		1	1		221	49	49	49	5			2	
174			49					2	222			13	2		2	2	1
175			49	1					223		1	25	1			2	3
176			22	4		15			224	4	3	29				1	2
177			30	5		2	1		225		1	23				1	1
178			28						226	5	2	28			2		1
179			49						227	26		7		1			1
180				8					228			9	1	5	1	2	1
181				2		1			229	6		26	7		6		2
182									230	5		12	7		4		3
183				4		4			231	11	1	5		3			23
184						1		4	232		2	23	3	3	4		5
185						7	1	7	233	1	1	2	7	1	1		4
186			14					2	234	29	5	7	3		3		
187			22		1	2	1		235	27	31	5	8	2	2		2
188			39			4	9		236	48	48	48	5	7	3		
189			3			7	9		237		8	28	6		4		11
190	4	1	2		4	1	1		238	35		15	2		2		7
191			9		3	2	2	1	239	28	9	2	3				9
192		1	19		1				240			1					2
193		2	12		2	4	3		241			1					2
194			9		2	4	4		242			1					6
195		1	4		3	4	4		243			7			2		5
196			3					1	244	36	32		1				6

Tabla 11. (Continuación).

Ranura.	Problema observado.								Ranura.	Problema observado.							
	1	2	3	4	5	6	7	8		1	2	3	4	5	6	7	8
	Número de bloques que lo presentan (0-49).									Número de bloques que lo presentan (0-49).							
245						1			273	3	1	5			4		
246									274	47	45	2			1		
247		2						3	275				1	1			
248								5	276			3			3		
249	4	1						1	277	4					4	5	
250						5			278			2		3	1		
251						3			279			2				2	
252						1			280					3		2	
253						9		3	281	15							
254				11		6			282								
255				2		7			283			1		2		3	
256	7	2	4			4			284								
257			1			6		1	285	21				1	1		
258			2			4			286	1		6		2		1	
259			1						287					1		2	
260			9			4		2	288								
261	3	1							289					2			
262	47	45	1	1		1		8	290					2		2	
263	1	1	1						291	1	6			1	1		
264	48		4						292	2				2	3	3	
265			4			2			293		2				1	1	
266	1		1			4			294					2	5	12	
267	4		1			2			295				1	3	2		
268								2	296					1	1		
269	1					4			297			1	1				
270		2	3						298					2	2		
271		3	1			1			299	3	2			11	1		
272	45		18					1	300	6	10			1			

2.2.1 Análisis de los resultados y acciones correctivas.

Debido a que gran parte de los bloques de chapas presentaron óxido y su estado no era óptimo pero tampoco alarmante, no se podía continuar con los trabajos ni con las pruebas posteriores hasta que el núcleo quedara en buenas condiciones. De acuerdo a esto se realizó una limpieza a fondo para remover el óxido y mejorar la condición superficial del núcleo estatórico, en las Figura 32 y Figura 33 se muestra el proceso de limpieza que se llevó a cabo con personal de EPSA e IA S.A.

En la Tabla 12 se muestra el detalle porcentual de las anomalías encontradas.

Tabla 12. Análisis resultado visual al núcleo.

Anomalía encontrada en el bloque.	N° de bloques que lo presentaron.	% del total.
1. Algunas chapas oxidadas al lado derecho de la ranura.	2221	15,11
2. Algunas chapas oxidadas al lado izquierdo de la ranura.	1213	8,25
3. Algunas chapas oxidadas al fondo de la ranura.	5618	38,22
4. Algunas chapas oxidadas y dañadas parcialmente.	739	5,03
5. Guías de las cuñas frontales obstruidas.	159	1,08
6. Ducto de ventilación parcialmente obstruido.	566	3,85
7. Aristas de la ranura filosas, con rebabas o protuberancias.	203	1,38
8. Residuos de resina o pintura en las ranuras.	376	2,56
Bloques en buen estado.	6888	46,86

Figura 32. Proceso de limpieza del núcleo por EPSA e IA S.A.



Figura 33. Limpieza del núcleo.



2.3 Pruebas Electromagnéticas.

Las pruebas electromagnéticas realizadas al núcleo estático sirven para detectar posibles cortos interlaminares que causan pérdidas por magnetización las cuales se presentan en forma de calor, estas pérdidas se componen de pérdidas por histéresis y

pérdidas por corrientes parasitas. Estas últimas se originan por los flujos variables que transporta el núcleo los cuales inducen una f.e.m. en las chapas ferromagnéticas y como estas tienen una resistividad determinada se crean corrientes que se asemejan a corrientes torbellino entre las láminas. Las corrientes aumentan a medida que el aislamiento entre láminas se deteriora, causando cortocircuitos entre las láminas y creando puntos calientes en el núcleo.

Los puntos calientes por lo general no son detectados por los medidores de temperatura propios de la máquina, por lo tanto se tiene que el punto máximo real de trabajo de una máquina desde el punto de vista de temperatura no está determinado por la temperatura registrada en los medidores, sino por la temperatura del punto más caliente, el cual normalmente no es detectado por estos medidores.

Una manera de detectar los puntos que deterioran el aislamiento es realizar una prueba que genere un flujo en el núcleo por medio de una bobina de magnetización o toroide y así poder determinar de forma indirecta la pérdida de aislamiento interlaminar. Comercialmente se encuentran 3 pruebas que evalúan la condición del aislamiento interlaminar, estas se encuentran con diversos nombres en la literatura. En la Tabla 13 se muestran las diferentes pruebas con los diferentes nombres que se les dan y su objetivo específico.

Tabla 13. Pruebas electromagnéticas al núcleo.

Prueba.	Nombres alternos.	Objetivo específico.
EL-CID (Electromagnetic Core Imperfection Detection).	Rated and reduced flux.	Probar el aislamiento local y general del núcleo.
	Deteccion electromagnética de imperfecciones.	
	Prueba a bajo flujo.	
Core Loop Test.	Prueba del toroide.	Probar el aislamiento general del núcleo.
	Rated Flux tests.	
	Ring flux test.	
	Full flux test.	
HFRT (High Flux Ring Test).	Aislamiento interlaminar.	Probar el aislamiento general del núcleo.
	Prueba de gran flujo.	

Antes de empezar con las pruebas, se deben buscar daños visibles en el núcleo que evidencien un posible corto entre láminas; en el caso de encontrarse estos daños, se debe reparar el núcleo de acuerdo al literal 2.6 antes de empezar con las pruebas.

2.3.1 Objetivos de las pruebas electromagnéticas.

- Detectar imperfecciones en la estructura del aislamiento laminar del estator, ocasionados en la mayoría de los casos por defectos en la instalación del aislamiento, rebabas, golpes o esfuerzos electromecánicos.
- Evaluar la integridad del aislamiento entre las laminaciones del núcleo del estator.

2.3.2 Precauciones de las pruebas electromagnéticas.

- El rotor tiene que ser extraído del estator y el estator debe estar limpio y seco. En algunos casos la prueba EL-CID se puede realizar con el rotor en su lugar.
- Puede existir un considerable riesgo al realizar este tipo de prueba, por ende todo el personal involucrado en la prueba debe estar familiarizado con las precauciones de seguridad que deben tomarse.
- Se recomienda consultar al fabricante sobre la posibilidad de realizar este tipo prueba.
- En los casos en el cual el daño es significativo o visualmente evidente, el aislamiento interlaminar debe restablecerse antes de la aplicación de la prueba. En caso contrario puede suceder que durante las pruebas se presenten calentamiento excesivo y ocasionar un incendio.
- Nunca debe usarse cable blindado en la bobina de magnetización para las pruebas de alto flujo, ya que también se inducirá tensión en este.
- Por seguridad debe existir una distancia de 0.9 a 3.7 metros entre la bobina de magnetización y el metal sólido (es decir, tierra, metal, armadura. Etc). Por ende no debe acercarse a la bobina de magnetización del núcleo del estator en el momento en que se efectúa la prueba.
- Todas las conexiones eléctricas deben ser revisadas antes de la aplicación del potencial de prueba.
- Debe disponerse de protección contra incendios apropiada durante la prueba.
- Si presenta sistema de refrigeración con líquido, este debe drenarse y permanecer vacío.
- Deben abrirse los terminales de la máquina, revestirse eficazmente y marcarse.
- Las RTDs y el registrador del estator deben permanecer en servicio durante la prueba.
- Se debe adecuar un teléfono u otro sistema de comunicación en varios puntos para tener un apropiado control de la prueba.
- Si se usan termocuplas para la medición de temperatura, el personal puede correr un riesgo considerable ya que en esta se induce una tensión al igual que en la espira sonda. También, se debe tener cuidado de no colocar las termocuplas en contacto con las laminaciones cortocircuitadas.
- En grandes máquinas, deben amarrarse los cables contra el movimiento durante la energización.
- Debe tenerse cuidado que ningún objeto metálico esté en contacto en el lado del entrehierro con las laminaciones del núcleo u objetos metálicos extraños de la estructura tales como: escaleras de metal, cables de la grúa, etc. que podrían formar un circuito de conducción en el núcleo, no debe salirse del interior de la máquina durante la prueba.
- Debe tenerse mucho cuidado al acceder al núcleo de las grandes máquinas, ya que existe el riesgo de una descarga eléctrica debida a la tensión inducida en las laminaciones [6].

2.3.3 Prueba HFRT (High Flux Ring Test).

La prueba de corto entre láminas, se ha establecido como un método eficaz y relativamente fácil de probar la resistencia interlaminar del núcleo del estator, en esta prueba se excita el núcleo al flujo nominal con la ayuda de una bobina de magnetización, también conocida como toroide.

2.3.3.1 Bobina de magnetización.

Para examinar el núcleo del estator adecuadamente, es necesario magnetizar el núcleo lo más aproximado al valor pico de operación, lo cual se lleva a cabo por medio de la bobina de magnetización que debe rodear el estator a través del entrehierro (después de que el rotor ha sido removido) y alrededor de la armadura exterior. El mejor Camino de retorno es aquel que está más cerca al diámetro exterior del núcleo, dentro de la armadura. En las máquinas de gran diámetro, la bobina de magnetización debe distribuirse alrededor de la periferia del estator para asegurar una distribución de flujo uniforme alrededor de todo el núcleo.

2.3.3.1.1 Diseño de la bobina de magnetización.

Para poder excitar el núcleo a su flujo de operación nominal, se deben calcular los parámetros eléctricos que debe tener la bobina de magnetización para lograr la excitación deseada. Por lo tanto antes de la preparación de la prueba se tiene que calcular el voltaje por espira de la bobina, la corriente que fluirá por ella y el número de vueltas necesario. A continuación se describirá como calcular cada uno de estos parámetros.

El valor de tensión por espira para la bobina de magnetización está dado por la Ecuación 4 [6].

$$VPT = 4.44 * f * \phi * 10^{-8} \quad \text{Ecuación 4.}$$

Donde ϕ viene dado por la Ecuación 5 [6].

$$\phi = B * \frac{(D1 - D2)}{2} * Leff \quad \text{Ecuación 5.}$$

Donde:

- VPT = Volts por espira.
- f = Frecuencia en Hz, 60Hz en Colombia.
- ϕ = Máximo flujo en el núcleo en Wb.
- B = Máxima densidad de flujo en el núcleo en Wb/cm² (de fabricante).
- D1 = Diámetro exterior del núcleo en cm.
- D2 = Diámetro hasta el interior de las ranuras del estator en cm.
- $Leff$ = Longitud efectiva del núcleo en cm.

La longitud efectiva del núcleo debe obtenerse de datos del fabricante, Si no es posible, el valor puede calcularse de acuerdo a la Ecuación 6 [6].

$$L_{eff} = (L - N_v * b_v) * F_s \quad \text{Ecuación 6.}$$

Donde:

- L = Longitud total en cm.
- N_v = Número de conductos de ventilación.
- b_v = Ancho de los conductos de ventilación en cm.
- F_s = Factor del apilamiento del núcleo dado por el fabricante.

El número de vueltas (N_t) que debe tener la bobina de magnetización está determinado por los Volts por espira (VPT) ya calculados en la Ecuación 4 y el voltaje disponible para la prueba (V_s) según la Ecuación 7 [6].

$$N_t = \frac{V_s}{VPT} \quad \text{Ecuación 7.}$$

Los resultados deben redondearse al siguiente valor superior entero.

Para determinar la dimensión del cable necesario para la bobina de magnetización, es necesario tener los datos en Ampere-vuelta por pulgada en la parte media radial de la periferia del núcleo, los cuales corresponden a la densidad de flujo en este lugar. Estos datos deben obtenerse del fabricante.

La corriente necesaria para la bobina de magnetización está dada por la Ecuación 8 [6].

$$I_f = \frac{ATI}{N_t} * \left(\frac{D1 + D2}{2} \right) * \pi \quad \text{Ecuación 8.}$$

Donde:

- I_f = Corriente de magnetización en Ampere.
- ATI = Ampere-vuelta por cm (de fabricante).
- N_t = Número de espiras.

2.3.3.2 Espira sonda.

Además de la bobina de magnetización se debe colocar alrededor del núcleo una espira de alambre número 12 a 18 AWG, aislada adecuadamente para la tensión inducida, de preferencia diametralmente opuesta a la bobina de magnetización. Su objetivo es verificar que el flujo circulante sea el de operación y no otro. Solo se puede medir la densidad de flujo en el núcleo colocando la espira sonda a fin de que solo abrace el núcleo sin incluir las partes adicionales de la armadura. En la mayoría de las máquinas esto no es posible, pero el error de medición en la densidad de flujo es aceptable.

Un voltímetro conectado a la espira sonda leerá aproximadamente la tensión inducida en esta, cuyo valor es calculado a continuación.

2.3.3.2.1 *Calculo para la espira sonda.*

El valor de tensión (V) para la espira sonda está dado por la Ecuación 9 [6].

$$V = \frac{1.05 * \text{voltage fase}}{2 * Kd * Kp * N} \quad \text{Ecuación 9.}$$

Donde:

Voltaje fase = voltaje línea a línea para conexión en delta, y voltaje línea a línea dividido entre $\sqrt{3}$ para conexión en Y.

Kd = factor de Distribución = 0.955.

Kp = Factor de acortamiento para el devanado del estator.

N = Número de espiras en serie por fase del devanado del estator.

2.3.3.3 **Preparación de la prueba HFRT.**

La prueba debe comenzar con un potencial menor al calculado y por lo general variable, ya que si los cálculos han sido mal realizados podría incurrirse en la destrucción de la máquina, deformación del núcleo o fractura de bobinas.

La bobina de magnetización debe estar aislada de áreas que se sospecha están averiadas para facilitar la medida de la temperatura. Residuos delgados de parafina, termómetros pegados con una masilla adecuada, termocuplas, pirómetros portátiles y cámaras de infrarrojo pueden ser usados para detectar puntos calientes. Éstos se deben detectar entre 15 a 30 segundos después que se inicie la prueba.

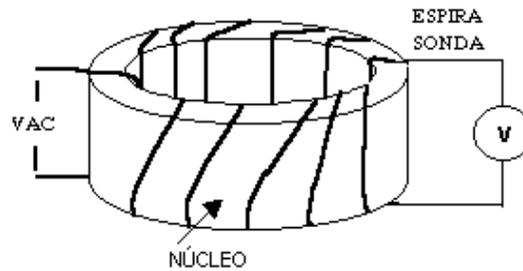
Si la resistencia interlaminar más baja se presenta en la parte superficial de los dientes, las áreas bajas del núcleo, el interior de los dientes o canales de ventilación. Se debe excitar durante 10 a 20 minutos antes de que el calor sea evidente en dichas superficies. Un último calentamiento debe ser realizado de 1 a 3 horas después de que se han completado las reparaciones pertinentes.

2.3.3.4 **Procedimiento de la prueba HFRT.**

En la Figura 34 se muestra el esquema típico de prueba.

- Se debe instalar el bucle con el número de vueltas calculado distribuido a lo largo del núcleo.
- Una vez puesto y energizado el bucle se comprueba que el voltaje en la espira sonda sea el calculado, así se verifica que la máquina está con su flujo nominal.
- Se hace una inspección termográfica en busca de puntos calientes.
- Si después de transcurrido un intervalo de tiempo (menos de 20 minutos), se observan puntos en los cuales se excede el calor permitido, la prueba se da por terminada.

Figura 34. Esquema de prueba HFRT.



Tomado de [8].

2.3.3.5 Criterios de decisión para la prueba HFRT.

Mediante la inspección visual se considera que puede existir cortocircuito entre las láminas del estator cuando se presentan abolladuras, delaminación o cambios de color, estos lugares deben ser de especial interés en el momento de efectuar la prueba.

Si al ejecutar la prueba se detecta calentamiento, ya sea visualmente o por medición indirecta sobre el estator, se debe reparar el aislamiento interlaminar.

Si existe una diferencia de 10 a 15°C o más entre partes adyacentes del núcleo, se considera este como un punto caliente [6].

2.3.4 Prueba Core loop.

Esta prueba es en esencia, la misma que la prueba HFRT, solo cambian algunas variables para los cálculos. Se trata separadamente de la prueba HFRT ya que los resultados de ambas en una misma máquina suele variar muy levemente.

Es la prueba tradicional para probar de forma indirecta el nivel de aislamiento interlaminar del núcleo estático, esto se logra excitando el núcleo por medio de una bobina de magnetización que rodea al núcleo; la tensión de alimentación de la bobina debe ser el necesario para producir una densidad de flujo cercana a la nominal en la zona central detrás de las ranuras, esto produce tensiones axiales entre las láminas. Las láminas que se encuentran en corto se evidencian como puntos calientes [3].

En grandes máquinas las zonas en falla más profundas pueden tardar hasta 30 minutos en evidenciarse como puntos calientes [3].

En algunos casos la prueba se utiliza para determinar la gravedad de los defectos encontrados con la prueba EL-CID. Sin embargo algunos expertos recomiendan realizar solo esta prueba omitiendo la prueba EL-CID para grandes generadores hidroeléctricos.

2.3.4.1 Bobina de magnetización.

Cómo ya se mencionó se necesita una bobina de magnetización capaz de inducir la densidad de flujo nominal de la máquina, esta debe rodear el estator a través del entrehierro y alrededor de la armadura exterior. En las máquinas de gran diámetro, la bobina de magnetización debe distribuirse alrededor de la periferia del estator para asegurar una distribución de flujo uniforme alrededor de todo el núcleo.

2.3.4.1.1 Cálculo de la bobina de magnetización.

Al igual que la prueba HFRT, para poder inducir el flujo nominal en el núcleo se debe calcular: el valor de voltaje por espira de la bobina de magnetización, el número de vueltas y la corriente que circulará por la bobina. El voltaje por espira que debe tener la bobina de magnetización para un devanado con conexión “Y”, para producir un flujo en el núcleo equivalente al producido por la máquina al 105% de su tensión nominal está dado por la Ecuación 10 [7].

$$V_{por\ espira} = \frac{1.05 * V_{L-L}}{\sqrt{3} * 2 * k_d * k_p * N} \quad \text{Ecuación 10.}$$

Donde:

- V_{L-L} = Voltaje línea a línea del devanado si es con conexión Y o $\sqrt{3}$ * Voltaje línea a línea para conexión en delta.
 k_d = Factor de distribución del devanado normalmente es 0.955.
 k_p = Factor de acortamiento del devanado.
 N = Número de espiras en serie por fase del devanado del estator.

El número de vueltas N_T que debe tener la bobina depende de la fuente de voltaje disponible y el voltaje que se requiere por espira. En la Ecuación 11 [7] se muestra el cálculo del número de vueltas necesario.

$$N_T = \frac{V_S}{V_{por\ espira}} \quad \text{Ecuación 11.}$$

El resultado se debe redondear al valor entero superior.

Es importante conocer el valor de la corriente que circulará por la bobina para saber la dimensión del cable que se debe usar. También se deben implementar las protecciones adecuadas si es el caso y comprobar que la fuente resista la prueba. La corriente se deduce con la curva B-H de la máquina, esta curva es la relación entre la densidad de flujo (B) en Teslas y la intensidad de campo magnético (H) en Amperes vuelta/metro. Normalmente no se dispone de la curva B-H de la máquina bajo prueba, en este caso se recomienda usar una curva generalizada para el material del núcleo de la máquina. Para estimar la corriente se debe seguir el siguiente procedimiento [3].

- Se calcula la densidad de flujo en la parte posterior de los dientes en el núcleo usando la Ecuación 12 [3].

$$B = \frac{\Phi/2}{A} \quad \text{Ecuación 12.}$$

Donde A corresponde al área transversal de la sección activa del núcleo y está dada por la Ecuación 13 [3]. Los términos de la ecuación se toman del estator según lo mostrado en la Figura 35 y el flujo Φ se calcula según la Ecuación 14 [3].

$$A = cl * W_y * \text{Factor de apilamiento} \quad \text{Ecuación 13.}$$

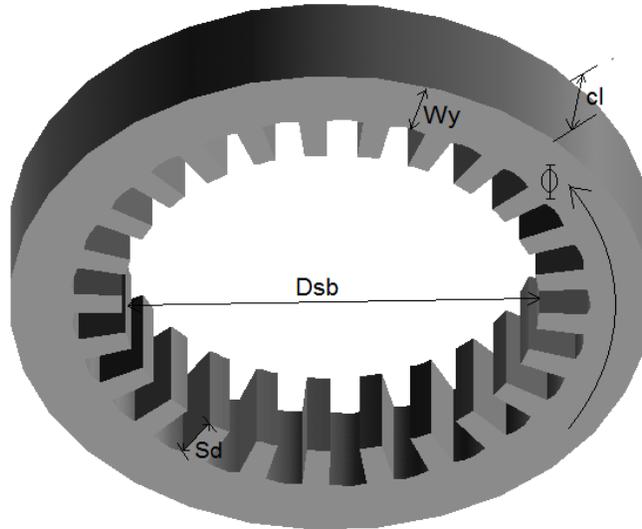
Donde:

cl: ancho efectivo del núcleo.

Wy: distancia entre el diámetro exterior del núcleo y el fondo de ranura.

Factor de apilamiento: Valor de fabrica

Figura 35. Datos del núcleo para la prueba Core Loop.



Tomado de [3].

$$\Phi = \frac{V_{ph} * N_p}{4.44 * f * K_d * k_p * N_{TP}} \quad \text{Ecuación 14.}$$

- Usando una curva B-H para el tipo de acero del núcleo de la máquina se busca el valor de la intensidad de campo H para la densidad de flujo B calculado, otra opción es obtener la curva B-H de la máquina por medio de simulación y estimar el valor de H con esta curva.
- Una vez obtenida la intensidad de campo H, se calcula el total de Amperes-vuelta necesario para inducir la densidad de flujo B en el estator. Para esto se utiliza la Ecuación 15 [3].

$$MMF = H * l_{fp} \quad \text{Ecuación 15.}$$

Donde:

MMF: Amperes-vuelta de la bobina de magnetización.

H: Intensidad de Campo.

lfp: es la longitud de trayectoria de flujo y es igual a: $[(Dsb+2)*(Sd+Wy)]*\pi$

Sd: Profundidad de la ranura.

- Por último se calcula la corriente de alimentación, la cual viene dada por la Ecuación 16 [3].

$$I_S = \frac{MMF}{N_T} \quad \text{Ecuación 16.}$$

Si la alimentación no es capaz de suministrar la potencia necesaria, se pueden repetir los cálculos considerando una vuelta adicional teniendo en cuenta que esto reduciría el flujo inducido. Sin embargo se pueden obtener buenos resultados excitando la máquina hasta un mínimo del 75% del flujo nominal [3].

2.3.4.2 Espira sonda.

Al igual que en la prueba HFRT, se debe colocar alrededor del núcleo una espira de alambre número 12 a 18 AWG, de preferencia diametralmente opuesta a la bobina de magnetización como se muestra en la Figura 36. El objetivo de esta es el de verificar que el flujo circulante sea el deseado y no otro.

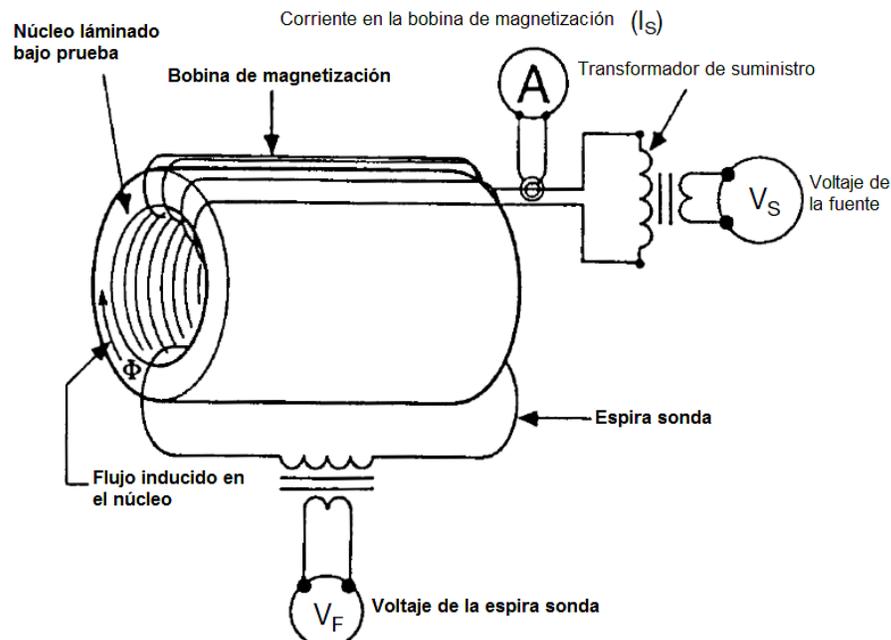
2.3.4.2.1 Cálculo de la espira sonda.

Un voltímetro conectado a la espira sonda leerá aproximadamente su tensión inducida, el valor esperado de la medida se calcula de acuerdo a la Ecuación 17 [3].

$$V_F = 4.44 * f * \Phi / 2 \quad \text{Ecuación 17.}$$

Donde el flujo se determina por la Ecuación 14.

Figura 36. Esquema de prueba Core Loop.



Tomado de [3].

2.3.4.3 Preparación de la prueba Core Loop.

La preparación de la prueba Core Loop es la misma a la usada en la prueba HFRT. Ver numeral 2.3.3.3.

2.3.4.4 Procedimiento de la prueba Core Loop.

El procedimiento de la prueba Core Loop es el mismo que el descrito en la prueba HFRT. Ver numeral 2.3.3.4.

Adicionalmente se puede medir la potencia suministrada por la fuente en el momento de la prueba para poder calcular las pérdidas por kilogramo de la máquina. Para esto se debe conocer el peso del núcleo.

2.3.4.5 Criterios de decisión para la prueba Core Loop.

Si antes de empezar la prueba se sospecha de una zona con falla, estos lugares deben ser de especial interés en el momento de efectuar la prueba.

Si el fallo se encuentra cerca de la superficie, la temperatura en esa zona aumentará rápidamente mientras que los daños profundos tardarán más en evidenciarse, sin embargo en un núcleo en buenas condiciones pueden aparecer diferencias de temperaturas, debido a las concentraciones de flujo. Por tal motivo se considera que existen daños si hay una diferencia de temperatura de más de 5°C entre el punto en falla y la zona más fría del estator. O si hay una diferencia de más de 15°C con respecto a la temperatura ambiente [3].

Si se toma la potencia activa suministrada por la fuente y se conoce el peso del núcleo se pueden calcular las pérdidas por kilogramo que presenta el núcleo en W/kg. Estas no deben exceder los 10 W/kg. Si el aislamiento interlaminar se encuentra en buenas condiciones, las pérdidas no suelen ser mayores a 6 W/kg [3].

Si se tienen registros de pruebas anteriores, el aumento de las pérdidas no debe ser mayor al 5%.

2.4 Resultado y análisis de la prueba Core Loop realizada en Salvajina.

La prueba fue realizada por la firma EMT (Electric Machines Test) el 26 de septiembre del año 2013.

El equipo usado para el registro término fue una cámara infrarroja FLIR i-50.

Los datos para la ejecución de la prueba fueron:

- Voltaje por espira: 70 V.
- Voltaje de la fuente: 450 V.
- Corriente de prueba: 862 A.
- Número de vueltas de la bobina: 5.
- Calibre del cable: 3x2/0.

Se marcaron cuatro secciones del estator a las cuales se les tomó una termografía al iniciar y una al finalizar la prueba. La prueba tuvo una duración total de una hora con cuarenta minutos, durante este tiempo se monitoreo la temperatura de las cuatro secciones.

El incremento de temperatura que tuvo el estator entre el inicio y el fin de la prueba fue de 10°C.

En términos generales el núcleo del estator se encuentra en buenas condiciones.

2.4.1 Prueba EL-CID (Electromagnetic Core Imperfection Detection).

Esta prueba determina cortos circuitos entre laminaciones del núcleo del estator mediante un toroide que produce un flujo magnético entre el 3 y 4 % del flujo nominal. Por lo tanto la fuente de alimentación para la bobina de magnetización es mucho más pequeña que el necesario para realizar las pruebas a flujo nominal, lo cual es una gran ventaja. La prueba de EL-CID ha demostrado buena sensibilidad para detectar laminaciones en corto en el núcleo del estator de turbogeneradores. Otra ventaja de esta prueba es que se pueden detectar fallas localizadas, esto quiere decir que da a conocer si la falla se encuentra en la superficie, en laterales o en fondo de ranura al igual que posibles cortos en barras de construcción.

Existe una gran controversia acerca de la efectividad de esta prueba en grandes generadores que tengan más de 1 sección (en el caso de los generadores de Salvajina estos se componen de 4 secciones), ya que en la zona donde se unen las secciones se pueden obtener medidas incorrectas. Sin embargo la prueba puede ser efectiva si se cuenta con la experiencia suficiente como para saber interpretar los resultados en estas zonas [3]a.

2.4.1.1 Cálculo de la bobina de magnetización.

El voltaje de excitación por espira necesario para garantizar un flujo correspondiente al 4% del nominal de la máquina, se calcula de acuerdo a la Ecuación 18 [17].

$$V_{por\ espira} = \frac{0.04 * V_{L-L}}{\sqrt{3} * 2 * k_d * k_p * N} \quad \text{Ecuación 18}$$

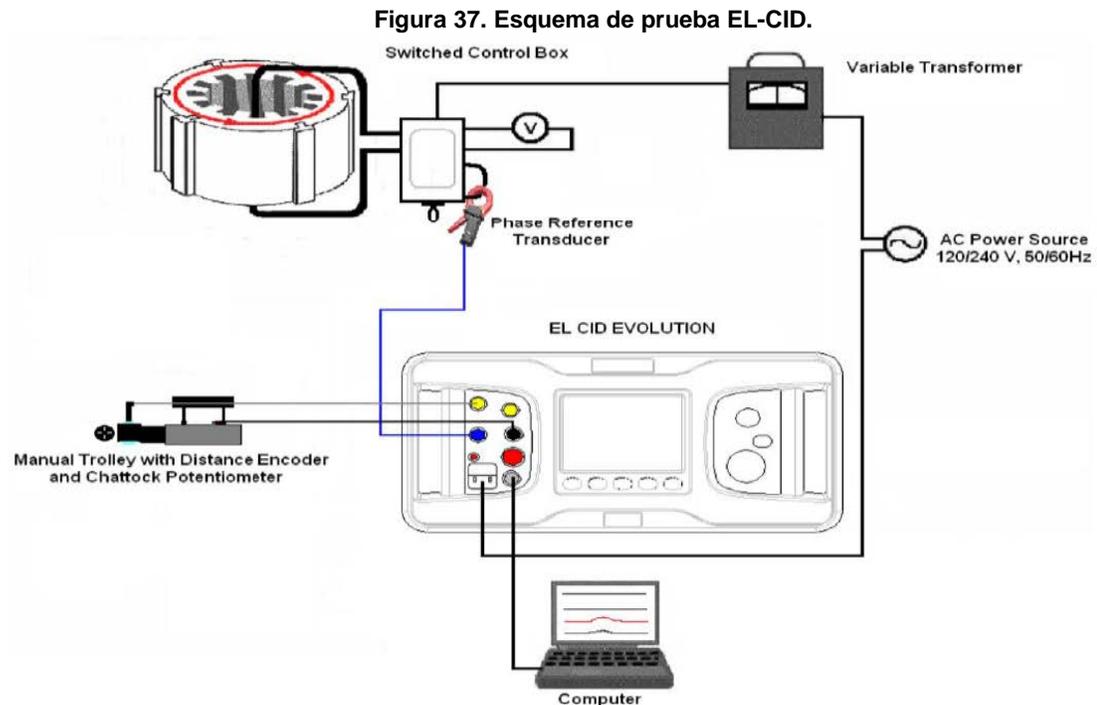
Donde:

V_{L-L}	= Voltaje línea a línea del devanado.
k_d	= Factor de distribución del devanado normalmente es 0.955.
k_p	= Factor de acortamiento del devanado.
N	= Número de espiras en serie por fase del devanado del estator.

2.4.1.2 Procedimiento de la prueba EL-CID.

- El ensayo se debe realizar a lo largo de todas las ranuras del núcleo del estator, para esto se puede emplear un bucle de excitación.

- Durante la prueba se debe dejar constante la tensión de alimentación del bucle, con el fin de garantizar una excitación en el núcleo correspondiente al 4% del flujo nominal de la máquina.
- El esquema de prueba se muestra en la Figura 37.



Tomado de "resultado de prueba EL-CID, Salvajina".

2.4.1.3 Criterio de decisión para la prueba EL-CID.

Mediante la inspección visual se considera que puede existir cortocircuito entre las láminas del estator cuando se presentan abolladuras, delaminación o cambios de color. Estos lugares deben ser de especial interés en el momento de efectuar la prueba.

Si se obtienen valores pico o diferencias de corriente en cuadratura mayores a $\pm 100\text{mA}$ se considera la existencia de defectos preocupantes.

En estatores de gran tamaño, cuya construcción obliga a tener particiones, se considera normal obtener valores de corriente que pueden superar hasta 10 o más veces los promedios obtenidos en las demás ranuras. Esto se debe al entrehierro en estos puntos. Por tal razón, el análisis de estas ranuras y de las ranuras aledañas debe hacerse de forma particular, teniendo en cuenta esta condición.

2.5 Resultados y análisis de la prueba EL-CID realizada en Salvajina.

La prueba se realiza con el objetivo de determinar el estado del aislamiento interlaminar del núcleo antes de la instalación del nuevo bobinado del estator.

La prueba fue realizada por la firma Global strategies & solutions S.A. (GSS) el día 31 de marzo del año 2009.

Las normas aplicadas en la prueba son: IEEE Std 112-1996; IEEE Std 115-1995; IEEE 393.

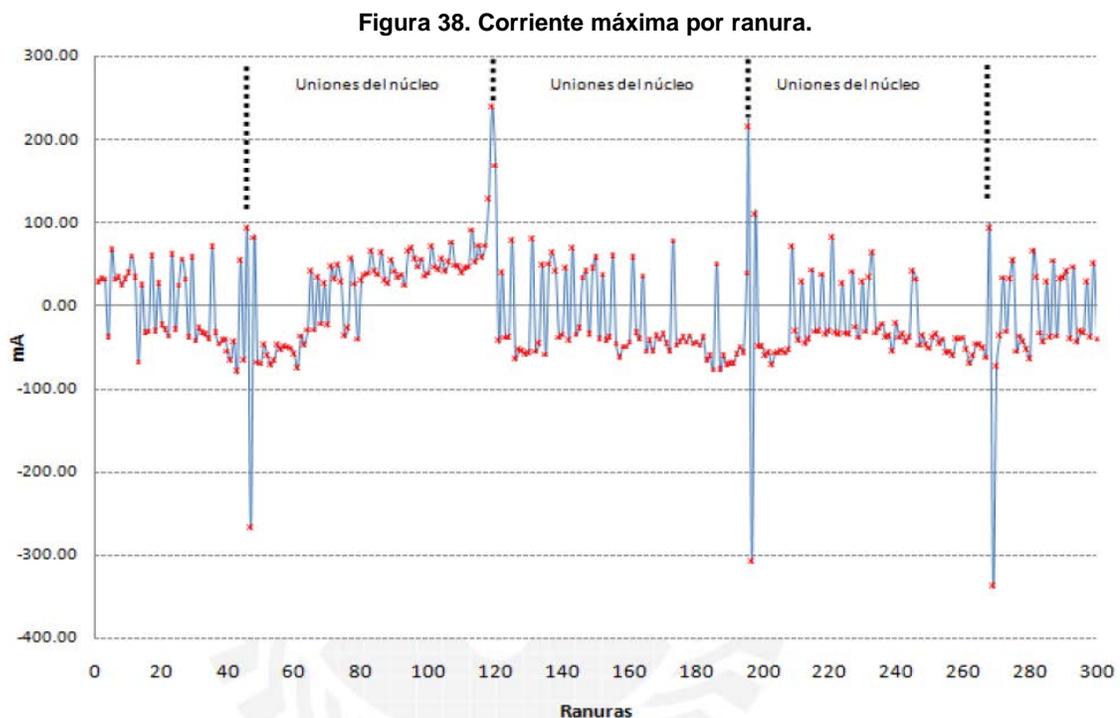
La prueba se realizó con el equipo EL-CID EVOLUTION.

El ensayo se realizó a lo largo de todas las ranuras del núcleo del estator, empleando un total de 24 espiras. Distribuidas en tres partes, pasando por las ranuras 53, 184 y 223.

Durante la realización de la prueba se mantuvo constante la tensión de alimentación del bucle, con el fin de garantizar una excitación en el núcleo correspondiente al 4% del flujo nominal de la máquina, con una tensión de espira de 3.46 V, y una corriente de 14,7 A. Con lo cual se tiene la certeza (según literatura del principio de la prueba), que para valores de corriente en cuadratura mayores a $\pm 100\text{mA}$, ya se consideran defectos considerables en el aislamiento interlaminar del núcleo.

Debido a que este estator es de gran tamaño y tiene 4 particiones las cuales se dan en las ranuras 47, 119, 197 y 269 se considerará normal obtener valores de corriente hasta 10 o más veces los promedios obtenidos como ya se dijo anteriormente.

En la Figura 38 se muestra la corriente máxima por ranura que se obtuvo durante esta prueba se evidencia la diferencia significativa de la corriente en las ranuras correspondientes a las uniones del núcleo en comparación a las demás, tal y como se había mencionado anteriormente.



Como se evidencia en la Figura 38, la corriente en cuadratura registrada de cada ranura, exceptuando las tomadas en las ranuras 47, 119, 197 y 269 y sus más cercanas, están entre $\pm 100\text{mA}$ lo cual está dentro de los límites aceptables.

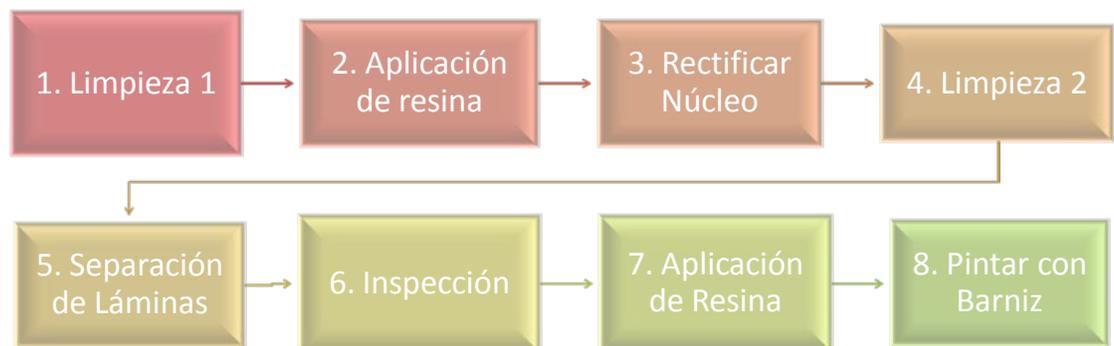
En conclusión el núcleo no presenta síntomas de cortos entre láminas. Teniendo en cuenta este resultado y el resultado de la inspección visual con la acción correctiva que se tomó al respecto, se determina que el núcleo se encuentra en óptimas condiciones y no requiere acciones correctivas adicionales.

2.6 Proceso de Reparación del Núcleo.

En caso de que alguna de las pruebas anteriormente descritas revelen una condición anormal en el núcleo, se debe seguir el siguiente procedimiento para la reparación del mismo, siempre y cuando sea posible.

La secuencia de trabajo para reparar el núcleo se muestra en la Figura 39. La secuencia de describirá en detalle más adelante.

Figura 39. Secuencia de trabajo para reparar núcleo.



2.6.1 Limpieza 1.

Se debe limpiar la superficie del núcleo con Thiner usando escobillones de nylon y liencillo para retirar el barniz y la suciedad. Para evitar daños durante la limpieza, no se debe utilizar elementos metálicos, ni ferromagnéticos.

2.6.2 Aplicación de resina.

Aplicar resina Hysol Epoxy a cada paquete de láminas que debe repararse. Esta resina se endurecerá y servirá para proteger durante el proceso de rectificación del núcleo aquellas zonas de láminas del paquete que no estén en corto.

La resina Hysol Epoxy es la recomendada para esta labor en cualquier máquina, sin embargo se puede usar otra resina con características similares.

2.6.3 Rectificar núcleo.

Antes de rectificar el núcleo se debe cubrir muy bien el resto de paquetes del área donde se va a reparar dejando solamente descubierto el paquete de láminas donde se iniciará el

proceso de pulida. Esto es muy importante para evitar que las limaduras desprendidas por el fresado, caigan sobre otras superficies del núcleo, pudiendo ocasionar más daños. Para proteger estas zonas, se puede utilizar cartulina, cinta de mascarar o liencillo.

Se debe mantener el área de trabajo bien iluminada y con buena ventilación. Disponer de dos alimentaciones para suministro de aire con respectivos racores o acoples para la fresadora manual y un equipo que funcione con el principio de Venturi para la succión de limadura.

Se conecta la fresadora manual adecuada con la fresa ajustada al tipo de pulida, en el caso de los generadores de Salvajina (6.4 \varnothing x10mm) (3.0 \varnothing x6.4x10mm). Esta selección se hace de acuerdo al grado de dureza del material fusionado, condición, profundidad y dimensión de la zona.

Se ajusta la fresadora a la velocidad adecuada y se pule colocándola en forma vertical y efectuando movimientos radiales. Se retira el material que se encuentra adherido a la superficie del núcleo. Se debe tratar de asentar la fresa suavemente a la zona dañada, a fin de evitar rotura y desgaste prematuro de la fresa, ver Figura 40. Se debe mantener a mano el equipo con principio Venturi para succionar las partículas de limadura que caen alrededor.

Toda la limadura dejada durante el proceso de fresado debe ser succionada y no soplada.

La zona con láminas en corto, debe quedar completamente pulida y libre de material incrustado o fundido.

Figura 40. Forma de sujetar la fresadora.



2.6.4 Limpieza 2.

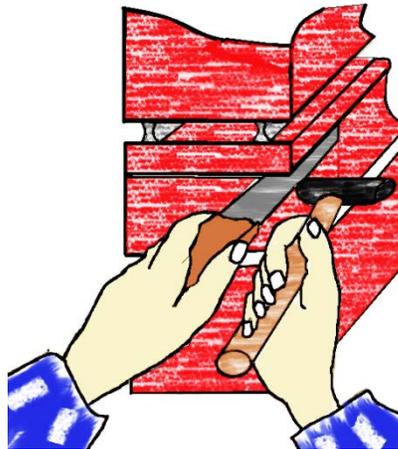
Como se indicó en el literal anterior, la limadura y los desechos dejados durante la pulida deben ser retirados mediante aspiradora o Venturi. De igual forma se debe limpiar la superficie pulida utilizando una brocha y limpiando con un lienzo humedecido de thinner #78 (TTE 8310). Así se garantiza total limpieza de la superficie pulida.

2.6.5 Separación de las láminas.

Este proceso requiere mucho cuidado para poder garantizar la eliminación total de posibles uniones entre láminas a causa de material fundido, abolladuras, etc. Con esto se busca eliminar el corto entre láminas, se debe tener cuidado de no causar más daño a la superficie a reparar. A continuación se explica el procedimiento para separar las láminas.

- Se separa cada lámina en la superficie a reparar utilizando un cuchillo con hoja fina y delgada de material no ferroso, puede ser acero inoxidable. Ver Figura 41.
- Una vez separada cada lámina, se debe inspeccionar con la ayuda de una lupa la superficie y la separación de la lámina en cuestión.
- Utilizando una línea, se retira imperfecciones de la lámina dejando el borde limado libre de virutas.
- Durante el proceso de separación y acabado del borde del laminado, debe evitarse no causar nuevamente daños al núcleo.

Figura 41. Separación de láminas.



2.6.6 Inspección.

Se debe inspeccionar utilizando lupas especiales el aislamiento entre cada lámina a fin de determinar si ha sido recuperado o no.

Si el resultado obtenido durante el chequeo no es satisfactorio, deben repetirse las operaciones de los numerales 2.6.3 y 2.6.5.

2.6.7 Aplicación de resina epóxica.

Antes de aplicar la resina se debe limpiar la zona de aplicación y verificar que la resina esté bien líquida y no espesa para mayor penetración. Después se aplican tres capas de resina compuesta de R9-2039 (10 partes) + HD35G1 (3 partes) Hysol Epoxy con la ayuda de una brocha limpia. Se debe esperar 10 segundos entre la aplicación de cada capa para que la resina penetre dentro del laminado.

Esta resina comienza a espesarse después de una hora y se endurece en 5 horas a 28°C.

Se tiene que guardar sumo cuidado de no dejar residuos (goteos) de resina entre las ranuras por donde van las cuñas, ni en los ductos de ventilación del núcleo.

Luego de haberse aplicado la resina y antes de que se endurezca, deben colocarse cuñas de madera y metálicas, como se ilustra en la Figura 42, entre los ductos de ventilación del paquete de láminas en reparación. Lo anterior se hace para mantener prensado todo el paquete de láminas durante el secado de la resina y así compactar mejor el bloque. Para evitar que las cuñas se peguen dentro del ducto, haciendo difícil su retiro, se debe forrar la punta de la cuña en lámina de teflón. Ver Figura 43.

Figura 42. Cuña para prensar el paquete de láminas.

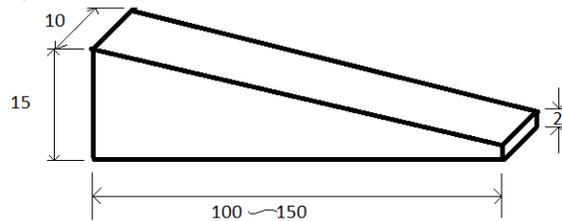
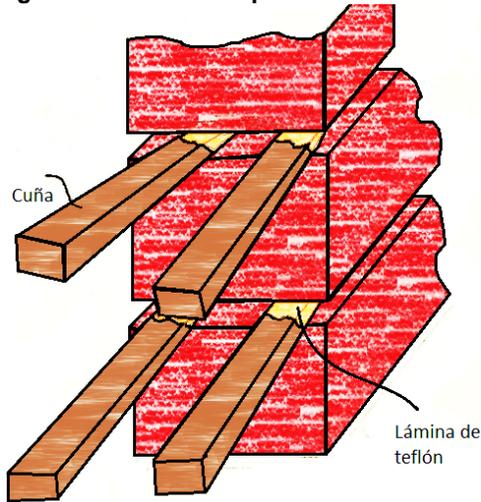


Figura 43. Proceso de prensado con cuñas.



2.6.8 Aplicar con barniz.

Aplicar barniz a la zona reparada, Ver Figura 44, en el caso de los generadores de la Central Hidroeléctrica Salvajina, se usa barniz negro suministrado por Toshiba, su aplicación se debe hacer con brocha o pistola.

Figura 44. Forma de aplicar el barniz.



De acuerdo a los resultados de las pruebas anteriores se concluye que el núcleo se encuentra en buen estado y solo se realizaron intervenciones menores para daños pequeños.

Además de evaluar la condición del núcleo se debe realizar un diagnóstico detallado con pruebas cuidadosamente realizadas al devanado del estator y todo su sistema aislante. Se debe tener en cuenta que las fallas más influyentes ocurren en estos elementos. Es por esto que en el Capítulo 3 se hará una descripción detallada de cada prueba eléctrica y de inspección que se recomiendan para un diagnóstico preciso y detallado del estado en que se encuentra el devanado y su sistema aislante.

3. PRUEBAS Y DIAGNÓSTICO DEL DEVANADO ESTATÓRICO.

En este capítulo se describen las pruebas técnicas realizadas al devanado del estator para evaluar su estado.

Como se mencionó anteriormente los generadores y el sistema aislante de sus devanados están sometidos a diversos factores mecánicos, eléctricos, térmicos y ambientales que deterioran el aislamiento, reduciendo así la vida útil del generador. Es por esto que se deben hacer pruebas de inspección y eléctricas para evaluar el estado de los devanados y su sistema aislante.

Se debe destacar que no todas las pruebas descritas a continuación se realizaron para hacer el diagnóstico en la unidad 2 de generación de la central Hidroeléctrica Salvajina, sin embargo se recomienda realizar todas las pruebas para un diagnóstico más profundo y detallado.

La prueba inicial que se realiza al devanado y todo su sistema aislante es una inspección visual. Para que esta sea detallada, el rotor debe ser extraído del generador.

Después de la inspección visual se realizan las pruebas eléctricas, para esto el devanado debe tener una temperatura mínima de 5°C por encima de la temperatura ambiente, para que no se presente condensación.

En la Tabla 14 se muestran las pruebas que se tratan en este capítulo, su objetivo principal y la norma que la rige (si es el caso).

Tabla 14. Pruebas para diagnosticar el devanado estatórico.

Prueba.	Tipo.	Objetivo.	Norma.
Inspección visual del devanado.	Inspección.	Evaluar la condición del sistema aislante del devanado estatórico.	IEEE Std 432-1992
Inspección de aflojamiento de cuñas.	Inspección.	Evaluar la condición del sistema de cuñado.	N/A
Resistencia Óhmica del devanado.	Eléctrica.	Evaluar la condición del devanado, de acuerdo a cambios en el valor de la resistencia óhmica.	IEEE Std 115-2009
Resistencia de aislamiento del devanado.	Eléctrica.	Evaluar el estado del aislamiento a tierra.	IEEE Std 43-2013
Factor de potencia y Tip-Up.	Eléctrica.	Evaluar el estado del aislamiento a tierra y la presencia de descargas parciales.	IEEE Std 286-2000
Alta tensión DC o Hi-Pot.	Eléctrica.	Evaluar el estado del aislamiento a tierra y comprobar su rigidez dieléctrica.	IEEE Std. 95-2002
Impulso.	Eléctrica.	Evaluar el estado del sistema aislante.	IEEE Std 522-2004
Descargas parciales.	Varias.	Evaluar la presencia de descargas parciales en el aislamiento.	IEEE Std 1434-2000

3.1 Prueba Inspección Visual.

La inspección debe estar enfocada en aquellas áreas que han demostrado ser más propensas a los daños y deterioros causados por: el envejecimiento térmico, la sobretemperatura, el sobrevoltaje, la contaminación, los daños físicos o los efectos de ionización o efectos corona [7]. Estos últimos son una de las principales causa de daño en el sistema aislante de la máquina, es por esto que se explicará con más detalle en qué consisten los efectos de ionización. Sin embargo en este numeral solo se explican las descargas superficiales, las cuales son un tipo de efecto de ionización. Esto porque son las que se detectan efectivamente de forma visual, los otros efectos de ionización serán explicados en las pruebas eléctricas.

3.1.1 Descargas superficiales.

Las descargas superficiales ocurren cuando un gas es ionizado al ser expuesto a un campo eléctrico intenso. Las descargas superficiales contribuyen a la degradación general del aislamiento, estas tienden a concentrarse en la salida del devanado junto a la vecindad del núcleo. La pintura gradiente que se aplica a las cabezas de bobina, generalmente compuesta por carburo de silicio, es una característica introducida en las máquinas de alto voltaje para eliminar las altas concentraciones de campos eléctricos en la vecindad del núcleo y en la salida del devanado [49].

El efecto de estas descargas en la superficie, produce el daño de la capa superficial orgánica del aislamiento. Estas descargas, causan menos deterioro que las descargas de ranura, descargas parciales internas y actividad de corona en la cabeza de bobina [49].

3.1.2 Objetivos de la inspección visual.

- Evaluar el estado físico del devanado estatórico y su sistema aislante.
- Evaluar el estado de las capuchas (CAPS) del devanado.
- Detectar evidencia de descargas superficiales en el devanado en la parte saliente de la ranura.
- Evaluar la contaminación y abrasión presente en el aislamiento del devanado.

3.1.3 Procedimiento de la inspección visual.

A continuación se describirán las anomalías generales que deben buscarse en todos los elementos del devanado y su sistema aislante: , luego se detallan las anomalías que deben buscarse en cada elemento específico del devanado. Los principales lugares de inspección se detallan en las Figura 45 y Figura 46.

Figura 45. Zonas de inspección visual del devanado.

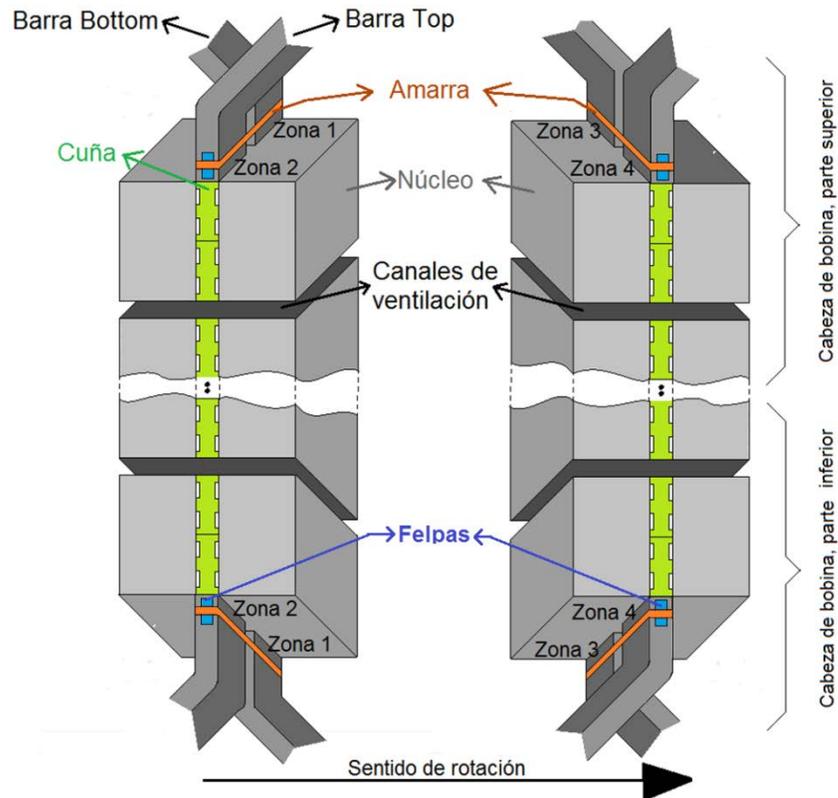


Figura 46. Zonas de inspección visual del devanado.



3.1.3.1 Degradación del aislamiento debido al envejecimiento térmico.

Para detectar esta anomalía, se deben buscar bobinas o ductos de ventilación que presenten: hinchazón (solo bobinas), aislamiento poco firme o quebradizo. Estas características suelen indicar separación de las capas del aislamiento, debido al envejecimiento térmico, esto se evidencia como un sonido hueco al golpear el aislamiento [7].

La degradación debido al envejecimiento térmico también puede ocasionar contracción del aislamiento, desprendiendo así, la bobina de la ranura ocasionando vibraciones y desgaste del aislamiento a tierra. Esta característica se evidencia como polvillo blanco alrededor de la ranura o a la salida del devanado [7].

3.1.3.2 Contaminación.

Se debe buscar en todo el devanado, presencia de: polvo, aceite, humedad y otros productos químicos. La contaminación del devanado afecta negativamente el desempeño del sistema aislante [7].

3.1.3.3 Agrietamiento.

Se debe buscar presencia de grietas en todos los elementos aislantes del devanado, principalmente en las estructuras de refuerzo, tales como: anillos de conexión, separadores, etc. [7].

3.1.3.4 Descargas corona.

Se debe buscar presencia de polvo blanco, gris o rojo, principalmente en las cabezas superior e inferior del devanado. Estas suelen ocurrir en las Zonas 1, 2, 3 y 4 mostradas en la Figura 45. En la Figura 47 se muestra un ejemplo de presencia de polvo blanco resultado de descargas corona en la parte saliente de las barras del devanado. Se debe tener cierta experiencia para diferenciar el polvo producido por vibraciones del polvo producido por descargas corona [7].

Figura 47. Presencia de polvo blanco resultado de descargas corona.



Tomado de [44].

3.1.3.5 Principales puntos de inspección.

En la Tabla 15 se muestran los principales puntos del devanado que deben ser inspeccionados, qué anomalías buscar en estos y las características de estas anomalías.

Tabla 15. Principales puntos para la inspección visual del devanado.

Paso.	Punto a inspeccionar.	Anomalía.	¿Qué buscar?	Características.
1	Cuñas*.	Polvo blanco	Presencia de polvo blanco en la superficie de las cuñas	El polvo blanco suele ser indicativo de actividad de descargas parciales y algunas veces de vibraciones debidas a la pérdida de aislamiento a tierra por envejecimiento [8] [20].
		Polvo amarillo	Presencia de polvo amarillo en la superficie de las cuñas.	Es indicativo de desgaste del material de las cuñas o del aislamiento. También puede indicar la existencia de cuñas flojas [20].
2	Amarras**.	Polvo blanco	Presencia de polvo blanco en la superficie de las amarras	Suele ser indicativo de descargas parciales [20] [21].
		Erosión	Signos de erosión en la parte frontal y posterior de las amarras.	La erosión se da por pérdida del epóxico y del barnizado debido a envejecimiento o vibraciones [20] [21].
		Firmeza	Verificar que las amarras se encuentren firmemente apretadas entre los brazos de bobinas.	Las amarras sueltas o flojas suelen darse por envejecimiento o vibraciones.
3	Separadores	Polvo blanco	Presencia de polvo blanco en la superficie de los separadores	Suele ser indicativo de descargas parciales [20] [21].
		Firmeza	Verificar que los separadores estén firmes y apretados por medio de las amarras.	Separadores sueltos suelen ser indicativos de vibraciones y desgastes de las amarras [20].
		Caminos de falla.	Posibles caminos de falla, poner especial atención en los separadores de barras contiguas que operen a alta tensión.	Caminos negros o señales de descargas parciales sobre la superficie de los separadores.
		Grietas y erosión.	Presencia de grietas y erosión del barniz o epóxico utilizado en los separadores.	Suele ser indicativo de vibración.

* Las cuñas se inspeccionan con más detalle. La inspección de estas se explica en el numeral 3.3.

** La inspección de las amarras se explica con detalle en el numeral 2.1.2.13.

Tabla 15. (Continuación).

4	Cabezas de bobina superior e inferior.	Polvo blanco	Presencia de polvo blanco en la superficie de las barras, principalmente en la parte saliente de la ranura.	Las descargas superficiales se presenta en forma de un polvillo blanco bien sea como una raya gruesa cuando el efecto está incrementando o como unos pequeños puntos cuando el efecto está en sus comienzos o es incipiente. Normalmente el efecto corona se encuentra en el lomo de la bobina o en su cara ancha. Se debe observar detenidamente y con mucho detalle la parte media que hay entre la bobina Top y Bottom cuando están alojadas en su respectiva ranura [20].
		Separación	Separación entre barras, signos de aflojamiento o deformación.	Verificar si la separación entre barras en el cabezal es uniforme. Que no haya signos de aflojamiento o deformación de las barras en el cabezal ni separadores ni amarres flojos [20].
		Caminos de falla.	Caminos de falla en el cabezal.	El camino de falla suele producirse en los separadores.
		Grietas y erosión.	Grietas y erosión en el aislamiento de la barra, en la parte saliente de la ranura.	Las grietas y la erosión suelen ser resultado de vibraciones, la parte más importante a inspeccionar es la salida de ranura.
		Sobrecalentamiento	Decoloración en el aislamiento, núcleo o blindajes magnéticos.	El sobrecalentamiento puede darse por muchos motivos, desde ductos de ventilación obstruidos, hasta aislamiento envejecido. Y se evidencia como una decoloración.
		Hinchazón, aislamiento poco firme o quebradizo.	Aislamiento quebradizo, flojo o hinchado.	Es indicativo de degradación por envejecimiento térmico, y separación de las capas de aislamiento. Al golpear el aislamiento se produce un sonido hueco [8].
		Pérdida del barniz.	Asperezas en la superficie de las bobinas.	Puede ser producida por los torbellinos de aire causados por los deflectores. Normalmente se presenta en las zonas 1, 2, 3 y 4 mostradas en la Figura 45.
5	CAPS	Fisuras	Fisuras en las capuchas (CAPS).	Verificar que los CAPS no presente fisuras ni estén flojos. También se deben verificar los amarres entre CAPS en las cabezas de bobina inferiores [20].

Tabla 15. (Continuación).

6	Felpas.	Flojas	Felpas flojas o desplazadas de su lugar.	Se debe revisar tanto en la parte superior como inferior que las felpas no estén flojas ni desplazadas de su respectivo sitio [20].
7	Anillo de conexión	Polvo blanco	Polvo blanco en los soportes del anillo de conexión.	Las descargas parciales en los anillos de conexión, suelen presentarse alrededor de los soportes del anillo, si es necesario se debe desmontar cada soporte para asegurar la ausencia de dichas descargas [20].
		desajuste	Soportes desajustados del anillo de conexión	Debido a la vibración se puede presentar un desajuste de los soportes del anillo.

Tomado de [4].

3.2 Resultados y análisis de la inspección visual realizada al devanado del generador.

Los equipos utilizados para la realización de la prueba fueron.

- Linterna miniatura. Para inspeccionar los lugares con poca luz, como los ductos de ventilación.
- Lámpara fluorescente portátil. Para la búsqueda de polvo blanco.
- Espejo tipo odontólogo. Para inspeccionar lugares de difícil acceso visual.
- Lupa. Para verificar con detalle cualquier anomalía.

La prueba se realizó con el fin de detectar presencia de descargas superficiales en las bobinas del estator, esta prueba se enfocó principalmente en las cabezas de bobina tanto en la parte superior como inferior del devanado.

Los resultados de la inspección visual se muestran en las Tabla 16 y Tabla 17, correspondientes a la inspección de las cabezas de bobina superiores e inferiores respectivamente. En estas tablas se especifican en qué ranura se encontró anomalía, en qué barra se encontró, que tipo de anomalía se encontró, el voltaje de la barra que presentó la anomalía y en qué parte de la barra se encontró dicha anomalía. Las siglas usadas en las tablas corresponden a:

- **CL:** Corona leve.
- **CM:** Corona media.
- **CA:** Corona alta.
- **PR:** Polvillo rojo.
- **CF:** Cuña floja.
- **AF:** Amarra floja.

Las zonas mencionadas corresponden a las mostradas en la Figura 45. Y los números de las cuña corresponden a los mostrados en la Figura 18 del numeral 1.3.3.3.

En el Anexo A.2.1 se muestra el formato utilizado para la realización de la prueba.

Tabla 16. Resultado inspección visual del devanado. Cabeza superior.

CABEZAS SUPERIORES.				
Ranura N°.	Tipo de barra.	Voltaje.	Anomalía.	Lugar de la anomalía.
3	Top	4700.79	CL	ZONA 5
17	bottom	6214.6	CL	ZONA 1
25	top	6134.92	PR	ZONA 2
29	top	1991.86	PR	ZONA 2
31	top	7648.74	CF	CUÑA 6-8-9
41	top	4382.09	PR	ZONA 2
49	top	7569.66	CA	ZONA 8
63	top	637.39	CL	ZONA 5
66	top	4222.74	PR	ZONA 2
77	bottom	5577.2	PR	ZONA 3-CUÑA 5
76	bottom	7170.69	PR	ZONA 1
79	top	7250.36	CA	ZONA 2
84	bottom	2469.9	CA	ZONA 3
109	top	2629.25	CF	CUÑA 5
110	top	1035.77	CF-PR	CUÑA 5
123	bottom	3505.67	PR	ZONA 1
127	top	4939.81	PR	CUÑA 5
130	bottom	1354.46	PR	ZONA 3
136	bottom	6533.3	CL	ZONA 3
144	top	3107.3	PR	ZONA 2
147	top	4939.81	PR	ZONA 2
179	top	7569.06	PR	ZONA 2
189	top	7569.06	Bastante PR	ZONA 2
190	top	5975.58	PR	amarra y cuña frontal
208	top	478.05	CF	tres primeras cuñas con CM
209	top	2310.56		Barra con falla
223	top	637.39	PR	CUÑA frontal
236	bottom	7170.69	PR	ZONA 1
239	top	6931.67	PR	ZONA 2 Y AMARRA
257	top	5258.51	PR	ZONA 2 Y CUÑA
258	top	1115.44	PR	ZANA 4 Y CUÑA
258	bottom	3665.02	PR	ZONA 1
262	top	5099.16	CM	ZONA 4
263	top	1274.79	PR	CUÑA
273	top	1274.79	CM	CUÑA
277	top	3027.62	PR	ZONA2 Y CUÑA FRONTAL.
278	top	1434.14	PR	ZONA 4 Y CUÑA
279	top	6612.97	PR	CUÑA

Tabla 17. Resultado inspección visual del devanado. Cabeza inferior.

CABEZAS INFERIORES.				
Ranura N°.	Tipo de Barra.	Voltaje.	Anomalía.	Lugar de la anomalía.
1	Bottom	7967.43	CL	ZONA 1
2	Bottom	6373.95	CL	ZONA 1
3	Top	1593.49	CL	ZONA 2
10	Bottom	79.61	CL	ZONA 3
17	Bottom	6214.6	CL	ZONA 3
26	Bottom	7808.09	PR	ZONA 1 y 3
32	Bottom	1912.18	PR	ZONA 1
44	Top	7409.71	CA	ZONA 4 y 2
49	Top	7569.06	PR	ZONA 2
50	Top	5975.58	PR	CUÑA 4
56	Top	4222.74	CL	ZONA 2
59	Top	7250.36	CL	ZONA 2
63	Top	637.39	PR	ZONA 2 CUÑA 4
68	Bottom	3983.72	PR	ZONA 1
71	Bottom	7330.04	CL	ZONA 3
76	Bottom	7170.69	PR	ZONA 1
79	Top	7250.36	PR	ZONA 2
83	Bottom	3824.37	PR	ZONA 1 CUÑA 4
85	Bottom	876.02	PR	ZONA 3 CUÑA 4
91	Bottom	7011.34	CA	ZONA 3 CUÑA 4
92	Top	2549.58	PR	CUÑA 4
96	Bottom	3904.04	CL	ZONA 1
99	Top	6931.67	CL	ZONA 4
104	Top	6772.32	CL	ZONA 4
105	Bottom	1195.12	CL	ZONA 1
108	Top	1115.44	PR	CUÑA 4-6
109	Top	6931.67	CL	CUÑA 4
114	Top	2788.6	CL	ZONA 2
121	Top	3426	PR	ZONA 1-2
122	Top	2868.28	PR	ZONA 2 CUÑA 4
124	Bottom	6788.6	CL	ZONA 2-3
126	Top-Bottom	6533.35	CL	ZONA 1 y 2-CUÑA 4 - 6
127	Top	2037.62	PR	ZONA 1-2 CUÑA 4
128	Top	1434.14	PR	CUÑA 4
129	Top	2947.95	PR	ZONA 1
142	Bottom	6373.95	PR	ZONA 1
146	Bottom	6333.3	CL	ZONA 1
151	Bottom	7967.43	CA	ZONA 1-3
152	Top	3186.97	PR	ZONA 2
158	Bottom	4621.11	CL	ZONA 1
166	Bottom	7808.09	CL	ZONA 1-3
167	Bottom	6214.6	CA	ZONA 3
171	top-Bottom	7648.74	PR	ZONA 1-2
176	Bottom	4541.09	PR	ZONA 3-1
186	Bottom	7489.39	CM	ZONA 3-1
189	top	1991.86	CL	ZONA 4
199	top	1991.86	CF	ZONA 4-CUÑA 4
201	top	7330.04	CL	ZONA 1-2
202	Top-Bottom	2230.88	CL	ZONA 1-2
203	Top	637.39	CL	ZONA 1-2-CUÑA 4
207	Bottom	2071.53	CL	CUÑA 4
210	Top	5656.88	CL	ZONA 2
214	Bottom	7409.71	CL	ZONA 1

Tabla 17. (Continuación).

218	Bottom	796.74	PR	ZONA 1-3
221	Bottom	7330.04	PR	ZONA 1
222	Bottom	5736.55	PR	ZONA 3-1
224	Bottom	2469.9	PR	ZONA 3-1
226	Top	3904.04	PR	CUÑA 4
227	Bottom	5577.2	PR	ZONA 2
228	top	3983.72	PR	ZONA 3 CUÑA 4
233	Bottom	3824.37	PR	ZONA 2
235	Top-Bottom	5497.53	PR	CUÑA 4
239	Top-Bottom	2629.25	PR	ZONA 1-2
248	Top-Bottom	6851.99	PR	ZONA 1-2
251	Bottom	3744.69	CL	ZONA 1-3
253	Bottom	3824.37	CL	ZONA 1
254	Bottom	6772.32	PR	ZONA 3
255	Top	5178.83	PR	CUÑA 4
257	Top	2708.93	PR	ZONA 1 CUÑA 4
258	Bottom	1115.44	PR	ZONA 1
259	Top	6931.67	PR	ZONA 1-2
261	Bottom	6692.64	CL	ZONA 1-3
262	Bottom	5099.16	PR	ZONA 1-2. CUÑA 4-6
265	Bottom	5178.83	CL	ZONA 1
266	Top	3585.35	PR	ZONA 1 CUÑA 4
267	Top-Bottom	2708.93	CL	ZONA 1-2
269	Top-Bottom	2947.95	CM	ZONA 3-4-1
272	Bottom	5099.16	PR	ZONA 1-2 CUÑA 4
273	Bottom	3505.67	PR	ZONA 1-2 CUÑA 4
278	Bottom	3946.32	PR	ZONA 1-3

Como se aprecia en las tablas anteriores el estado más común de las barras, es presencia de polvillo rojo en las cabezas superiores e inferiores del devanado lo que evidencia presencia de descargas corona. Además, en las cabezas inferiores se observan varias barras con presencia de corona leve, principalmente en barras bottom.

3.3 Prueba de Inspección de Aflojamiento de Cuñas.

Las cuñas son uno de los elementos más importantes a tener en cuenta en la inspección de los generadores, ya que estas son las que fijan la bobina en la ranura, manteniendo una presión sobre la bobina reduciendo así la vibración en la ranura, con esto se minimiza la pérdida de la capa semiconductora y del aislamiento principal. Es por esto que la inspección de las cuñas, conocida también como mapeo de cuñas se trata como un ítem diferente al de inspección visual.

Una de las principales causas de daños significativos en bobinas, es su vibración tanto en dirección radial como tangencial, produciendo así erosión en el aislamiento lateral de la bobina.

La presión radial de las bobinas es dada por las cuñas, esta presión debe ser mantenida durante toda la vida de la bobina, para esto se recomienda inspeccionar su ajuste durante el primer año de operación y luego en cada overhaul de la máquina.

En los devanados nuevos el aflojamiento se debe a que la bobina modifica sus dimensiones durante el proceso de postcurado de la resina, el cual es alrededor de un año.

La existencia de una cuña floja indica una separación existente en la dirección radial entre la ranura y la bobina, esta separación puede darse gracias al pobre empaquetamiento durante la instalación de la bobina o a sus deformaciones.

Los devanados termo-endurecidos tienden a presentar más cuñas flojas que los termoplásticos, ya que estos tienden a fijarse sobre la ranura.

Es común que las cuñas de los extremos tiendan a aflojarse durante el funcionamiento de la máquina, estas cuñas tienden a deslizarse fuera del núcleo. Esta anomalía es fácilmente detectable por medio de la inspección visual.

3.3.1 Objetivos de la Prueba de inspección de aflojamiento de cuñas.

- Verificar el estado del cuñado de la máquina.
- Determinar cuáles cuñas deben ser ajustadas o cambiadas.
- Determinar si se debe hacer recuñado total de la máquina.

3.3.2 Precauciones de la prueba

- Tener cuidado de no dañar el aislamiento de las láminas del núcleo si se usan herramientas metálicas.
- Al momento de reemplazar las cuñas bien sea por originales o usadas, se debe verificar las medidas de diseño y realizar un montaje apropiado. Para esto se debe tener claro la ubicación de cada cuña dentro de la ranura. Ver desde la Figura 18 hasta la Figura 24 del numeral 1.3.3.3, para el caso de los generadores de Salvajina.
- Tener cuidado con el lijado y la limpieza de las cuñas antes del montaje.
- Cuando las cuñas son removidas del estator se debe examinar el área de la bobina bajo la cuña, así como la ranura, sus cintas y materiales de relleno con el fin de encontrar evidencias de daño en el aislamiento, separación de cintas, daño en el laminado, rellenos flojos y la condición del barniz.

3.3.3 Preparación de la prueba.

El proceso de inspección de aflojamiento de cuñas requiere de experiencia para establecer en forma certera el ajuste y la necesidad de cambiar algunas o todas las cuñas del estator.

Si la inspección se realiza de forma manual debe hacerse con un martillo no magnético, golpeando cada cuña con el martillo, sintiendo la vibración que se produce usando los dedos de la Figura 48. Es recomendable que una sola persona sea la responsable de realizar la inspección completa del cuñado.

La inspección también se puede hacer de forma automática, usando un equipo de prueba especial.

Figura 48. Forma para realizar el mapeo de cuñas manualmente.

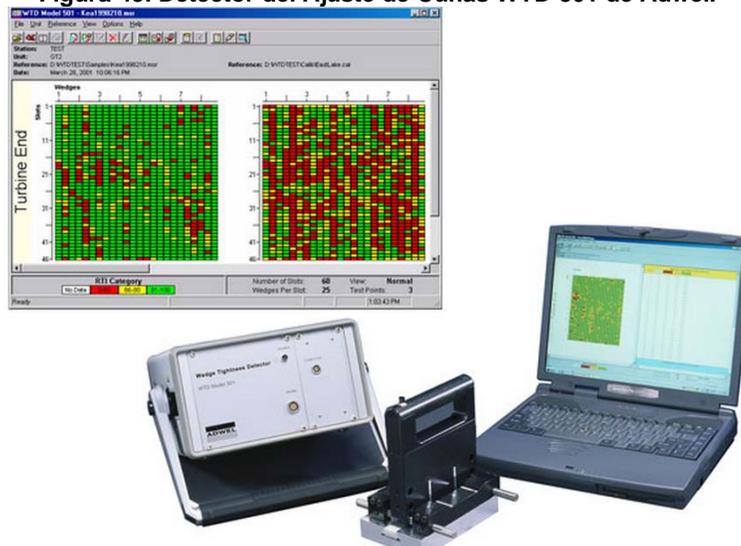


Tomado de [20].

3.3.4 Procedimiento de la inspección de aflojamiento de cuñas usando un equipo especial.

Existen dispositivos manuales y autómatas que realizan esta prueba de forma rápida. Uno de estos es el Detector del Ajuste de Cuñas WTD-501 de la empresa Adwel, el cual consiste en una sonda de mano que golpea cada cuña 10 veces por segundo, midiendo la vibración y el sonido resultante por medio de un acelerómetro. Las mediciones se transmiten al WTD-501, el cual presenta los resultados en forma de valores numéricos y de mapa de ajustes codificados por color, el operario del equipo decide cómo clasificar los valores y qué codificación de color darle a estos. En la Figura 49 se muestra el equipo WTD-501 y la forma que muestra los resultados.

Figura 49. Detector del Ajuste de Cuñas WTD-501 de Adwel.



Tomado de [45].

Para realizar la prueba usando un equipo igual o parecido al mencionado, solo se debe pasar la sonda por cada ranura, como se muestra en la Figura 50.

Figura 50. Forma de realizar la inspección de aflojamiento de cuñas, con un WTD-501.



Tomado de [46].

3.3.5 Procedimiento de la inspección manual de aflojamiento de cuñas.

La persona encargada de realizar la inspección empieza a golpear en orden las cuñas del estator usando un martillo no magnético, sintiendo la vibración y escuchando el sonido que se produce. De acuerdo a la experiencia de la persona, las cuñas se marcan de acuerdo a los siguientes criterios.

3.3.5.1 Cuñas muy flojas, inexistentes o fisuradas.

Cuando se detectan cuñas muy flojas, inexistentes o fisuradas, que presentan las siguientes características, se marcan con una "F"

- Cuando sale polvo blanco o amarillento de los lados o de la parte final de las cuñas al golpearlas, produciendo también un ruido sordo o sin resonancia.
- Cuando al golpearlas se puede sentir una vibración significativa. Esta vibración puede ser detectada por monitoreo diferencial, tomando con los dedos las cuñas y la orilla de la ranura del núcleo.
- Si frecuentemente se produce un sonido de matraca al golpear la cuña con el martillo.
- Cuando se tiene un gran vacío interno se produce un ruido como de tambor al golpear la cuña.
- Cuando la cuña tiene movimiento axial y se mueve fácilmente utilizando una palanca apoyándose en la cuña siguiente.

- Cuando las cuñas se han desplazado axialmente hacia afuera de la ranura.
- Si las cintas de relleno bajo las cuñas, presentan un desplazamiento hacia afuera.

3.3.5.2 Cuñas poco flojas.

Si las cuñas se encuentran pocos flojas, según los siguientes criterios, se marcan con una "P"

- Si la vibración se puede sentir fácilmente cuando la cuña es golpeada con un martillo, aunque no haya evidencia de polvo o movimiento axial equivalente, normalmente presenta un sonido hueco ya que presenta una baja frecuencia natural.
- Cuando hay evidencia de desplazamiento de la cinta de relleno ubicada bajo la cuña.

3.3.5.3 Presencia de pequeños vacíos. De acuerdo al criterio personal se marcan con "P".

En este caso la cuña no se puede considerar floja pero tampoco lo suficientemente apretada, es aquí donde se requiere de la experiencia para decidir si es necesario o no el cambio. La señal de que existe un pequeño vacío es el siguiente, y aquellas que presenten esto se marcan con una "P".

- Si se presenta un sonido de tambor al golpearla, por lo general es acompañado por una pequeña vibración y una baja frecuencia natural.

3.3.5.4 Ajuste apretado.

Si las cuñas se encuentran apretadas, según los siguientes criterios, no se marcan.

- Si al golpear la cuña se produce un sonido sólido, puede presentar una pequeña vibración la cual, al igual que el sonido, presentará una alta vibración natural.
- Si no existe evidencia de movimiento axial.
- Si no hay evidencia de desplazamiento de la cinta de relleno hacia afuera.
- Si no se encuentran rastros de polvo.

3.3.5.5 Muy apretada.

Se presenta la misma situación del ajuste apretado pero con un sonido más seco. Estas cuñas tampoco se marcan.

Si es posible se recomienda una segunda revisión de todas las cuñas, esta revisión debe hacerla otra persona, igualmente con mucha experiencia.

3.3.5.6 Criterios de decisión de la inspección de aflojamiento de cuñas.

El mapeo de cuñas se evalúa de la siguiente manera:

- Cuando se encuentra que el 60% de las cuñas en una ranura están marcadas con "F", se debe recuñar la ranura completa.

- Se debe recuñar toda la ranura si el 15% o 20% de las cuñas de la ranura están marcadas con “F” o “P” y se encuentran juntas [20].
- Si hay cuñas marcadas con “F” en la parte final de la ranura o cuñas marcadas con “P” en la primera o última posición de la ranura, estas deben reemplazarse.
- Se debe recuñar la ranura completa cuando: cuatro o más cuñas marcadas con “F” están juntas en alguna parte de la ranura si la longitud del estator es de 2500mm o menos, o si seis o más cuñas marcadas con “F” están juntas en alguna parte de la ranura cuando la longitud del núcleo excede los 2500mm.
- Si se tienen cuñas muy flojas pero no entran en los numerales anteriores, se deben pintar con barniz los bordes de ranura y las cuñas adyacentes.
- Si el 25% de las cuñas del estator se encuentran marcadas con “F” y/o “P”, se recomienda estudiar el recuñado total de la máquina [20].

Cuando se requiere realizar alguna acción correctiva bajo la sección de la cuña, se deben reemplazar las cintas de relleno utilizando los espesores adecuados. Es conveniente aplicar barniz entre cada tira de relleno y a la cuña.

En devanados muy “viejos” se debe hacer una evaluación de los pros y contras de la acción de recuñar todo el devanado ya que se corre el riesgo que al extraer cuñas se venga “pegado” parte del aislamiento de las bobinas. El análisis debe incluir disponibilidad de repuestos para cambiar los componentes que se deterioren o dañen durante el proceso de recuñado. En casos extremos de la condición de envejecimiento del aislamiento en donde se tiene un alto riesgo de avería por extracción de las cuñas es mejor aplicar capaz de barniz al interior de las cuñas dejando entre capa y capa el tiempo de secado del barniz hasta obtener un mejor apriete de las cuñas flojas.

3.4 Resultados y análisis de la inspección de aflojamiento de cuñas, realizado al generador.

Para diagnosticar el estado de las cuñas del generador 2 de la central Hidroeléctrica Salvajina se utilizó el Detector de Ajuste de Cuñas WTD-501.

La inspección de aflojamiento de cuñas fue realizada en el año 2010 por la firma GSS.

Para esta prueba, GSS utilizó tres clasificaciones de los valores numéricos codificados en los colores rojo, amarillo y verde.

En la Tabla 18 se muestra el resumen de la inspección de aflojamiento de cuñas.

Tabla 18. Resumen del estado de las cuñas de la unidad de generación 2 de Salvajina.

Categorías usadas			
Código de color	0-30	31-60	61-100
Criterio	Mala	Regular	Buena
% de cuñas dentro de las categorías	18,8	30	51,2

Como se logra apreciar en la Tabla 18, la mayoría de las cuñas se encuentran en buenas condiciones.

3.5 Prueba de la Resistencia Óhmica del Devanado:

La resistencia óhmica de DC en devanados de grandes máquinas es relativamente baja, por lo tanto la exactitud de la medida será significativa si se tiene un mínimo de cuatro decimales.

La prueba es muy sensible a las variaciones de temperatura, por esto el estator debe conservar una temperatura constante durante la realización de la prueba. Los resultados se deben comparar con los datos de fábrica originales.

La resistencia garantizada por el fabricante se da a una temperatura de referencia, normalmente debe hacerse la corrección de temperatura a 20°C y a 75°C.

3.5.1 Objetivos de la prueba de resistencia óhmica.

- Verificar el valor de resistencia óhmica del devanado del estator para compararlo con el dato de fábrica.
- Detectar posible cortocircuito entre espiras o cortos a tierra.
- Detectar conexiones defectuosas y/o equivocadas. Comprobando que los empalmes entre barras o bobinas hayan sido adecuados y no presenten alta resistencia.
- Detectar circuitos abiertos.

3.5.2 Precauciones de la prueba de resistencia óhmica.

- Esta prueba se debe realizar con la máquina parada, y conocer por mediciones directas o indirectas la temperatura del estator, cuando esta es diferente a la ambiente.
- Se debe verificar y garantizar la calibración de los elementos de medida que se usen.
- Garantizar buen contacto entre los terminales del equipo de medida y los terminales del devanado.
- Normalmente las medidas de resistencia óhmica son afectadas por factores como la temperatura, humedad, corrosión, potencial de prueba y su duración. De estos factores el más preocupante es la temperatura.
- La corriente D.C. aplicada debe ser máximo del 10% de la corriente nominal, con el fin de evitar elevaciones de resistencia como consecuencia de la elevación de la temperatura del cobre.
- Se deben ubicar medidores de temperatura y humedad relativa en la periferia del estator y se debe controlar que la temperatura sea igual o inferior a 70°C.

3.5.3 Preparación de la prueba de resistencia óhmica.

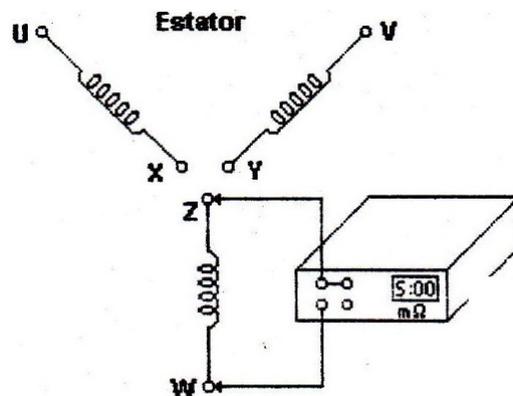
El estator debe estar limpio y seco, se requiere un puente Kelvin o un puente Wheatstone para obtener el valor de resistencia del devanado del estator por comparación directa.

Los dos métodos más comunes para medir la resistencia óhmica son el directo y el método por caída de tensión, los cuales se describirán a continuación.

3.5.3.1 Método directo.

Para este método se requiere de un puente Kelvin o Wheatstone para obtener el valor de resistencia del devanado de campo por comparación directa. El esquema de prueba para este método se muestra en la Figura 51.

Figura 51. Esquema de conexión para la prueba de resistencia del devanado del estator por medio del método directo.



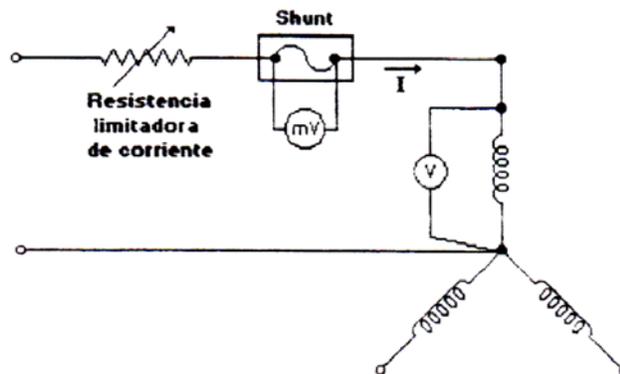
Tomado de [10].

3.5.3.2 Método de caída de tensión.

El esquema de prueba para este método se muestra en la Figura 52.

Para llevar a cabo la prueba por medio de este método se requiere: una fuente de corriente continua, dos milivoltímetros, un shunt e instrumentación calibrada para medir temperatura. Con el valor del voltaje en el devanado y la corriente se, calcula la resistencia del devanado usando la ley de Ohm.

Figura 52. Esquema de conexión para la prueba de resistencia del devanado del estator por el método de caída de tensión.



Tomado de [10].

3.5.4 Procedimiento de la prueba de resistencia óhmica.

- Se deben desconectar los terminales de línea y del neutro para tomar de forma independiente la medida de cada rama del devanado.
- Se toma la lectura de resistencia con el equipo de medida. Al valor de la resistencia total debe restársele el valor de resistencia del cable que se haya utilizado para la medida. Al mismo tiempo y si es posible se toman lecturas de temperatura por lo menos en cuatro puntos diferentes del estator para obtener un promedio, el cual se anotará en el protocolo.
- Un medidor de temperatura se instala en una de las barras del devanado del estator. Esta temperatura sirve de referencia para el promedio de las temperaturas leídas. Si la diferencia entre el promedio y la temperatura leída en el instrumento es igual o superior a 0.5 °C, se promedian estos dos valores para obtener la temperatura medida a registrar en el formato.

3.5.5 Criterios de decisión de la prueba de resistencia óhmica.

La resistencia garantizada por el fabricante se da a una temperatura de referencia, normalmente debe hacerse la corrección de temperatura a 20°C y a 75°C. Por lo tanto, el valor medido antes de compararlo con el garantizado debe corregirse por temperatura usando la ecuación 19 [11]:

$$R_s = R_t * \frac{T_s + K}{T_t + K} \quad \text{Ecuación 19.}$$

Donde:

R_s = Resistencia corregida a la temperatura de referencia.

R_t = Resistencia medida a temperatura T_t .

T_s = Temperatura de referencia.

T_t = Promedio de la temperaturas medidas.

K = Constante. Para el cobre es de 234.5 y para el aluminio es de 245.

- Si la resistencia medida y ajustada a la temperatura de referencia es mayor a la garantizada en más de un 10%, se debe repetir la medida para evitar un posible mal contacto entre los terminales del puente Kelvin y el devanado. Si la diferencia persiste se deben revisar las uniones entre los bobinas, buscando un empalme defectuoso.
- Como cualquier otra prueba eléctrica, los resultados deben compararse con los datos de fábrica originales u otros de referencia cuando se dispone de estos.
- Si el valor de resistencia es menor a los registrados con anterioridad, puede indicar la existencia de corto entre espiras del devanado.
- Si el valor de resistencia es mayor a los registrados con anterioridad, puede ser un indicio de fisuras entre las uniones de las bobinas, mal contacto o soldaduras defectuosas.
- Uno de los objetivos de la prueba es verificar que no existan cortos entre espiras, malas conexiones o circuitos abiertos, para esto la diferencia entre las resistencias ya corregidas de cada fase no debe ser mayor a 0.5%.

3.5.6 Resultados y análisis de la prueba de resistencia óhmica realizada en el generador.

La última prueba de resistencia óhmica realizada antes del cambio de devanado a la unidad 2 de generación de la central Hidroeléctrica Salvajina, fue en el año 2011.

La norma en la que se basó la prueba fue la IEEE 118 de 1978.

Los instrumentos usados para la prueba fueron:

- Medidor de resistencia óhmica Adwel International serie 222117.
- Higrómetro.
- Termómetro.

Los parámetros de la prueba fueron los mostrados en la Tabla 19.

Tabla 19. Parámetros de la prueba de resistencia óhmica del devanado.

Parámetros de la prueba.			
Temperatura ambiente (°C).		25,000	
Humedad relativa (%).		64,000	
Temperatura de referencia Ts (°C).		75,000	
Constante del material "K".		234,500	
Temp. (°C).	Estator.	Fase A.	26,200
		Fase B.	26,200
		Fase C.	26,200
	Núcleo.		26,200
	Promedio Tt.		26,200
Corriente aplicada (A).		10,000	

La prueba se realizó a cada fase por separado y posteriormente se corrigieron los resultados por temperatura a 75°C. Los resultados de la prueba se muestran en la Tabla 20.

Tabla 20. Resultado de la prueba de resistencia óhmica del devanado.

Resistencia (mΩ).	Fase R.	Fase S.	Fase T.
Medida a la temperatura Tt.	3,9280	3,9220	3,9330
Corregida a la temperatura Ts.	4,6633	4,6562	4,6692
Resistencia fabricante a 75°C.	4,5600	4,5600	4,5600

El análisis de los resultados se muestra en la Tabla 21.

Tabla 21. Análisis de los resultados de la prueba de resistencia óhmica del devanado.

Resistencia (mΩ).	Fase R.	Fase S.	Fase T.
Resistencia corregida.	4,6633	4,6562	4,6692
Promedio.	4,6629		
Datos de fábrica.	4,5600	4,5600	4,5600
Error vs promedio (%).	-0,01	0,14	-0,14
Error vs datos de fábrica (%).	-2,26	-2,11	-2,39

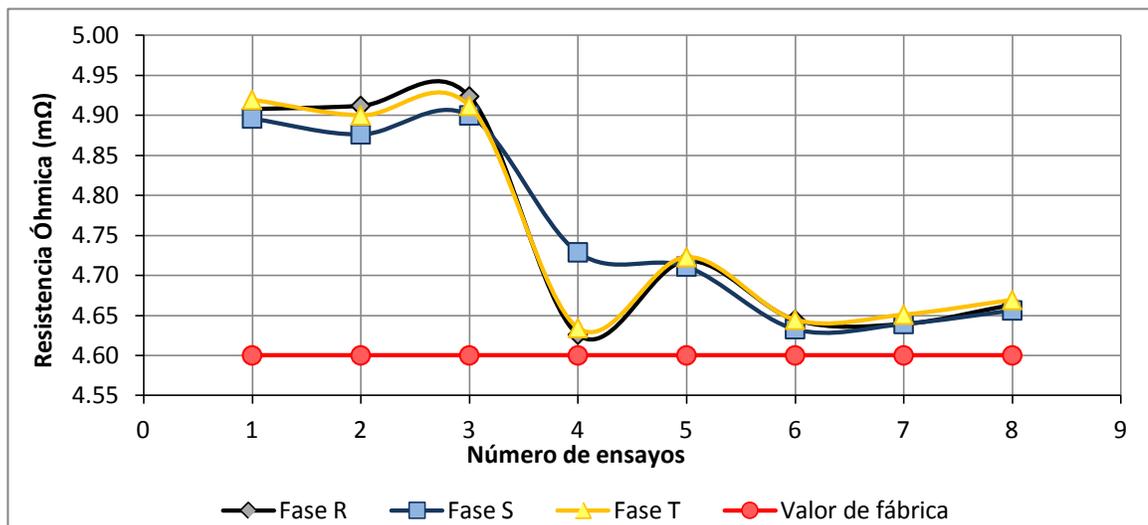
Como se aprecia en la Tabla 21 el error entre los valores de resistencia tomados durante la prueba y el valor garantizado de fábrica es menor al 2.4%, según el criterio de decisión se acepta un error máximo del 10%. Igualmente se aprecia un error máximo de 0.14% entre los resultados de la prueba en cada fase, según el criterio se acepta un máximo de 0.5%.

Adicionalmente se hace una comparación histórica con 7 pruebas realizadas anteriormente. En la Tabla 22 se muestran los valores de resistencia por fase corregidos a 75°C de cada una de las pruebas, así como el año en que se realizó. En la Figura 53 se muestra el comportamiento de la resistencia de cada fase durante las últimas 8 pruebas, en esta se logra apreciar que los valores de resistencia han disminuido, sin embargo estos se han mantenido por encima de la garantizada por el fabricante, pero dentro del rango permitido.

Tabla 22. Registro histórico de la prueba de resistencia óhmica del devanado.

Ensayo.	1	2	3	4	5	6	7	8
Año	2007	2007	2008	2009	2009	2010	2010	2011
Fase R (mΩ).	4,9077	4,9118	4,9236	4,6259	4,7181	4,6444	4,6393	4,6633
Fase S (mΩ).	4,8960	4,8763	4,8999	4,7288	4,7110	4,6328	4,6393	4,6562
Fase T (mΩ).	4,9194	4,8999	4,9118	4,6342	4,7228	4,6444	4,6508	4,6692

Figura 53. Registro histórico de la resistencia óhmica del devanado.



De lo anterior se concluye que, según esta prueba y los registros históricos, el devanado no presenta cortos entre espiras, circuitos abiertos ni conexiones erróneas.

3.6 Prueba de Resistencia de Aislamiento del Devanado Estático.

La principal causa de falla de los devanados de las máquinas eléctricas es el desgaste del aislamiento. Por esto, en la evaluación del estado de las máquinas eléctricas resulta necesario un sistema de medición que sea capaz de dar una valoración objetiva del estado del aislamiento.

Las características dieléctricas de un aislamiento en buen estado son:

- Alta resistencia superficial.
- Alta resistencia volumétrica.
- Rigidez dieléctrica.
- Resistencia a los impulsos.
- Absorción dieléctrica.
- Disipación de potencia.
- Factor de potencia dieléctrica.
- Resistencia al arco.
- Resistencia a la ionización.

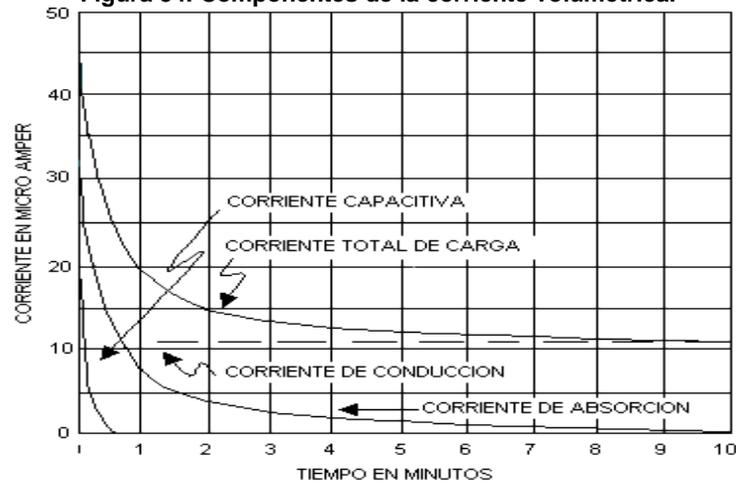
Cuando un material aislante es sometido a una diferencia de potencial, circulará por este una corriente, la cual se descompone en varios tipos de corrientes. Estos se describirán a continuación para tener un mejor conocimiento del comportamiento del sistema aislante cuando es sometido a una diferencia de potencial. Se profundizará un poco en este tema debido a que muchas de las pruebas eléctricas que se describirán y que se realizan a los devanados están relacionadas con evaluar el sistema aislante, ya que es el sistema aislante y su estado quien define la expectativa de vida funcional de la máquina.

De la misma forma se debe tener en cuenta que existen factores que afectan la medida de la prueba, estos factores se describirán más adelante.

3.6.1 Componentes de corriente.

Al someter un material aislante a una diferencia de potencial dado, hará circular por él una corriente, la cual se descompone en una corriente de fuga y una corriente volumétrica. La primera es casi constante en el tiempo y la segunda circula a través del volumen del aislamiento, esta a su vez está formada por tres componentes, que se muestran en la Figura 54 y se describen a continuación [10].

Figura 54. Componentes de la corriente volumétrica.



Tomado de [21].

3.6.1.1 Corriente capacitiva.

De magnitud comparativamente alta y de corta duración, normalmente desaparece en su totalidad cuando se toman los primeros datos, y no afecta las medidas. Está determinada por las características geométricas de los elementos que hacen el papel de placas conductoras, en medio de las cuales está el material dieléctrico. En los devanados del generador las placas están constituidas por las barras de cobre en la bobina y por el núcleo estático, el cual está aterrizado. En medio de estas dos placas está el aislamiento de las bobinas el cual actúa como dieléctrico de un capacitor [10].

3.6.1.2 Corriente de absorción.

Tiene un comportamiento decreciente, aunque más lento que la corriente capacitiva. La corriente de absorción está determinada por el material dieléctrico y es el resultado de la orientación de los dipolos en la dirección opuesta al campo eléctrico al cual está sometido el material dieléctrico. Inicialmente la corriente de absorción es grande, debido a la gran cantidad de dipolos que se orientan con el tiempo, sin embargo estos van decreciendo hasta llegar a saturar el material dieléctrico y desaparecer. Para obligar a otros dipolos a orientarse se necesita un nuevo incremento del campo eléctrico. Normalmente la resistencia medida en los primeros minutos de una prueba es en mayor parte determinada por la corriente de absorción [10]a.

Esta corriente es una función inversa del tiempo y se expresa por la Ecuación 20 [21].

$$I_A = Kt^{-n} \quad \text{Ecuación 20.}$$

Donde:

- I_A = Corriente de absorción.
- K = Función del voltaje aplicado, la capacitancia y el sistema aislante particular.
- t = Tiempo.
- n = Exponente que es una función característica del sistema aislante.

3.6.1.3 Corriente de conducción.

Circula a través del material dieléctrico y al igual que la corriente de fuga en la superficie es casi constante. Esta corriente predomina después de que la corriente de absorción se hace insignificante. Tanto la corriente de fuga superficial como la conducción en el material dieléctrico se ven favorecidas por la presencia de humedad y contaminantes tales como aceites y grasas. La presencia de estos contaminantes en la superficie de los devanados hace que se disminuya fuertemente la resistencia superficial del aislamiento, incrementando así la corriente superficial. La disminución de la resistencia superficial se hace mucho más grave con la presencia de polvo y partículas en general, retenidas en la superficie de los devanados [10].

3.6.2 Factores que afectan la medida de la resistencia de aislamiento.

Como ya se mencionó, existen diversos factores que afectan los valores medidos durante la prueba, algunos de estos factores afectan más significativamente que otros. A continuación se explicarán los diferentes factores que afectan la medida [10].

3.6.2.1 Efectos de la condición de la superficie en la resistencia de aislamiento.

La medida de resistencia de aislamiento permitirá detectar imperfecciones en la estructura del aislamiento, ocasionados en la mayoría de los casos por defectos en la colocación del aislamiento, golpes o esfuerzos mecánicos. Sin embargo, la detección de estos defectos depende del nivel de humedad o de suciedad que se forme en la superficie de la falla, pues en este caso debido a que la tensión de prueba es baja, solo se incrementan de forma significativa las corrientes superficiales impidiendo la detección de las imperfecciones en la estructura propia del aislamiento [10].

Cuerpos extraños como polvo de carbón depositado en la superficie generan corrientes superficiales que pueden disminuir la resistencia del aislamiento, el polvo o las sales normalmente no son conductores cuando están secos. Sin embargo se pueden volver parcialmente conductores si se expone a humedad o aceite [10].

Si la resistencia de aislamiento o el índice de polarización se reducen debido a la contaminación, se pueden llevar a un valor apropiado si se realiza un proceso de limpieza y de secado. Además se puede hacer un seguimiento al proceso de eliminación de humedad de un devanado ya que aplicándole calor en forma uniforme, las corrientes superficiales y volumétricas se reducen, logrando el aumento de la resistencia de aislamiento [10].

3.6.2.2 Efectos de la humedad en la resistencia de aislamiento.

Si la temperatura del devanado es baja en presencia de alta humedad relativa puede haber condensación en el devanado lo que produce una película de humedad en este, la cual reduce la resistencia del aislamiento. Por ende es importante tomar las medidas de resistencia cuando la temperatura del devanado está por encima del punto de condensación, el cual depende de la humedad y la presión atmosférica. El efecto es más pronunciado si la superficie se haya contaminada [10].

Muchos tipos de aislamiento de devanados son higroscópicos, y la humedad puede ser atraída al interior del cuerpo del aislamiento desde el medio ambiente húmedo. La

humedad absorbida tendrá un gran efecto en la resistencia de aislamiento. Las máquinas en servicio por lo regular están a una temperatura suficientemente alta para evitar la condensación y así evitar la humedad. Cuando la maquina se encuentra fuera de servicio las pruebas se pueden realizar antes de que la temperatura caiga por debajo del punto de condensación, o se puede calentar para que quede por encima de este punto [10].

3.6.2.3 Efectos de la temperatura en la resistencia de aislamiento.

El valor de la resistencia de aislamiento de un devanado depende de la temperatura del devanado y del tiempo transcurrido desde la aplicación de la tensión. La resistencia de aislamiento de la mayoría de los materiales varía inversamente de forma exponencial con la temperatura [10].

Para eliminar el efecto de la temperatura al momento de comparar los valores medidos, estos deben corregirse a 40°C, usando la Ecuación 21 [21]. Donde la constante K_t se puede obtener de la Ecuación 22 [21] para aislamientos *Termoplásticos* (usados generalmente antes de 1960, como los sistemas asfálticos) y de las Ecuaciones 23 y 24 [21] para aislamientos *Termo endurecidos* (usados después de 1960, incluyen sistemas aislantes basados en poliéster y epóxico), también se puede obtener de la Figura 55 o de la Tabla 23.

$$R_c = K_t * R_t \quad \text{Ecuación 21.}$$

Donde:

- R_c Resistencia de aislamiento ($M\Omega$) corregida a 40 °C.
- R_t Medida de resistencia de aislamiento ($M\Omega$) a la temperatura t .
- K_t Coeficiente de temperatura resistencia de aislamiento a la temperatura t .

$$K_T(T) = 0.5^{(40-T)/10} \quad \text{Ecuación 22.}$$

$$\text{Para } 40^\circ\text{C} < T < 85^\circ\text{C} \quad K_T(T) = e^{-4230\left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{313}\right)} \quad \text{Ecuación 23.}$$

$$\text{Para } 10^\circ\text{C} < T < 40^\circ\text{C} \quad K_T(T) = e^{-1245\left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{313}\right)} \quad \text{Ecuación 24.}$$

Figura 55. Variación aproximada con la temperatura del factor de corrección para máquinas rotativas.

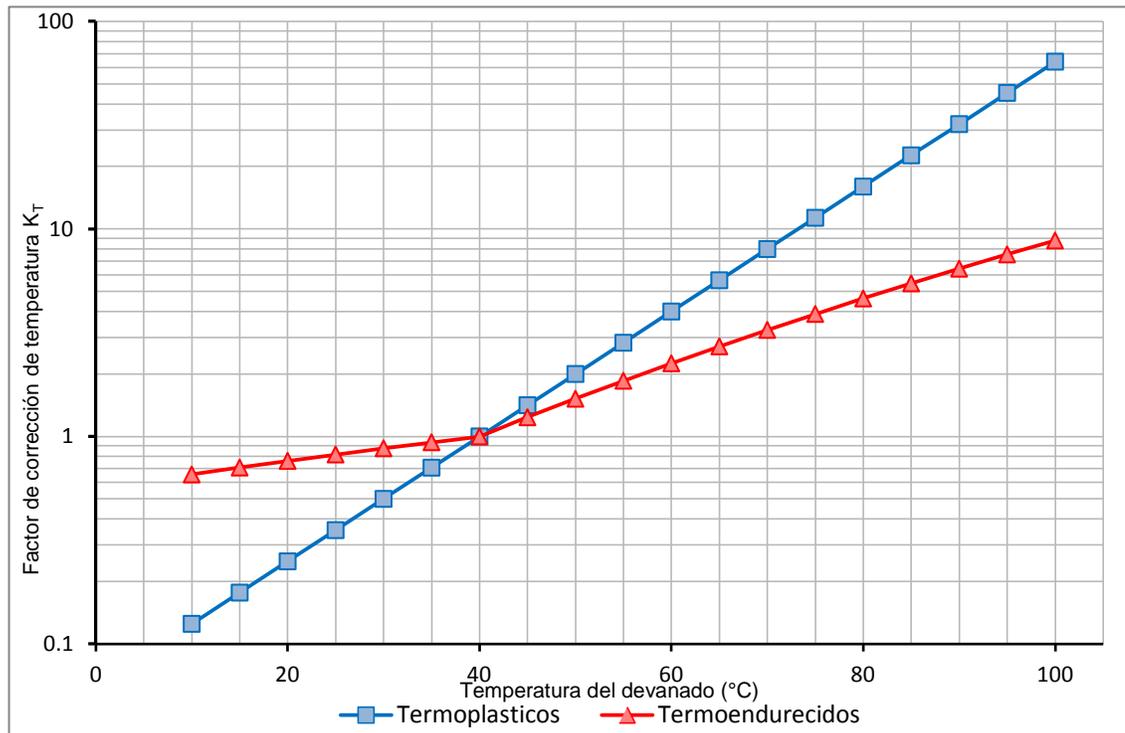


Tabla 23. Factor de corrección por temperatura K_t.

T (°C).	KT (Termoplásticos).	KT (Termo endurecidos).
10	0,125	0,656
20	0,250	0,762
30	0,500	0,877
40	1,000	1,000
50	2,000	1,520
60	4,000	2,252
70	8,000	3,261
80	16,000	4,625
85	22,627	5,467

Tomado de [21].

Para el índice de polarización no es necesario realizar la corrección de temperatura, ya que en 10 minutos la variación de la temperatura es poca, generando un efecto insignificante para el cálculo del índice de polarización.

3.6.2.4 Efectos de la magnitud del potencial en la resistencia de aislamiento.

El valor de resistencia de aislamiento puede disminuir un poco al aumentar el potencial aplicado. Sin embargo, para un aislamiento en buenas condiciones y completamente seco se obtendrá substancialmente la misma resistencia de aislamiento para cualquier potencial hasta el valor pico de la tensión nominal [10].

Si la resistencia de aislamiento disminuye significativamente con el aumento del potencial aplicado, puede ser un indicio de imperfecciones o fracturas del aislamiento debido a los efectos de la suciedad, humedad, una mezcla de estos o el resultado de otros fenómenos de deterioro. La variación de la resistencia es más pronunciada en potenciales considerablemente por arriba de la tensión nominal [10].

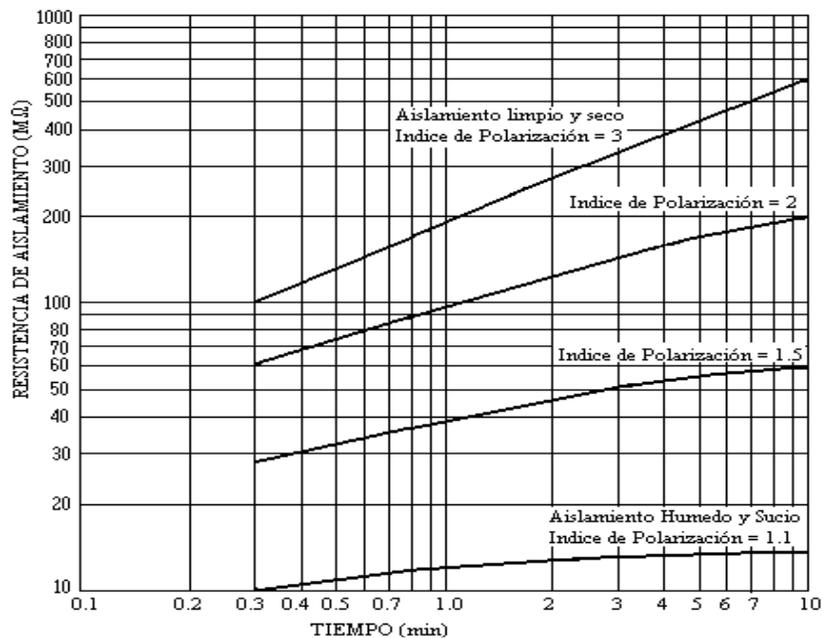
3.6.2.5 Efectos de la duración de la prueba en la resistencia de aislamiento.

En un devanado limpio y seco, la corriente de conducción es muy pequeña y por lo tanto será la componente de absorción la que determine el comportamiento de la resistencia después de un minuto.

El valor de la resistencia de aislamiento de un devanado, normalmente crecerá con la duración de la aplicación de la prueba de DC (ver Figura 56), este aumento normalmente será rápido cuando se aplica por primera vez el potencial, y con el paso del tiempo se acercará a un valor constante. El valor de la resistencia de aislamiento de un devanado seco en buenas condiciones puede continuar aumentando durante horas si se aplica una tensión constante. Sin embargo un valor relativamente estable se alcanza normalmente entre diez y quince minutos. Si el bobinado está húmedo o sucio, el valor de la resistencia de aislamiento se estabilizará en uno o dos minutos después de aplicar el potencial de prueba [10].

Si el aislamiento lo permite, se puede aplicar el potencial de prueba durante diez minutos o más para poder desarrollar la característica de absorción dieléctrica del devanado (Figura 56). Las lecturas se tomarán cada diez segundos durante el primer minuto, y luego cada minuto hasta el tiempo límite. Esta característica puede ser usada para detectar humedad o suciedad en el devanado [10].

Figura 56. Variación típica de la resistencia de aislamiento con el tiempo para aislamiento clase b, en devanados de AC.



Tomado de [10].

La resistencia de aislamiento en un minuto es útil para evaluar la condición del aislamiento cuando se hacen comparaciones con datos anteriores y posteriores obtenidos en condiciones similares.

3.6.2.6 Efecto de la presencia de carga en la resistencia de aislamiento.

Las medidas de resistencia de aislamiento presentarán errores si existen cargas residuales en el aislamiento, por consiguiente, antes de medir la resistencia de aislamiento o el índice de polarización, el devanado debe ser completamente descargado a tierra junto con la armadura de la máquina. Si existe cualquier duda acerca del tiempo de descarga, se debe medir la corriente de descarga entre el devanado y tierra, la cual se manifiesta como una deflexión inversa de la aguja [10].

Después de la aplicación de un alto potencial DC, es importante poner a tierra el devanado por seguridad, para no afectar la exactitud de pruebas subsecuentes [10].

3.6.3 Objetivos de la prueba de resistencia de aislamiento.

- Determinar el estado de humedad del devanado.
- Detectar imperfecciones en la estructura del aislamiento, ocasionados en la mayoría de los casos por defectos en la colocación del aislamiento, golpes o esfuerzos electromecánicos.

3.6.4 Precauciones para la prueba de resistencia de aislamiento.

- Durante la realización de la prueba de resistencia de aislamiento se aplican voltajes altos de D.C. y debido que los devanados tienen propiedades inductivas y capacitivas, se pueden producir accidentes debido a la energía que se almacena en estos durante la prueba. Para evitar estos accidentes, se debe descargar el devanado a través de una resistencia a tierra por un tiempo mínimo de cuatro veces el tiempo de duración de la prueba.
- La temperatura del devanado debe estar unos grados por encima del punto de condensación del agua, para evitar la concentración de humedad en el aislamiento del devanado.
- Se recomienda que cada una de las fases sea aislada y examinada separadamente, cuando sea factible, como se describe en el numeral 3.6.6.3.
- Las pruebas se pueden hacer a todo el devanado una vez se cumplan ciertas condiciones. Una objeción para probar todas las fases de una vez es que solamente se prueba el aislamiento a tierra.
- Es esencial que el potencial aplicado al devanado sea constante para prevenir que la corriente de carga fluctúe e interfiera en la medición.
- Debe restringirse el valor de la tensión aplicada a un valor apropiado dentro del rango de voltaje del devanado (ver Tabla 24) y la condición fundamental del aislamiento. Esto es particularmente importante en el caso de máquinas de bajo voltaje o unidades húmedas, ya que cuando el potencial en la prueba es demasiado alto, este puede causar fatiga en el aislamiento.

- Antes de efectuar la medida de resistencia de aislamiento, se debe verificar la buena calibración del megóhmetro u otros elementos de medida que se usen.
- Antes de efectuar medidas de resistencia de aislamiento debe comprobarse que el aislamiento de los conductores que unen el megóhmetro con el devanado, no afecte la medida.
- Los cables que unen el megóhmetro con los devanados no deben tener contacto con tierra o entre sí. De otra manera la corriente de fuga y las pérdidas por efecto corona pueden introducir errores en los datos de la prueba.
- Por motivos de seguridad y para evitar la medición de corrientes parasitas, los cables de prueba pueden ser blindados.

3.6.5 Preparación de la prueba de resistencia de aislamiento.

- La superficie del aislamiento debe estar limpia y seca en caso que la medida sea para suministrar información sobre la condición del interior del aislamiento, para así diferenciarlo de la condición de la superficie. La limpieza de la superficie es de gran importancia cuando las pruebas son hechas en ambiente húmedo.
- Verificar la limpieza y los amarres del devanado estatórico.
- Aterrizar todos los elementos de medida que puedan verse afectados por la prueba.
- Verificar cuidadosamente el circuito de prueba, según la Figura 57 o la Figura 58.
- Para grandes máquinas se debe disponer estratégicamente de varias personas que observen atentamente los devanados, durante la realización de la prueba. Éstas deben conocer las características de una falla: Chispa, ruido o humo.
- Todo el personal debe conocer el momento exacto en que comienza la prueba, considerar las precauciones y la tensión que se va aplicar.
- Se debe registrar la temperatura ambiente, humedad relativa, punto de condensación, temperatura del bobinado, tiempo fuera de servicio, tensión de prueba y la disposición de la conexión en el momento de realización de la prueba.

3.6.6 Procedimiento de la prueba de resistencia de aislamiento.

Existen diferentes factores que afectan los datos medidos de resistencia de aislamiento en la prueba, adicionalmente se pueden obtener los índices de absorción y polarización, dependiendo del tiempo de aplicación de la prueba [10].

3.6.6.1 Nivel de tensión para la prueba.

El nivel de tensión requerido durante la prueba de acuerdo al voltaje nominal de la máquina, se obtiene de la Tabla 24.

Tabla 24. Tensión de prueba para la medición de resistencia de aislamiento.

Tensión Nominal (V).	Tensión de prueba (V).
<1000	500
1000-2500	500-1000
2501-5000	1000-2500
5001-12000	2500-5000
>12000	5000-10000

Tomado de [21].

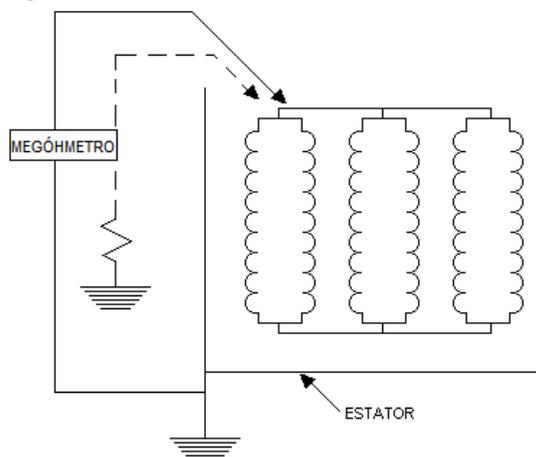
La prueba de resistencia de aislamiento puede hacerse por fases o al devanado completo, se recomienda realizarla por fases para realizar el diagnostico del devanado, y se recomienda realizar la prueba al devanado completo durante el secado del devanado para garantizar la ausencia de humedad [21].

3.6.6.2 Medida de la resistencia de aislamiento a todo el devanado.

Esta medida se efectúa al devanado completo de acuerdo al esquema mostrado en la Figura 57.

Antes de iniciar el secado, se deben conectar sólidamente entre sí todos los terminales de bobina que no estén aislados. El mismo procedimiento se sigue con los terminales de bobina inferiores que no estén aislados. Para realizar la medida de resistencia de aislamiento al devanado completo se cortocircuitan los tres terminales de fase, y se les conecta la línea del megóhmetro a utilizar. El terminal de tierra del megóhmetro se conecta al mismo punto donde está puesta a tierra del estator, como se muestra en la Figura 57 [10].

Figura 57. Circuito de prueba devanado completo.



Tomado de [10].

Antes de efectuar las medidas de resistencia de aislamiento, se registran las medidas de temperatura en los siguientes puntos:

- Centro del estator.
- Arriba del núcleo.
- Mitad del núcleo.
- Parte baja del núcleo.

Las medidas de resistencia de aislamiento se realizan hasta que el índice de polarización sea satisfactorio [10].

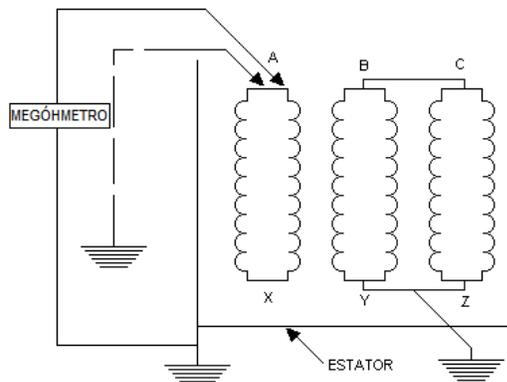
Las medidas de resistencia de aislamiento se realizan de la siguiente manera:

- Cada hora: resistencia de aislamiento de 30 segundos y un minuto.
- Cada dos horas: Resistencia de aislamiento de 10 minutos.

3.6.6.3 Medida de la resistencia de aislamiento por fase.

Las medidas de resistencia de aislamiento a cada fase se efectúan de acuerdo con el esquema mostrado en la Figura 58.

Figura 58. Esquema de prueba fase por fase.



Tomado de [10].

Para realizar la medida de resistencia de aislamiento por fases, se conecta el terminal de línea del megóhmetro a la fase a probar y el terminal de tierra a la tierra del estator. Se deben conectar, sólidamente entre sí, los otros dos terminales superiores e inferiores de las fases que no se probarán [10].

El terminal de tierra del megóhmetro se conecta al mismo punto donde está puesta a tierra la carcasa, y las dos fases que no se van a medir, como se muestra en la Figura 58.

Antes de efectuar las medidas de resistencia de aislamiento, se deben registrar las medidas de temperatura en los siguientes puntos. [10]

- Centro del estator.
- Temperaturas arriba del núcleo.

- En la mitad del a núcleo.
- Parte baja del núcleo.

La secuencia recomendada para realizar la prueba de resistencia de aislamiento por fases es la siguiente:

- Terminal de línea del megóhmetro en la fase A, se cortocircuitan y aterrizan las fases B y C.
- Terminal de línea del megóhmetro en la fase B, se cortocircuitan y aterrizan las fases A y C.
- Terminal de línea del megóhmetro en la fase C, se cortocircuitan y aterrizan las fases A y B.

Cada dos horas se toman lecturas de resistencia de aislamiento al devanado completo a: los 15 segundos, 1 minuto y 10 minutos. A la hora siguiente de tomadas las resistencias de aislamiento al devanado completo, se toma la resistencia de aislamiento de quince segundos y un minuto a cada fase, con las otras dos aterrizadas [10].

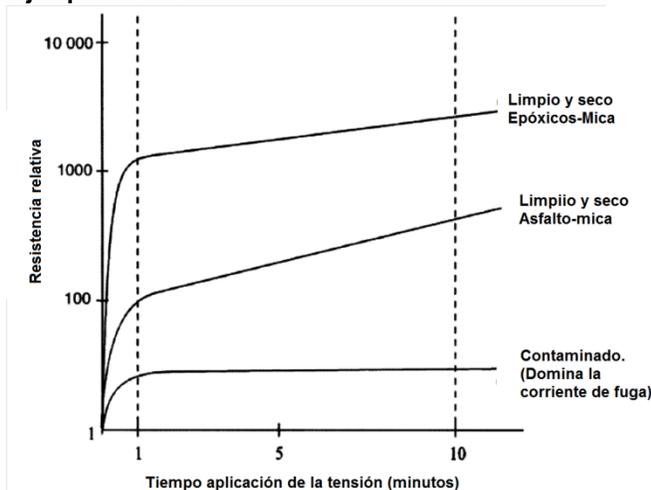
Cada cuatro horas se toma la lectura de humedad relativa en el sitio de montaje del estator. Los datos de humedad relativa sirven para analizar el comportamiento del aislamiento durante el secado [10].

3.6.6.4 Índice de polarización I.P.

El índice de polarización es el cociente entre el valor de resistencia de aislamiento en diez minutos y el valor de resistencia de aislamiento en un minuto, como se muestra en la Ecuación 25 [21] es un indicativo de la pendiente de la curva característica de la Figura 59. El índice de polarización puede ser útil para determinar el grado de humedad de un devanado y determinar si es conveniente la aplicación de la prueba de sobretensión [10].

$$I.P. = \frac{R_{10 \text{ min}}}{R_{1 \text{ min}}} \quad \text{Ecuación 25.}$$

Figura 59. Ejemplo de curvas características de diferentes sistemas aislantes.



Tomado de [21].

3.6.6.5 Índice de absorción I.A.

Cuando no se cuenta con antecedentes históricos para la evaluación de la resistencia de aislamiento, se emplea como elemento de apoyo la razón de absorción dieléctrica, que es igual a la razón entre la resistencia de aislamiento medida a los sesenta segundos y la resistencia de aislamiento medida a los treinta segundos, como se muestra en la Ecuación 26 [21].

$$I. A. = \frac{R_{60 \text{ seg}}}{R_{30 \text{ seg}}} \quad \text{Ecuación 26.}$$

3.6.7 Criterios de decisión para la prueba de resistencia de aislamiento.

Existen dos criterios de decisión basados en las medidas de resistencia de aislamiento que permiten determinar el estado de un aislamiento. Estos son el criterio de resistencia de aislamiento de un minuto y el de índice de polarización.

3.6.7.1 Criterio de una buena resistencia de aislamiento.

Las normas dan los valores mínimos de resistencia de aislamiento que debe tener un devanado de una máquina rotativa, en función del voltaje a una temperatura de referencia para considerar que está en buen estado.

Según [21] el valor mínimo de la resistencia de aislamiento de una máquina corregido a 40°C, se determina según la Tabla 25.

Tabla 25. Resistencia de aislamiento mínima a 40 °C.

Resistencia de aislamiento mínima (MΩ).	Máquina en prueba.
$IR_{1\text{min}} = kV + 1$	La mayoría de los devanados fabricados antes de 1970, todos los devanados de campo y otros devanados no descritos en esta tabla.
$IR_{1\text{min}} = 100$	Para la mayoría de los bobinados de A.C. (Bobinas enrolladas) fabricados después de 1970.
$IR_{1\text{min}} = 5$	Para la mayoría de las máquinas con bobinado del estator aleatorio y con bobinas enrolladas con una tensión nominal menor de 1 kV y armaduras de C.C.

Tomado de [21].

Donde:

$IR_{1\text{min}}$ = Resistencia de aislamiento mínima recomendada en Mega ohms a 40 °C a 1 minuto.

kV = Tensión línea-línea rms nominal de la máquina.

Una manera útil de monitorear la condición del aislamiento de una máquina dada, es realizar comparaciones entre datos de pruebas anteriores como el índice de polarización y el valor de resistencia aislamiento corregido a 40 °C. Estas mediciones deben haber sido realizadas bajo condiciones uniformes de temperatura, humedad, etc. [21].

Cuando no está disponible el historial de la resistencia de aislamiento, los valores mínimos recomendados deben ser los dados en la Tabla 25 y un valor mínimo de índice de polarización de uno.

El valor observado de la resistencia de aislamiento para la evaluación de la condición del devanado de la máquina no debería ser considerado como criterio exacto, ya que tiene varias limitaciones como [21]:

- La resistencia de aislamiento de un bobinado no está relacionada directamente con su rigidez dieléctrica. Es imposible especificar el valor de resistencia de aislamiento, para el cual un devanado fallará eléctricamente.
- En grandes máquinas los bobinados poseen un área de superficie sumamente grande, y pueden tener valores de resistencia de aislamiento más bajos que el valor mínimo recomendado.
- Si se toma un solo valor de resistencia de aislamiento no se puede determinar si existe humedad, sustancias o elementos extraños en el devanado. Para determinar si el devanado se encuentra contaminado o húmedo, son necesarios los índices de absorción y polarización.

3.6.7.2 Criterio del índice de polarización.

En un devanado limpio y seco, la corriente de conducción es muy pequeña, y por lo tanto será la componente de absorción la que determine el comportamiento de la resistencia después de un minuto [21].

Si un aislamiento está húmedo o contaminado, el efecto de la corriente de absorción en la medida de resistencia de aislamiento no es apreciable, debido a que la componente de conducción es muy grande. La corriente de fuga inicialmente es grande y después de decrecer durante un período de tiempo corto, aproximadamente dos minutos, se estabiliza. En este caso el valor del I.P. tiende a 1. [21]

Como se mencionó anteriormente el IP no depende de la temperatura, igualmente no depende tampoco del tamaño de la máquina cuando se comparan los valores obtenidos con los recomendados, ni estará afectado por condiciones ambientales existentes durante la prueba. Las anteriores ventajas hacen que el criterio de I.P sea el más usado para comparar valores obtenidos de una misma máquina [21].

Apoyándose en los registros históricos de I.P obtenidos de los devanados de una máquina, se puede hacer un seguimiento al proceso de contaminación por el polvo y materiales en suspensión en el aire y principalmente por la absorción de humedad [21].

Para efectuar comparaciones entre los índices de polarización debe tenerse la precaución de que éstos hayan sido tomados con un mismo voltaje de prueba.

El valor mínimo recomendado para el índice de polarización depende de la clase térmica del aislamiento, estos valores se muestran en la Tabla 26.

Tabla 26. Valores mínimos recomendados de I.P.

Clase térmica.	I.P. Mínimo.
Clase 105 A	1.5
Clase 130 B y superiores	2.0

Tomado de [21].

Está reconocido que puede ser posible operar las máquinas a valores por debajo del valor mínimo recomendado. Sin embargo no es recomendable.

Si un índice de polarización es menor que uno después de efectuar la limpieza y un buen secado, se debe consultar con el fabricante del equipo [21].

Un alto índice de polarización en un devanado viejo, puede ser una condición anormal. Por ejemplo, un índice de polarización de cinco o más para un devanado de veinte años de uso, podría indicar que el aislamiento del devanado está intacto eléctricamente, pero puede haber perdido su rigidez mecánica; el cual podría incurrir en una fractura repentina por un choque mecánico debido a la fragilidad del aislamiento [21].

Cuando las cabezas de bobina de la máquina son tratadas con material semiconductor, con el propósito de eliminar el efecto corona, la resistencia de aislamiento observada puede ser algunas veces más pequeña que el valor de una máquina similar no tratada [21].

En el momento de decidir sobre el estado de un aislamiento se pueden considerar los dos criterios, un índice de polarización bueno o satisfactorio y una resistencia de aislamiento de un minuto, que puede establecer mediante cualquiera de las fórmulas expuestas. No obstante, si nos atenemos a los fundamentos de criterio del IP, siempre que este sea bueno, el devanado analizado estará en condiciones de soportar el voltaje de la prueba de alta tensión o el de operación nominal [21].

Cuando el valor de la resistencia de aislamiento en 1 minuto es superior a los 5000 MΩ, el valor de la corriente puede estar en el orden de nano amperes según la tensión aplicada. En este nivel de sensibilidad pequeños cambios en el nivel de tensión, condiciones ambientales y otros componentes no relacionados pueden afectar en gran medida la corriente total, haciendo que el IP pueda ser o no un indicativo de la condición del aislamiento [21].

En algunos casos, específicamente en los devanados con barras tipo Roebel que cuentan con control de esfuerzos en las cabezas de bobina y estos están en contacto directo con el cobre de las barras, la corriente de fuga superficial puede ser mucho mayor a la corriente de absorción haciendo que la corriente total sea casi constante en el tiempo, dando como resultado un valor de IP cercano a 1, reduciendo así la utilidad de la prueba [21]a.

3.6.7.3 Criterio de índice de absorción I.A.

En términos generales se pueden establecer los rangos de aceptación del índice de absorción como se muestra en la Tabla 27.

Tabla 27. Evaluación del índice de absorción.

Valor del I.A.	Evaluación.
Menor a 1,1	Peligroso.
1,1 - 1,25	Cuestionable.
1,25 - 1,4	Aceptable.
Mayor a 1,4	Bueno.

Tomado de [10].

3.6.8 Resultados y análisis de la prueba realizada en el generador.

La prueba de resistencia de aislamiento realizada al devanado estático, se ejecutó en febrero 1 de 2008 a cargo de EPSA. Los instrumentos usados para la realización de la prueba fueron:

- Medidor de aislamiento Megger Fluke 1550B.
- Termómetro.
- Higrómetro.
- Cronómetro.
- Cables tipo caimán.

Los parámetros de la prueba se muestran en la Tabla 28.

Tabla 28. Parámetros de la prueba de aislamiento.

Parámetros de la prueba.	
Humedad relativa.	60
Temperatura Estator (°C).	Arriba. 27
	Centro. 27
	Abajo. 27
	Promedio. 27,00
Constante de corrección por temperatura Kt.	0,41
Tensión aplicada (V).	5116

Los resultados de la prueba se muestran en la Tabla 29. En esta se aprecia que el valor de resistencia de aislamiento corregido promedio de las tres fases era de 618MΩ.

Tabla 29. Valores de resistencia de aislamiento de las tres fases obtenidos en la prueba.

Medida De Resistencia Aislamiento.						Resistencia promedio Corregida a 40°C (MΩ).	
Resistencia De Aislamiento (MΩ).	Tiempo.	Fase R.	Fase S.	Fase T.	R Prom.		
	R= 15 s	440	443	434	439	R= 15 s	179
	R= 30 s	819	896	872	862	R= 30 s	352
	R= 45 s	1170	1290	1260	1240	R= 45 s	507
	R= 1 min	1400	1690	1450	1513	R= 1 min	618
	R= 2 min	2310	2970	2950	2743	R= 2 min	1121
	R= 3 min	3000	4700	4200	3967	R= 3 min	1621
	R= 4 min	3590	4920	5320	4610	R= 4 min	1884
	R= 5 min	4150	5910	6570	5543	R= 5 min	2265
	R= 6 min	4450	6880	7030	6120	R= 6 min	2501
	R= 7 min	5300	7820	7990	7037	R= 7 min	2875
	R= 8 min	5430	8660	8930	7673	R= 8 min	3135
	R= 9 min	5800	9470	9800	8357	R= 9 min	3414
	R= 10 min	6160	10200	10700	9020	R= 10 min	3685

Con los valores obtenidos de resistencia en 30 segundos, 1 y 10 minutos se calcula el índice de polarización y el índice de absorción, el valor de estos se muestran en la Tabla 30.

Tabla 30. Índices obtenidos de la prueba de aislamiento.

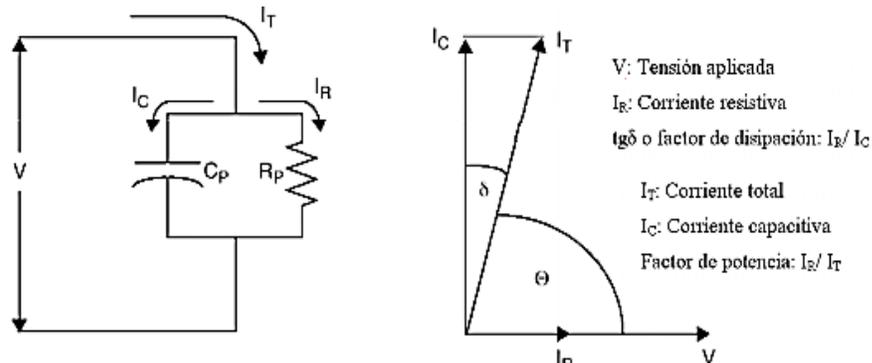
Índices calculados.	
Índice de absorción (I.A.).	1,75
Índice de Polarización (I.P.).	5,96
Resistencia Calculada (MΩ).	618,32

Según el resultado de la prueba, se concluye que el aislamiento del devanado se encuentra en buenas condiciones, sin embargo puede estar debilitado en su composición estructural.

3.7 Prueba de Factor de Potencia y Factor de Potencia Tip-Up.

Cuando un aislamiento se somete a una diferencia de potencial, aparecerán dos corrientes significativas, una relativamente alta " I_c " que está desfasa 90° del voltaje y una corriente pequeña " I_r " que está en fase con el voltaje, como se muestra en la Figura 60 izquierda.

Figura 60. Componentes de la corriente de aislamiento con una tensión A.C.



Tomado de [25].

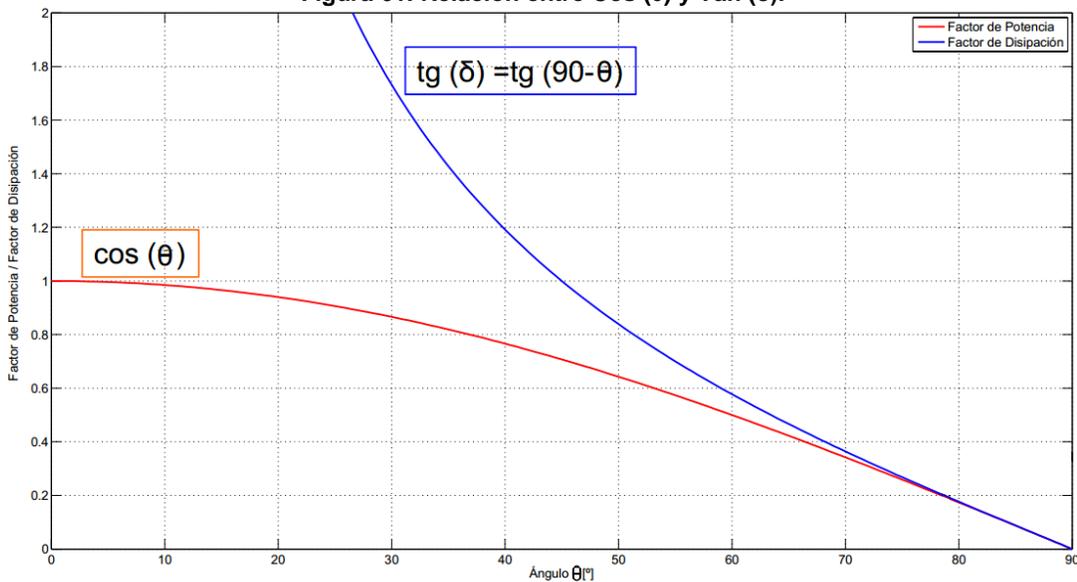
El factor de potencia es la relación entre la potencia disipada en el aislamiento en Vatios y el producto del voltaje sinusoidal y la corriente eficaz en Volt-Ampere, en otras palabras es la relación entre la corriente resistiva y la corriente total.

El resultado de esta relación es una cantidad adimensional, como se muestra en la ecuación 27 [14] [18]:

$$PF = \cos \theta = \sin \delta = \frac{I_r}{I_t} = \frac{E(I_r)}{E(I_t)} = \frac{\text{Watts}}{\text{Volts} * \text{Amper}} \quad \text{Ecuación 27.}$$

El factor de disipación o Tan (δ) es la relación entre la componente resistiva y la corriente capacitiva, esta tiende a igualarse con el factor de potencia cuando el ángulo θ tiende a 90° como se muestra en la Figura 61. En términos prácticos se considera que: $FP = \cos(\theta) = \tan(\delta)$, ya que el valor del ángulo θ suele ser cercano a 90° cuando la prueba se realiza en un material aislante.

Figura 61. Relación entre Cos (θ) y Tan (δ).



Tomado de [25]a.

El factor de potencia aumenta a medida que el voltaje de prueba incrementa. Esto se da porque a medida que el voltaje empieza a aumentar el aire y el gas localizado en los huecos presentes en el aislamiento empiezan a ionizarse, cuando el gradiente de tensión del gas es superado ocurre una descarga parcial lo que genera un aumento del factor de potencia, el circuito equivalente de la descarga parcial se muestra en la Figura 60 derecha [18].

Valores de factor de potencia relativamente altos a valores bajos de voltaje suelen darse cuando el devanado está envejecido ya que se reduce la rigidez física, se presentan delaminaciones y se crean huecos en el aislamiento. De igual forma el incremento puede darse por la resistencia de contacto entre la bobina y la ranura por el deterioro de la pintura de grafito lo cual puede generar descargas de ranura [18].

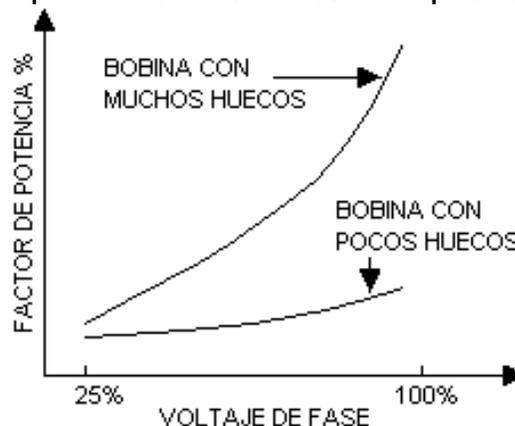
El factor de potencia se expresa en porcentaje. Por ejemplo el factor de potencia para un aislamiento del tipo epoxi-mica es típicamente alrededor de 0.5% y para un aislamiento asfáltico es alrededor del 3%, generalmente es deseable que sea muy bajo. Pero el hecho que posea altas pérdidas dieléctricas (corriente " I " alta) no necesariamente implica que el aislamiento este deteriorado [18].

El factor de potencia Tip-Up está definido como la diferencia del factor de potencia medido a dos tensiones diferentes, normalmente los medidos a 25 y 100% de la tensión línea-tierra del devanado [18]. A continuación se describe con más detalle el factor de potencia Tip-Up.

3.7.1 Factor de potencia Tip-Up.

Se puede obtener información adicional sobre la condición del aislamiento al determinar el incremento del factor de potencia entre el 25% y el 100% del rango de voltaje de línea a tierra nominal, esta prueba se utiliza como una prueba de control de calidad o de mantenimiento, los resultados se analizan estadísticamente teniendo en cuenta resultados de pruebas anteriores. En la Figura 62 se muestra la diferencia entre el comportamiento del factor de potencia de un devanado sin huecos en el aislamiento y uno con muchos huecos.

Figura 62. Comportamiento de las bobinas ante la presencia de huecos.



Tomado de [18].

Después de cierto límite en el incremento de la tensión aplicada al devanado, los huecos experimentan descargas parciales como se mencionó anteriormente. Estas a su vez emiten luz y calor que al reaccionar con el oxígeno forman ozono de olor muy característico. Este consumo de energía, incrementa las pérdidas eléctricas en el devanado, lo que incrementa el factor de potencia. Entre más grande es el factor de potencia con el incremento de la tensión, mayor es la actividad de descarga parcial y peor es la condición del devanado [18].

Las descargas parciales erosionan gradualmente los vacíos en el material, de esta manera se remueve el soporte físico para la mica, ocasionando que las capas externas del aislamiento (resina, cinta de vidrio, etc.) se pulverice por las descargas y la vibración física. Aunque las áreas dañadas son comúnmente cercanas al cobre, y en el caso de bobinas multiespira están entre espiras. El resultado de este deterioro son las fallas a tierra. La prueba de Tip-Up es sensitiva a las descargas por delaminación y descargas en cabezales de bobina [18].

3.7.2 Factores que afectan los resultados de la prueba del factor de potencia.

A continuación se describen los factores que afectan el resultado de la prueba, ya sea que se pruebe todo el devanado, bobinas solas, grupos, etc [18].

3.7.2.1 Efecto de la temperatura en la prueba del factor de potencia.

La característica del factor de potencia versus la tensión, se ve afectada en cierta medida por la temperatura del aislamiento de la bobina. Es deseable que las medidas se realicen dentro de un rango pequeño de temperatura, es decir que permita la comparación entre valores del factor de potencia a diferentes máquinas y en diferentes ocasiones para la misma [14].

Sin embargo la temperatura tiene un efecto despreciable en la prueba de factor de potencia Tip-Up [18].

3.7.2.2 Efecto de pruebas anteriores sobre la prueba de factor de potencia.

La curva característica de factor de potencia Vs voltaje se verá afectada si se realizan pruebas de alto potencial (Hi-pot), antes de realizar la prueba de factor de potencia. De igual forma el nivel de Tip-Up se verá afectado, por esto se recomienda realizar primero la prueba de factor de potencia antes de realizar pruebas de alto potencial.

3.7.2.3 Efecto de la longitud de la bobina y el electrodo de prueba sobre la prueba de factor de potencia.

Esto influye en la sensibilidad de la prueba cuando existen áreas relativamente pequeñas con alta actividad de descargas parciales, la sensibilidad de la prueba disminuye con el aumento de longitud de la bobina. Si la prueba se realiza a la bobina fuera del núcleo, se puede probar una sección particular de esta si se desea localizar pequeñas áreas con anomalías.

Sin embargo se puede realizar la prueba a grupos de bobinas en serie para disminuir los tiempos de prueba, teniendo en cuenta que la sensibilidad disminuye. Para compensar esta disminución, [14] recomienda establecer un límite de aceptación general en vez de

un límite de aceptación por bobina, si un grupo supera el límite establecido se deben probar las bobinas por aparte.

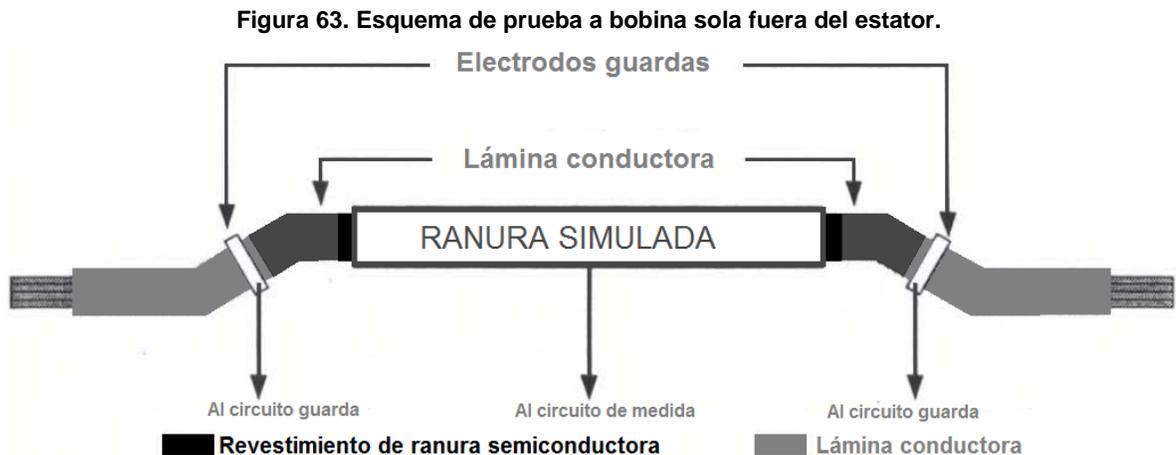
Si la prueba se realiza a toda una fase o a un grupo grande de bobinas en serie, una bobina que presente una anomalía, puede tener un efecto casi nulo en el resultado de la prueba pasando por alto la falla [14].

3.7.2.4 Efectos de la cinta gradiente en el resultado de la prueba Tip-Up.

La cinta gradiente se ubica en la parte saliente del devanado, esta previene la concentración de tensión en la superficie de la bobina adyacente a la ranura y disminuir así las descargas de ranura.

La cinta tiene una alta resistencia no lineal con el aumento del potencial haciendo que las pérdidas de potencia en la capa cambien uniformemente más rápido. Esto es normal pero suele causar errores de medida durante la prueba en máquinas de gran potencia, igualmente en ciertos casos se obtienen medidas negativas debido al sistema gradiente de la bobina [14].

El efecto de la cinta gradiente solo se puede eliminar por completo cuando se realiza la prueba a las bobinas fuera del estator y colocando en corto circuito la cinta gradiente con la pintura semiconductor del interior de la ranura. Si los electrodos de prueba se colocan a 3mm más allá de la cinta, ver Figura 63, el resultado de la prueba Tip-Up representará de mejor forma el verdadero estado del aislamiento del devanado [14] [18].



Tomado de [14].

3.7.3 Objetivos de la prueba Factor de potencia y Tip-Up.

- Detectar imperfecciones en la estructura del aislamiento, ocasionados en la mayoría de los casos por defectos en la colocación del aislamiento, golpes, esfuerzos electromecánicos o fabricación.
- Identificar la presencia de vacíos en el aislamiento, que presenten descargas parciales.
- Detectar la presencia de humedad, contaminantes y efecto corona en el aislamiento del estator.

3.7.4 Precauciones de la prueba Factor de potencia y Tip-Up.

- La temperatura del devanado debe estar unos grados sobre el punto de condensación del agua, para evitar la concentración de humedad en el aislamiento del devanado.
- Es necesario desconectar la máquina de los terminales, y abrir el neutro para que cada fase sea completamente aislada. Así probando cada fase individualmente se da una comparación entre fases que será útil para evaluar y cualificar la condición del devanado.
- Solamente se prueba el aislamiento puesto a tierra.
- Los R.T.D's instalados en los devanados deben conectar a tierra.
- Los terminales de conexión, cables, interruptores, condensadores, pararrayos, y otros equipos externos pueden influir en un marcado grado de la lectura de la prueba. Por lo tanto se recomienda desconectarlos.
- Se deben proteger los cables desconectados y conservar distancias para realizar chequeos libres de efecto corona que afectan mucho las medidas.
- Los cables que unen la fuente de tensión con los devanados, no deben tener contacto con tierra o entre sí. De otra manera la corriente de fuga y las pérdidas por efecto corona pueden introducir errores en los datos de la prueba.
- El núcleo del estator debe estar aterrizado. Por lo tanto, los instrumentos deben tener capacidad de trabajar con dispositivos aterrizados.
- Antes de efectuar la medida de factor de potencia y/o Tip-Up, se debe verificar la calibración de los elementos de medida que se usen.
- Es esencial que el potencial aplicado al devanado sea constante, para prevenir que la corriente de carga fluctúe e interfiera en la medición.
- Si la prueba se realiza a las bobinas por separado y fuera del núcleo, se debe usar un montaje que simule la ranura real, el montaje debe ser idéntico para cada bobina.
- Al igual que pruebas anteriores, al finalizar la prueba de factor de potencia, el devanado debe ser descargado a tierra.

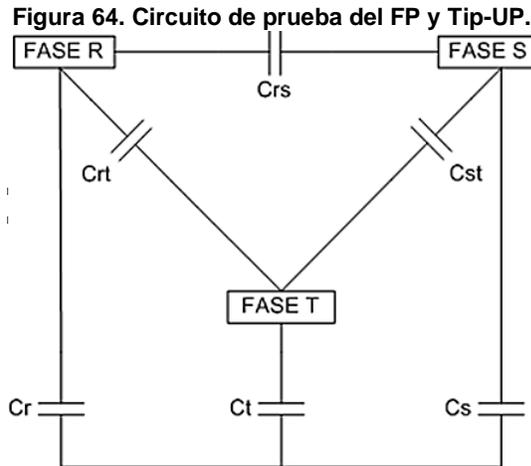
3.7.5 Preparación de la prueba de factor de potencia y Tip-Up.

- La prueba de factor de potencia y Tip-Up requiere una fuente de alimentación de alto voltaje de AC libre de descargas parciales, para energizar el devanado por encima del voltaje de fase nominal. Puede ser necesaria una fuente de alimentación superior a 50 kVA para grandes motores y generadores.
- La superficie del aislamiento debe estar limpio y seco.
- Verificar la limpieza y amarres del estator.
- Aterrizar todos los elementos de medida que puedan verse afectados por la prueba.
- Verificar cuidadosamente el circuito de prueba.

- Para grandes máquinas se debe disponer estratégicamente de varias personas que observen atentamente los devanados durante la realización de la prueba. Estos deben conocer las características de las descargas.
- Todo el personal debe conocer el momento exacto en que comienza la prueba, considerar las precauciones y la tensión que se va aplicar.

3.7.6 Procedimiento para la prueba de factor de potencia y Tip-Up.

El diagrama de conexión para la realización de la prueba, se muestra en la Figura 64. La descripción del procedimiento se hará refiriéndose al analizador de aislamiento M400 de la empresa *Doble Engineering Company*, la descripción se hace para este equipo ya que es el que dispone EPSA. Si se usa un equipo diferente se debe revisar el manual del equipo correspondiente.



Tomado de [18].

3.7.6.1 Secuencia para la medición del factor de potencia.

Hay dos modos de prueba para medir el factor de potencia que se realizan con el equipo M4000, estos son: Modo GST (GND) y modo UST, la secuencia de conexiones para realizar cada uno de estos modos se describen a continuación [18].

3.7.6.1.1 Modo GST (GND).

- Terminal línea del M4000 en la fase A, fases B y C cortocircuitados y aterrizados.
- Terminal línea del M4000 en la fase A fase C cortocircuitada y aterrizada, fase B en terminal UST.
- Terminal línea del M4000 en la fase B, fases A y C cortocircuitados y aterrizados.

3.7.6.1.2 Modo UST.

- Terminal línea del M4000 en la fase B, fase A cortocircuitada y aterrizada, fase C en terminal UST del equipo de prueba.
- Terminal línea del M4000 en la fase C, fases A y B cortocircuitados y aterrizados.

- Terminal línea del M4000 en la fase C, fase B cortocircuitada y aterrizada, fase A en terminal UST del equipo de prueba.

Como ya se mencionó el factor de potencia Tip-Up es la diferencia entre el FP medido a la tensión nominal U_n y el FP medido a 0.25 veces, como se muestra en la Ecuación 28 [18].

$$Tip - Up = FP(100\%) - FP(25\%) \quad \text{Ecuación 28.}$$

3.7.7 Criterios de decisión para la prueba de factor de potencia y Tip-Up.

- Los valores de factor de potencia y Tip-Up pueden ser comparados entre fases, y con resultados de pruebas anteriores, siempre y cuando se hayan realizado bajo condiciones similares [18].
- Según [18] el factor de potencia en máquinas con aislamiento clase F, debe estar dentro de los rangos mostrados en la Tabla 31.

Tabla 31. Criterio de aceptación para el factor de potencia y Tip-UP según Doble Engineering Company.

Factor de potencia	Tensión de la máquina en kV
F.P. < 1.0%	13.8 - 14.4 Kv
F.P. < 1.5%	15 - 18 Kv
F.P. < 2.0%	19 - 26 Kv

Tomado de [18].

- De la misma forma se consideran aceptables los criterios mostrados en la Tabla 32.

Tabla 32. Criterio de aceptación según [17].

Elemento bajo prueba	% Vn	FP	Tip-Up
Generadores con aislamiento clase B (Mica-Asfalto).	100	≤ 4,0	-
Bobinas con aislamiento de asfalto.	100	≤ 8,0	-
Bobinas con aislamiento epóxico.	20	≤ 2,0	-
	100	≤ 3,5	-
	60 y 20	≤ -	0,5
	80 y 60	≤ -	0,5
Generadores sincrónicos	100 y 25	<	1

Tomado de [16].

- Si el Tip-Up es negativo y se descarta que la cinta gradiente esté causando esto, se considera que el aislamiento se encuentra en mal estado [18].

3.7.8 Resultados y análisis de la prueba realizada al generador.

La última prueba realizada antes del cambio de devanado se llevó a cabo en junio 1 de 2011 por parte de EPSA. El factor de potencia fue medido a 4 niveles diferentes de

tensión, los cuales son: 2, 4, 6 y 8 kV, el factor de potencia Tip-Up se calcula con los factores de potencia a 8 y 2kV. En la Tabla 33 se muestran los resultados de la prueba, en esta ocasión solo se realizó el modo GST (CND), sin embargo se lleva un histórico de ambos modos.

Tabla 33. Resultados del Factor de potencia y Tip-Up.

Prueba	Modo GST (GND)			Lecturas equivalentes a 10 kV						
	Tensión	Tierra	Guarda	V (kV)	I (mA)	P (W)	C (pf)	FP	TIP-UP	Aislamiento medido
1	R	S,T	-	1.995	2641.3	468.39	700620.9	1,77	0,93	Cr+Crs+Cr
2				4.013	2652.1	549.48	703246.1	2,07		
3				5.993	2665.4	632.37	706643.3	2,37		
4				8.004	2677.7	723.5	710204.3	2,7		
5	S	T,R	-	1.996	2651.6	490.16	703306	1,85	0,88	Cs+Csr+Cst
6				3.998	2660.9	552.11	706040	2,07		
7				6.008	2675.3	639.68	709391.6	2,39		
8				8.007	2692.1	734.17	713295.2	2,73		
9	T	R,S	-	1.999	2651.7	457.25	703192	1,72	0,98	Ct+Cts+Ctr
10				4.002	2658.6	533.17	705355.7	2,01		
11				6.005	2671.7	631.14	708552	2,36		
12				8.008	2686.8	725.01	712476.7	2,7		

Según el criterio manejado en la Tabla 31, el factor de potencia se encuentra por arriba del límite aceptado, sin embargo el Tip-Up permanece dentro del límite aceptado.

El valor del factor de potencia es indicativo de un aislamiento envejecido, mientras que el Tip-Up no evidencia presencia alta de descargas parciales.

En las Figura 65 y Figura 66 se muestra el registro histórico del factor de potencia y Tip-Up desde el año 2003 hasta el 2011. En estas se aprecia una estabilidad histórica en los resultados de las pruebas, en este caso se tiene especial atención en el FP ya que evidencia envejecimiento del aislamiento.

Figura 65. Registro histórico del FP.

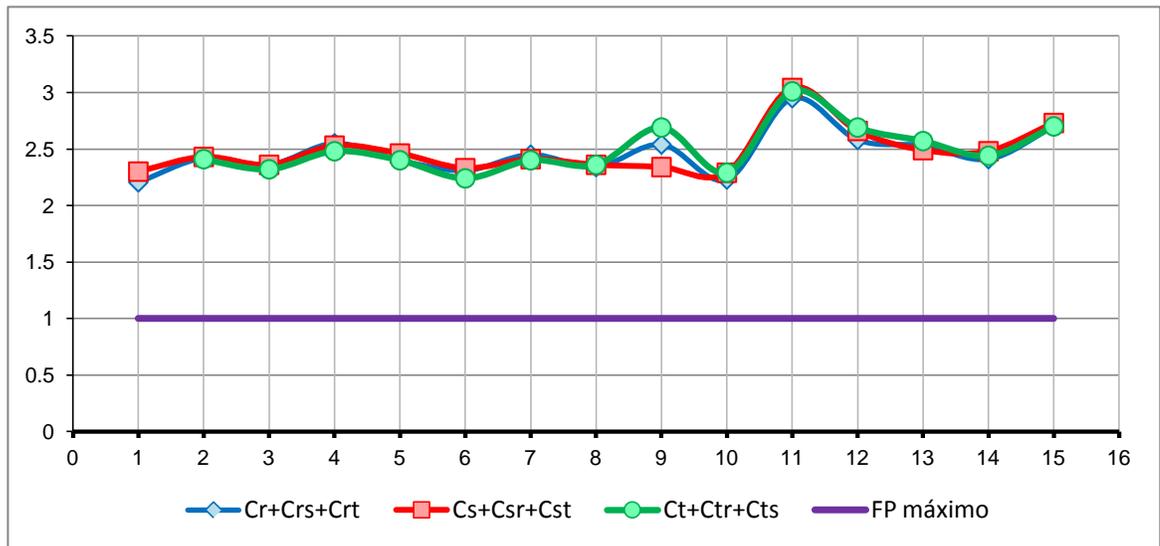
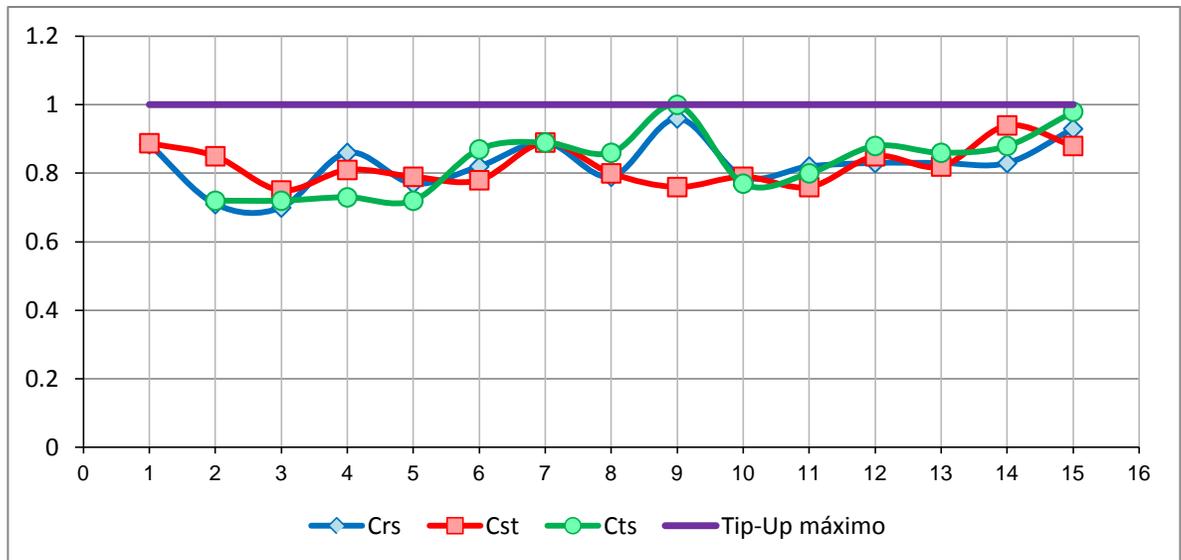


Figura 66. Registro histórico del factor de potencia Tip-Up.



3.8 Prueba de Alta Tensión DC o Hi-pot.

Esta prueba se realiza para verificar que el aislamiento tiene un nivel de rigidez dieléctrica mínima que indique que el aislamiento está en condiciones adecuadas de funcionamiento.

3.8.1 Factores que influyen en la prueba de alta tensión D.C.

Los factores que afectan esta prueba son similares a los que afectan la prueba de resistencia de aislamiento e IP, sin embargo existen otros factores. Además se da un manejo diferente al factor de humedad, utilizando este factor para localizar posibles grietas en el aislamiento del devanado. A continuación se describirán dichos factores.

3.8.1.1 Efecto de la humedad en la prueba Hi-pot.

La corriente superficial aumenta cuando se presenta humedad en el devanado, especialmente si se encuentra contaminado, por esta razón es conveniente mantener los devanados secos y con una temperatura ligeramente por encima de la temperatura ambiente para evitar condensación. Sin embargo, cuando exista la sospecha de grietas o fisuras en el aislamiento, se puede realizar la prueba en condiciones de alta humedad con el devanado por debajo de la temperatura ambiente para que entre humedad en las fisuras y/o grietas y así puedan ser detectadas [13].

3.8.1.2 Efecto de la contaminación superficial en la prueba Hi-pot.

Como ya se ha mencionado la contaminación presente en la superficie del material aislante puede incrementar la corriente superficial dependiendo del contaminante. Sin embargo se puede considerar realizar la prueba antes de la limpieza para detectar fácilmente fallas incipientes e identificar reparaciones que se requieran hacer, no obstante se debe realizar la prueba después de la limpieza para la garantía definitiva para la puesta en marcha [13].

3.8.1.3 Efecto de Resinas sin curar y otros revestimientos en la prueba Hi-pot.

Algunas resinas sin curar, barnices y otros revestimientos pueden ser causantes de altas corrientes durante las pruebas, por esto estos elementos deben estar completamente secos y curados antes de realizar las pruebas [13].

3.8.2 Objetivos de la prueba Hi-pot.

- Identificar la presencia de grietas o fisuras.
- Evaluar si existe contaminación superficial.
- Identificar la existencia de resina sin curar.
- Comprobar la absorción de humedad del aislamiento.
- Identificar la posible delaminación del aislamiento.
- Detectar huecos presentes en el sistema aislante.

3.8.3 Precauciones de la prueba Hi-pot.

Antes de realizar la prueba el devanado debe ser apto para pruebas de alta tensión, los valores de resistencia de aislamiento e índice de polarización deben cumplir con los límites expuestos en la sección anterior "Prueba de Resistencia de Aislamiento del Devanado Estático." Si el devanado es apto para realizar la prueba de alta tensión DC se deben tener las siguientes precauciones [13]:

- Antes de energizar se debe tener delimitado el sitio para restringir el acceso a la zona, y evitar que el personal entre en contacto con el equipo energizado.
- Debido al alto potencial puede existir una carga capacitiva almacenada, la cual puede ser peligrosa para el personal y el equipo de prueba.
- Los objetos cercanos que no tengan conexión a tierra, deben ser aterrizados para evitar tensiones inducidas.

- Cuando la prueba finaliza se debe esperar que la tensión del devanado caiga al menos, a la mitad de la tensión de prueba y luego descargar el devanado.
- Después de realizada la prueba, se debe descargar el devanado por un tiempo igual o superior a 4 veces la duración de la prueba, se tiene que tener en cuenta que la eliminación de la fuente de prueba no elimina la carga en el devanado, por tal motivo se debe llevar un proceso de descarga a tierra adecuado.
- No se debe acelerar el proceso de descarga con la aplicación de una tensión de polaridad opuesta a la tensión de prueba, ya que pueden surgir gradientes de tensión excesivos.
- Si es posible se recomienda realizar la prueba a las fases por separado, cortocircuitando y aterrizando las 2 fases que no estén bajo prueba, esto se hace para poder realizar una comparación entre fases ya que si se realiza la prueba a todo el devanado a la vez solo se probaría el aislamiento a tierra y no el estado del aislamiento entre fases.
- El voltaje debe aplicarse de forma gradual para evitar sobretensiones que puedan disparar las protecciones de la prueba u ocasionar un daño mayor en el aislamiento.
- Para la reducción de los efectos corona durante la prueba, se puede usar un conductor de gran diámetro aislado con materiales como polietileno, de igual forma se pueden reducir los efectos corona usando conductores blindados.
- El personal involucrado debe conocer el momento preciso en que inicia la prueba, y los niveles de tensión que se manejan.

3.8.4 Procedimiento de prueba Hi-pot como prueba de calidad.

Esta prueba se enfoca en detectar defectos en el material y defectos de fábrica para demostrar de forma práctica, que el aislamiento tiene buena rigidez dieléctrica. La tensión de esta prueba debe ser la adecuada para romper el aislamiento que no es seguro con respecto a la tensión de funcionamiento, las sobretensiones y el deterioro del aislamiento.

Se recomienda que la tensión de prueba sea de 1.7 veces la tensión rms nominal de operación. La aplicación de esta debe hacerse de forma gradual para evitar sobretensiones. La duración de cada prueba es normalmente 1 minuto [13].

3.8.4.1 Criterios de decisión de la prueba Hi-pot como prueba de calidad.

Esta es una prueba tipo Pasa/No-Pasa del aislamiento a tierra del devanado, por lo tanto si no se observa señal de peligro o fallos en el aislamiento durante el tiempo de prueba se considera que el devanado ha pasado la prueba.

La presencia de falla se evidencia por una descarga capacitiva aguda en el lugar de la avería, sin embargo si la falla es parcial esta se evidencia como un cambio grande o anormal de la corriente medida [13].

3.8.5 Procedimiento de prueba Hi-pot: Prueba de sobre voltaje controlado.

En esta prueba el nivel de voltaje se aumenta de forma controlada, ya sea como una rampa o de forma escalonada (paso a paso) hasta llegar al nivel de tensión máximo de la

prueba. La corriente medida se controla durante el progreso de la prueba, si se observan anomalías o desviaciones en la respuesta puede ser indicativo de problemas de aislamiento. Este tipo de prueba puede servir como una prueba de calidad, si el aislamiento soporta la tensión de prueba máxima puede considerarse adecuado para la operación hasta la próxima parada de mantenimiento [13].

La prueba de sobre voltaje controlado puede ofrecer la posibilidad de detectar un problema de aislamiento inminente y detener la prueba antes de ocasionar la ruptura del aislamiento.

3.8.5.1 Preparación de la prueba de sobre voltaje controlado.

El nivel de tensión máxima que se aplica en esta prueba no debe ser mayor al nivel máximo recomendado para la prueba de calidad, osea 1.7 veces la tensión rms nominal de operación [13].

El voltaje se puede incrementar de forma escalonada o en forma de rampa. El nivel de tensión inicial de la prueba puede ser cero e ir incrementando hasta el nivel máximo, o puede ser equivalente al 30% del nivel máximo de tensión que se va aplicar. Se mantiene constante hasta determinar el valor de la resistencia de aislamiento y el índice de polarización, si el devanado resulta apto para la prueba de alta tensión el nivel de tensión se aumenta desde el valor presente hasta el máximo recomendado en forma escalonada o continua [13].

Durante la prueba se debe observar con cuidado, el comportamiento de la corriente de fuga.

3.8.5.2 Procedimiento de prueba Hi-pot: Prueba con tensión escalonada de tiempo uniforme.

En este método la aplicación de tensión se hace en una serie de pasos uniformes con intervalos de tiempo regulares. La lectura de corriente se realiza al final de cada intervalo de tiempo y se grafica en una escala logarítmica en función de la tensión aplicada, la curva resultante se analiza durante y después de la prueba para detectar aumentos o variaciones que puedan indicar irregularidades en el aislamiento. La aplicación de voltaje debe hacerse de la siguiente forma [13]:

- El primer escalón de voltaje se puede usar para realizar la prueba de aislamiento e IP y determinar si el devanado es apto para continuar la prueba de alta tensión.
- Los siguientes escalones no deben ser mayores al 3% del nivel de tensión de prueba final y deben tener una duración de 1 minuto cada uno.
- Los ajustes del voltaje en cada escalón debe hacerse en los primeros 10 segundos.
- Puede ser necesario ajustar la tensión entre un 5 y 10% por debajo de lo deseado para permitir aumentos de voltaje durante el tiempo de prueba. Es importante no hacer reajustes del valor de tensión después de ser establecido el escalón.
- Si no se presentan cambios significativos en la corriente medida, se continúa aumentando la tensión de prueba hasta el nivel recomendado.

- Cuando se acabe de realizar la prueba a una fase, se debe descargar por lo menos durante 30 minutos antes de continuar con la prueba a las otras fases.
- Después de finalizar la prueba de tensión escalonada, se debe descargar el devanado por medio de una resistencia a tierra hasta que la tensión de remanencia sea la mitad de la tensión de prueba.
- Por último se debe aterrizar sólidamente el devanado estático.

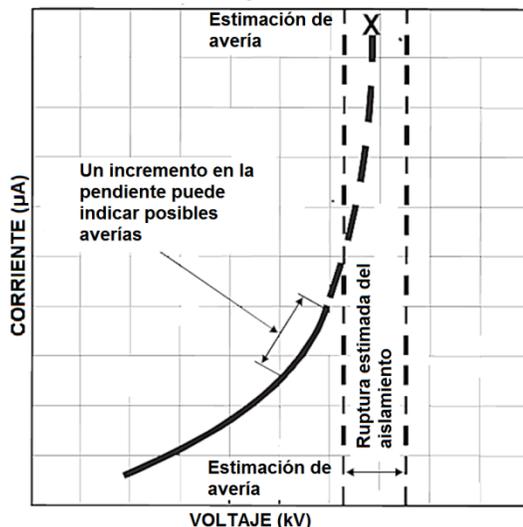
En algunos casos la absorción dieléctrica puede dominar la medición ocultando así variaciones significativas de la corriente, para minimizar esto el tiempo de duración de cada escalón puede ser hasta de 3 minutos para permitir que la corriente de absorción decaiga a un valor insignificante [13].

3.8.5.2.1 Criterios de decisión de la prueba con tensión escalonada de tiempo uniforme.

Cuando se completa la prueba se pueden realizar las siguientes interpretaciones:

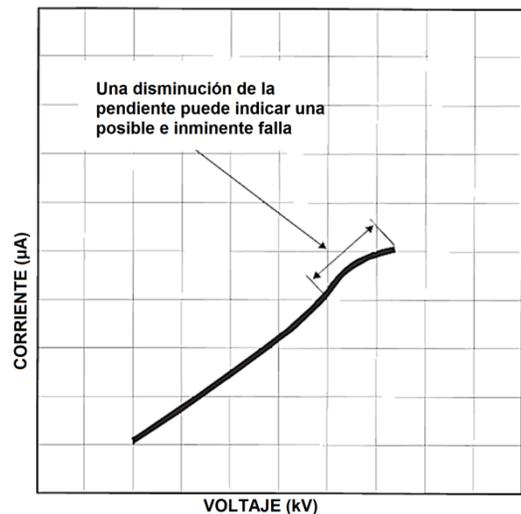
- El aparente aumento de la corriente en relación con el voltaje aplicado depende de las escalas utilizadas para el gráfico, si se desean hacer comparaciones con pruebas anteriores se deben usar escalas de trazado iguales. La curva resultante suele ser suave cuando no hay una avería inminente [13].
- Cualquier desviación de la curva puede ser indicativo de una aproximación a la tensión de ruptura del aislamiento. Ver Figura 67 y Figura 68. Las desviaciones deben ser confirmadas por otras medidas en otros incrementos, si la desviación persiste se recomienda parar la prueba si es posible para evitar la ruptura tota [13].

Figura 67. Devanado aparenta buenas condiciones al inicio y luego hay peligro de ruptura.



Tomadas de [13].

Figura 68. La disminución repentina de corriente indica una inminente falla del aislamiento.

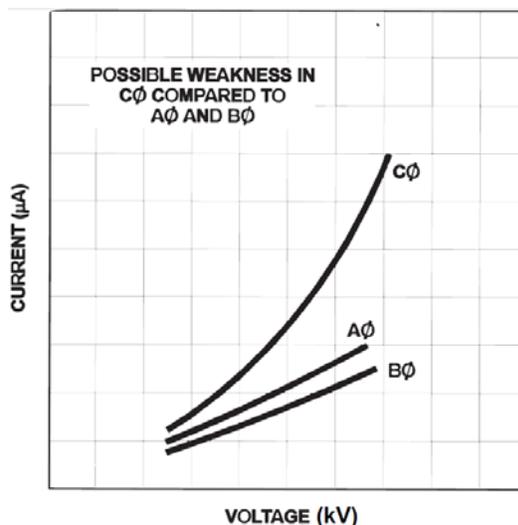


- El indicativo más común de que se está acercando a la ruptura es un crecimiento acelerado de la corriente, con respecto a la tensión. Para obtener un indicativo de la

tensión de ruptura la curva puede ser extrapolada siguiendo el comportamiento que lleva, ver Figura 67. Si la tensión de ruptura prevista es menor a la tensión de prueba final es necesario detener la prueba para evitar posibles fallas [13].

- Cuando se presenta una caída brusca de la corriente por encima de la tensión de funcionamiento del devanado, puede ser señal de un acercamiento al fallo del aislamiento. No se conoce un método para estimar la tensión de ruptura en este caso. Si el decremento continúa en los próximos escalones de voltaje, la prueba debe ser detenida [13].
- Una ruptura abrupta inesperada suele ser resultado de abrasión mecánica, agrietamiento o migración aguda de mica [13].
- Si se evidencian posibles fallos, se debe confirmar que no sea resultado de las conexiones de prueba, aislamientos de los cables de prueba, o cualquier otro elemento ajeno al devanado [13].
- Generalmente las pruebas se realizan a cada fase, la diferencia entre las características de las corrientes de cada fase que no se atribuyan a efectos corona, temperatura o humedad se suele atribuir a la condición del aislamiento, ver Figura 69.

Figura 69. Ejemplo de grafica de la prueba realizada a las tres fases.



Tomado de [13].

3.8.6 Procedimiento de prueba Hi-pot: Prueba de voltaje en rampa.

Esta prueba proporciona un mejor control y una visualización oportuna de un posible fallo para evitar daños mayores.

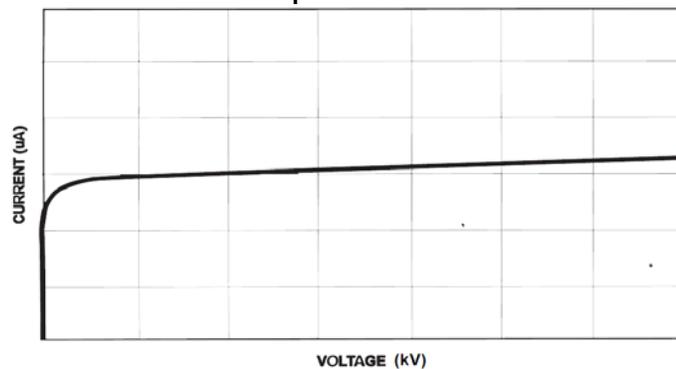
El voltaje se incrementa de forma lenta, aproximadamente 1 kV por minuto, de esta forma hay menos posibilidad de ocasionar daños en el aislamiento durante la prueba.

La aplicación de un voltaje en rampa en vez de pasos discretos de voltaje, linealiza automáticamente los componentes capacitivos y de absorción dieléctrica de modo que pequeñas variaciones de la corriente se pueden observar con más facilidad.

El incremento de voltaje debe ser constante, ya que cualquier variación en la tasa de aumento de la tensión crearía un cambio no lineal de la corriente conduciendo así a posibles errores en la medida.

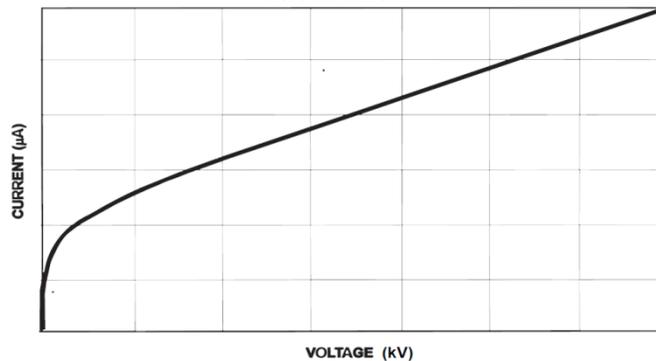
La curva de corriente versus voltaje resultante de la prueba de voltaje en rampa suele ser suave y casi lineal cuando el devanado está en buenas condiciones, como se muestran en las Figura 70 y Figura 71.

Figura 70. Resultado típico de la prueba en rampa de un devanado en buen estado con aislamiento epoxi-mica.



Tomado de [13].

Figura 71. Resultado típico de la prueba en rampa de un devanado en buen estado con aislamiento asfalto-mica.



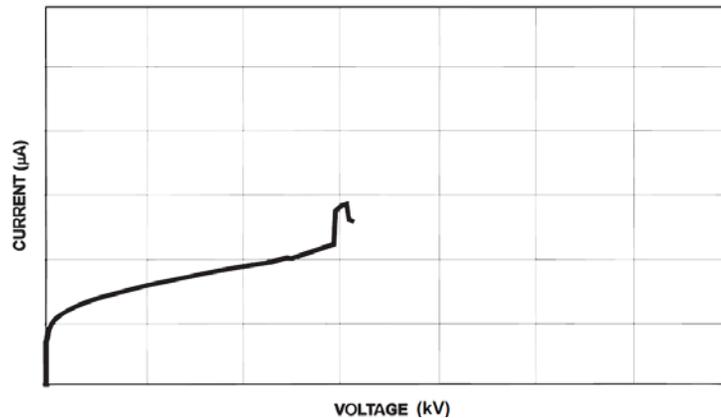
Tomado de [13].

3.8.6.1.1 Criterios de decisión para la prueba de voltaje en rampa.

Un aumento repentino en la corriente para un voltaje de prueba relativamente bajo, como se muestra en la Figura 72, suele indicar que el aislamiento de una barra a tierra puede estar roto o dañado de alguna forma [13].

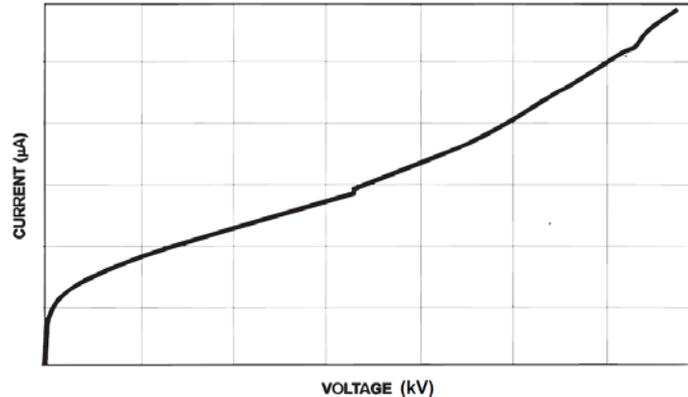
Si se evidencia un aumento gradual como el mostrado en la Figura 73 indica que el aislamiento en general está deteriorado o muy envejecido.

Figura 72. Curva I-V de falla localizada prueba de alta tensión DC.



Tomado de [13].

Figura 73. Curva I-V de aislamiento envejecido o con deterioro general.



Tomado de [13].

Cuando la curva I-V aumenta de forma exponencial como la mostrada en la Figura 74, es resultado de un devanado con alta presencia de humedad, la prueba debe detenerse antes de alcanzar la tensión de prueba máxima [13].

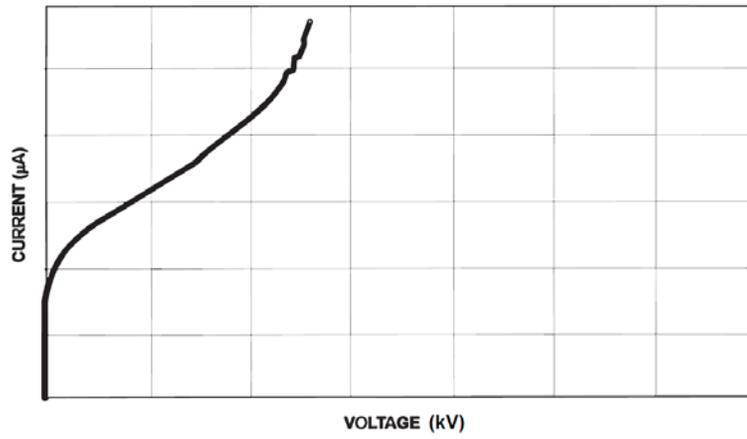
Cuando las reparaciones no permitieron el curado total del aislamiento, el comportamiento de la corriente se asimila al mostrado en la Figura 75.

Cuando los terminales de los devanados se encuentran muy contaminados la corriente no se comporta de forma lineal lo que indica una alta corriente superficial, un ejemplo de esto se muestra en la Figura 76 [13].

Si existe una grieta en el aislamiento la corriente será lineal hasta el punto de ocasionar la ruptura del aislamiento donde se presentará un pico de corriente, ver Figura 77.

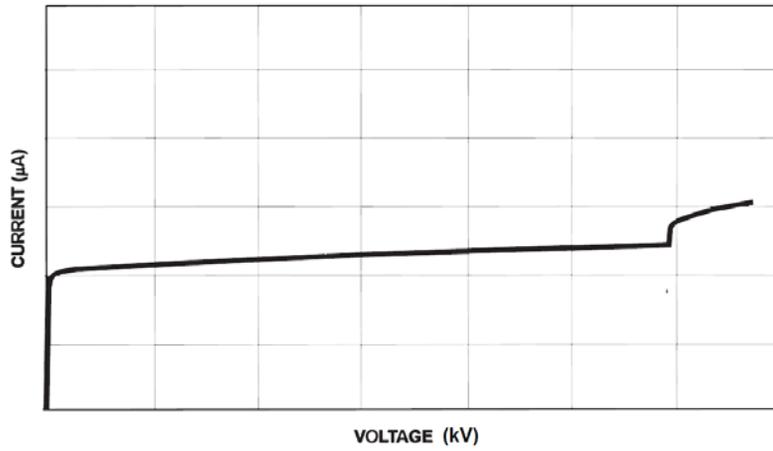
La presencia de aislamiento delaminado, encontrado en aislamientos de poliéster-mica, se evidencia como un comportamiento normal de la curva al inicio, pero a medida que se aumenta la tensión la pendiente aumenta y luego vuelve a la normalidad como se muestra en la Figura 78 [13].

Figura 74. Curva I-V de devanado con alta humedad.



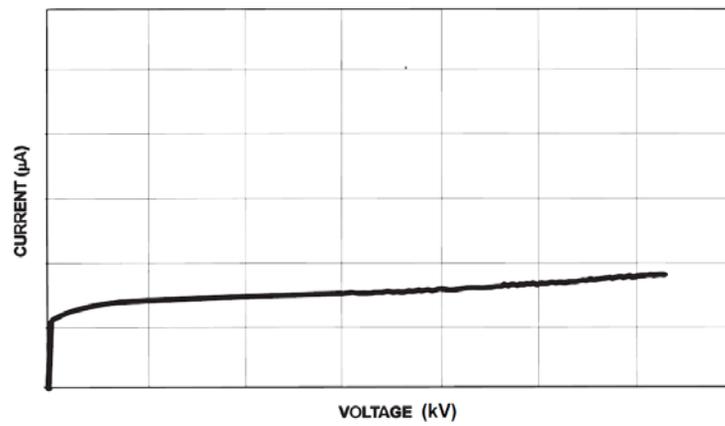
Tomado de [13].

Figura 75. Curva I-V de devanado sin curar.



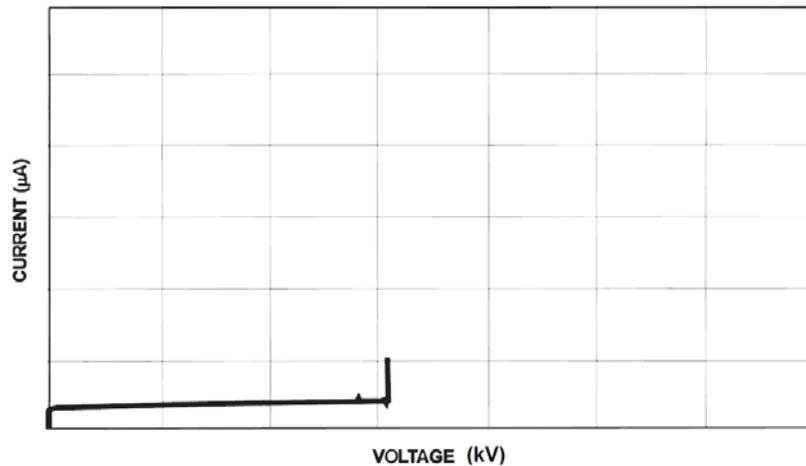
Tomado de [13].

Figura 76. Curva I-V de devanado con terminales muy contaminados.



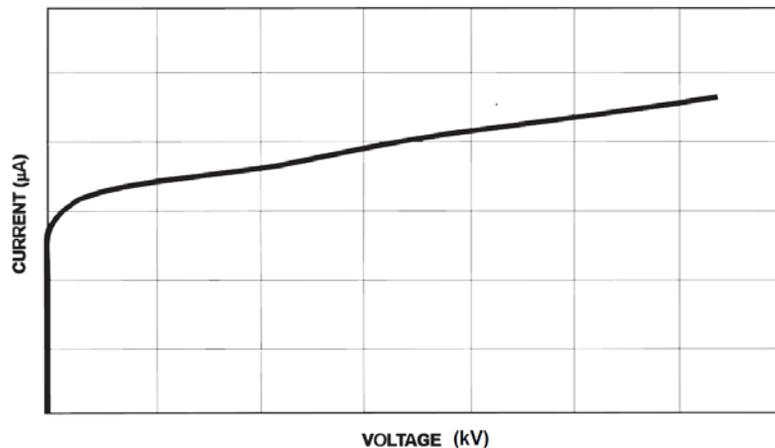
Tomado de [13].

Figura 77. Curva I-V de devanado con grieta en el aislamiento a tierra.



Tomado de [13].

Figura 78. Curva I-V de devanado con aislamiento delaminado.



Tomado de [13].

3.9 Prueba de Impulso.

Con esta prueba se puede evaluar la condición del aislamiento a tierra, entre hilos, entre bobinas y de fase a fase. También se pueden detectar circuitos abiertos, conexiones erróneas y número incorrecto de vueltas [10].

Para poder realizar esta prueba la máquina tiene que pasar las pruebas de aislamiento, IP y de alta tensión DC.

La prueba se realiza con un equipo especializado, el cual inyecta una serie de impulsos capacitivos de voltaje a dos fases del devanado, estos pulsos ocasionan una oscilación transitoria la cual crea un patrón de onda característico del circuito resonante compuesto por la inductancia del devanado y el capacitor del equipo de prueba. Debido a que las fases que componen la máquina son idénticas entre ellas, los patrones de onda formados

también deben ser idénticos, por lo tanto cualquier diferencia entre los patrones de onda es un indicativo de falla en el devanado [10].

A diferencia de las pruebas descritas hasta ahora, la prueba de impulso permite evaluar la condición del aislamiento entre hilos, esto es posible gracias a que los pulsos de voltaje aumentan abruptamente en muy poco tiempo lo cual crea un gradiente de voltaje entre los hilos dentro de las bobinas, si este voltaje es mayor al que soporta el aislamiento aparecerá una corriente de fuga o un arco de baja energía, esto se evidencia como una diferencia entre la onda característica de la fase con falla y la fase en buen estado. Además el devanado en corto dará un patrón de onda inestable o parpadeante [10].

Igualmente cualquier tipo de falla se evidenciará como una diferencia de ondas, de acuerdo a la característica que presente esa diferencia se podrá establecer qué clase de falla presenta el devanado, esto se detallará más adelante [10].

La prueba de impulso puede ser aplicada a:

- Bobinas estáticas individuales: Si la impedancia de las bobinas en el aire es demasiado baja, estas se pueden ensamblar en un núcleo simulado para la realización de la prueba.
- Bobinas montadas en el estator, con las cuñas y refuerzos puestos pero antes de realizar las conexiones.
- Bobinas montadas en el estator, con las cuñas y refuerzos puestos, con las conexiones en serie hechas pero antes de aislarlas y antes de hacer las conexiones entre grupos de fases.
- Grupos de fases individuales, antes de conectarlos entre sí.
- Devanados de máquinas en servicio como ensayo de mantenimiento preventivo.

3.9.1 Objetivos de la prueba de impulso.

- Evaluar la condición del aislamiento entre hilos.
- Evaluar la condición del aislamiento entre fases.
- Evaluar la condición del aislamiento entre bobinas.
- Evaluar la condición del aislamiento a tierra.
- Verificar posibles circuitos abiertos.
- Buscar conexiones erróneas.

3.9.2 Precauciones de la prueba de impulso.

Para realizar la prueba se deben tener todas las precauciones de seguridad descritas en la prueba de alta tensión DC y la prueba de aislamiento e IP.

Muchas compañías consideran la prueba como destructiva, sin embargo es la única que evalúa el aislamiento entre hilos [10].

3.9.3 Preparación de la prueba de impulso.

- La prueba se puede realizar con el rotor puesto o extraído.
- El devanado debe haber pasado la prueba de IP, estar limpio y seco.
- Se deben aterrizar todos los elementos de medida que se puedan ver afectados por la prueba.
- Se debe señalar bien la zona de prueba para evitar accidente, de igual forma hay que verificar que el circuito de prueba está bien conectado.
- La temperatura del devanado debe estar algunos grados por encima de la temperatura ambiente para evitar la condensación.

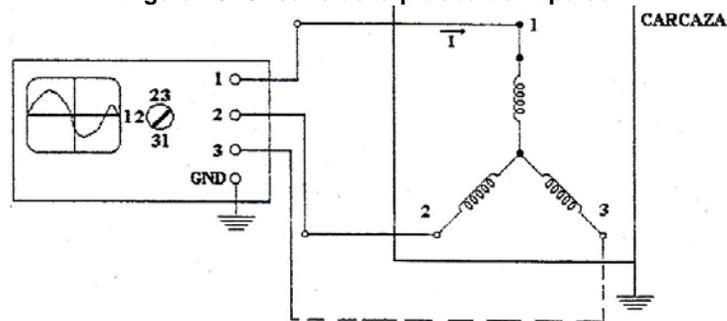
La realización de la prueba se debe hacer con un equipo especializado para esta. Actualmente existen equipos que comparan las tres ondas de cada fase de forma simultánea y realizan la prueba automáticamente, igualmente existen equipos menos avanzados que requieren de un manejo más manual y compara por par de fases, el procedimiento de prueba depende del equipo utilizado, por lo tanto se describirá el procedimiento de forma general, para mayor seguridad y certeza se recomienda revisar el manual del equipo de prueba que se utilizará [10].

3.9.4 Procedimiento de la prueba de impulso.

La tensión de prueba no debe ser inferior a 350 V pico por vuelta, este valor es el necesario para mostrar un vacío de aire en el aislamiento entre hilos, en otras palabras, es la tensión necesaria para romper dieléctricamente un espacio de aire entre 2 hilos contiguos de una bobina. Sin embargo en la práctica el valor de tensión usado para la prueba de impulso es mucho mayor al mínimo mencionado. De hecho muchos fabricantes utilizan varios parámetros de la máquina para determinar el nivel de tensión con el cual se debe probar su máquina, por lo tanto es conveniente establecer con el fabricante el nivel de tensión de la prueba. Sin embargo existe un enfoque generalizado y aceptado, el cual establece que el nivel de tensión para la prueba debe ser el doble del voltaje de operación en volts más mil ($2xE + 1000$ V) o un porcentaje de este dependiendo el estado del aislamiento, por ejemplo para un devanado nuevo la tensión puede ser entre 1.2 y 1.7 veces el doble del voltaje más mil [22] [23].

El circuito de prueba es similar al mostrado en la Figura 79.

Figura 79. Circuito de la prueba de impulso.



Tomado de [10].

No todos los equipos de prueba permiten llegar a la tensión recomendada, sin embargo para un generador de 13.8 kV se acepta un valor de tensión de salida para la prueba de 20 kV.

En el caso del generador de Salvajina, esta prueba no fue realizada, en parte porque la falla se logró detectar con otras pruebas, haciendo innecesario realizar esta prueba.

3.9.5 Criterios de decisión para la prueba de impulso.

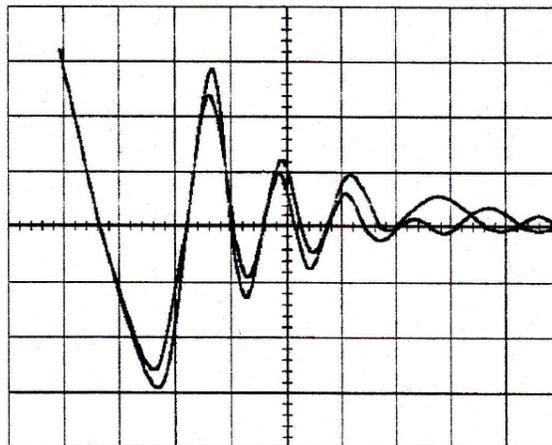
Hay solo cuatro patrones de onda que se deben recordar y son muy evidentes, estos son:

- Si la señal es estable y concuerda con las otras fases, el devanado se considera en buenas condiciones.
- Si la señal es inestable y no concuerda con las otras fases, es indicativo de una falla en el aislamiento.
- Señal indicativa de circuito abierto.
- Señal indicativa de fase a tierra.

El devanado se considera en buen estado si las tres señales permanecen estables y concuerdan entre sí durante el transcurso de la prueba.

En la Figura 80 se muestra un patrón de onda característico de un devanado con falla en el aislamiento, la gráfica debe mostrar una separación de onda o una inestabilidad para probar la existencia de una falla [10].

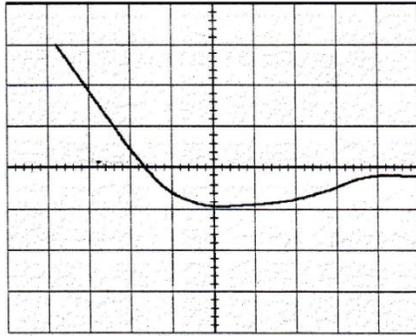
Figura 80. Ejemplos de presencia de falla durante la prueba de impulso.



Tomado de [10].

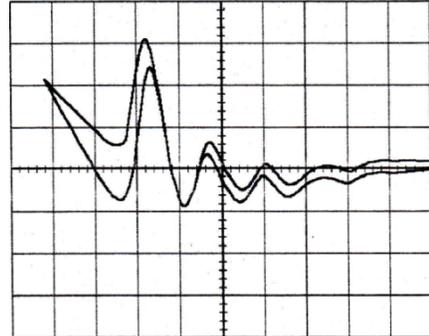
Cuando el devanado tiene un circuito abierto no aparece ningún patrón de onda o una de las señales flota sobre otra. La primera opción se da cuando el equipo de prueba compara 2 fases al mismo tiempo y la fase abierta no está siendo probada, ver Figura 81. La segunda opción se da cuando se comparan dos fases y una de ellas está abierta, ver Figura 82.

Figura 81. Comparación de las fases 1-2 con la 3 conectada a tierra. Fase 3 abierta.



Tomado de [10].

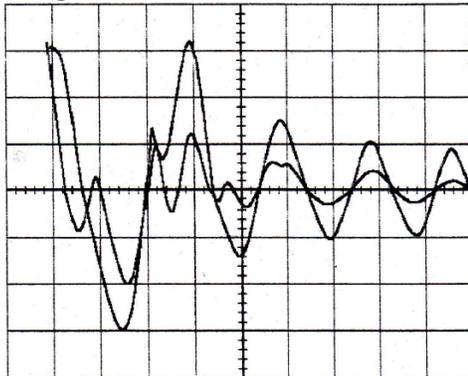
Figura 82. Comparación de las fases 1-2 o 2-3, con la que sobra a tierra. Fase 2 abierta.



Tomado de [10].

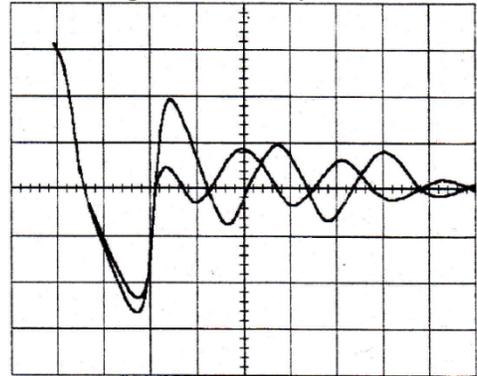
Otras formas de onda dependiendo el tipo de falla se muestran en las Figura 83 a Figura 89.

Figura 83. Cortocircuito entre fases.



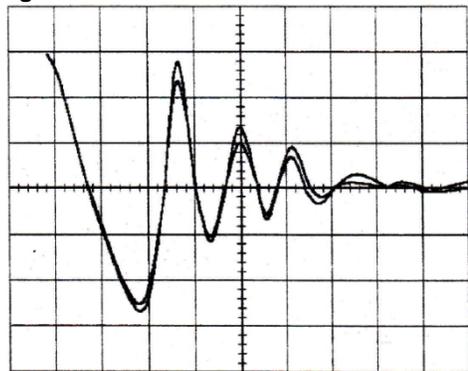
Tomado de [10].

Figura 85. Tierra parcial.



Tomado de [10].

Figura 84. Cortocircuito sólido entre hilos.



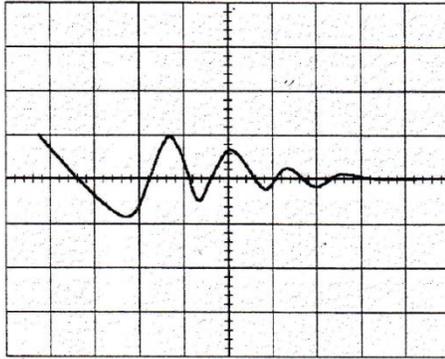
Tomado de [10].

Figura 86. Cortocircuito entre bobinas.



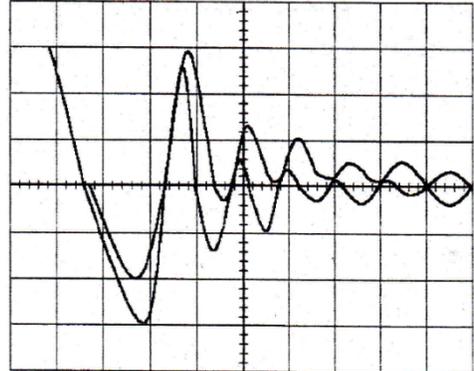
Tomado de [10].

Figura 87. Tierra sólida.



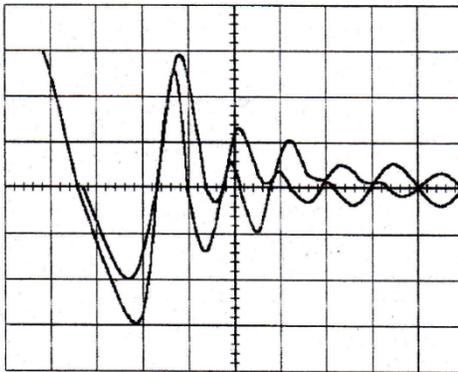
Tomado de [10].

Figura 89. Bobina invertida.



Tomado de [10].

Figura 88. Cortocircuito entre grupos.



Tomado de [10].

3.10 Prueba de Descargas Parciales (DP).

Las descargas parciales suelen desarrollarse en los materiales aislantes, en zonas cuyas propiedades no son homogéneas, en estas zonas se presenta una concentración local de campo eléctrico, lo que produce un sobreesfuerzo eléctrico local que puede generar una ruptura dieléctrica. Por lo general las descargas parciales ocurren en las cavidades del aislamiento, estas no ocasionan un daño instantáneo en el sistema, pero si van degradando el aislamiento hasta producir una ruptura total con el paso del tiempo, desencadenando así en un daño más grave, pudiendo dejar la máquina fuera de servicio [39].

Las descargas parciales tienen varias características físicas como lo son: pulsos eléctricos, frecuencias de radio, pulsos acústicos, luz, reacciones químicas, etc. Debido a esto también existen varios métodos para detectar la actividad de descargas parciales dentro del aislamiento. A continuación se explicarán brevemente los métodos más comunes para detectarlas.

No se describirán de forma detallada cada una de las maneras para detectar las descargas parciales, dado lo extenso del tema, por lo tanto si se desea profundizar en el tema se recomienda remitirse a los siguientes documentos y a sus referencias bibliográficas.

- IEEE Std 1434-2000, "IEEE Trial-Use Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery".
- "Caracterización de la propagación de señales armónicas inyectadas en el devanado del inducido de una máquina de corriente alterna", Juan C. Bolaños y Jaime A. Vanegas, tesis de pregrado, escuela de ingeniería eléctrica y electrónica, Universidad del Valle.

3.10.1 Detección de pulsos eléctricos.

Cada vez que se genera una DP aparecerá un flujo de corriente que crea un pulso que viaja como una onda electromagnética a través del devanado de la máquina, estos pueden propagarse en diferentes modos, sufrir atenuaciones, reflexiones y encontrar complejas y variables impedancias en las regiones de ranura y cabeza de bobina. a través de la impedancia del sistema aislante. En este método de detección se miden los pequeños pulsos de voltaje o de corriente que acompañan a las DP's.

Los pulsos se pueden detectar por medio de condensadores de alta tensión, estos suelen estar conectados a los terminales de fase. Los condensadores presentan una alta impedancia a la frecuencia de la red y una baja impedancia frente a las altas frecuencias de las DP's.

Los pulsos de corriente se pueden detectar por medio de transformadores de corriente de alta frecuencia instalados en: los cables que conectan el neutro de la máquina a la impedancia de puesta a tierra, los conductores de fase o en otro lugar adecuado para la detección de la corriente [39].

En la salida de los condensadores o del transformador de corriente, aparecen pulsos de voltaje o corriente respectivamente, los cuales pueden medirse con osciloscopios, analizadores de espectros, etc.

3.10.2 Detección de radio frecuencia (RF).

Además de crear pulsos de tensión y corriente, las DP's también crean algunas ondas de RF que se propagan lejos de la fuente de DP con frecuencias que van desde 100kHz hasta varios cientos de MHz. Por lo tanto se pueden utilizar antenas de radio AM para evaluar la actividad de DP's. También se puede usar una antena direccional de RF para localizar la fuente de DP. Este tipo de prueba se puede hacer on-line y off-line [39].

3.10.3 Factor de potencia Tip-Up.

Como ya se mencionó, el factor de potencia Tip-Up es una medida indirecta del nivel de descargas parciales presentes en el aislamiento [39]. Ver 3.7.

3.10.4 Detección de ozono.

En las máquinas refrigeradas por aire, las descargas parciales superficiales crean reacciones químicas en el aire adyacente. Uno de los subproductos de estas reacciones es el ozono. Este es un gas con un olor característico, la concentración del ozono aumenta si hay un considerable número de DP's. Existen varios métodos para medir la concentración del ozono, como los tubos químicos o los sensores electrónicos [39].

A pesar de que se puede medir la concentración de ozono fuera de línea, se recomienda que su medición se haga on-line como una herramienta de monitoreo constante.

Se debe tener en cuenta que las DP's dentro del aislamiento no ocasionan ozono medible [39].

3.10.5 Detección acústica y ultrasónica.

Cada pulso de DP produce una pequeña onda de choque que a su vez crea ruido acústico, si la hay mucha actividad de DP's el ruido resultante se asemeja al producido por algo friéndose. El ruido acústico producido va desde unos cientos Hz a más de 150kHz. Se pueden usar micrófonos direccionales para medir el nivel ruido producido por la DP y localizar su fuente. Si la DP se produce dentro del aislamiento a tierra, el ruido producido no será detectable a menos que la actividad de DP sea significativamente grande [39].

3.10.6 Detección por medio de sondas electromagnéticas.

Los métodos que permiten la medida de actividad de DP en cada bobina conectada al devanado son basados en una sonda electromagnética o de detección, que se localiza en el extremo de un báculo portátil eléctricamente aislado.

Las lecturas de las sondas suelen ser dadas en mA o pC. La lectura de la prueba no se ve afectada por la configuración del devanado y refleja la condición del sistema aislante. Se han encontrado por medio de la experiencia que los valores aceptados de corriente medidos por este método son los mostrados en la Tabla 34.

Tabla 34. Valores aceptados de corriente de las DP's

Tipo de aislamiento	Valor aceptado (mA)
Asfalto-mica	100
Poliéster-mica	30
Epóxico-mica	20

Tomado de [39].

3.10.7 Prueba de Descargas de ranura (DR).

La prueba de descarga de ranura se realiza con el simple propósito de verificar la eficacia del contacto eléctrico entre la superficie conductora de la bobina (pintura o cinta semiconductora) y el hierro de las ranuras del estator. El resultado de las pérdidas por contacto eléctrico es una alta energía de descarga entre la superficie conductora de la bobina y el núcleo. Puesto que en gran medida el deterioro acelerado del aislamiento a tierra se produce por la descarga de ranura, es importante detectar rápidamente su condición y corregirla [39].

Los analizadores de descarga de ranura utilizan circuitos de detección resonantes con rango de frecuencia donde la descarga superficial posee una alta energía (aproximadamente 2500 Hz), aunque con bloqueo de voltaje a 60 Hz por medio de un filtro paso alto.

La prueba se realiza con el devanado energizado con una tensión aproximada a la tensión por fase. La localización de DP se completará al conectar un analizador de descargas de ranura en los terminales de la máquina, una fase a la vez. Por medio de un osciloscopio se puede observar fácilmente cuando existe una descarga, estas se reflejan como reflexiones de alta frecuencia [39].

3.10.8 Prueba de detección de descargas parciales internas y descargas corona.

La prueba pretende ser un indicador y localizador de la ionización alrededor de la estructura del aislamiento. Esta prueba es sensible a la corona en la superficie de las cabezas de bobina, así como a la ionización en la cavidad interior de la estructura del aislamiento. Comparado con las descargas de ranura, la energía de descarga involucrada en la corona superficial o en la ionización de las cavidades interiores, puede ser de magnitud más baja. La energía en la descarga varía con el cuadrado del voltaje a través del entrehierro y directamente con la capacitancia efectiva al punto de falla [40].

La Descarga Corona posee varios efectos indeseables, como la actividad química, la producción de calor, y el bombardeo iónico. Los efectos de deterioro de corona dependen de la intensidad y proporción en la repetición, así como del diseño del sistema de aislante involucrado [39].

El equipo de la prueba de detección de corona consiste de tres unidades básicas:

- Un equipo capaz de energizar el devanado del estator en operación normal, con voltaje de fase y frecuencia nominal.
- Una antena o sonda de corona: Para la medida de corona en las cabezas de bobina, la antena es generalmente de más o menos una pulgada de largo, rodeada con un aislamiento y montada en el extremo de un largo mango aislante.
- Un amplificador e indicador para la conexión de la antena o un medidor de pulsos pico.

La prueba de detección de corona se propone como un indicador y localizador de la ionización fuera de lo normal dentro de la estructura del aislamiento.

3.11 Resultados y análisis de la prueba realizada en el generador.

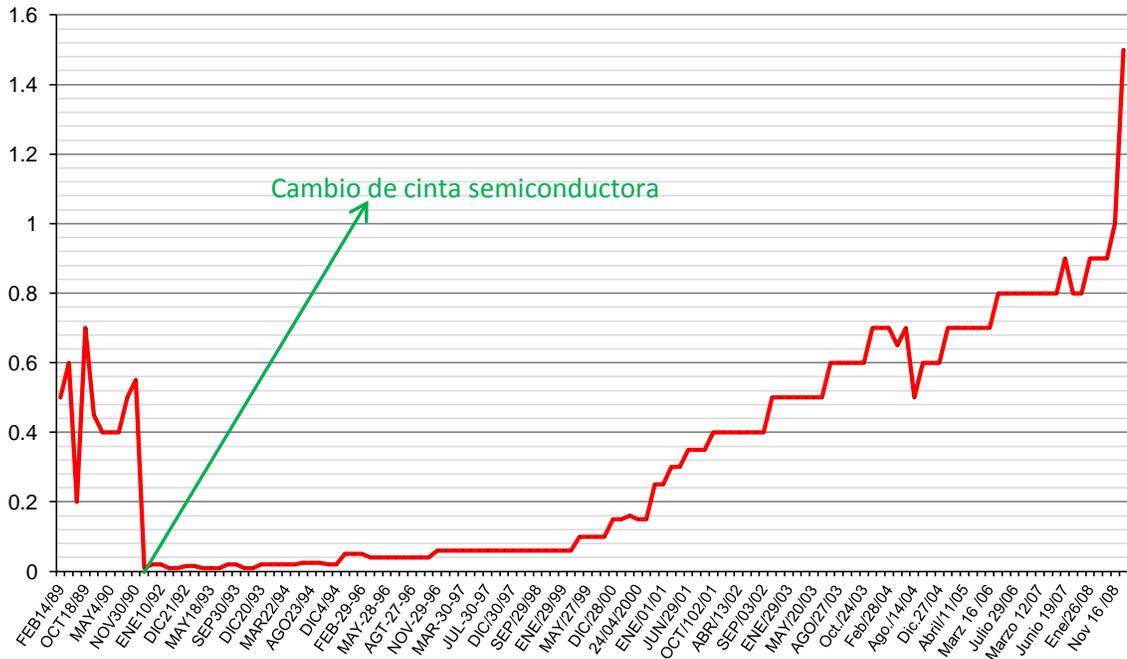
Como se mencionó anteriormente, hay varias formas de evaluar la actividad de descargas parciales. En la Central Hidroeléctrica Salvajina, las formas comunes de evaluar las DP's son: el factor de potencia Tip-Up y la detección de ozono. Los resultados históricos del factor de potencia Tip-Up se muestran en el numeral 3.7.8.

En este numeral se mostrarán los resultados de la detección de ozono y la detección de DP por medio de sonda electromagnética en la unidad de generación 2 de la Central Salvajina.

3.11.1 Registro histórico de ozono.

En la Figura 90 se muestra el registro histórico de la medición de ozono, en esta figura se logra apreciar un considerable y acelerado aumento del nivel de ozono desde el último cambio de la cinta semiconductor.

Figura 90. Registro histórico del nivel de ozono presente en la máquina.



Los altos niveles de ozono registrados en las últimas mediciones, son un claro indicativo de alta presencia de descargas superficiales en el sistema aislante del devanado del estator.

3.11.2 Resultados prueba de DP usando una sonda electromagnética.

La prueba fue realizada por la firma Global Strategies & Solutions S.A. (GSS) el 19 de enero de 2010. Los equipos utilizados para la realización de la prueba fueron:

- Sonda PPM 97 Adwel s/n: 0100607.
- Fuente de alimentación de alta tensión.

La prueba se realiza luego de presentarse falla a tierra en la barra 181 de la fase S. Adicionalmente se han presentado otras fallas ocasionadas por DP's en años anteriores al de la prueba y de igual forma se ha realizado la prueba de DP en estas ocasiones.

Según la Tabla 34, el valor máximo aceptable de corriente para el tipo de aislamiento de los generadores de Salvajina, es de 20mA. Durante la prueba se obtuvieron valores aceptables en la mayoría de las barras, sin embargo también se obtuvieron valores muy elevados, que superaron el límite aceptable y los valores de las pruebas anteriores.

Desde la Figura 91 a la Figura 96 se muestran los dos últimos resultados de la prueba realizada en cada fase (abril del 2009 y enero del 2010), con el objeto de comparar los valores de ambas pruebas y así tener una mejor idea de la gravedad de las DP's. la grafica con línea verde corresponde a la prueba realizada en 2009 y la azul en 2010.

Figura 91. Comparativo DP's Fase R, bobina 1.

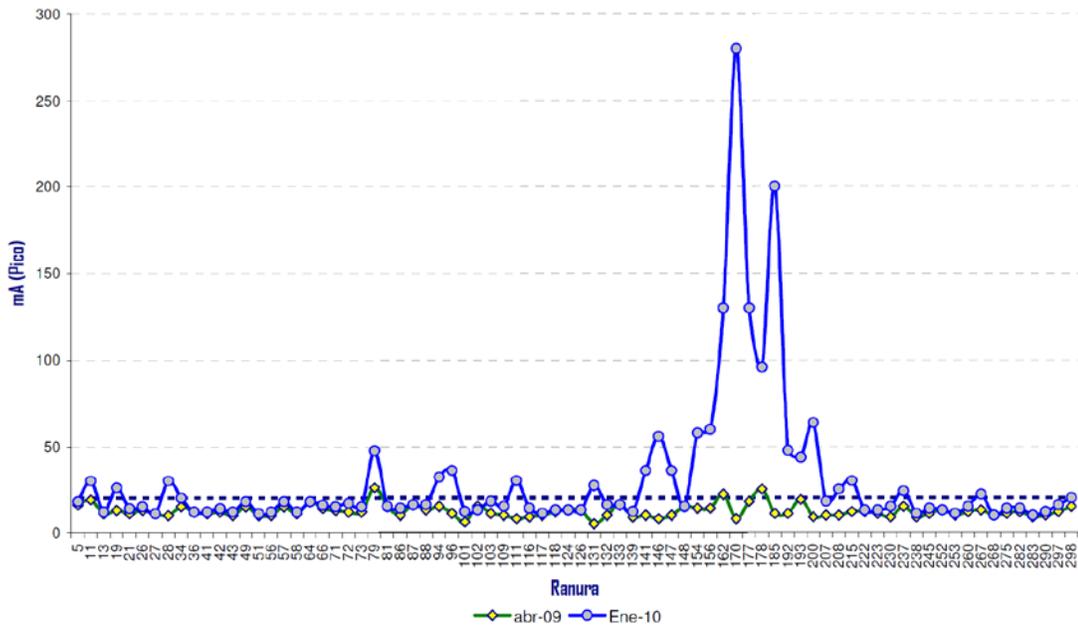


Figura 92. Comparativo DP's Fase R, bobina 2.

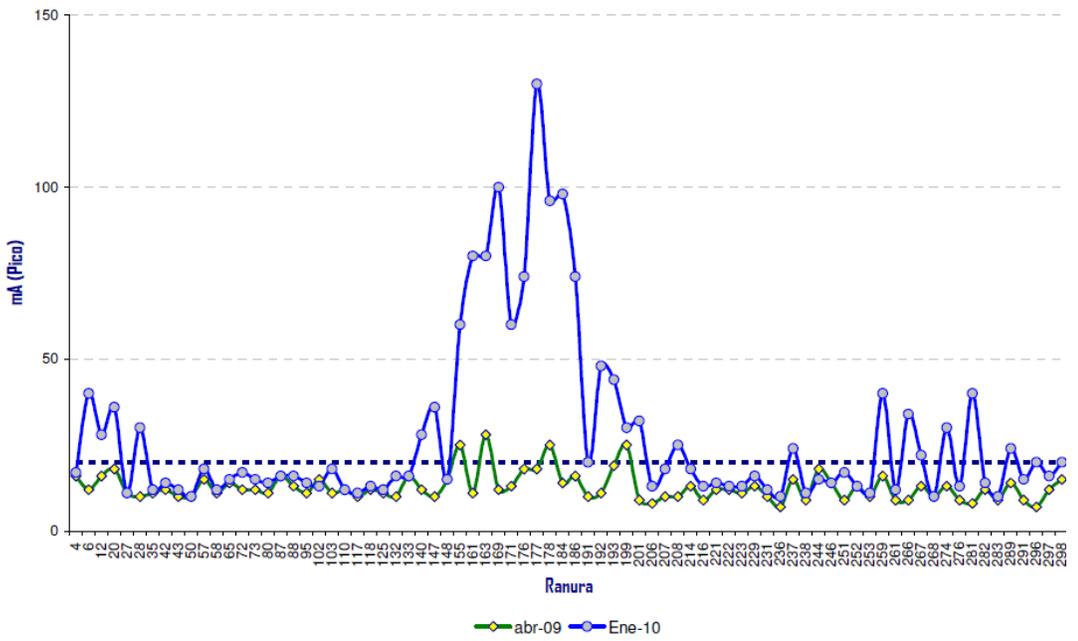


Figura 93. Comparativo DP's Fase S, bobina 1.

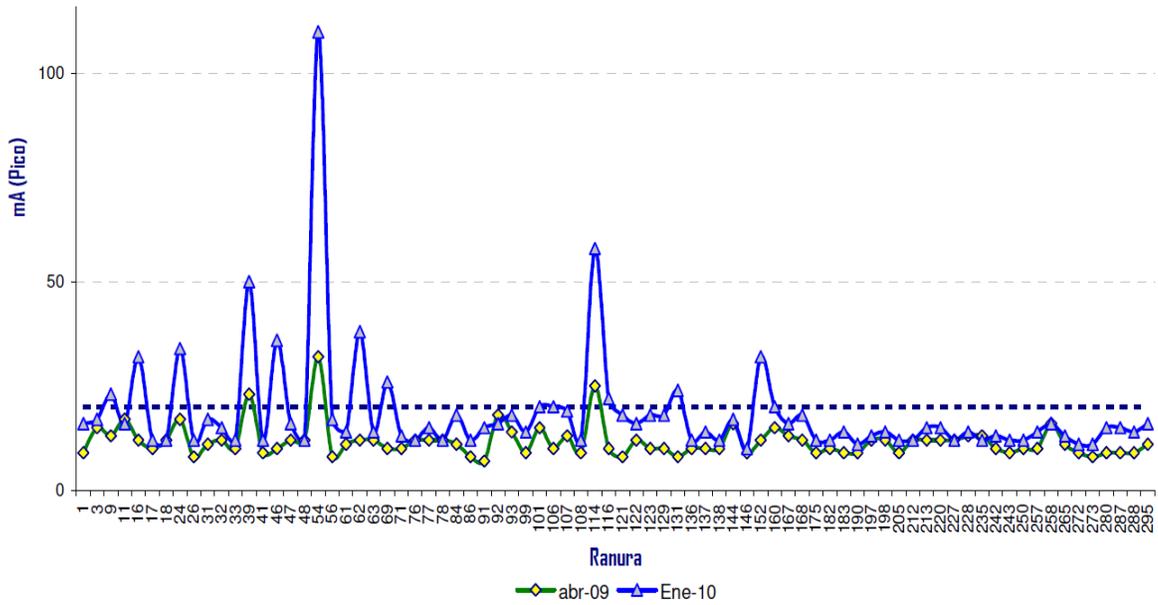


Figura 94. Comparativo DP's Fase S, bobina 2.

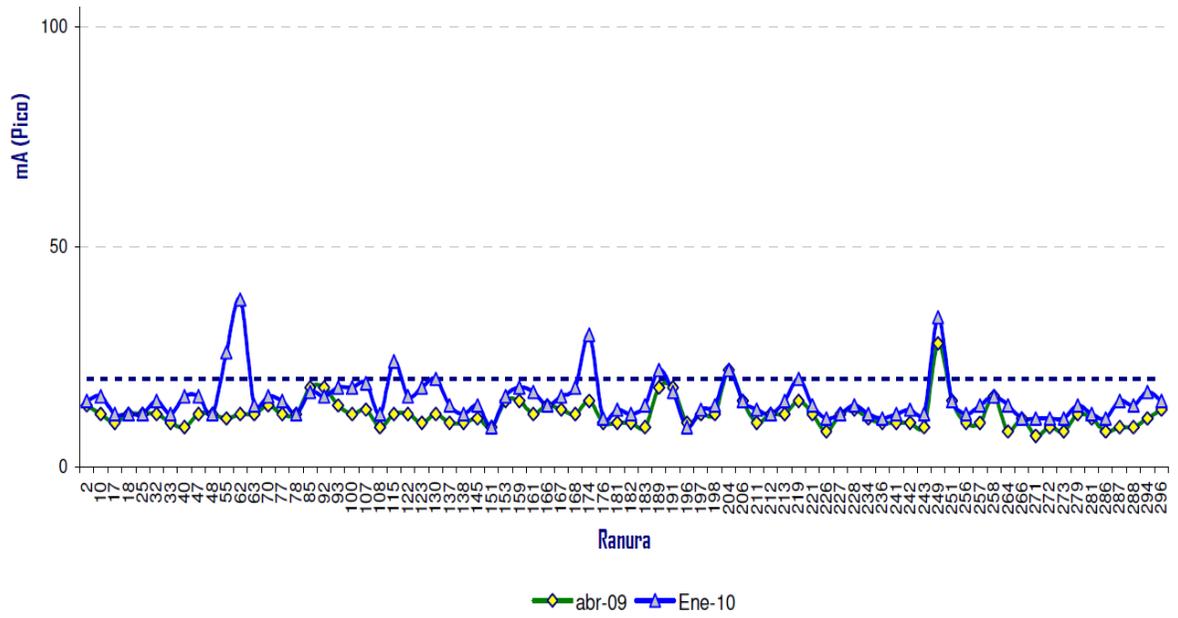


Figura 95. Comparativo DP's Fase T, bobina 1.

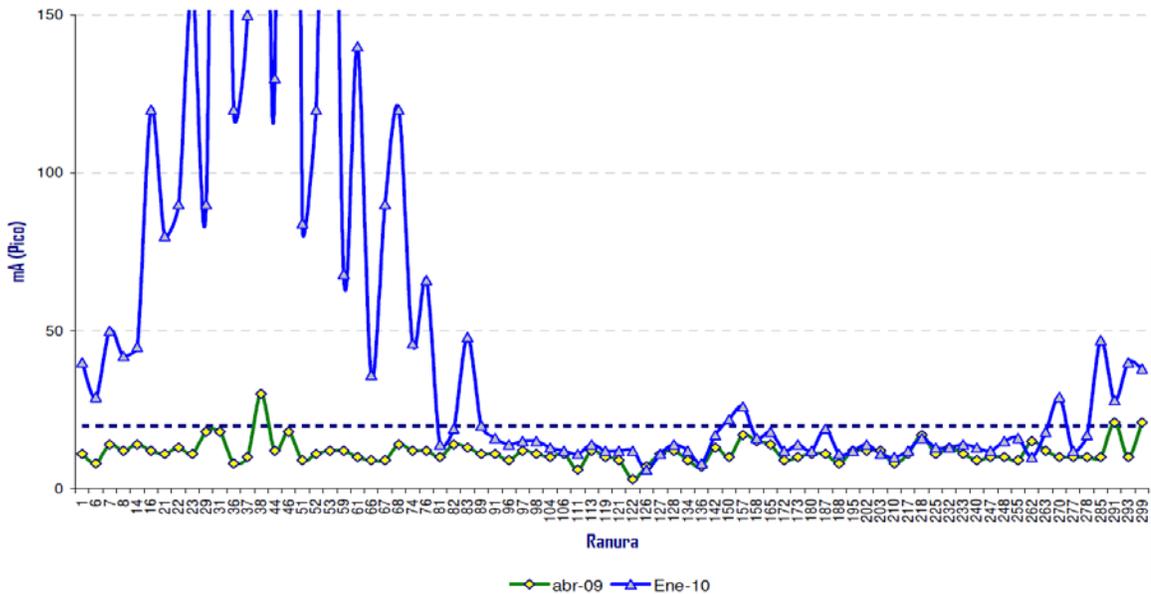
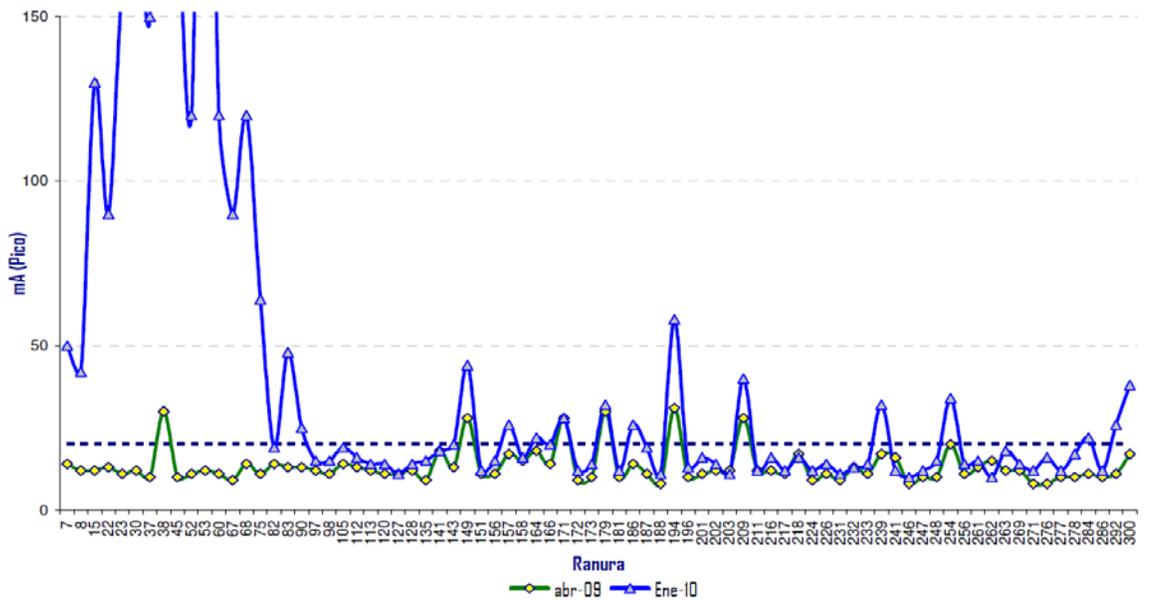


Figura 96. Comparativo DP's Fase T, bobina 2.



Con estos resultados se puede apreciar un deterioro progresivo y acelerado del aislamiento, originado por la alta actividad de descargas parciales.

Debido a los resultados obtenidos en las pruebas descritas hasta ahora, EPSA desea realizar un cambio completo del devanado del estator para así mejorar la disponibilidad de servicio del generador. Para esto se debe especificar claramente las características que debe cumplir el nuevo devanado, estas serán descritas en el capítulo 5.

4. EVALUACIÓN PARA CAMBIO DE CONFIGURACIÓN DEL DEVANADO.

En este capítulo se muestra el estudio realizado por el Doctor Jose L. Oslinger donde se comparan tres devanados propuestos por diferentes empresas, para evaluar el posible cambio de la configuración del devanado estático original de la Unidad de generación 2 de Salvajina.

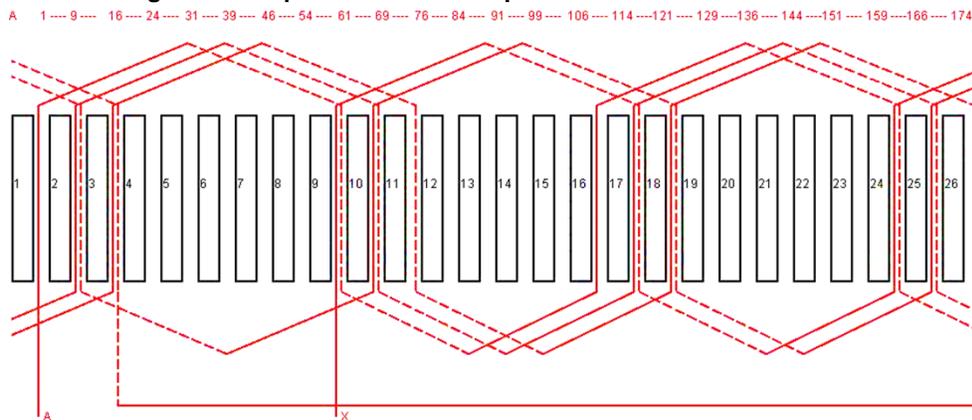
Se mostrará el esquema de conexión de cada devanado propuesto y los armónicos de fuerza magneto motriz (FMM) que estos presentarían durante la operación de la máquina.

4.1.1 Devanado propuesto por TOSHIBA.

Toshiba propone conservar el diseño original el cual corresponde a un devanado trifásico ondulado progresivo de doble capa con pasos 1-9-16 sin sistema para cambio de neutro.

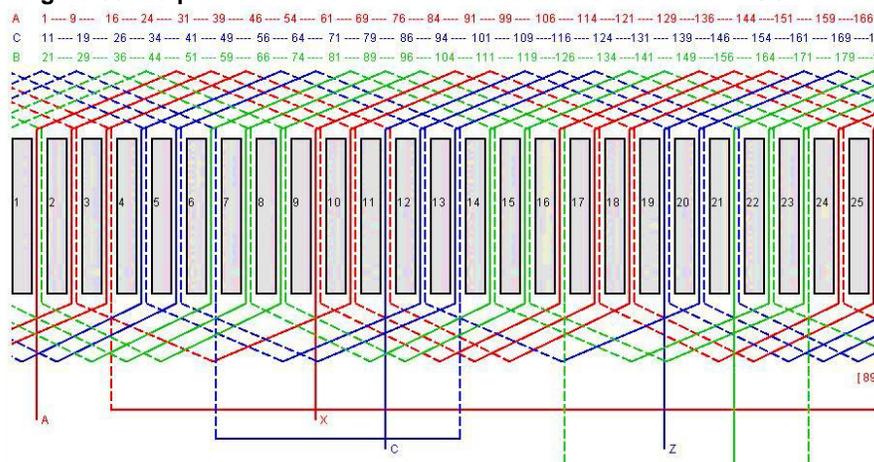
En la Figura 97 se muestra el esquema de conexión de una fase del devanado propuesto por TOSHIBA para la unidad de generación 2 de la Central Hidroeléctrica Salvajina y en la Figura 98 se muestra el esquema de conexión de todas las fases del devanado.

Figura 97. Esquema de conexión por fase. Devanado TOSHIBA.



Tomado de [38].

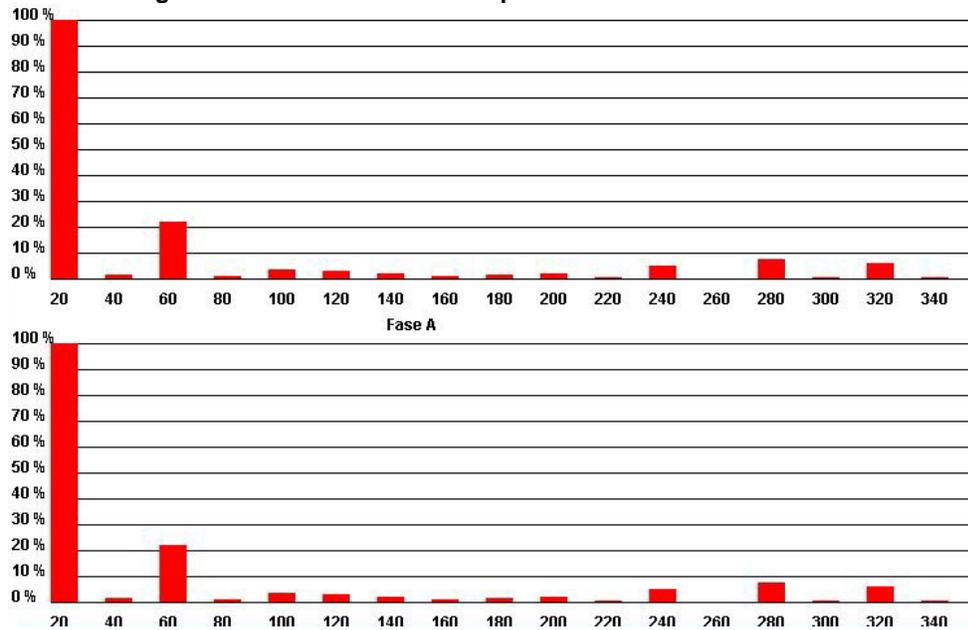
Figura 98. Esquema de conexión de todas las fases. Devanado TOSHIBA.



Tomado de [38].

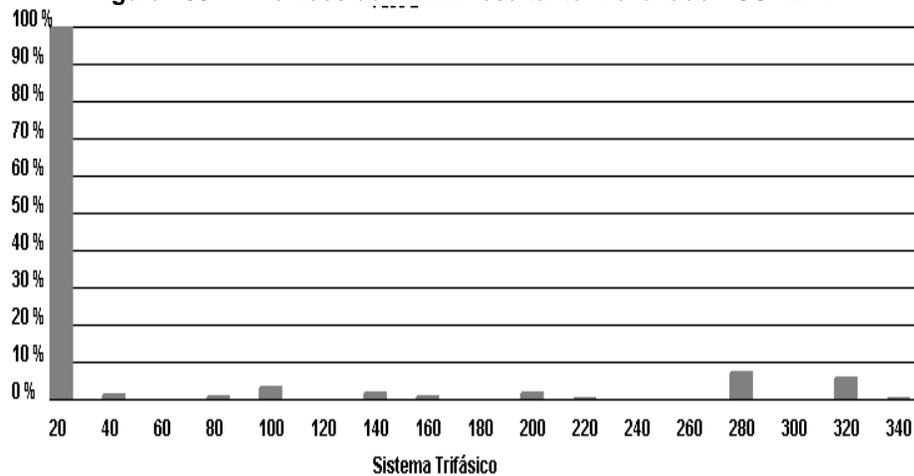
En la Figura 99 se muestran los armónicos de FMM por fase y en la Figura 100 se muestran los armónicos resultantes que presentaría el devanado propuesto por Toshiba.

Figura 99. Armónicos de F.M.M. por fase. Devanado TOSHIBA.



Tomado de [38].

Figura 100. Armónicos de F.M.M. resultante. Devanado TOSHIBA.



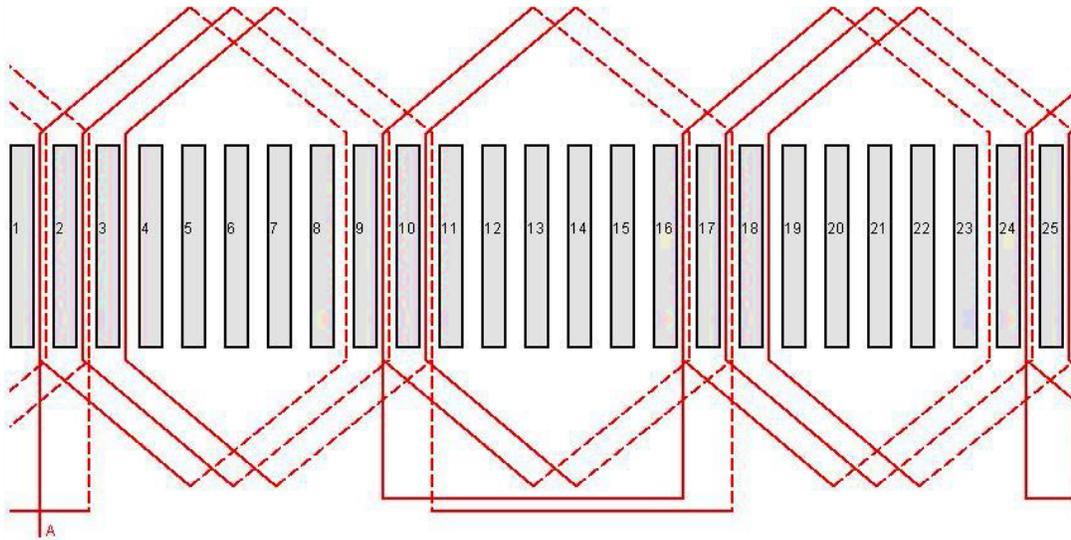
Tomado de [38].

4.1.2 Devanado propuesto por ANDRITZ.

ANDRITZ propone un devanado trifásico imbricado de doble capa con paso 1-8 sin sistema para cambio del neutro.

En la Figura 101 se muestra el esquema de conexión de una fase del devanado propuesto por ANDRITZ para la unidad de generación 2 de la Central Hidroeléctrica Salvajina.

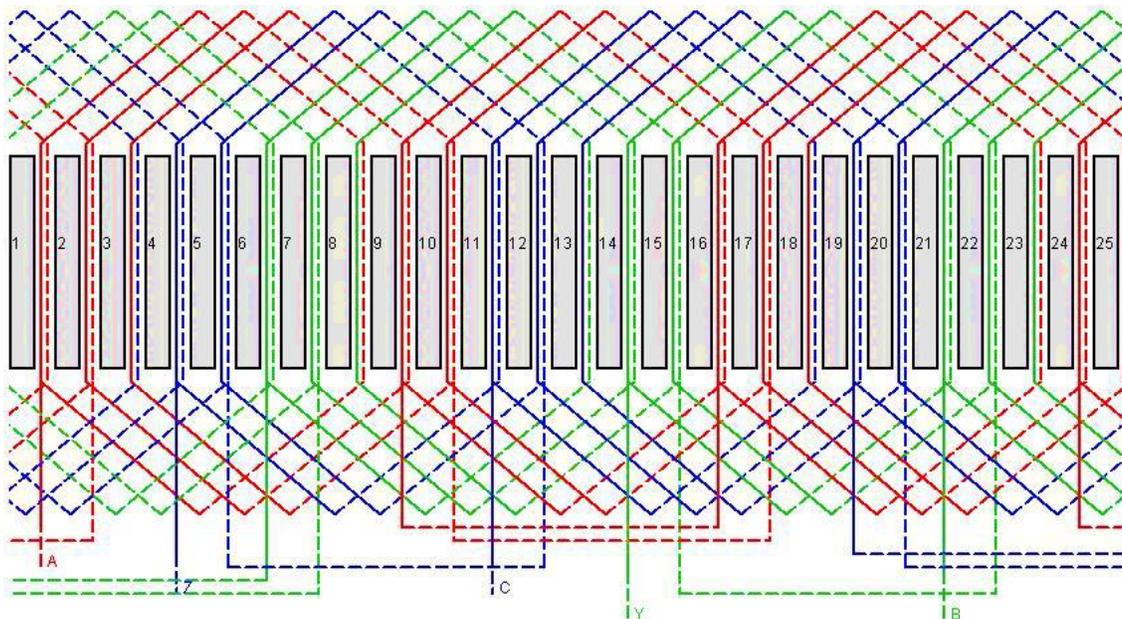
Figura 101. Esquema de conexión por fase. Devanado ANDRITZ.



Tomado de [38]a.

En la Figura 102 se muestra el esquema de conexión de todas las fases del devanado propuesto por ANDRITZ para la unidad de generación 2 de la Central Hidroeléctrica Salvajina.

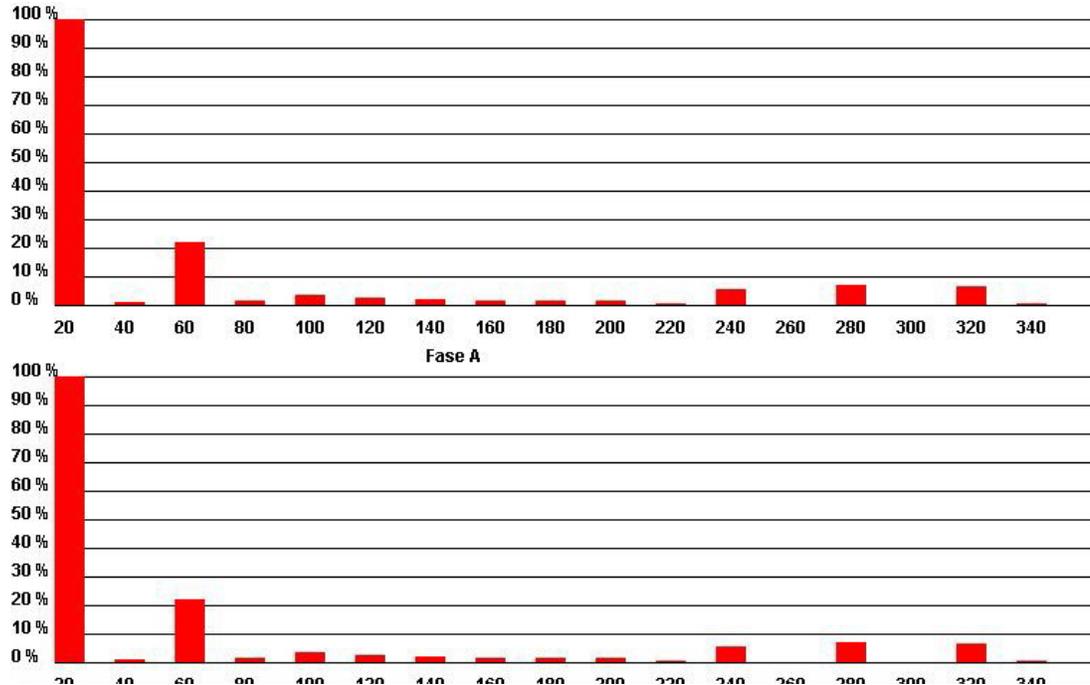
Figura 102. Esquema de conexión de todas las fases. Devanado ANDRITZ.



Tomado de [38].

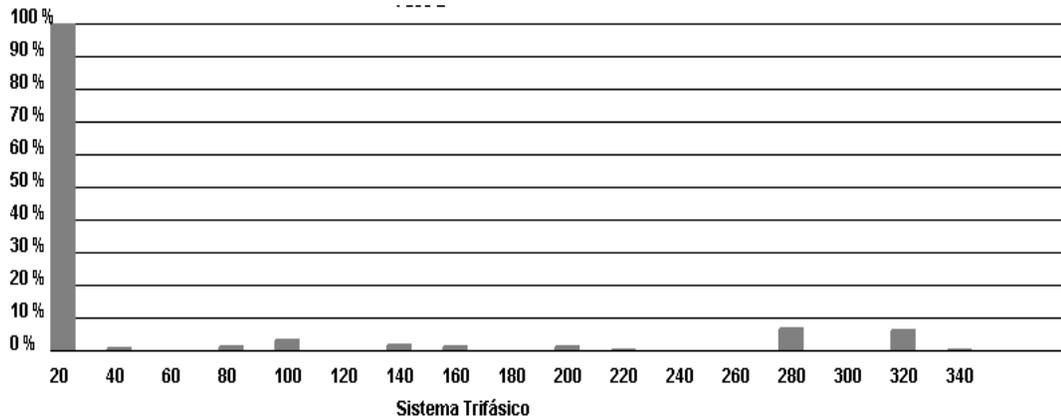
En la Figura 103 se muestran los armónicos de FMM por fase y en la Figura 104 se muestran los armónicos resultantes que presentaría el devanado propuesto por ANDRITZ.

Figura 103. Armónicos de F.M.M. por fase. Devanado ANDRITZ.



Tomado de [38].

Figura 104. Armónicos de F.M.M. resultante. Devanado ANDRITZ.



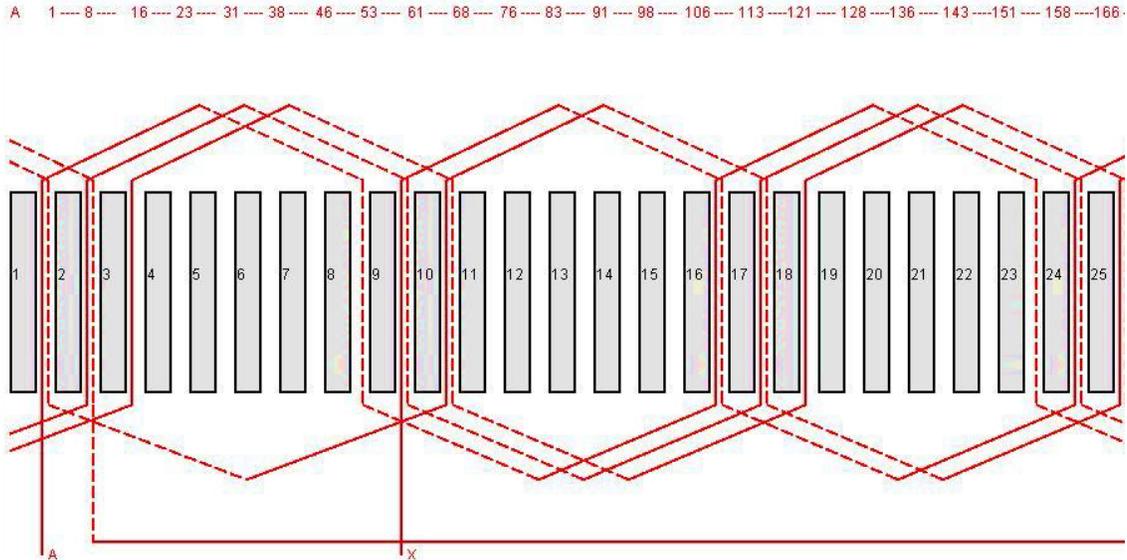
Tomado de [38].

4.1.3 Devanado propuesto por OSLINGER.

OSLINGER propone un devanado trifásico ondulado progresivo de doble capa con pasos 1-8-16 sin sistema de intercambio de neutro.

En la Figura 105 se muestra el esquema de conexión de una fase del devanado propuesto por OSLINGER para la unidad de generación 2 de la Central Hidroeléctrica Salvajina.

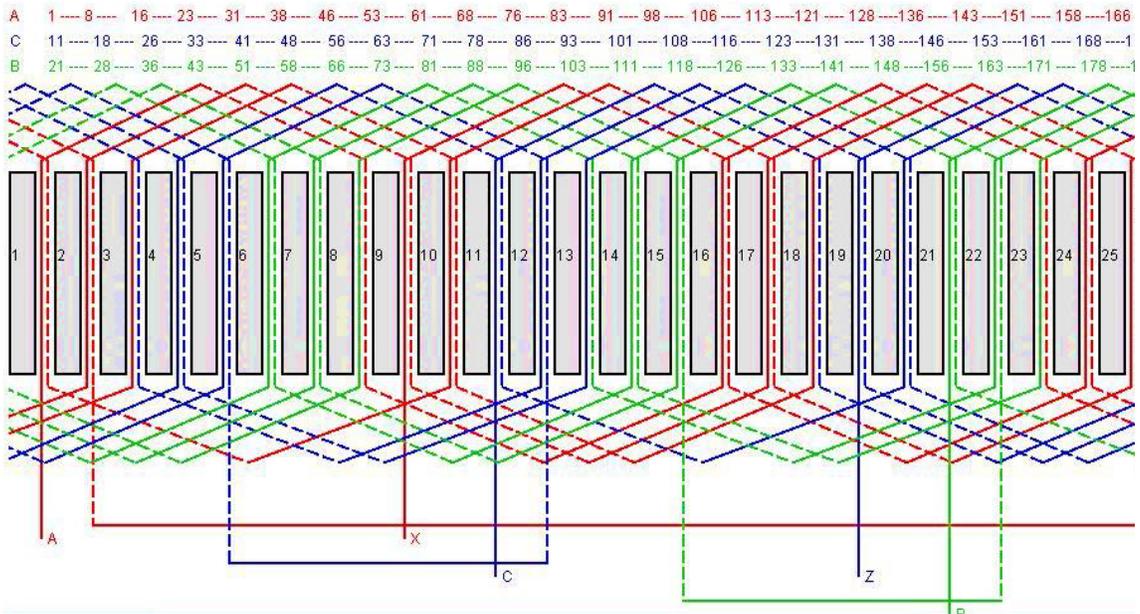
Figura 105. Esquema de conexión por fase. Devanado OSLINGER.



Tomado de [38].

En la Figura 106 se muestra el esquema de conexión de todas las fases del devanado propuesto por OSLINGER para la unidad de generación 2 de la Central Hidroeléctrica Salvajina.

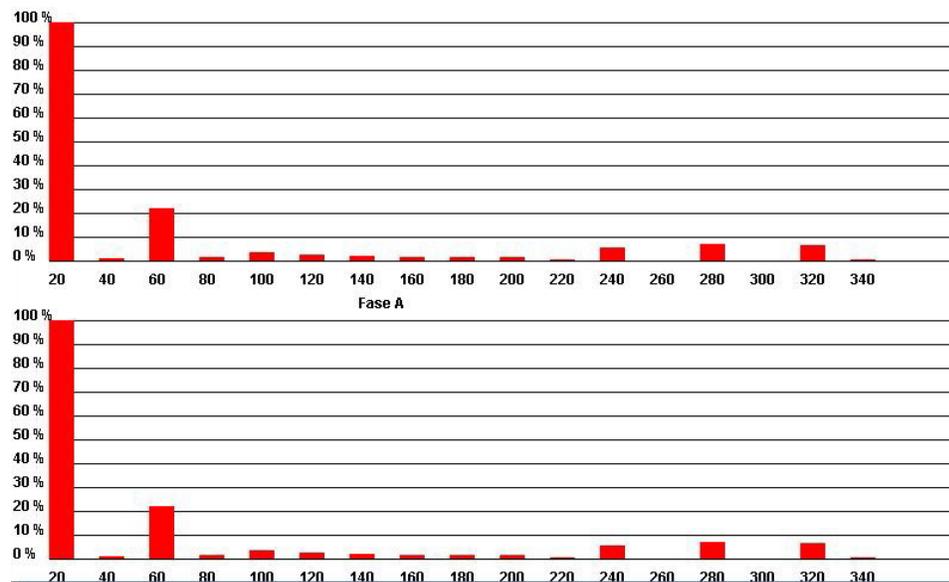
Figura 106. Esquema de conexión de todas las fases. Devanado OSLINGER.



Tomado de [38].

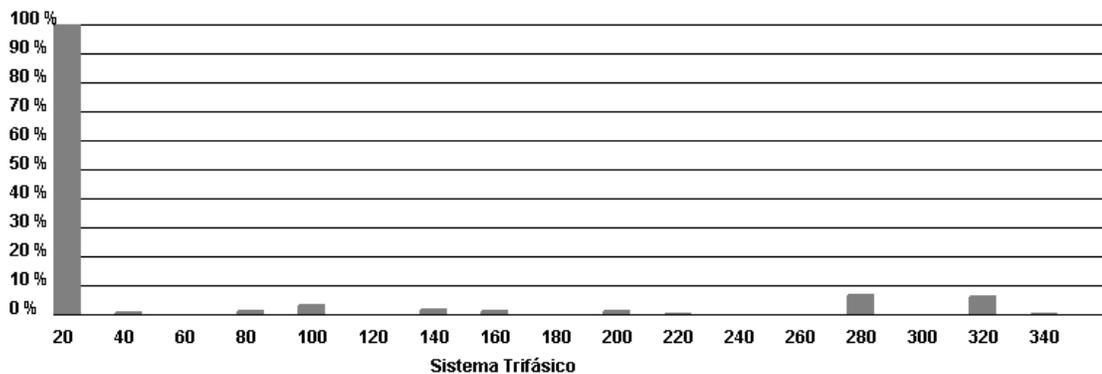
En la Figura 107 se muestran los armónicos de FMM por fase y en la Figura 108 se muestran los armónicos resultantes que presentaría el devanado propuesto por OSLINGER.

Figura 107. Armónicos de F.M.M. por fase. Devanado OSLINGER.



Tomado de [38].

Figura 108. Armónicos de F.M.M. resultante. Devanado OSLINGER.

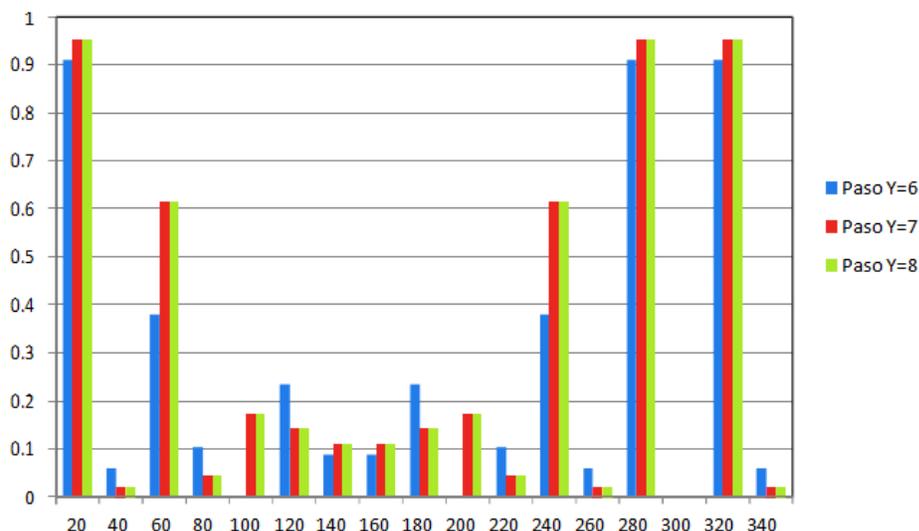


Tomado de [38].

4.1.4 Conclusiones sobre los diseños propuestos.

En la Figura 109 se muestran los factores de devanado para las diferentes configuraciones propuestas.

Figura 109. Factores de devanado Paso Y=6, Y=7, Y=8



Tomado de [38].

Para los tipos de devanados propuestos por Toshiba y Andritz, no existe diferencia apreciable entre las componentes fundamentales y los espectros de armónicos de la FMM resultante del entrehierro. Lo anterior significa que los efectos electromagnéticos, mecánicos y térmicos derivados de las componentes de la fuerza magnetomotriz bajo carga no presentarán diferencias significativas debido al cambio propuesto [38].

En el devanado imbricado se debe considerar: el tiempo de montaje, reparación y la posición de las tapas superiores con la altura resultante de los puentes de conexión.

El devanado propuesto por OSLINGER no presenta una diferencia significativa de las componentes fundamentales y los espectros de armónicos de la FMM comparado con los otros dos devanados.

Debido a que los devanados no presentan diferencias con respecto a las componentes fundamentales y los espectros de armónicos, EPSA decide conservar el diseño original propuesto por Toshiba, con esto se procede a definir las características que debe cumplir el nuevo devanado, las cuales se muestran en el siguiente capítulo.

5. DETERMINACIÓN DE LOS REQUISITOS TÉCNICOS DEL NUEVO DEVANADO SEGÚN NORMAS INTERNACIONALES Y ÚLTIMOS AVANCES TECNOLÓGICOS.

En este capítulo se muestran las normas que debe cumplir el fabricante para la elaboración del nuevo devanado y en qué organizaciones puede basar la normativa de los trabajos que realice. También se describen las condiciones de operación que debe soportar el nuevo devanado, las exigencias técnicas de los materiales y la forma de construcción de los elementos del devanado. Luego se describen los parámetros técnicos de operación que debe cumplir el devanado.

Con el nuevo devanado se espera dar una solución directa a la degradación, debido al envejecimiento acelerado que ha tenido el aislamiento ocasionado por la alta actividad de descargas superficiales. Para lograr esto se requiere hacer un rediseño del sistema aislante. Los principales cambios que debe tener el nuevo devanado son:

- Cambio del aislamiento de Clase B a Clase F.
- Mejorar el sistema semiconductor de ranura y el sistema gradiente de cabezas de bobina.
- Mejorar el sistema de fijación de las barras en las ranuras, cuñas, rellenos y separadores de fase.

Los requisitos y las especificaciones mostradas en este capítulo corresponden a las exigidas para el cambio del devanado estático de la unidad de generación 2 de la Central Hidroeléctrica Salvajina. Sin embargo estos pueden servir de base para especificar nuevos devanados o barras estáticas individuales, de otros grandes generadores.

Se debe tener en cuenta que los parámetros de funcionamiento expuestos en este capítulo corresponden a los parámetros originales del generador 2 de Salvajina, los cuales deben tomarse como los límites mínimos exigidos y estos, solo pueden ser modificados para mejorar las condiciones de operación del generador. De la misma forma se recomienda que las especificaciones para el cambio de devanado de otros grandes generadores, conserven sus características originales y estas solo deben modificarse con el objetivo de mejorar las condiciones de operación de la máquina.

5.1 Normas, Procedimientos y/o Prácticas Recomendadas que Debe Seguir el Fabricante.

Los equipos, productos, pruebas y materiales suministrados deberán cumplir con las normas y procedimientos recomendados por las siguientes organizaciones [42]:

- American National Standards Institute.....ANSI
- American Society for Testing and Materials.....ASTM
- American Society of Mechanical Engineers.....ASME
- American Society for non-Destructive Testing.....ASNT

- American Institute of Steel Construction.....AISC
- American Welding Society.....AWS
- International Electrotechnical Commission.....IEC
- Institute of Electrical and Electronics Engineers.....IEEE
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas.....ICONTEC- (IEC)
- Insulated Cable Engineers Association.....ICEA
- Japanese Industrial Standard.....JIS
- National Electric Manufactures Association.....NEMA
- National Electric Code.....NEC
- Normas Alemanas.....DIN, VDE
- Steel Structures painting Council.....SSPC

El fabricante puede usar una norma superior o equivalente a las mostradas en la Tabla 35 para la realización de pruebas y especificaciones de los nuevos parámetros del generador, además, la construcción y definición de los parámetros finales deben hacerse de acuerdo a [43].

Tabla 35. Normas requeridas.

Organización.	Norma.	Título.
IEC	695	Fire hazard testing. Part 2-2: Needle flame test.
ANSI	C50.10	Rotating Electrical Machinery Synchronous Machines.
IEEE	115	Guide: Test Procedures for Synchronous Machines (R 1995).
ANSI	C50.12	Requirements for Salient- Pole Synchronous Generators/Motors for Hydraulic Turbine Applications.
IEEE	43	Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery.
ANSI / IEEE	275/1992	Recommended Practice for Thermal Evaluation of Insulation Systems for Alternating-Current Electric Machinery Employing form-Wound Preinsulated Stator Coils for Machines Rated 6900V and Below.
ANSI / IEEE	522/1992	Guide for testing Turn-To-Turn Insulation in form-Wound Stator Coils For Alternating Current Rotating Electric Machines.
DIN CDE ENGLI	0530 PT 15 (D)/ 1998	Rotating Electrical Machines: Impulse Voltage Withstand Levels of Rotating a.c. Machines with Form-Wound Stator Coils Identical to IEC 2(CO) 535 (Nov.) (Supersedes Draft DIN VDE 0530 Part 1 A1/08/86).
IEC	34 PT 15/1992	Rotating Electrical Machines Part 15: Impulse Voltage Withstand Levels of Rotating a.c. Machines with form-Wound Stator Coils First Edition.
IEEE	429/1994	Recommended Practice for Thermal Evaluation of Sealed Insulation Systems for AC Electric Machinery Employing Form-Wound Preinsulated Stator Coils for Machines Rated 6900V and Below.

Tabla 33. (Continuación).

IEEE	522/1992	Guide for testing Turn to-Turn Insulation on form-Wound Stator Coils for Alternating-Current Rotating Electric machines.
ANSI/ASQC	Q91-1987	Quality Systems-Model for Quality Assurance in Design and Development, Production, Installations, and Servicing.
IEEE	792 TRIAL-USE-1988	Recommended Practice for the Evaluation of the Voltage Capability of Insulation Systems for AC Electrical Machinery Employing For-Wound Stator Coils.
IEEE	1043	Recommended Practice for Voltage - Endurance Testing of Form - Wound Bars and Coils.
IEEE	56	Interlaminar Insulation Test.
IEEE	505	Guide for the evaluation and identification of insulation systems of electrical equipment.

Tomado de [42].

Las unidades de trabajo deben ser las establecidas en el Sistema internacional de medidas "International System of Units" (SI), tal como lo define el "International Standard" ISO 1000.

5.2 Condiciones de Operación del Nuevo Devanado.

El generador deberá operar sin problemas bajo condiciones nominales de potencia, frecuencia, factor de potencia y voltaje [43].

5.2.1 Incremento de temperatura a carga nominal y a 15% de sobrecarga.

Se debe tener en cuenta que la temperatura del fluido refrigerante se debe establecer en: 40°C si el fluido es aire y 30°C si es agua. En base a esto se realizan las exigencias térmicas del devanado [43].

El aumento máximo de temperatura del devanado del estator no deberá ser superior a 60°C cuando el generador opere a potencia, voltaje, factor de potencia y frecuencia nominal. La temperatura del devanado del estator será medida por medio de quince detectores de temperatura del tipo PT-100 empotrados en el aislamiento del devanado [42].

El aumento máximo de temperatura del devanado no deberá ser superior a 80°C cuando el generador opere a potencia máxima continua de 115 MVA (15% de sobrecarga).

Los aumentos de temperatura indicados deberán estar de acuerdo con [43].

5.2.2 Generación de ozono.

Se deberá especificar por cuántas horas de operación del generador se garantiza que el contenido de ozono medido dentro del recinto no excederá 0.1 ppm [42]. Este valor es tomado de acuerdo a sugerencias del fabricante original.

5.2.3 Variación de tensión y frecuencias nominales.

El generador debe ser térmicamente capaz de funcionar continuamente dentro de los límites de su curva de capacidad, en los rangos de $\pm 5\%$ de su tensión nominal y $\pm 2\%$ de su frecuencia nominal [43].

5.2.4 Desbalance de corriente de fase (I_2).

En condiciones de potencia nominal donde las corrientes de cada fase son menores al 105% de la corriente nominal por fase; el generador deberá ser capaz de soportar una condición continua de desbalance de corriente en una de las fases, y la corriente de secuencia negativa (I_2) resultante no podrá ser superior a los mostrados en la Tabla 36 [43].

Tabla 36. Límite de corriente de secuencia negativa frente un desbalance de corriente.

Tipo de generador	Corriente I_2 permisible (%)
Sin devanado amortiguador	5
Con devanado amortiguador	10

Tomado de [43].

La corriente I_2 se da como porcentaje de la corriente nominal.

5.2.5 Cortocircuito en los terminales.

El generador deberá ser capaz de soportar, sin dañarse, un cortocircuito trifásico a potencia nominal con 5% de sobretensión, con excitación constante. También debe ser capaz de soportar cualquier otro tipo de corto circuito que dure 30 segundos o menos [43].

5.3 Exigencias técnicas de materiales y formas constructivas de los elementos del nuevo devanado.

Los materiales usados y las técnicas empleadas para la construcción del devanado y todo su sistema aislante, deberán hacerse de acuerdo con las últimas prácticas y avances de ingeniería. Se deben considerar los regímenes de operación en estado estable y transitorio de acuerdo con las normas pertinentes mostradas en la Tabla 35.

Los materiales deben ser nuevos, comerciales, fabricados bajo las normas internacionales mencionadas, y diseñados para su aplicación específica [42].

5.3.1 Aislamiento principal.

El sistema aislante del devanado deberá ser fabricado con aislamiento Clase F de acuerdo con la clasificación de la IEEE. Los materiales correspondientes a la Clase F son:

- Mica.
- Resinas epóxicas
- Fibra de vidrio
- Cintas semiconductoras.

- Barnices semiconductores.
- Elastómeros semiconductores o materiales semiplásticos.

No se deben aceptar materiales higroscópicos, de conductividad variable o que sufran deterioro prematuro por el alto voltaje o por los cambios cíclicos térmicos [42].

5.3.2 Sistema semiconductor en la sección recta.

El fabricante deberá usar una cinta, pintura o silicona conductora para dar un plano de referencia a las bobinas y protegerlas contra efecto corona, después de aplicar la pintura o cinta se debe obtener una resistencia superficial no menor de 2 k Ω /Cuadro y no mayor de 16 k Ω /Cuadro. Se puede aceptar el uso de cintas si se emplea el sistema de impregnación al vacío. En caso de que las cintas no sean parte integral del proceso se deberá usar pinturas conductoras. Cualquier modificación debe quedar claramente expresada en la propuesta del fabricante [42].

5.3.3 Conductores.

Los conductores que conforman todas las barras a suministrar deberán ser fabricados con cobre electrolítico, con una pureza superior o igual al 99.9%, recocido de alta conductividad y con un contenido de oxígeno no mayor a 10 ppm [42].

Para permitir una adecuada distribución de la corriente en la barra y reducir las pérdidas adicionales se deberá usar transposición tipo Roebel de 360°, y garantizar una adecuada impedancia. Refiérase al numeral 1.3.1.1.

El aislamiento de los conductores que forman una barra debe ser de materiales flexibles, para permitir adecuado moldeo de la transposición en la parte recta de la bobina y en las curvaturas de los cabezales [3].

Los subconductores deben ser de aristas redondeadas, para evitar concentraciones de campo eléctrico y garantizar un gradiente eléctrico bajo [42].

5.3.4 Sistema de graduación de campo eléctrico en las cabezas de bobina.

Se debe usar cinta o pintura para graduar el campo eléctrico en la zona de las cabezas de bobina debido a la pérdida del plano de referencia de tierra. Se acepta el uso de cintas si se emplea el sistema de impregnación al vacío. En caso que las cintas no formen parte integral del proceso, se deberá usar pinturas semiconductoras.

Los sistemas de graduación de campo y semiconductor de ranuras deben estar adecuadamente traslapados. Se deberá indicar claramente el tipo de traslape con sus respectivas medidas. La longitud de la pintura graduadora debe ser adecuada para soportar los ensayos de alta tensión DC. La resistencia superficial de la cinta graduadora, en ohmios por cuadro deberá ser mayor o igual a 10¹¹ Ω /Cuadro [42].

5.3.5 Esfuerzo dieléctrico.

El fabricante deberá explicar detalladamente el esfuerzo dieléctrico máximo (kV/mm) que garantizará en su rediseño. Este es uno de los principales parámetros técnicos [42].

5.3.6 Materiales de relleno.

Los materiales de relleno de fondo de ranura, separador entre bobinas, relleno entre la cuña y las bobinas, y los rellenos laterales necesarios para la fijación de la bobina deberán ser del tipo semiconductor y compatibles entre ellos. Se deberán indicar detalladamente los espesores de los rellenos y las holguras que se obtendrán con estos materiales [42].

5.3.7 Cuñas.

Las cuñas deberán ser de material indeformable y no contráctil, éstas deben permitir un fácil montaje y un adecuado deslizamiento sobre las bobinas durante el montaje. Los bordes deben tener un perfil tal que permita un eficiente flujo de aire hacia el canal de ventilación. Se debe considerar el nivel de vibraciones del generador y la reducción de costos de mantenimientos por recuñado. Se debe evitar el uso de cualquier pegante para asegurar las bobinas y las cuñas dentro de las ranuras del núcleo [42].

5.3.8 Elastómeros para fijación de la bobinas.

El uso de elastómeros para la fijación de las bobinas en las ranuras se puede aceptar si se demuestra su efectividad con pruebas aceleradas de envejecimiento.

En caso de usar elastómeros se deberá indicar [42]:

- El procedimiento de mantenimiento a realizar al devanado del estator.
- El tipo de limpiadores dieléctricos a usar y la forma de aplicación.
- La soportabilidad del elastómero a los productos orgánicos derivados del petróleo y los solventes.

En caso de utilizarse elastómeros, estos deben cumplir los siguientes requerimientos [42]:

- Asegurar buen contacto electromecánico entre la capa semiconductora del aislamiento y las paredes de la ranura.
- Poseer un adecuado coeficiente de conductividad para garantizar una efectiva transferencia de calor del aislamiento hacia el núcleo.
- Permitir la instalación de las bobinas dentro de la ranura con una presión de inserción suficiente pero sin deterioro del aislamiento.
- Permitir la extracción de la bobina sin daño en el aislamiento.
- Soportar la frecuencia de compresión y relajación del estator.
- Soportar la presencia de ozono y compuestos nitrogenados.
- Soportar los esfuerzos del aislamiento, debido a la expansión y contracción axial de las bobinas durante los ciclos mecánicos y térmicos.
- Operar efectivamente en las condiciones de sobrecarga del generador.
- Soportar permanentemente vapores de aceites y fugas de aceite de los cojinetes.

5.3.9 Acabado final de las barras.

Las bobinas deberán ser fabricadas utilizando moldes o plantillas que aseguren uniformidad en sus dimensiones. Todas las bobinas de un mismo tipo deberán ser intercambiables. Las barras del devanado deberán estar libres de porosidades, defectos, decoloraciones y bordes agudos [42].

5.3.10 Cabezas de bobina.

Las cabezas de bobina superior e inferior, deberán ser aisladas con cajas de moldeo "CAPS" construidas de material aislante y vaciadas en sitio con resina epóxica Clase F, de baja propagación a la flama (auto-extinguible). Las cajas de moldeo deben ser uniformes, libre de rebabas y deformaciones, se deben fabricar con materiales compatibles con la resinas a utilizar [42].

5.3.11 Amarras.

Las cabezas de bobina y las conexiones del devanado deberán estar soportadas y aseguradas rígidamente con amarras de cintas planas que sean compatibles con un barniz epóxico de dos componentes y de secado al aire, para formar un sistema compacto que evite vibraciones y deformaciones producidas en la operación del generador y en todas las condiciones de cortocircuito. En caso de las amarras de cabezas de bobinas, estas deben permitir una adecuada refrigeración [42].

El barniz debe ser de una viscosidad tal que permita una adecuada impregnación de la amarra y que no escurra hacia el borde del laminado [42]a.

5.3.12 Anillos de sujeción del devanado.

Los anillos de sujeción deberán ser construidos en dos partes, con materiales compatibles con barnices y resinas a usar [42].

5.3.13 Soldadura.

Durante el procedimiento de soldadura se deberá usar medios de refrigeración que eviten el deterioro del aislamiento en las vecindades de las uniones. Las soldaduras deben ser sometidas a ensayos de ultrasonido por muestreo [42].

El material de soldadura deberá ser de bajo punto de fusión y alta pureza.

En el caso de Salvajina, el proceso de soldadura se realizó por inducción, este método trae ventajas como la disminución del tiempo de soldadura, calidad en la soldadura y disminución del riesgo por calentamiento puntual en la soldadura y no calentamiento de las barras o bobinas adyacentes.

5.3.14 Terminales del neutro.

Los terminales del neutro y los de fase deberán ser prolongados hasta el sitio de interconexión con las barras del generador y deben incluirse todos los elementos necesarios para realizar esta interconexión.

Los conductores que forman el punto neutro del generador, se deberán diseñar para un aumento máximo de temperatura de 50 °C en condiciones de operación a máxima potencia nominal [42].

5.3.15 Ubicación de los RTD's.

Se recomienda conservar la ubicación original de los RTD's existentes, en el caso Salvajina la ubicación de los RTD's se muestran en la Tabla 1.

5.3.16 Protecciones del generador.

Se debe tener en cuenta que el generador está protegido contra fallas a tierra y entre fases por medio de relés existentes, en el caso del generador de Salvajina estos son [42]:

- Relé Detector de Falla a Tierra: 64G.
- Protección Diferencial: 87G y 87GT.
- Protección de Distancia de respaldo: 21G.
- Relé de Perdida de Campo: 40.
- Relé de Secuencia Negativa: 46.
- Relé de Potencia Inversa: 32.
- Relé de Retardo de Tiempo: 87GT-84UDFT.
- Relé de Sobrevoltaje: 59.
- Relé Temporizado de Bajo Voltaje: 27.
- Relés Instantáneos de Bajo Voltaje: 27 y 27G.
- Relé de Potencia Reactiva: 55.
- Relé de Baja Potencia: 37.

5.3.17 Puentes de interconexión de grupos de bobinas, anillos, conexión serie entre ramas y terminales de salida.

Deben ser de fácil montaje y mantenimiento, además garantizar un contacto efectivo. Las conexiones no deberán crear puntos calientes [42].

Los puentes de interconexión entre grupos de bobinas, y los conductores de salida deberán tener una sección transversal de cobre al menos del 100% de la sección de cobre utilizado en las bobinas [42].

La calidad de las uniones con las soleras de cobre, se debe evaluar realizando un barrido ultrasónico tipo C a 10 MHz con 0.5 de resolución en las superficies soldadas [42].

5.4 Parámetros técnicos a garantizar.

Se deben garantizar las siguientes características en las barras y el devanado en general cuando sea pertinente. Estas características son las mínimas requeridas por EPSA ESP.

5.4.1 Parámetros eléctricos.

En la Tabla 37 se muestran los parámetros eléctricos que debe cumplir el nuevo devanado de la unidad 2 de generación de la Central Hidroeléctrica Salvajina.

Adicional a estos, el devanado nuevo debe conservar, mínimo, los parámetros originales de la máquina expuestos al principio del Capítulo 1, como lo son: el factor de potencia, las reactancias, factor de desviación, resistencia del devanado, TIF, etc. Estos parámetros sólo pueden ser modificados para mejorar la operación del generador.

Tabla 37. Parámetros eléctricos exigidos por EPSA ESP para el nuevo devanado

Descripción.	Unidad.	Requerido.
Tensión nominal entre fases, Vn.	kV	13.8
Rigidez dieléctrica del aislamiento a un minuto, mayor o igual.	kV (rms) /mm	≥25
Voltaje de perforación en aceite del aislamiento de la bobina.	kV (AC).	≥30
Gradiente de potencial en la parte recta de la barra.	kV/mm	≤2.7
Constante dieléctrica relativa a 20 °C.		≥4
Factor de disipación (tan δ) a 3 kV/mm y 20 °C.	%	≤2
Factor de disipación (tan δ) a 3 kV/mm y 80 °C.	%	≤3
Factor de disipación (tan δ) a 3 kV/mm y 140 °C.	%	≤10
Variación de Tan δ entre 0.2 Vn y Vn con escalones de 0.2 Vn.	%	≤0.5
Variación de tanδ entre 0.2 Vn y 1.5 Vn en escalones de 0.2 Vn a 80 °C y 140 °C. El último paso se hace con variación de 0.1 Vn.	%	≤1.0
Medida de descargas parciales a la tensión de fase (Qmax).	pC	≤2.000
Aislamiento entre cobres.	Volt – AC	120e
Resistencia superficial del sistema semiconductor de cada barra.	Ω /cuadro	≥2.000 ≤16.000
Resistencia superficial del sistema graduador.	Ω /cuadro	≥10 ¹¹
Resistencia de contacto entre la barra y la superficie del núcleo antes del cuñado frontal.	Ω	≤2.000

Tomado de [42].

5.4.2 Parámetros térmicos.

En la Tabla 38 se muestran los parámetros térmicos que debe cumplir el nuevo devanado.

Tabla 38. Parámetros térmicos exigidos por EPSA ESP para el nuevo devanado

Descripción.	Unidades.	Requerido.
Conductividad térmica.	kcal /m h °C	≥0.20
Coefficiente de expansión térmica.	1 / °C	≤10 ⁻⁴

Tomado de [42].

5.4.3 Parámetros mecánicos.

En la Tabla 39 se muestran los parámetros mecánicos que debe cumplir el nuevo devanado de la unidad 2.

Tabla 39. Parámetros mecánicos exigidos por EPSA ESP para el nuevo devanado

Descripción	Unidades	Requerido.
Tensión de ruptura a 20 °C.	kg/cm ²	≥1.000
Tensión de ruptura a 80 °C.	kg/cm ²	≥800
Tensión de ruptura a 140 °C.	kg/cm ²	≥500
Módulo de elasticidad sin variación de la temperatura.	kg/cm ²	≥10 ⁵

Tomado de [42].

5.5 Observaciones generales.

Este capítulo puede usarse como guía para plantear los requisitos técnicos de un nuevo devanado de un gran generador teniendo en cuenta las siguientes pautas:

- Se recomienda conservar como límites mínimos los parámetros originales del generador, por esto es importante la descripción técnica del estator y su devanado, tal y como se hizo en el Capítulo 1 de este trabajo.
- Si se desean cambiar los parámetros, estos cambios deben hacerse solo en pro de mejorar las condiciones operativas de la máquina.
- Se debe tener claramente identificada la causa principal de falla que justifica el cambio de devanado, para centrar las especificaciones en la mejora de los elementos que presentaron dichas fallas. Por esto es importante un diagnóstico asertivo y completo del estado general del devanado y el núcleo, tal y como se hace en los capítulos 2 y 3.

- Si los parámetros originales no obedecen a normas actuales, estos deben ser reajustados para cumplir la norma y orientados en mejorar las características del generador.
- El fabricante puede modificar parte de las especificaciones siempre y cuando sean objeto de mejoras técnicas. Las modificaciones por parte del fabricante deben quedar claramente consignadas y justificadas.
- En cualquier caso el fabricante deberá garantizar no desmejorar las características actuales de elementos, componentes, materiales ni la operación del generador.

En el capítulo siguiente se mostrarán los parámetros propuestos por el fabricante y se definirán los parámetros definitivos aceptados por ambas partes, en el caso del cambio de devanado de la unidad 2 de la Central Salvajina

6. ACUERDOS CON EL FABRICANTE Y LÍMITES TÉCNICOS GARANTIZADOS.

En este capítulo se establecerán las condiciones que debe cumplir el fabricante si desea cambiar algún parámetro o requisito planteado en la especificación técnica. Luego se muestran las características técnicas garantizadas por el fabricante para el nuevo devanado del estator de la unidad de generación 2 de Salvajina.

6.1 Condiciones para cambio en las especificaciones.

La principal condición que debe cumplir el fabricante para realizar cualquier cambio en las especificaciones, es cumplir con las normas internacionales que rigen el o los parámetros a modificar.

Adicionalmente, siempre se debe velar por la mejora en las especificaciones, al menos que se tengan limitantes técnicas para obtener dichas mejoras, sin embargo todo cambio efectuado en las especificaciones, debe seguir cumpliendo con las normas internacionales.

Sin importar cual sea el caso, el fabricante debe justificar detalladamente el cambio propuesto a las especificaciones y garantizar no desmejorar las características actuales de elementos, componentes, materiales ni la operación del generador.

6.2 Características técnicas garantizadas por el fabricante.

De acuerdo a los parámetros exigidos por EPSA mostrados en el capítulo 5, el fabricante garantiza los siguientes parámetros.

6.2.1 Parámetros eléctricos.

En la Tabla 40 se muestran los parámetros eléctricos que garantiza el fabricante para el nuevo devanado del estator de la unidad 2 de Salvajina.

Tabla 40. Parámetros eléctricos garantizados por el fabricante.

Descripción.	Unidad.	Requerido.	Garantizados
Tensión nominal entre fases, Vn.	kV	13.8	13.8
Rigidez dieléctrica del aislamiento a un minuto, mayor o igual.	kV (rms) /mm	≥25	>30
Voltaje de perforación en aceite del aislamiento de la bobina.	kV (AC).	≥30	>25
Gradiente de potencial en la parte recta de la barra.	kV/mm	≤2.7	<2.7
Constante dieléctrica relativa a 20 °C.		≥4	>3.5
Factor de disipación (tan δ) a 3 kV/mm y 20 °C.	%	≤2	<2
Factor de disipación (tan δ) a 3 kV/mm y 80 °C.	%	≤3	<3

Tabla 40. (Continuación).

Factor de disipación (tan δ) a 3 kV/mm y 140 °C.	%	≤ 10	<10
Variación de Tan δ entre 0.2 Vn y Vn con escalones de 0.2 Vn.	%	≤ 0.5	<1.5
Variación de tan δ entre 0.2 Vn y 1.5 Vn en escalones de 0.2 Vn a 80 °C y 140 °C. El último paso se hace con variación de 0.1 Vn.	%	≤ 1.0	<1.5
Medida de descargas parciales a la tensión de fase (Qmax).	pC	≤ 2000	<2000
Aislamiento entre cobres.	Volt – AC	120	120
Resistencia superficial del sistema semiconductor de cada barra.	Ω / $\chi\upsilon\alpha\delta\rho\sigma$	≥ 2.000 ≤ 16.000	≥ 400 ≤ 5000
Resistencia superficial del sistema graduador.	Ω / $\chi\upsilon\alpha\delta\rho\sigma$	$\geq 10^{11}$	$\geq 10^9$
Resistencia de contacto entre la barra y la superficie del núcleo antes del cuñado frontal.	Ω	≤ 2.000	≤ 20000

Como se aprecia en la Tabla 40 hay parámetros que mejoran las características eléctricas comparándolos con los exigidos por EPSA, igualmente hay otros parámetros que están ligeramente por debajo de lo exigido, sin embargo permanecen dentro de los límites aceptables. Por lo tanto se aceptan los parámetros eléctricos garantizados por el fabricante.

6.2.2 Parámetros térmicos.

En la Tabla 41 se muestran los parámetros térmicos que garantiza el fabricante para el nuevo devanado del estator de la unidad 2 de Salvajina.

Tabla 41. Parámetros térmicos garantizados por el fabricante.

Descripción.	Unidad.	Requerido.	Garantizados
Conductividad térmica.	kcal /m h °C	≥ 0.20	>0.2
Coefficiente de expansión térmica.	1 / °C	$\leq 10^{-4}$	<10 ⁻⁴

No hay diferencia entre los parámetros garantizados y los exigidos.

6.2.3 Parámetros Mecánicos.

En la Tabla 42 se muestran los parámetros mecánicos garantizados por el fabricante.

Tabla 42. Parámetros mecánicos garantizados por el fabricante.

Descripción.	Unidad.	Requerido.	Garantizados
Tensión de ruptura a 20 °C.	kg/cm2	≥ 1.000	≥ 1.000
Tensión de ruptura a 80 °C.	kg/cm2	≥ 800	≥ 800
Tensión de ruptura a 140 °C.	kg/cm2	≥ 500	≥ 500
Módulo de elasticidad sin variación de la temperatura.	kg/cm2	$\geq 10^5$	$\geq 10^4$

Adicionalmente el fabricante garantiza un nivel de ozono en régimen continuo cómo se muestra en la Tabla 43.

Tabla 43. Nivel de ozono garantizado.

Descripción.	Unidad.	Requerido.	Garantizados
Generación de ozono en régimen continuo	ppm	N/E	0.1 por 17000 horas o 2 años de operación

No existen diferencias significativas entre lo propuesto por el fabricante y lo exigido por EPSA, por tal motivo se acepta la propuesta del fabricante (Toshiba).

7. RESULTADOS OBTENIDOS.

Este trabajo aportará a las grandes generadoras una metodología válida para especificar un nuevo devanado de un gran generador, cumpliendo las normas internacionales y siguiendo técnicas o procesos aceptados.

8. CONCLUIONES.

Se requiere de un estudio profundo y detallado del devanado original antes de realizar cualquier trabajo sobre él. Adicionalmente es necesario conocer los criterios dados por las normas o fabricantes de equipos, para garantizar un correcto proceso de aceptación de cada trabajo efectuado en el nuevo devanado.

Siempre que sea posible se debe estudiar la posibilidad de cambiar el diseño del devanado en busca de mejoras.

Todo parámetro planteado en el pliego de especificaciones, tiene un margen para la modificación o el cambio del mismo, siempre y cuando sea con justa y comprobada causa.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] EMIRO DÍEZ SALDARRIAGA. Máquinas eléctricas sincrónicas (2nd ed).
- [2] M. P. KOSTENKO, L. M. PIOTROVSKI. (1973). Máquinas eléctricas tomo II. Moscú: MIR.
- [3] Greg C. Stone, Edward A. Boulter, Ian Culbert & Hussein Dhirani. Electrical Insulation For Machines -Design, evaluation, aging, testing and repair.
- [4] EPSA. Procedimiento de inspección de la carcasa y el núcleo del estator. TOSHIBA ECS-020702 Julio 2002. (2002).
- [5] I. Kerszenbaun. (1996). IEEE Power Engineering Series.
- [6] ANSI/IEEE Std 56-1997. IEEE guide for insulation maintenance of Large alternating-current Rotating Machinery (10000 KVA and Larger)
- [7] IEEE Std 432-1992. Guide for insulation Maintenance for rotating Electric Machinery (5 Hp to less than 10.000 Hp) 1992. Appendix A4.
- [8] EPSA. Prueba de aislamiento interlaminar en el núcleo del estator.
- [9] The Gund Company. Generator Insulation Handbook. St. Louis, Missouri U.S.A.
- [10] EPSA. Ensayos de mantenimiento de generadores síncronos de polos salientes.
- [11] IEEE Std 115-2009, "IEEE Guide for test procedures for synchronous machines"
- [12] IEEE Std 118-1978, "IEEE Standard test, Code For Resistance Measurement
- [13] IEEE Std. 95-2002. "Recommended Practice for Insulation Testing of Large AC Electric Machinery (2300 V and Above) With High Direct Voltage"
- [14] IEEE Std 286-2000, "IEEE Recommended Practice For Measurement Of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation."
- [15] DOBLE. Engineering Company. Rotating Machinery, Insulation Test Guide.
- [16] J.H. Walker. (1981). Large Synchronous Machines. Clarendon press Oxford.
- [17] Global Strategies & Solutions, S.A. Prueba el CID "Detección electromagnética de imperfecciones en el núcleo.
- [18] EPSA. Factor de potencia y TIP-UP en máquinas rotativas.
- [19] EPSA. Revisión visual de bobinas Top y Bottom parte superior inferior en el mantenimiento anual.
- [20] ISIDOR KERSZENBAUM. Inspection of large synchronous machines.
- [21] IEEE Std 43-2013 (revision of IEEE Std 43-2000), "IEEE Recommended practice for testing insulation resistance of electric machinery".
- [22] User manual SKF Static Motor Analyzer AWA-IV 2/4 kVs and 6/12 kVs.
- [23] IEEE Std 522-2004, "IEEE Guide for Testing Turn Insulation of Form-Wound Stator
- [24] Coils for Alternating-Current Electric Machines.

- [25] MEGGER. (2012, octubre 3). Nuevas tecnologías de evaluación de la condición de transformadores de potencia. Pruebas de factor de potencia/disipación. Buenos aires, Argentina.
- [26] INDUCOR Ingeniería S.A. Guía de laboratorio Parte 1 –Rev.01. U. Tecnológica Nacional, facultad nacional Avellaneda.
- [27] EPSA Salvajina, plano SALV-01-003.
- [28] EPSA Salvajina, plano SALV-01-001A.
- [29] EPSA Salvajina, plano P-20041203.
- [30] EPSA Salvajina, plano SALV-01-004E.
- [31] EPSA Salvajina, plano SALV-01-004D.
- [32] EPSA Salvajina, plano SALV-01-004C.
- [33] EPSA Salvajina, plano SALV-01-004A.
- [34] EPSA Salvajina, plano TOSHIBA M-20040910.
- [35] EPSA Salvajina, plano: SALV-01-001.
- [36] Aislador compuesto del estándar del aislamiento del aislante BMC del plástico termoendurecible http://es.made-in-china.com/co_solidson/product_Thermosetting-Plastic-Composite-Insulation-BMC-Standoff-Standard-Insulator_eniosring.html, Consultado el 27 de enero de 2015 a las 08:41hr
- [37] EPSA. Inspección del aflojamiento de cuñas.
- [38] J. L. Oslinger. Comparación de conexionado y armónicos de fuerza magnetomotriz f.m.m para los devanados propuestos. Generadores Salvajina.
- [39] IEEE Std 1434-2000, "IEEE Trial-Use Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery".
- [40] IEEE Std 1553-2002, "IEEE Trial-Use Standard for Voltage-Endurance Testing of Form-Wound Soils and Bars for Hydrogenerators".
- [41] IEEE Std 1043-1996 (R2009), "IEEE Recommended Practice for Voltage-Endurance Testing of Form-Wound Bars and Coils".
- [42] J.L. OSLINGER, R. D. JAIMES. Especificaciones técnicas devanado estator generador central Hidroeléctrica Salvajina. EPSA Documento "ET_DEV_GRP2_SALVv25".
- [43] IEEE Std C50.12-2005, "IEEE Standard for Salient-Pole 50Hz and 60Hz Synchronous Generators and Generator/Motors for Hydraulic Turbine Applications Rated 5MVA and Above".
- [44] W. G. Moore. (2005). Why generators fail. Combined Cycle Journal, first quarter.
- [45] Hydro-Generator Off-line Testing.http://www.irispower.com/hydro_offline_wtd.aspx. Consultado el 11 de marzo de 2015 a las 16:35 hrs.
- [46] Global Strategies & Solutions S.A. Detección electrónica de ajustes de cuñas (SWA). <http://globalstrategiessolutions.com/deteccion-electronica-de-ajustes-de-cunas-swa-2/>. Consultado el 11 de marzo de 2015 a las 16:45 hrs.

- [47] STEPHEN J. CHAPMAN, Maquinas eléctricas (3ª edición), British Aerospace Australia: Mc Graw Hill.
- [48] JESÚS FRAILE MORA (2003), Máquinas eléctricas (5ª edición), España: Mc Graw Hill.
- [49] EPSA. Teoría del efecto corona y métodos de prueba.