



**DIAGNÓSTICO DEL AISLAMIENTO PRINCIPAL DE BOBINAS ESTATÓRICAS  
SOMETIDAS A ESFUERZOS TERMOELÉCTRICOS EN LABORATORIO**

**LUIS CARLOS CASTRO HEREDIA**

**TESIS PRESENTADA EN CUMPLIMIENTO PARCIAL DE LOS REQUISITOS  
PARA EL GRADO DE DOCTOR EN INGENIERÍA CON ÉNFASIS EN INGENIERÍA  
ELÉCTRICA**

**VERSION FINAL EVALUADA POR**

**Dr. ARMANDO RODRIGO MOR  
Dr. ANDREA CAVALLINI  
Dr. JUAN MANUEL MARTINEZ TARIFA**

**CALI, COLOMBIA 2014**

## TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS.....	iv
AGRADECIMIENTOS.....	ix
LISTA DE ABREVIACIONES .....	x
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivos de la Investigación.....	2
1.2 Organización del Documento.....	3
1.3 Contribución Principal .....	4
1.4 Alcance y Limitaciones de la Investigación.....	5
1.5 Publicaciones.....	6
2 SISTEMAS DE AISLAMIENTO COMPUESTO.....	7
2.1 Sistemas de Aislamiento de Devanados Estatóricos.....	7
2.2 Resinas Sintéticas.....	19
2.2.1 Resinas Poliéster.....	20
2.2.2 Resinas Epóxicas.....	22
2.3 Materiales de Soporte Mecánico.....	26
2.4 Barreras Dieléctricas de Mica.....	28
3 ENVEJECIMIENTO DEL AISLAMIENTO PRINCIPAL.....	32
3.1 Esfuerzos de Operación.....	32
3.2 Envejecimiento por Esfuerzos Eléctricos.....	36
3.3 Envejecimiento por Esfuerzos Térmicos.....	39
3.4 Subproductos de Degradación del Envejecimiento Termoeléctrico.....	44
3.5 Efectos del Envejecimiento Termoeléctrico en las Propiedades Físicas del Aislamiento.....	45
4 PARÁMETROS DIELECTRICOS DEL AISLAMIENTO.....	49
4.1 Descargas Parciales.....	50
4.1.1 Distribuciones Estadísticas de los Patrones en Fase Resuelta.....	52
4.1.2 Parámetros de Forma de las Distribuciones Estadísticas.....	52
4.2 Corriente de Fuga.....	56
4.3 Capacitancia y Factor de Disipación.....	59
4.4 Respuesta Dieléctrica.....	63
4.4.1 Relaciones de Kramers-Kronig.....	69
4.4.2 Función de Respuesta Dieléctrica.....	71
5 PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL AISLAMIENTO.....	73
5.1 Temperatura de Transición Vítrea.....	73
5.1.1 Análisis de Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC).....	83
5.2 Perfiles de Pérdida de Masa.....	85
5.2.1 Análisis de Termogravimetría (TGA).....	89
5.3 Detección de Cambios Moleculares.....	91
5.3.1 Espectrometría Infrarroja FTIR.....	97
6 MÉTODO EXPERIMENTAL.....	105
6.1 Barras de Prueba.....	105
6.2 Programa de Envejecimiento.....	108
6.2.1 Programa de Envejecimiento en el Primer Grupo de Barras de Prueba.....	109
6.2.2 Programa de Envejecimiento en el Segundo Grupo de Barras de Prueba.....	111

6.3	Metodología para la Toma de Muestras .....	112
6.4	Banco de Pruebas e Instalaciones.....	115
6.4.1	Banco para Aplicación de Ciclado Térmico .....	115
6.4.2	Banco para la Aplicación de Esfuerzos Termoeléctricos en la Universidad del Valle	118
6.4.3	Banco para la Aplicación de Esfuerzos Termoeléctricos en la Universidad KTH	119
6.4.4	Laboratorio de Ensayo de Bobinas .....	120
6.4.5	Diagrama de Conexión para las Mediciones a Alto Voltaje.....	123
6.4.6	Equipos de Medición Utilizados.....	123
7	EVALUACIÓN DEL AISLAMIENTO POR PARÁMETROS DIELECTRICOS....	126
7.1	Modelamiento de la Respuesta Dieléctrica .....	126
7.2	Cambios en la Respuesta Dieléctrica con el Envejecimiento .....	128
7.2.1	Efectos del Voltaje de Prueba .....	130
7.2.2	Efectos de la Cinta Gradiente .....	133
7.2.3	Dinámica del Envejecimiento .....	137
7.3	Cambios en los Parámetros Dieléctricos a 60Hz con el Voltaje de Prueba .....	141
7.3.1	Mediciones de Capacitancia, Factor de Disipación y Tip-up .....	142
7.3.2	Cálculo del Incremento de Corriente $\Delta I$ .....	147
7.3.3	Cálculo del índice $K$ .....	151
7.4	Medición de Descargas Parciales.....	159
7.4.1	Reconocimiento de Patrones.....	160
7.4.2	Análisis de Parámetros.....	162
7.5	Índice $K$ como Indicativo de la Resistencia del Aislamiento a la Degradación....	171
8	EVALUACIÓN DEL AISLAMIENTO POR PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS	174
8.1	Cambios en la Temperatura de Transición Vítre.....	174
8.2	Cambios en los Perfiles de Pérdida de Masa.....	178
8.3	Cambios Estructurales en la Resina .....	182
8.3.1	Método del Estándar Interno.....	184
9	CONCLUSIONES.....	195
10	RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS .....	200
11	REFERENCIAS .....	202
	ANEXO I.....	214
	ANEXO II.....	217

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Evolución en las dimensiones del aislamiento y de los conductores en las ranuras del estator de máquinas rotativas a) Reducción del espesor del aislamiento principal a tierra, b) Incremento del esfuerzo eléctrico aplicado al aislamiento principal.....	7
Figura 2. Tipos de bobinas que forman el devanado del estator: a) Bobinas preformadas, b) Barras tipo Roebel. ....	8
Figura 3. Diferentes estructuras aislantes aplicadas en forma de cintas para a) Barras tipo Roebel, b) Bobinas preformadas .....	9
Figura 4. Fenómeno de separación de cinta o girth cracking a) en las áreas de los ductos de ventilación [8] y b) en el borde del núcleo [9]. ....	11
Figura 5. Desarrollo y principales mejoras en los sistemas de aislamiento de máquinas eléctricas rotativas que llevaron a los sistemas disponibles en la actualidad. ....	18
Figura 6. Grupo funcional epoxi.....	23
Figura 7. Clasificación general de las resinas epóxicas.....	23
Figura 8. Estructura química de las resinas epóxicas de a) bisfenol-A y b) novolacas. ....	24
Figura 9. Diferencia en la dureza de sistemas Resin Rich y VPI medida por el módulo elástico versus temperatura.....	24
Figura 10. Sección transversal esquemática de la mica moscovita mostrando el plano de exfoliación y los planos octaédricos y tetraédricos. ....	30
Figura 11. Mecanismos de degradación del aislamiento principal: a) Inclusiones gaseosas. b) Delaminación o separación de las cintas del aislamiento. c) Arborizaciones eléctricas d) “Electrical tracking” o caminos de carbonización.....	33
Figura 12. Degradación de la superficie de la mica expuesta a descargas parciales resultando en el colapso de su estructura. ....	38
Figura 13. Representación esquemática de las principales reacciones que ocurren durante la degradación térmica en polímeros.....	40
Figura 14. Reacción de auto-oxidación del polietileno que da lugar a escisión de cadena formando micro cavidades.....	42
Figura 15. Componentes de las pérdidas dieléctricas de los sistemas de aislamiento. ....	49
Figura 16. Componentes fundamentales de un sistema de medición: circuito detector, circuito interface y unidad de procesamiento. ....	50
Figura 17. Proceso de transformación de los pulsos de descarga del dominio del tiempo al dominio de la fase obteniendo como resultado un patrón en fase resuelta.....	51
Figura 18. Comportamiento de la corriente de fuga en función del voltaje de prueba.....	56
Figura 19. Característica de corriente-voltaje mostrando la corriente de fuga real y la corriente hipotética que circularía sin la presencia de las descargas parciales.....	58
Figura 20. Ángulo de pérdidas dieléctricas $\delta$ por debajo del voltaje de inyección de descarga donde no ocurren pérdidas por ionización.....	59
Figura 21. Métodos típicos para la medición de capacitancia y factor de disipación: a) Método de impedancia vectorial en el dominio de la frecuencia y b) Método de puente balanceado de Schering. ....	60
Figura 22. Ángulo de pérdidas dieléctricas $\delta$ a alto voltaje incluyendo las pérdidas por ionización. ....	60

Figura 23. Representación esquemática de la polarización en un material dieléctrico. ....	64
Figura 24. Representación esquemática de la respuesta dieléctrica de un material ante la aplicación de un campo eléctrico tipo escalón. ....	67
Figura 25. Representación de dos mecanismos de polarización con sus correspondientes picos en las pérdidas dieléctricas ocurriendo en las frecuencias $\omega_{p1}$ y $\omega_{p2}$ . ....	70
Figura 26. Comportamiento de la respuesta dieléctrica de acuerdo al modelo de decaimiento exponencial (modelo de Debye) y al modelo de ley de potencia fraccionaria (modelo de Curie-Von Schweidler). ....	72
Figura 27. Comportamiento comparativo del volumen específico en función de la temperatura entre a) un polímero termoformado y b) un polímero termoplástico. ....	75
Figura 28. Comportamiento del factor de disipación versus temperatura usado para determinar la $T_g$ de un aislamiento a) parcialmente curado y b) de un aislamiento completamente curado. ....	76
Figura 29. Parámetros viscoelásticos como función de la temperatura usados para determinar la temperatura $T_g$ de un polímero termoformado. ....	77
Figura 30. Medición de DSC para un polímero a) durante un primer calentamiento mostrando un pico endotérmico y b) luego de un ciclo calentamiento/enfriamiento/calentamiento mostrando un cambio escalón endotérmico alrededor de la temperatura de transición vítrea. ....	79
Figura 31. Programa de temperatura controlado calentamiento/enfriamiento recomendado para eliminar la historia térmica de la muestra. ....	81
Figura 32. Efecto de la velocidad de calentamiento en la detección de la temperatura de transición vítrea. ....	82
Figura 33. Representación esquemática de una curva TGA indicando dos procesos de descomposición. ....	86
Figura 34. Definición de la pérdida de masa y de la temperatura inicial y final del proceso en una curva de TGA. ....	86
Figura 35. Mediciones de TGA para los componentes típicos de un sistema de aislamiento. ....	89
Figura 36. Perfiles de pérdida de masa para muestras con diferentes niveles de envejecimiento: a) muestras sin envejecer, b) muestras luego de 23 años en servicio. ....	91
Figura 37. Modos de vibración posibles para un grupo no lineal $\text{CH}_2$ : a) vibración de estiramiento simétrico, b) vibración de estiramiento asimétrico, c) vibración de tijereteo, d) vibración de balanceo, e) vibraciones de torcedura, f) vibración de agitación. ....	93
Figura 38. Representación esquemática de un instrumento de FTIR. ....	94
Figura 39. Representación esquemática de la descomposición de la radiación incidente en reflectancia difusa y especular y su refocalización en un instrumento FTIR-DRIFTS. ....	95
Figura 40. Representación esquemática de la interacción entre la radiación incidente y la muestra y del comportamiento del haz de luz dentro del cristal en un instrumento FTIR-ATR de a) múltiples reflexiones, b) única reflexión. ....	97
Figura 41. Espectro FTIR de una muestra de mica. ....	99
Figura 42. Barras de prueba del primer grupo utilizadas en el laboratorio de Alta Tensión de la Universidad KTH – Suecia. ....	105
Figura 43. Segundo grupo de barras de prueba utilizadas en el laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Universidad del Valle. ....	107
Figura 44. Programa de envejecimiento secuencial multiesfuerzo. ....	109

Figura 45. Método de remoción de las muestras del aislamiento disolviendo la resina en acetona.....	113
Figura 46. Método de remoción directa de las muestras del sistema de aislamiento. ....	114
Figura 47. Grupo motor-generator de 500A/30Vdc. a) Estado inicial, b) Puesta en marcha. ....	115
Figura 48. Sistema de control de la corriente de armadura del grupo motor-generator. ...	116
Figura 49. Implementación del sistema de control del grupo motor-generator. ....	116
Figura 50. Adecuación de las barras estáticas para las pruebas de ciclado térmico.....	117
Figura 51. Implementación del banco para pruebas de ciclado térmico.....	117
Figura 52. Método de placas calefactoras para la aplicación de esfuerzos térmicos. ....	118
Figura 53. Sistemas de control y adquisición de temperaturas para la aplicación de esfuerzos termoeléctricos. ....	118
Figura 54. Banco de pruebas para aplicación de esfuerzos termoeléctricos.....	119
Figura 55. Implementación de un horno para aplicación de esfuerzos termoeléctricos (Universidad KTH-Suecia).....	120
Figura 56. Sistemas de control del Laboratorio de Ensayo de Bobinas: a) Tablero principal de accionamiento y mando, b) Control de potencia independiente para cada barra sometida a esfuerzo térmico. ....	121
Figura 57. Laboratorio de Ensayo de Bobinas.....	122
Figura 58. Diagrama de conexión para las mediciones de $C/\tan\delta$ y descargas parciales ...	123
Figura 59. Equipo de medición de respuesta dieléctrica Megger Idax300.....	123
Figura 60. Equipos de medición de capacitancia y factor de disipación a 60Hz Doble M4100, Omicron TD1 y Megger Delta4000.....	124
Figura 61. Equipo de medición de descargas parciales PowerDiagnostix ICMSsystem. ....	124
Figura 62. Equipo de medición de descargas parciales TechImp PDCheck MKIV.....	125
Figura 63. Ajuste de la curva $C''(\omega)$ por medio de una línea recta (en rojo) de pendiente $m$ . ....	127
Figura 64. Curva ajustada de $\Delta C'(\omega)$ luego de sustraer un valor de a) $C_\infty$ : 1.8nF y b) 1.886nF.....	128
Figura 65. Respuesta dieléctrica de la barra SGa medida a 1kV y 10kV. ....	129
Figura 66. Evolución en el tiempo de los valores de $m$ calculados para diferentes voltajes de prueba para la barra SGa. ....	129
Figura 67. Evolución de la actividad de descargas parciales medida como un incremento en la capacitancia tip-up medida entre 10 y 1kV para la barra SGa. ....	131
Figura 68. Efecto de las descargas parciales sobre parte imaginaria de la respuesta dieléctrica de la barra SGa.....	131
Figura 69. Valores de $m$ calculados a 1, 4, 7 y 10kV para todos los casos de estudio que involucraron mediciones en las barras completas a) antes y b) después del programa de envejecimiento.....	133
Figura 70. Parte imaginaria de la respuesta dieléctrica para la barra SG: a) medición en la barra completa SGa, b) medición con anillos guarda. ....	133
Figura 71. Parte real de la respuesta dieléctrica para la barra SG: a) medición en la barra completa SGa, b) medición con anillos guarda. ....	134
Figura 72. Evolución en el tiempo de los valores de $m$ calculados para diferentes voltajes de prueba para la barra SGM. ....	134

Figura 73. Valores de $m$ evaluados en las configuraciones de medición SGa (toda la barra), SGm (zona de ranura), SGf (cabeza de bobina 1) y SGn (cabeza de bobina 2) previo al programa de envejecimiento.....	135
Figura 74. Evolución de la actividad de descargas parciales medida como un incremento en la parte real de la capacitancia compleja (capacitancia) entre 10 y 1kV para a) la barra completa SGa y b) con electrodos guarda SGm. ....	136
Figura 75. Contribución de las cabezas de bobina a la capacitancia total de la barra SGa.	137
Figura 76. Evolución de la capacitancia compleja con el envejecimiento medido a 1kV..	138
Figura 77. Evolución de la capacitancia compleja con el envejecimiento medido a 4kV..	138
Figura 78. Evolución de la capacitancia compleja con el envejecimiento medido a 7kV..	138
Figura 79. Evolución de la capacitancia compleja con el envejecimiento medido a 10kV. ....	139
Figura 80. Característica de la capacitancia y del factor de disipación con el voltaje de prueba durante el programa de envejecimiento para todas las barras de prueba del primer grupo.....	143
Figura 81. Característica del factor de disipación con el voltaje de prueba reportada en [172]. ....	144
Figura 82. Evolución de la capacitancia medida a 500V y 10kV con el tiempo de envejecimiento.....	145
Figura 83. Evolución del factor de disipación medido a 500V y 10kV con el tiempo de envejecimiento.....	146
Figura 84. Evolución de los valores $\Delta \tan \delta$ y $\Delta C$ con el tiempo de envejecimiento para el primer grupo de barras.....	146
Figura 85. Característica de corriente versus voltaje para los casos de estudio a) LU2 y b) SGa. ....	147
Figura 86. Método de la primera derivada de la característica $I$ versus voltaje de prueba para el cálculo de la curva $I_0$ y determinación del voltaje $U_{i1}$ .....	148
Figura 87. Contribución de las cabezas de bobina a los valores de $\Delta C$ y $\Delta \tan \delta$ .....	149
Figura 88. Características $\Delta C$ versus $\Delta \tan \delta$ obtenidas para las barras de prueba en el programa de envejecimiento termoeléctrico.....	152
Figura 89. Aproximación al voltaje de ruptura de gases en un campo uniforme de acuerdo a la ley de Paschen.....	154
Figura 90. Característica $\Delta C$ versus $\Delta \tan \delta$ para las barras de prueba Bar2 y Bar4. ....	156
Figura 91. Característica $\Delta C$ versus $\Delta \tan \delta$ para las barras de prueba Bar1 y Bar6. ....	156
Figura 92. Característica de la capacitancia y del factor de disipación con el voltaje de prueba para la barra Bar1.....	158
Figura 93. Característica de la capacitancia y del factor de disipación con el voltaje de prueba para la barra Bar6.....	158
Figura 94. Circuito de medición de descargas parciales de acuerdo con IEC60270-2000.	160
Figura 95. Evolución de la carga promedio $q_m(\pm)$ con el tiempo de envejecimiento para las barras de prueba del primer grupo.....	162
Figura 96. Evolución de la carga máxima $q_{\max}(\pm)$ con el tiempo de envejecimiento para las barras de prueba del primer grupo.....	163
Figura 97. Evolución de la repetición $n(\pm)$ con el tiempo de envejecimiento para las barras de prueba del primer grupo.....	163

Figura 98. Evolución del ángulo medio de las descargas parciales con el tiempo de envejecimiento para las barras de estudio LU1, LU2, SU1 y SU2. ....	166
Figura 99. Evolución de la amplitud promedio $q_m(\pm)$ con el tiempo de envejecimiento para las barras de prueba del segundo grupo.....	168
Figura 100. Evolución de la amplitud máxima $q_{max}(\pm)$ con el tiempo de envejecimiento para las barras de prueba del segundo grupo.....	168
Figura 101. Evolución de la repetición $n(\pm)$ con el tiempo de envejecimiento para las barras de prueba del segundo grupo.....	169
Figura 102. Evolución del ángulo medio de las descargas parciales $\phi_{pd}(\pm)$ con el tiempo de envejecimiento para las barras de estudio Bar1, Bar2, Bar4 y Bar6. ....	170
Figura 103. Evolución de la temperatura de transición vítrea para las barras de prueba STa, LU2 y LTa. ....	174
Figura 104. Termogramas antes y después del envejecimiento para la barra STa. ....	175
Figura 105. Termogramas iniciales para las parras Bar1 y Bar4.....	177
Figura 106. Evolución de la pérdida de masa con el tiempo de envejecimiento. ....	179
Figura 107. Perfiles de pérdida de masa para las barras Bar2 y Bar4. ....	180
Figura 108. Definición de las temperaturas $T_i$ , $T_f$ , $T_{avg}$ y $T_{max}$ que marcan el proceso de pérdida de masa en las muestras.....	180
Figura 109. Cambios en las temperaturas $T_i$ , $T_f$ , $T_{avg}$ y $T_{max}$ con el tiempo de envejecimiento. ....	181
Figura 110. Promedio de las temperaturas características del proceso de pérdida de masa para las barras de prueba del segundo grupo.....	182
Figura 111. Espectro infrarrojo FTIR KBr de muestras del aislamiento preparadas en forma de polvo. ....	183
Figura 112. Espectros FTIR iniciales para la barra STa. ....	184
Figura 113. Método del estándar interno aplicado a los espectros iniciales de la barra STa. ....	185
Figura 114. Espectros FTIR para la barra STa. ....	186
Figura 115. Cambio en las bandas de absorción con el tiempo de envejecimiento para la barra STa.....	186
Figura 116. Interfaz gráfica para la identificación de las bandas de absorción. ....	187
Figura 117. Cambio en las bandas de absorción con el tiempo de envejecimiento para la barra LTa. ....	188
Figura 118. Cambio en las bandas de absorción con el tiempo de envejecimiento para la barra LU2.....	188
Figura 119. Entrecruzamiento de la resina epóxica, a) por medio de amina y b) por medio de anhídrido el cual contiene grupos C=O. ....	190
Figura 120. Cambio en las bandas de absorción con el tiempo de envejecimiento para la barra Bar6. ....	192
Figura 121. Cambio en las bandas de absorción con el tiempo de envejecimiento para la barra Bar1. ....	193
Figura 122. Cambio en las bandas de absorción con el tiempo de envejecimiento para la barra Bar2. ....	194
Figura 123. Cambio en las bandas de absorción con el tiempo de envejecimiento para la barra Bar4. ....	194



## AGRADECIMIENTOS

Esta investigación desea agradecer especialmente al

Grupo de Investigación en Conversión de Energía CONVERGIA por el aval dado para el desarrollo de la misma, por las instalaciones, por el espacio de trabajo provisto y a todos sus integrantes.

Al Profesor José Luis Oslinger quien actuó como director de la investigación y quién gestionó la consecución de las barras de prueba y los equipos de medición.

Al profesor Jairo Palacios por su ayuda y valiosísima colaboración en la revisión del documento, por siempre mostrar disposición para contribuir a solucionar problemas surgidos en el transcurso de la investigación y sobre todo por su inagotable buena disposición y optimismo.

A la Empresa de Energía del Pacífico EPSA S.A. E.S.P por la donación de barras de pruebas.

A la Profesora Gladys Caicedo, al Ingeniero Francisco Murcia y al Ingeniero Rubén Jaimes por su valiosa gestión y colaboración en el préstamo del equipo de medición de tangente delta. Al ingeniero Jaimes, muchísimas gracias por su oportuna y amable colaboración, por ajustarse a los tiempos, por los traslados, por la asignación de personal y por todo lo que hizo posible realizar las mediciones.

Al profesor Fabio Zuluaga quien me guio y asesoró en la interpretación de los resultados de espectrometría.

A los ingenieros Andrés Cerón, Diego Fernando Navas y Fabio Muñoz por sus colaboraciones en la revisión del documento.

A la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad del Valle y a la Fundación del Banco de la República por la financiación aportada a esta investigación.

Al Departamento Administrativo de Ciencias, Tecnología e Innovación COLCIENCIAS por proveer recursos para esta investigación y por mi financiación parcial.

Al Profesor Nathaniel Taylor quiero expresarle mi más sincera gratitud por su colaboración y ayuda en la discusión de los resultados, así mismo deseo manifestarle una profunda admiración y respeto.

Y por último pero no menos importante quiero agradecer a todas aquellas personas que de una u otra forma estuvieron alrededor prestando colaboración y apoyo. A Mónica, a Mauricio y Catalina, a David y a Gustavo muchas gracias.

¡Gracias!

## LISTA DE ABREVIACIONES

$q_m^\pm$	Carga aparente promedio para el semiciclo positivo (+) y negativo (-)
$q_{\max}^\pm$	Carga aparente máxima para el semiciclo positivo (+) y negativo (-)
$n^\pm$	Repetición en pulsos por segundo medidos para el semiciclo positivo (+) y negativo (-)
$S_k(\pm)$	Sesgo, asimetría o skewness calculada a una distribución de pulsos de descargas parciales para el semiciclo positivo (+) y negativo (-)
$Ku(\pm)$	Curtosis calculada a una distribución de pulsos de descargas parciales para el semiciclo positivo (+) y negativo (-)
$U_{i1}$	Primer voltaje de incremento rápido de la corriente total de pérdidas
$U_{i2}$	Segundo voltaje de incremento rápido de la corriente total de pérdidas
$\Delta I$	Corriente total de pérdidas tip-up.
$T_{IR_{ref}}$	Transmitancia de una banda de absorción de referencia
$C'_{i_{rel}}$	Relación entre la capacitancia medida a 100Hz para el i-ésimo ciclo de envejecimiento y la capacitancia medida a 100Hz antes del programa de envejecimiento
$C''_{i_{rel}}$	Relación entre la parte imaginaria de la capacitancia compleja medida a 100Hz para el i-ésimo ciclo de envejecimiento y la parte imaginaria de la capacitancia compleja medida a 100Hz antes del programa de envejecimiento
$\phi_{PD}(\pm)$	Ángulo de fase promedio del patrón de fase resuelta calculado por el equipo PDCheck
AC	Corriente alterna
ATR	Reflectancia total atenuada
BDV	Voltaje de ruptura dieléctrica
C	Capacitancia medida a frecuencia industrial a alto voltaje
C=O	Grupo funcional carbonilo
$C_o$	Capacitancia medida a frecuencia industrial a bajo voltaje
CH <sub>2</sub>	Grupos metileno
CH <sub>3</sub>	Grupos metilo
DC	Corriente continua
DGEBF-A	Resina epóxica de diglicidil éter de bisfenol A
DIV	Voltaje de inyección de descarga
DSC	Calorimetría de barrido diferencia
DTA	Análisis térmico diferencial
$f$	Frecuencia de la red eléctrica
$f(t)$	Función de respuesta dieléctrica en el dominio del tiempo
$f(\omega)$	Función de respuesta dieléctrica en el dominio de la frecuencia
FTIR	Espectroscopia infrarroja por Transformada de Fourier
$Hn^\pm(qn)$	Distribución del número de pulsos $n^\pm$ en función de la carga $q_m$
$Hn^\pm(\varphi)$	Distribución de $n^\pm$ respecto al ángulo de fase
$Hq_{\max}^\pm(\varphi)$	Distribución de $q_{\max}^\pm$ respecto al ángulo de fase
$Hq_m^\pm(\varphi)$	Distribución de $q_m^\pm$ respecto al ángulo de fase
$I$	Corriente total de pérdidas
$I_0$	Corriente de pérdidas sin el efecto de las descargas parciales y de la cinta gradiente
$K$	índice que calcula la relación entre los valores de $\Delta \tan \delta$ y $\Delta C$
KBr	Bromuro de potasio
$m$	Parámetro del modelo de potencia fraccionaria en el dominio de la frecuencia utilizado en el estudio de respuesta dieléctrica
$m_1, m_2$	Relación entre las pendientes de las líneas rectas formadas en la curva $I-V$

OH	Grupo funcional hidroxilo
PDHD	Histograma de la magnitud de los pulsos de descargas parciales
PRPD	Patrón en fase resulta de una medición de descargas parciales
Resin Rich	Proceso de fabricación mediante cintas previamente impregnadas con resina
SiC	Carburo de silicio
$\tan\delta, DF$	Factor de disipación a alto voltaje
$\tan\delta_0$	Factor de disipación a bajo voltaje
$T_{avg}$	Promedio de las temperaturas $T_i$ y $T_f$
TEAM	Sigla que hace referencia a los esfuerzos Térmicos, Eléctricos, Ambientales y Mecánicos
$T_f$	Temperatura que indica el final del proceso de pérdida de masa en un termograma de TGA
$T_g$	Temperatura de transición vítrea
TGA	Análisis de termogravimetría
$T_i$	Temperatura que indica el inicio del proceso de pérdida de masa en un termograma de TGA
$T_{IR}$	Transmitancia
$T_{max}$	Temperatura correspondiente al valor máximo de la curva de DTA.
$V_{LL}$	Voltaje de línea-línea
$V_{LN}$	Voltaje línea-neutro
VPI	Proceso de impregnación mediante vacío y presión
$\varphi$	Ángulo de fase respecto a la forma de onda del voltaje de prueba
$\varphi_{_Hn}(\pm)$	Ángulo de fase promedio ponderado por la repetición $n^\pm$ de las descargas parciales
$\varphi_{_Hqn}(\pm)$	Ángulo de fase promedio ponderado por la carga promedio $q_m^\pm$ de las descargas parciales
$\Delta C$	Capacitancia tip-up
$\Delta M$	Porcentaje de pérdida de masa
$\Delta \tan\delta$	Factor de disipación tip-up

# 1 INTRODUCCIÓN

La valoración en la confiabilidad en la operación de las máquinas rotativas de alto voltaje se logra entre otros con técnicas adecuadas de diagnóstico aplicadas a sus sistemas de aislamiento dieléctrico. De hecho, el fenómeno mismo de la degradación o envejecimiento del sistema de aislamiento requiere múltiples y diversas técnicas de evaluación. No existe un método o técnica de evaluación que de manera individual alerte sobre la ocurrencia inminente de una falla y ciertamente ninguna proporciona pistas certeras respecto a la vida útil residual.

A nivel global y a lo largo de los años el problema del diagnóstico de los sistemas de aislamiento se ha abordado desde los centros de investigación de la mano de fabricantes y usuarios. Allí se estudian, proponen y validan criterios de diagnóstico para su aplicación final en campo. La construcción de bases de datos históricos ha constituido una herramienta de gran utilidad para la validación en condiciones reales de dichos criterios. Así, en los países industrializados la investigación y la experiencia han sido fundamentales para lograr el actual estado del arte en la evaluación de sistemas de aislamiento en general de todos los equipos de alto voltaje. Sin embargo, ambos factores no siempre se dan simultáneamente en países en vía de desarrollo.

En el caso Colombia, la investigación en el diagnóstico de sistemas de aislamiento puede considerarse muy limitada. Algunos estudios se han llevado a cabo en las principales universidades del país aunque con divulgación igualmente limitada. Durante el desarrollo de esta investigación se encontró con agrado la publicación en el año 2012 de dos tesis de maestría desarrolladas por la Universidad Nacional de Colombia [1][2] en las que se evaluaron parámetros dieléctricos como indicadores de vida útil residual de sistemas de aislamiento de máquinas rotativas de alto voltaje. Para entonces estos resultados eran prácticamente los únicos divulgados públicamente en Colombia. Aunque la necesidad de estos estudios también se presenta en el Valle del Cauca, no se identificaron estudios previos en la región en estos temas.

Las relaciones del grupo de Investigación en Conversión de Energía Convergia con el sector de generación de energía eléctrica han permitido conocer múltiples casos de falla en generadores de alto voltaje. Estas fallas, que se han presentado principalmente en sistemas de cogeneración, han ocurrido en algunos casos en la misma máquina con cortos periodos de tiempo entre falla y falla, lo cual resulta en un escenario bastante adverso si se tiene en cuenta los tiempos requeridos para regresar la máquina a operación. En un mercado donde las políticas gubernamentales están incentivando la ampliación de la capacidad instalada de cogeneración en más de 70% en los próximos tres años para crecer desde 206MW hoy a 360MW en el año 2017<sup>1</sup> el desarrollo de investigación en diagnóstico de sistemas de aislamiento está más que justificado. A su vez el impulso de la investigación tiene el potencial de desarrollar la industria de la fabricación de barras y bobinas de alto voltaje. Hoy, al no disponer de capacidad para fabricar devanados (13.8kV) localmente, retornar una máquina a servicio luego de que ha sufrido una falla puede tomar extensos periodos de tiempo. Solo por mencionar un ejemplo, éste es el caso del turbogenerador de 20MVA del ingenio más grande del suroccidente colombiano que a la fecha acumula más de un año por fuera de operación luego de presentar una falla a tierra.

---

<sup>1</sup> Fuente: El Sector Azucarero Colombiano, más que azúcar, una fuente de energía renovable para el país, Asocaña, 2014

Como en cualquiera de las ramas de las ciencias, alcanzar un estado óptimo de desarrollo en un área específica exige un camino de conocimiento que se construye paulatinamente. En un horizonte inmediato el alcance de esta investigación es apoyar las prácticas industriales de diagnóstico al mismo tiempo que busca unirse y complementar las actuales contribuciones producidas a través de distintas universidades. En el mediano y largo plazo, la obligatoria articulación entre los distintos sectores; industriales y entes investigadores, permitirá impactar el sector de generación de energía eléctrica por medio de la formación de personal calificado, de la identificación de técnicas y estrategias de diagnóstico y del incremento en la confiabilidad de los equipos de alto voltaje.

Internacionalmente el diagnóstico de máquinas eléctricas es un campo de gran trayectoria, con una amplia variedad de herramientas y técnicas de medición investigadas en todos los niveles. Luego, existen numerosos puntos de partida desde dónde contribuir a la solución del problema. En esta investigación la elección del punto de partida se definió considerando las condiciones y necesidades reales de la industria nacional. Las técnicas más modernas y con más potencial en la actualidad son cualquiera de las técnicas de medición y diagnóstico de descargas parciales. No obstante, solo las compañías nacionales más grandes implementan este tipo de mediciones debido a su alto costo, la poca oferta de compañías en el país con capacidad para realizarlas y ciertamente por la dificultad en su interpretación. Por su parte las mediciones de capacitancia y factor de disipación son de aplicación más común abarcando un mayor porcentaje del mercado. Apoyados en los anteriores aspectos técnicos y de mercado, las mediciones de capacitancia y factor de disipación constituyeron la técnica explorada y aplicada en este trabajo. Como resultado se logró una detallada interpretación de los resultados de las mediciones de capacitancia y factor de disipación y dos nuevos criterios de evaluación. Aun así las mediciones de descargas parciales también fueron incluidas y jugaron un papel fundamental en el análisis de los resultados.

Al interior del grupo Convergencia, en los últimos años las líneas de investigación se han abordado procurando un enfoque interdisciplinar al entender que los problemas globales requieren un enfoque sistémico y trabajo en equipo. Con esta perspectiva, se buscó complementar las contribuciones obtenidas a partir de mediciones dieléctricas con una primera aproximación a la aplicación de técnicas y ensayos fisicoquímicos. La decisión de incluir esta herramienta de diagnóstico estuvo motivada por su extensa aplicabilidad y trayectoria como herramienta de control de calidad de los procesos de fabricación y recientemente por el interés que ha despertado como método alternativo para la evaluación de la degradación. La base conceptual de los ensayos fisicoquímicos se abordó de tal forma que fuera fácil su apropiación para ingenieros electricistas y similares permitiéndoles la interpretación de los resultados.

En el país, este enfoque podría considerarse pionero de acuerdo con la revisión bibliográfica y las informaciones de las empresas del sector energético.

Definido el punto de partida y una componente de innovación se establecieron una serie de objetivos cuya consecución permitieron la apropiación y generación de conocimiento.

## **1.1 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

El objetivo general de esta investigación es:

- Estimar la degradación del aislamiento principal de bobinas/barras del estator de máquinas sincrónicas sometidas a envejecimiento termoeléctrico acelerado en laboratorio por medición de tangente delta, descargas parciales y análisis fisicoquímico.

Los objetivos específicos son:

- Caracterizar la variación de los parámetros dieléctricos medidos en pruebas de tangente delta y descargas parciales como consecuencia de la aplicación de esfuerzos termoeléctricos en pruebas de envejecimiento acelerado
- Seleccionar los parámetros asociados a los cambios en las propiedades fisicoquímicas del material aislante durante el envejecimiento termoeléctrico medidos por análisis fisicoquímico (Termogravimetría TGA y Espectrometría infrarroja FTIR)
- Evaluar posibles correlaciones entre la variación de los parámetros dieléctricos y fisicoquímicos debido a la aplicación de esfuerzos termoeléctricos

## 1.2 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

El desarrollo de la investigación desde sus fundamentos teóricos hasta la discusión de los resultados se presentan en este documento a lo largo de nueve capítulos específicos. La extensión de los mismos fue un estrecho balance entre la intención de estructurar un documento de guía o referencia para los interesados en los sistemas de aislamiento pero al mismo tiempo siendo lo suficientemente breve para no producir un texto innecesariamente denso. Al final se obtuvo un documento si bien extenso estructurado de tal forma que ofrece la posibilidad de avanzar a través de él según los intereses particulares del lector. Aunque necesariamente todos los capítulos están correlacionados es posible todavía saltar entre ellos para llegar a un tema en particular.

Los capítulos 2 al 4 constituyen el marco teórico básico. Su elaboración fue el resultado de un compromiso entre una incontable cantidad de información disponible y la intención de condensar décadas de desarrollo en un breve resumen práctico para el lector, entrando en detalle en aquellos temas relevantes para la investigación. El capítulo 2 es un brevísimo recuento histórico que define el objeto de estudio: métodos de fabricación y tipos de sistema de aislamiento. El capítulo 3 ahonda en cada componente principal desde la perspectiva de los materiales y del papel que juegan en el desempeño del sistema de aislamiento. Básicamente los capítulos 2 y 3 definen el problema de investigación. El capítulo 4 establece el fundamento teórico detrás de las mediciones de capacitancia, factor de disipación, descargas parciales y respuesta dieléctrica. A partir de este marco conceptual se proponen dos parámetros de evaluación del sistema de aislamiento: el primero relaciona el avance de la degradación con la variación de los parámetros del modelo de respuesta dieléctrica mientras que el segundo relaciona el incremento de la capacitancia y el incremento en el factor de disipación ambos como función del voltaje de prueba para proporcionar información sobre la condición del aislamiento.

El capítulo 5 es por sí mismo la primera contribución de esta tesis. En él se recopilan y revisan los cambios en las propiedades fisicoquímicas del aislamiento durante el envejecimiento y se seleccionan parámetros de interés. Igualmente se describen los conceptos teóricos detrás de cada parámetro y detrás de las técnicas de medición que se han aplicado para su estudio. En este capítulo se permitió ser extenso al recopilar los principales resultados que se han obtenido de diversas investigaciones a nivel mundial. Ciertamente este capítulo ofrece un panorama del estado del arte del estudio de la degradación de sistemas de aislamiento de alto voltaje por métodos fisicoquímicos. Vale la pena resaltar que este capítulo aunque abordó el problema del envejecimiento del aislamiento desde el punto de vista químico

su enfoque y escritura no estuvo dirigida hacia ingenieros especialistas en el área de la química. El lector, sin ninguna experiencia en este campo, encontrará una descripción sencilla de todos aquellos fenómenos fisicoquímicos que por mucho son complejos permitiéndole introducirse en esta línea. Se incluyen así mismo resultados experimentales reportados en la literatura que servirán de fundamento para la interpretación de los parámetros y detalles para la ejecución práctica de los ensayos. Aunque inicialmente solo estuvo contemplado en los objetivos explorar las técnicas de FTIR y TGA, por su importancia y aplicación también se incluyó el uso de las mediciones de calorimetría diferencial de barrido (DSC) en la evaluación de los sistemas de aislamiento. Esto exigió ampliar el método experimental para incluir mediciones de DSC.

El capítulo 6 presenta el desarrollo experimental incluyendo la descripción de las barras de prueba, de los programas de envejecimiento, de los equipos de medición y de las instalaciones de laboratorio disponibles.

Los capítulos 7 y 8 muestran los resultados de las mediciones dieléctricas y fisicoquímicas respectivamente y discute las ventajas y limitaciones de los criterios de evaluación propuestos. Finalmente en el capítulo 9 se resumen las principales conclusiones de los resultados por mediciones dieléctricas y fisicoquímicas así como también se discute la posible correlación entre ambas técnicas.

### **1.3 CONTRIBUCIÓN PRINCIPAL**

La definición del índice de evaluación  $K$  es directamente la primera contribución de esta tesis. No solo por su capacidad de suministrar información respecto al nivel de degradación del aislamiento sino también porque exploró las mediciones de capacitancia y del factor de disipación más allá de la práctica habitual de comprobar si sus valores individuales han superado o no los conocidos criterios de diagnóstico. Desde otra perspectiva, parámetros que usualmente han sido tratados independientemente ahora son correlacionados brindando esto información complementaria.

Los resultados de las mediciones de respuesta dieléctrica también se suman a los aportes principales. En el país esta técnica de evaluación ha sido aplicada principalmente a transformadores de potencia, por lo que los resultados aquí presentados representan la introducción de la técnica para su aplicación en la evaluación de sistemas de aislamiento de máquinas rotativas de alto voltaje.

La revisión del problema de la degradación del aislamiento desde el punto de vista de los cambios fisicoquímicos es un resultado importante porque contribuye a la apropiación del conocimiento y marca un inicio para abordar el problema de investigación multidisciplinariamente al identificar cambios en los parámetros fisicoquímicos causados por el envejecimiento de los aislamientos.

La infraestructura construida en el laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Universidad del Valle constituyó uno de los logros más destacables por su aporte a la región y a la Universidad para este tipo de estudios e investigación. De hecho la implementación del banco de pruebas fue la etapa más extensa y compleja tanto por el tiempo empleado para la consecución de los recursos financieros como porque demandó una gran cantidad de trabajo de laboratorio. El banco de pruebas resultante se une a los pocos de su tipo en el país y con certeza es el primero disponible en la región del suroccidente colombiano de tipo académico. Su uso es un punto de partida y un medio para la investigación. En el contexto nacional, la implementación de este banco de pruebas resultó oportuno y de gran valor. Previo a la

finalización de esta tesis ya estaban en curso dos investigaciones relacionadas que utilizarán las instalaciones ahora disponibles. En un horizonte de tiempo conservador se busca la certificación de los procesos que permita extender el alcance del banco de pruebas hasta la prestación de servicios a la industria.

#### **1.4 ALCANCE Y LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN**

El objeto de estudio será limitado exclusivamente al aislamiento principal o aislamiento a tierra de bobinas de máquinas eléctricas rotativas compuestas de una matriz de vidrio/mica/resina. Otras estructuras como el aislamiento entre espiras o entre subconductores no fueron directamente evaluadas. Las mediciones dieléctricas emplearon voltajes sinusoidales de amplitud y frecuencia controlada. Mediciones haciendo uso de voltajes DC o impulso no fueron tenidos en cuenta. Los parámetros y resultados de mediciones se utilizaron con fines de diagnóstico: intentar relacionar los resultados de las mediciones dieléctricas y fisicoquímicas con el estado probable del aislamiento que ocasionó dichos resultados. La estimación de la condición del aislamiento se hizo principalmente en términos relativos, es decir comparando el estado entre las barras de prueba disponibles. Se utilizaron barras de prueba únicamente en sus dimensiones reales con el propósito de reducir al máximo la influencia de la remoción de las muestras en los parámetros dieléctricos.

El número de barras de prueba disponibles representa la principal limitación para la generalización de los criterios de evaluación aquí presentados. En condiciones óptimas es deseable realizar un gran número de mediciones en una gran cantidad de barras de prueba. Existen estudios en los que se han utilizado decenas de barras o bobinas e incluso devanados completos en los métodos experimentales, los cuales sin duda alguna estuvieron estrechamente articulados con fabricantes o usuarios finales de máquinas rotativas. Esta relación fabricantes-investigación no siempre es posible ya sea por cuestiones económicas o de otra índole. En estos casos, la investigación dispone de dos alternativas: construir las barras de prueba usualmente de dimensiones reducidas si se dispone del conocimiento e infraestructura para hacerlo o trabajar con un pequeño número de barras de construcción original, nuevas o usadas. Esta última alternativa fue la implementada en esta tesis. Incluso con el pequeño número de barras de prueba los resultados obtenidos fueron lo suficientemente consistentes como para continuar la investigación en esta dirección buscando la validación de los criterios para su aplicación en campo.

El tiempo para la ejecución de la investigación fue otra limitante. Como se mencionó la implementación del laboratorio y su banco de pruebas en los rangos requeridos demandó una gran cantidad de tiempo y esfuerzo, acortando el tiempo disponible para la ejecución de los programas de envejecimiento e incluso para la publicación misma de resultados. Sin embargo, terminada esta fase de implementación inicial, el potencial para continuar la investigación y para la divulgación exhaustiva de resultados es altamente atractivo.

Los recursos financieros fueron limitados, impactando entre otros el tiempo de implementación y construcción de las instalaciones. Sin embargo los resultados y las instalaciones físicas y equipos producto de esta tesis son satisfactorios tanto para mí como para el grupo Convergencia.



## 1.5 PUBLICACIONES

En el transcurso de esta investigación se logró la publicación de dos artículos.

J. L. Oslinger and L. C. Castro, “Metodología para el cálculo de armónicos de fuerza magnetomotriz y su relación con las componentes de secuencia de la FEM de ranura,” *Ingeniería y Universidad*, vol. 17, no. 2, pp. 1–6, 2013.

J. L. Oslinger and L. C. Castro, “Correlation between capacitance and dissipation factor used for assessment of stator insulation,” *Waset*, vol. 63, no. 72, pp. 365–71, 2012.

El primer artículo no fue resultado directo de esta investigación pero sí de la etapa de formación inicial en relación a los devanados del estator de máquinas eléctricas rotativas. La segunda publicación por su parte si es directamente relacionada con esta investigación. En este artículo se presentaron las primeras consideraciones y fundamentos respecto al índice  $K$  utilizado como herramienta de diagnóstico. A la fecha se está trabajando en otros artículos los cuales se espera publicar muy pronto.

## 2 SISTEMAS DE AISLAMIENTO COMPUESTO

### 2.1 SISTEMAS DE AISLAMIENTO DE DEVANADOS ESTATÓRICOS

A lo largo del siglo pasado, los sistemas de aislamiento para los devanados del estator de máquinas rotativas de alto voltaje han evolucionado de simples estructuras para separar las barras o bobinas del núcleo de estator, hechas a partir de materiales naturales de uso común en la industria eléctrica hasta los sistemas de alta tecnología con propiedades dieléctricas avanzadas existentes hoy en día. Dos factores principales motivaron el desarrollo de nuevos y mejores materiales aislantes: En primer lugar, los materiales aislantes naturales mostraron deficientes propiedades térmicas y de resistencia a la tensión, y de ahí que su vida útil fuera muy reducida, y en segundo lugar, las restricciones en la economía global. Las guerras mundiales presionaron un rápido incremento de la potencia de salida de las máquinas rotativas para satisfacer el fuerte crecimiento en la demanda energética. Actualmente, estas restricciones en la economía global implican asegurar la confiabilidad en el servicio y la extensión de la vida útil de las máquinas rotativas. El mayor impacto de estos factores en el diseño de las máquinas ha sido el incremento del esfuerzo eléctrico (kV/mm) que el aislamiento principal a la tierra tiene que soportar. Como se puede apreciar en la Figura 1, el esfuerzo eléctrico de las máquinas rotativas actuales está en el rango de 3 kV/mm [3], tres veces mayor que el de las máquinas rotativas construidas hace 100 años y por supuesto su tamaño también es menor. Por el otro lado, la vida útil de las máquinas rotativas modernas ha experimentado una disminución importante en contraste con máquinas antiguas, que en condiciones favorables fácilmente podían alcanzar cincuenta años de servicio.

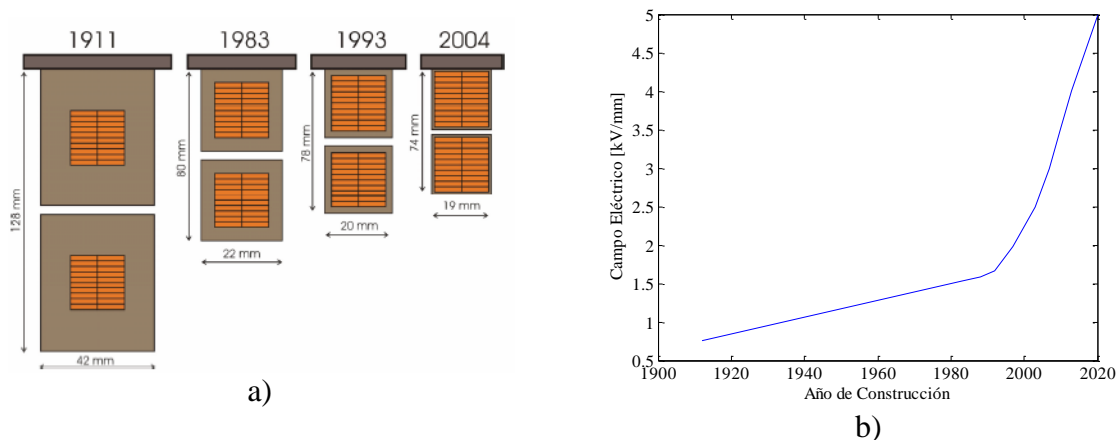


Figura 1. Evolución en las dimensiones del aislamiento y de los conductores en las ranuras del estator de máquinas rotativas a) Reducción del espesor del aislamiento principal a tierra, b) Incremento del esfuerzo eléctrico aplicado al aislamiento principal.

El acoplamiento entre el campo magnético creado en el rotor y el campo magnético creado en el estator permite la conversión de energía mecánica a eléctrica o viceversa que se da en una máquina eléctrica rotativa según su régimen de funcionamiento. Estos campos magnéticos son creados por las corrientes eléctricas que fluyen a través de bucles de alambre de cobre en forma de bobina. Un devanado está formado por varias bobinas conectadas y distribuidas según se requiera. Las bobinas insertadas en el estator aterrizado tienen que ser dieléctricamente aisladas la una de la otra y del estator, de lo contrario, se produciría un corto circuito y las corrientes no fluirían en las trayectorias establecidas para producir los campos

magnéticos. Dos partes principales se pueden distinguir claramente en una bobina: las secciones de ranura que corresponde a la parte de la bobina insertada en el estator y las cabezas de bobina que conectan las secciones de ranura entre sí y cuyas formas pueden variar según el tipo de máquina. En máquinas de pequeño y mediano tamaño, las bobinas se moldean y se aíslan antes de insertarlas en el estator. A este tipo de bobina se les conoce como bobinas preformadas como se muestra en la Figura 2a. Para grandes potencias de salida, el tamaño de la máquina crece significativamente de tal forma que las bobinas ya no pueden ser manipuladas con facilidad sin riesgo de daño. Entonces las grandes bobinas se fabrican en mitades o barras, también llamadas barras tipo Roebel como se puede ver en la Figura 2b. Una vez que cada mitad o barra es insertada en el estator, se conectan para formar una bobina. Usualmente las bobinas preformadas se componen por varias espiras mientras las barras tipo Roebel son bobinas de una sola espira.

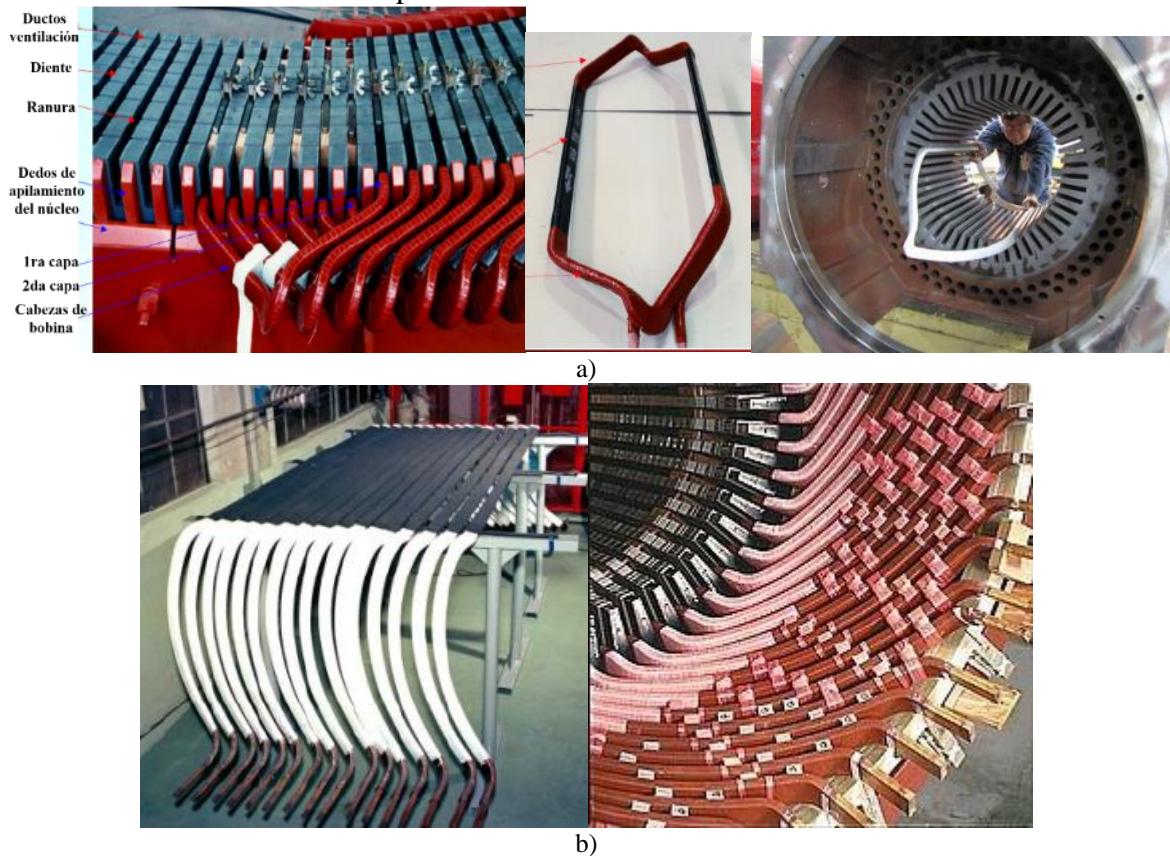


Figura 2. Tipos de bobinas que forman el devanado del estator: a) Bobinas preformadas, b) Barras tipo Roebel.

En las bobinas del estator pueden encontrarse varias estructuras aislantes que tienen un diseño específico de acuerdo con el esfuerzo eléctrico que deben soportar. Tanto si se trata de una bobina preformada o una barra tipo Roebel, el cobre siempre se divide en subconductores que se aíslan entre sí con el fin de reducir el efecto piel y corrientes circulantes. Adicionalmente en las bobinas preformadas cada espira está aislada la una de la otra. La estructura aislante más exterior es el aislamiento principal o el aislamiento a tierra, el cual está diseñado para soportar el voltaje nominal de línea a tierra.

Como puede apreciarse en la Figura 3, hoy en día las estructuras aislantes tanto para bobinas o barras son aplicadas sobre los conductores en forma de cintas. Cuanto mayor es el voltaje nominal, mayor será el espesor requerido para el aislamiento principal y por lo tanto un

mayor número de vueltas de cinta serán necesarias. Las cintas para el aislamiento entre subconductores y entre espiras pueden diferir algo en cuanto a los materiales se refiere. Sin embargo, típicamente el aislamiento principal consiste de cintas de mica cuya composición por peso cuando está completamente curado es de 65% mica, 25% resina y 10% material de soporte mecánico [4].

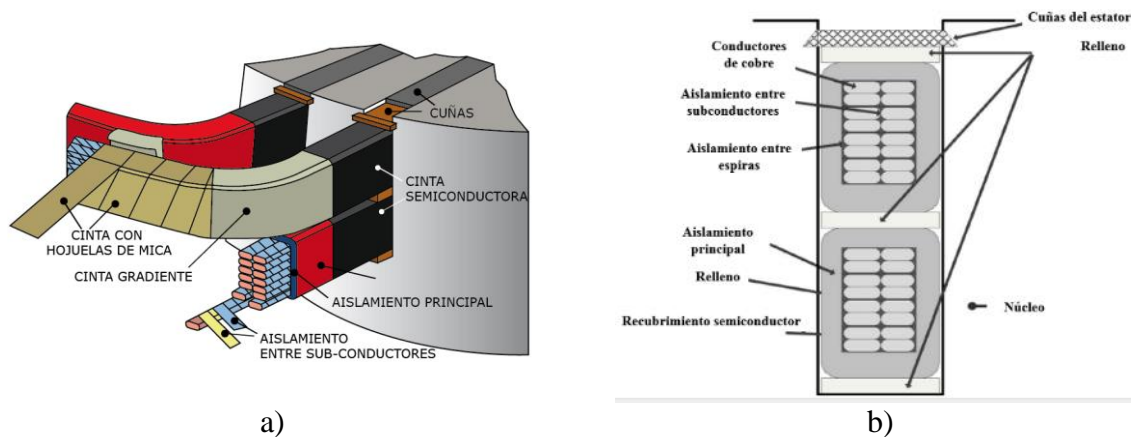


Figura 3. Diferentes estructuras aislantes aplicadas en forma de cintas para a) Barras tipo Roebel, b) Bobinas preformadas

Respecto a la evolución histórica de los sistemas de aislamiento del estator, muchos cambios han tenido lugar a través de los años. Alrededor de 1900 las bobinas de los devanados del estator eran aisladas con materiales naturales de uso común en la industria. La principal barrera dieléctrica del aislamiento ha sido desde siempre la mica. Su poca resistencia mecánica hizo necesario la utilización de soportes o refuerzos. Inicialmente estos soportes eran construidos de fibras naturales de celulosa, seda, lino, algodón o la lana, utilizadas de forma individual en el aislamiento entre subconductores y en grupos para hacer telas tejidas y no tejidas que hacían parte del aislamiento principal. Las resinas usadas como aglutinantes o adhesivo de todos los componentes del sistema de aislamiento abarcaron brea, goma laca, aceite de linaza, ceras, aceites de petróleo, y asfalto, entre otros. Rápidamente sus escasas propiedades dieléctricas saltaron a la vista, por lo cual se intentaron mejorar mediante la adición de materiales de relleno como arena, mica, asbesto y cuarzo [5].

Aunque las propiedades dieléctricas de la mica eran bien conocidas, su uso era limitado debido a la dificultad de producción y manipulación. La tela de algodón barnizada o “varnished cambric” fue uno de los primeros sistemas de aislamiento hechos con los materiales naturales antes mencionados aplicados a la estructura de la bobina completa. Este sistema se hizo de un grado fino de tela de algodón impregnado con una resina natural a partir de aceites que se endurecían tras su exposición al aire, también llamados aceites secantes. Los mismos sufren reacciones de oxidación en presencia de oxígeno que produce entrecruzamiento molecular, convirtiéndolos en un material duro y resistente. La principal limitación de este primer sistema sin-mica fue su resistencia térmica limitada y su pobre resistencia a las descargas tipo corona. La solución parcial a estas limitaciones provino de Europa donde se desarrolló el sistema “micafolium” el cual consistía en grandes hojas de papel Kraft con hojuelas de mica o finos trozos de mica moscovita transparente sobre él, impregnadas con goma laca o resina de copal. Las hojas de micafolium se enrollaban en la sección recta de las bobinas por medio de una máquina, mientras que las cabezas de bobina eran aisladas

manualmente con tela de algodón barniza. Este proceso de fabricación semiautomático fue conocido como proceso Haefely y fue introducido en América del Norte en 1911 por la compañía Westinghouse. La vida térmica de este mejorado sistema todavía era pobre debido a la naturaleza orgánica del tejido de algodón barnizado aplicado a las cabezas de bobina. Además, el traslape entre el tejido de algodón y las hojas de mica se deterioraba cuando la máquina era sometida a ciclos térmicos. Entre el comienzo de la Primera Guerra Mundial y la década de 1920, un nuevo desarrollo tecnológico tuvo lugar dando origen a un sistema de aislamiento de trozos de mica impregnada con resina asfáltica. En este sistema, incluso las cabezas de bobina eran recubiertas con cintas de mica a diferencia de su predecesor. El material de soporte para la mica era papel de celulosa en ambos lados que proporcionaba mayor resistencia mecánica. Los procesos de fabricación tuvieron que adaptarse y mejorarse a medida que la complejidad de los sistemas de aislamiento creció. En su tiempo, uno de los grandes avances en la industria de los sistemas de aislamiento fue la impregnación del papel con asfalto a través de un proceso de vacío y presión conocido como "proceso VPI" por sus siglas en inglés; Vacuum Pressure Impregnation [6]. En este proceso que ha estado vigente hasta la actualidad, un grupo de bobinas aisladas con cintas de mica con un bajo contenido de resina eran insertadas en un molde de las ranuras del estator que a su vez estaba dentro de un tanque. Después el tanque era sellado y se aplicaba vacío para extraer el aire y la humedad de las bobinas. Luego el tanque era inundado con asfalto caliente bajo presión por un período de tiempo específico. Una vez que la resina impregnó todas las capas de cinta de mica, el asfalto residual era devuelto a un depósito de almacenamiento. Cualquier exceso de asfalto era drenado y el grupo de bobinas transferido a un horno para el curado final. Una práctica común entre los fabricantes era la de modificar la resina asfáltica con aceites secantes. De este modo los aislamientos mica-asfalto se volvieron más flexibles, su vida térmica aumentó y dado que la resina asfáltica no contenía solventes la impregnación de las cintas de mica mediante VPI resultaba en menores pérdidas dieléctricas y delaminación. Esto era debido a que la resina se endurecía por reacciones de oxidación y entrecruzamiento promovidas por los aceites secantes y no debido a la evaporación de solventes como ocurría con las resinas naturales. Sin embargo, la unión o traslape entre el aislamiento de la parte recta y el de las cabezas de bobina todavía persistía principalmente en máquinas con estatores de gran longitud. En 1930 un sistema de aislamiento de cinta de mica continua (parte recta y cabezas de bobina) fue adoptado por la mayoría de los fabricantes manteniendo el uso de las resinas asfálticas modificadas como resinas de impregnación. Para entonces la principal preocupación sobre el uso de resinas asfálticas fue que ellas realmente curaban en un débil estado termoestable. Para 1940, los valores nominales de placa de las máquinas rotativas habían crecido hasta el punto de que los núcleos del estator alcanzaron o superaron 2.5 m de largo y tal crecimiento en la longitud del núcleo provocó un nuevo problema asociado con resina asfáltica. El núcleo del estator, el aislamiento a tierra y los conductores de cobre tienen diferentes coeficientes de expansión/contracción por lo que el aislamiento firmemente unido al cobre se somete a altas tensiones de cizallamiento con cada arranque/parada y en general con los cambios térmicos acarreados por los cambios en la carga de la máquina. En máquinas con largos estatores cuando la resina asfáltica se ablandaba con el incremento de la temperatura debido a su naturaleza termoplástica, comenzaba a fluir hacia afuera de las cintas. El exceso de resina se drenaba a través de los ductos de ventilación y en el extremo del núcleo del estator. Como resultado, las cintas de mica al perder el material aglutinante comenzaron a separarse circunferencialmente. Este nuevo problema con los aislamientos asfálticos mostrado en la Figura 4 fue conocido como separación de cinta o "girth cracking" [7].

A pesar de los problemas con los aislamientos asfálticos, estos se utilizaron ampliamente hasta principios de los años 1960 para máquinas de alto voltaje de pequeño y mediano tamaño con algunas importantes modificaciones como la sustitución del papel de soporte por tejidos de fibra de vidrio o de Dacrón (como fue comercializado por la compañía DuPont) y como el aumento de la temperatura de reblandecimiento del asfalto. Las fibras de vidrio permitieron aplicar las cintas del aislamiento con más fuerza a las bobinas lo que resultó en un aislamiento menos propenso al envejecimiento térmico, eléctrico y mecánico.

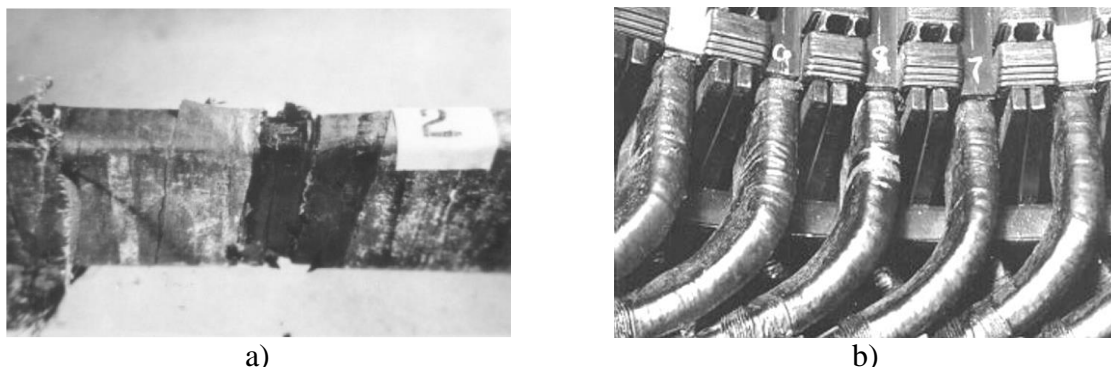


Figura 4. Fenómeno de separación de cinta o girth cracking a) en las áreas de los ductos de ventilación [8] y b) en el borde del núcleo [9].

Mucho antes de este tiempo, la necesidad de una resina con una mayor estabilidad térmica y mecánica y de mejores procesos de fabricación dio lugar a la sustitución de las resinas naturales por resinas sintéticas. A mediados de 1950, las resinas de poliéster eran de uso común por parte de fabricantes de máquinas eléctricas y rápidamente las formulaciones de resina de poliéster sin solventes reemplazaron las resinas asfálticas. La baja viscosidad del poliéster lo hizo adecuado para el proceso de VPI originalmente desarrollado para resinas asfálticas. Algunos años más tarde, las resinas epóxicas entraron en escena. Al principio, las resinas epóxicas tenían una alta viscosidad que no era adecuada para los procesos de impregnación, lo cual fue cambiando paulatinamente con el tiempo hasta hoy donde este tipo de resinas son ampliamente utilizadas en sistemas de aislamiento para todo tipo de máquinas [10][5].

En 1949, la compañía Westinghouse Electric Corp. desarrolló el primer sistema de aislamiento "moderno" [10][11] comercializado con el nombre de Thermalastic para turbogeneradores. En la década de 1950 este sistema estuvo disponible para motores grandes. Este sistema de aislamiento continuo consistía en cintas de mica impregnadas mediante el proceso VPI con resina poliéster termoformada. Estas cintas de mica consistían en finos trozos de mica moscovita de buena calidad entre dos capas de un material de soporte delgado y fibroso como el papel, con hojuelas de mica unidas al material de soporte con una resina compatible. Para ese entonces, las resinas sintéticas evolucionaron para resolver el problema de la separación de las cintas y la naturaleza termoplástica de resinas asfálticas. Resinas sintéticas con solventes del tipo termoestable fueron probadas en la fabricación de sistemas de aislamiento pero pronto se descubrió que estas resinas eran inadecuadas porque tenían un alto contenido de solventes no reactivos que debían ser eliminados después de la impregnación llevando así a la formación de inclusiones gaseosas dentro del aislamiento. Durante el proceso de desarrollo del sistema Thermalastic se tuvieron en cuenta diferentes resinas sintéticas sin disolvente pero fueron desechadas pues no cumplían con las propiedades eléctricas y



mecánicas deseadas. Finalmente, se desarrolló una resina del tipo poliéster lineal sin solventes copolimerizada con una resina monomérica reactiva a alta temperatura. La reacción de copolimerización era llevada a cabo sin ningún subproducto gaseoso o líquido permitiendo la impregnación de casi todos los intersticios en el interior de las cintas del aislamiento. Una vez que el aislamiento estaba consolidado, a las bobinas se les aplicaba el tratamiento conductivo habitual tanto en la sección de ranura como en las cabezas de bobina. En 1956, después de 5 años de servicio de este sistema y mientras la atención de los fabricantes estaba dirigida hacia el desempeño de los nuevos sistemas de aislamiento sintéticos, se publicó un informe en el que se afirmó que el sistema Thermalastic estuvo completamente libre de evidencias del problema de separación de cintas, tanto por observación visual como por pruebas dieléctricas realizadas después de pruebas de ciclado térmico[12]. A lo largo de los años subsecuentes tuvieron lugar algunos cambios, por ejemplo, el material de soporte de papel fue reemplazado por tejidos de vidrio, la formulación de la resina se modificó para mejorar su estabilidad de almacenamiento y otras propiedades al igual que se aplicó un tratamiento mejorado para la supresión de descargas parciales en la superficie de las bobinas. A pesar de que inicialmente el sistema Thermalastic empleó resinas poliéstericas, años después la Westinghouse presentó el sistema Epoxy Thermalastic para ser utilizado en grandes motores mediante proceso VPI. Las modificaciones y perfeccionamientos continuaron y en 1972 entró en servicio un turbogenerador con sistema de aislamiento híbrido que contenía resina epóxica modificada con resina del tipo poliéster.

Paralelamente a los desarrollos producidos por la Westinghouse, en 1954 la General Electric Co lanzó al mercado el sistema Micapal I, pocos años después del lanzamiento del sistema Thermalastic. El objetivo de General Electric con el sistema Micapal era aumentar el desempeño de las barreras dieléctricas, de la resina de impregnación y de los materiales de soporte para desarrollar un aislamiento que cumpliera plenamente los requisitos de confiabilidad y continuidad del servicio. Aunque la mica aplicada en forma de cintas continuó siendo una excelente barrera dieléctrica debido a su alta rigidez dieléctrica, excelente estabilidad química y térmica y a su resistencia a las descargas corona los ingenieros se dieron cuenta de que el proceso de producción de las cintas de mica era aún susceptible a mejoras. Las hojuelas de mica hasta entonces utilizadas sobre papel de celulosa como su material de soporte eran relativamente grandes y lo suficientemente rígidas para formar cavidades de aire en el aislamiento. Posteriormente estas inclusiones se rellenaban con resina durante el proceso de impregnación obteniéndose un aislamiento bien consolidado pero aun con cavidades de aire en su interior. Por lo tanto, se pensó que las propiedades dieléctricas, uniformidad de espesor y la conductividad térmica del aislamiento serían aún mejores si el número y tamaño de dichas cavidades se redujera. Para 1940, las hojuelas de mica más pequeñas disponibles eran de una pulgada cuadrada de superficie y de un milímetro de espesor. Después de la Segunda Guerra Mundial, estuvo disponible en el mercado una nueva hoja 100% de mica o papel de mica, flexible y autoportante conocida como Mica Mat, compuesto por diminutas hojuelas de mica de aproximadamente un mil cuadrado de superficie y entre 10 y 50 micrones de espesor que debido a fuerzas electrostáticas conformaban una hoja extremadamente delgada. Este avance, además redujo la dependencia de las hojuelas de mica provenientes de la India, hasta entonces principal fuente de mica y que se vio afectada por acontecimientos políticos mundiales. Para 1951, cintas de Mica Mat estuvieron disponibles en todos los anchos y de 1 a 5 milésimas de pulgada de espesor para la fabricación de aislamientos de bobinas. De acuerdo con [13] la calidad de los sistemas de aislamiento era mejorada hasta cierto límite al combinar cintas de hojuelas de mica con cintas del tipo Mica Mat. En lo que se refiere a la resina, cientos de

mezclas de resina fueron estudiadas por General Electric incluyendo compuestos fenólicos resistentes al arco eléctrico, poliésteres, copolímeros de acrilato y metacrilato, resinas de cumarona, polímeros de hidrocarburos, resinas de silicona, resinas epóxicas, y otras. El producto de reacción entre una resina epóxica y una resina alquídica fue finalmente seleccionada como la resina de impregnación más adecuada. El soporte mecánico de papel de celulosa también fue reemplazado por un tejido de vidrio de trama abierta de un milímetro de pulgada de espesor con lo cual se consiguió eliminar la formación de gases y el debilitamiento de la adhesión entre capas de cinta ocasionados por la degradación térmica del papel de celulosa. Por último, el proceso de impregnación y consolidación del aislamiento también se sometió a un importante cambio. La nueva fórmula epóxica debido a su alta viscosidad no era adecuada para la impregnación mediante VPI debido a su mayor viscosidad. Luego de darles forma de bobina, el apilamiento de conductores era aislados con cintas de mica cargadas previamente con resina epóxica en estado B: sin curar o parcialmente curadas. Después de insertar las bobinas en moldes de las ranuras del estator se sometían a un ciclo de prensado en caliente. El calor iniciaba las reacciones de curado mientras que la presión hidráulica era transferida a los moldes y a su vez a las capas de aislamiento por debajo de ellos, comprimiéndolas y moldeándolas hasta lograr un sistema de aislamiento para alto voltaje, denso y relativamente libre inclusiones gaseosas. En referencia a que las cintas de mica tenían exceso de resina antes de ser enrolladas en el apilamiento de conductores, este método fue llamado Resin Rich. En comparación, las cintas para procesos VPI tienen un bajo contenido de resina cuando son aplicadas a los conductores, siendo necesario un ciclo de impregnación. Las cintas para Resin Rich tienen un contenido de resina de 35-45% en peso, mientras que en las cintas de VPI el contenido de resina es de 5-15% [4]. Desde 1954 hasta 1975, un total de 750 turbogeneradores con sistemas Micapal fueron puestos en servicio sin interrupciones debido a fallas en el aislamiento. En 1963 General Electric comenzó a desarrollar una segunda generación de sistemas de aislamiento termoestables motivado principalmente por los siguientes factores[14]:

- Para entonces las resinas epóxicas llevaban más de 20 años en el mercado, por tanto el desarrollo de una resina epoxi aún mejor no era motivo de gran preocupación.
- Las fuentes naturales de hojuelas de mica de alta calidad comenzaron a agotarse.
- Los requerimientos para el procesamiento de las primeras resinas epóxicas tendieron a aumentar.
- Los ciclos de trabajo de las máquinas aumentó rápidamente con el aumento de las potencias de salida, exigiendo a los ingenieros aislamientos con mayores capacidades.
- Las resinas epóxicas sin solventes estuvieron cada vez más disponibles convirtiéndose en candidatas óptimas para la sustitución de las resinas del tipo solvente.

En 1966 apareció una primera aproximación a un sistema de aislamiento para hidrogeneradores exclusivamente de resina epóxica y papel de mica con el nombre comercial Epoxy Micamat. Para turbogeneradores a gas y vapor este sistema se conoció como Micapal F haciendo alusión a su destacable resistencia a la temperatura que los clasificaba como aislamiento clase F-H. Las resinas para ambos sistemas consistieron de mezclas de novolacas epóxicas y resinas epóxicas del tipo diglicedil éter de bisfenol A (DGEBF-A) curadas por medio de resinas fenólicas especiales y con 7-10% de solventes para asistir la impregnación



durante la fabricación de cintas Resin Rich que contenían tela de vidrio y papel de mica soportado por poliéster PET.

En 1975, el sistema Micapal II fue introducido en el mercado. Esta segunda generación del sistema de aislamiento anterior mejoró la resistencia mecánica en un 15%, la resistencia a la aplicación de voltaje en un 12%, eliminó el uso de hojuelas de mica, ahora sólo usando papel de mica, tenía una excelente estabilidad térmica y dimensional y capacidad para soportar la exposición al hidrógeno, aire, aceite o agua en una amplia gama de temperaturas. Los anteriores aislamientos de papel de mica utilizaron fórmulas de resina epóxicas con solventes. Estos solventes eran eliminados más tarde durante horneado al vacío con el problema de formación de cavidades que este proceso implica. La nueva generación de sistemas de aislamiento era del tipo sin solventes con lo cual se lograba la uniformidad dimensional de las bobinas y se simplificaban los controles requeridos en el proceso. Adicionalmente, el sistema Micapal II tenía una excelente capacidad de ciclado térmico, y era especialmente adecuado para ciclos de trabajo con arranques/paradas frecuentes [4]. El sistema Epoxy Micamat para hidrogeneradores pasó por un proceso de mejora en el que se añadieron óxidos metálicos al aislamiento principal lo que permitió reducir su espesor. En 1997 el sistema de aislamiento resultante fue colocado por General Electric en el mercado con el nombre de Hidromat.

Para comienzos de los años 1900, las barreras de mica se consideraron suficientes para evitar daños por descargas parciales en el aislamiento. En las primeras máquinas rotativas cuando la tensión nominal alcanzó 3-4kV empezaron a ocurrir descargas de ranura. Producto de la actividad de descargas parciales, el aislamiento principal se erosiona y desgasta conduciendo eventualmente a un fallo de aislamiento. Tras advertir la necesidad de una protección mejorada, los primeros sistemas de aislamiento con resinas naturales se terminaron con una capa de tela de asbesto recubierta con grafito con el propósito de prevenir descargas de ranura. La elasticidad de este tejido junto con la tendencia de los aislamientos de resinas naturales a expandirse en servicio era generalmente efectiva para la supresión de la actividad de descargas de ranura [15]. El sistema de prevención de corona y de descargas de ranuras sufrió varios cambios en los últimos años a la par con la evolución de los sistemas de aislamiento. Para máquinas de alto voltaje es esencial que la superficie del aislamiento de la sección de ranura esté en contacto íntimo con el núcleo del estator para evitar descargas parciales entre estas dos superficies o descargas de ranura. Como método de mitigación, la sección de ranura de las bobinas y algunas pulgadas más allá del borde del núcleo están cubiertas con una capa cuya resistividad es lo suficientemente baja para garantizar que el gradiente de campo eléctrico no excederá la rigidez dieléctrica de cualquier espacio de aire entre la bobina y el núcleo del estator, pero lo suficientemente alta para reducir las corrientes circulantes a través del bucle formado por la capa conductora y las láminas de acero del núcleo del estator. Este compromiso entre una alta y baja conductividad ha llevado a llamar a esta capa como capa semiconductor.

Al igual que el aislamiento mismo, las capas de supresión de descarga son propensas a la degradación especialmente cuando las bobinas no son ajustadas firmemente dentro de las ranuras. El movimiento relativo entre las bobinas y el núcleo erosiona las capas semiconductoras y el aislamiento principal produciendo descargas de ranura hasta que finalmente el aislamiento falla. Otros métodos para la supresión de descargas de ranura consistieron en la aplicación de pinturas metálicas y de papel de aluminio con una cubierta exterior de cinta de algodón sobre la superficie de las bobinas. Las pinturas metálicas usualmente tenían una resistencia muy alta para ser eficientes mientras que papel de aluminio era de difícil aplicación [16]. Otro intento temprano de recubrimiento para supresión de

descargas de ranura consistió en insertar una placa de mica a un lado de la bobina dentro de la ranura. Este relleno empujaba el otro lado de la bobina contra el núcleo mejorando el contacto y por lo tanto reduciendo los espacios de aire entre estas dos interfaces [17]. En 1920, se desarrollaron pinturas de grafito con las características de resistencia requeridas y recubrimientos fabricados a partir de negro de acetileno. Estos materiales y pinturas fueron aplicados a las capas de acabado de cinta de asbesto y/o en rellenos de ranura hechos de papel prensado [10].

Hoy en día, el método más común para la supresión de descargas de ranura es aplicar cintas de lana de poliéster no entrecruzada, impregnada con una composición de resina que contiene partículas de carbón o grafito. Estas cintas están disponibles con una resistividad superficial en el rango de 200 ohmios por cuadro a poco menos de 3000 ohmios por cuadro aproximadamente. Algunos de los problemas asociados con los recubrimientos semiconductores son su clase térmica limitada F y su compatibilidad con las resinas de impregnación, especialmente con aquellas empleadas en procesos VPI. En lo que respecta al proceso de aplicación sobre las bobinas, la máquina encintadora podría resultar contaminada con partículas de carbón, por lo que se requiere una máquina de encintado diferente tanto para la aplicación del aislamiento principal como para la aplicación de las capas semiconductoras [18]. Estas últimas estuvieron también disponibles en forma de pinturas inicialmente aplicadas luego del procesamiento de las bobinas. Cuando se usan en forma de cintas pueden ser aplicadas durante el proceso mismo de fabricación de las bobinas, no presentando mayores inconvenientes en sistemas Resin Rich, pero acarreando problemas de procesamiento en bobinas VPI [19].

Otro componente importante del sistema de aislamiento es la capa o recubrimiento gradiente aplicado sobre las cabezas de bobina en máquinas por encima de 6.6kV. El campo eléctrico a lo largo de la longitud de la ranura es más o menos uniforme, pero justo a la salida del núcleo el campo eléctrico se distorsiona. La distorsión acarrea puntos de concentración y si el campo eléctrico en algún punto sobre las cabezas de bobina es mayor que la rigidez dieléctrica del aire ( $\sim 3\text{kV/mm}$ ) se producen descargas superficiales. El propósito del recubrimiento gradiente es suavizar las concentraciones de campo eléctrico para evitar así descargas tipo corona o superficiales. La forma de los conductores, esto es esquinas y bordes afilados, también afectan a la distribución del campo eléctrico en el interior del aislamiento. Alrededor de 1930, la construcción de máquinas rotativas de mayores voltajes, por ejemplo desde 27.6 a 33kV, requirió nuevas soluciones al problema de las descargas corona sobre la superficie de las cabezas de bobina. La compañía Parsons Manufacturing Company diseñó y construyó un turbogenerador de 25 MVA, 33kV y 3.000 rpm con bobinas de conductores concéntricos con el fin de eliminar los posibles gradientes originados por la forma del conductor, convirtiéndose en uno de los primeros métodos para aliviar el campo eléctrico. Para entonces, también se propuso un sistema de aislamiento provisto con superficies equipotenciales a diferentes intervalos en el interior del aislamiento y con películas conductoras alrededor de los conductores con el mismo propósito [19].

El final de la capa semiconductoras algunas pulgadas más allá del borde del núcleo actúa como la terminación abrupta del núcleo del estator. Así el recubrimiento gradiente debe traslaparse cuidadosamente con la capa semiconductoras algunos centímetros para evitar concentraciones de campo eléctrico. En 1935, con el objetivo de suavizar el campo luego de la terminación de la capa semiconductoras se propuso aplicar sobre la superficie de las bobinas capas cuya resistencia iba incrementando en la medida que se alejaba del borde del núcleo. En un segundo método, se propuso colocar envolturas semiconductoras incrustadas en el

aislamiento a lo largo de la ranura, de diferentes longitudes extendiéndose más allá del borde del núcleo. Una combinación de ambos métodos también fue considerada [20]. En 1960, se propuso reemplazar las envolturas semiconductoras por papel metálico y colocarlos a diferentes profundidades con distintas longitudes únicamente en el interior del volumen del aislamiento de las cabezas de bobina [21]. La disposición de estas películas metálicas formaba un cono ayudando a suavizar el campo eléctrico. En 1995 fueron reportados los intentos de cubrir toda la superficie de las cabezas de bobinas VPI con una capa semiconductor y sólo aplicar el recubrimiento gradiente los terminales de salida del devanado del estator [22]. No obstante la primera mención a este posible método data de 1935 [20]. Como es evidente, estos métodos pioneros enfrentaron problemas de fabricación y por lo tanto no son utilizados en la actualidad.

Actualmente, el método más común para suavizar el campo eléctrico sobre las cabezas de bobina es el uso de un recubrimiento normalmente hecho de pinturas o cintas de tejido de poliéster cargado con carburo de silicio (SiC) que exhibe una característica voltaje-corriente no lineal [22]. En forma de cintas están disponibles completamente curadas o en estado B (parcialmente curadas). La elección del tipo de cinta es de gran preocupación debido a problemas de compatibilidad con el proceso mismo de fabricación del aislamiento de la bobina, especialmente con los sistemas VPI. En [23] se menciona que las cintas completamente curadas no funcionan correctamente cuando se aplica antes del proceso de VPI así como también presentan algunos problemas de adherencia cuando se aplica después del proceso VPI. Por el contrario se afirma que las cintas gradientes tipo Resin Rich aplicadas antes del proceso VPI tienen un mejor desempeño. En los sistemas VPI, las cintas gradientes deben ser aplicadas después de la impregnación de la resina pero antes del ciclo de presión y curado.

A pesar del uso generalizado de las cintas o pinturas cargadas con carburo de silicio, otros métodos han sido considerados incluyendo instalar sobre las cabezas de bobina un material de alta permitividad y conos del alivio de voltaje similares a los aplicados en los extremos de cables de alto voltaje. Las principales desventajas de estos métodos son que el espacio disponible para instalar los conos de alivio es bastante limitado y los materiales con permitividades relativas del orden de 30 necesarios no cumplen con los requerimientos para los materiales de uso en sistemas de aislamiento de máquinas rotativas [22].

Luego de la exitosa introducción de las resinas sintéticas, la estructura básica de los sistemas de aislamiento ha cambiado poco, esto es, su estructura continúa siendo compuesta en un 65% por cintas de papel de mica, en un 25% por algún tipo de resina epóxica y en un 10% por tejidos de vidrio o algún otro material sintético como material de soporte. El reto actual es el incremento de la conductividad térmica de los materiales involucrados buscando la reducción de los gradientes térmicos en el aislamiento que a su vez repercute en la disminución de los esfuerzos térmicos, el mejoramiento del desempeño de la máquina sin necesidad de modificar drásticamente el bien consolidado diseño de los devanados y en la reducción de la temperatura de operación o en el incremento de la densidad de potencia (kW/kg) conservando las dimensiones y temperatura de servicio de la máquina [24]. Otras posibilidades más revolucionarias también han sido consideradas. Entre ellas están el uso de termoplásticos de alta temperatura con rellenos de mica como barrera dieléctrica o el uso de sistemas de aislamiento sin mica en los cuales un polímero en forma de polvo es rociado sobre los conductores que van a ser aislados. En este proceso, los conductores son calentados hasta la temperatura de fusión del polímero. El endurecimiento posterior resultaría en un aislamiento virtualmente libre de inclusiones gaseosas y a su vez de descargas parciales [25]. Así mismo,

en los años recientes se ha investigado en el uso de resinas con rellenos de nanopartículas de sílica ( $\text{SiO}_2$ ), alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), mica, nitruro de aluminio ( $\text{AlN}$ ) y dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ). Especial atención se ha prestado al porcentaje de relleno, a su integración dentro del proceso de impregnación estándar, al tipo y tamaño de partícula del relleno y al desempeño de los compuestos de mica y resina epóxica con rellenos de nanopartículas cuando forman estructuras simples como laminados, pasando por bobinas de prueba hasta devanados reales. Resultados experimentales han sido más que satisfactorios mostrando una mejoría en la resistencia a la inyección de arborizaciones eléctricas, mayor rigidez dieléctrica, entre 15-30% mayor conductividad térmica y un incremento en un factor de 10 de la vida útil [26], [27].

Finalmente, el lector podrá encontrar en la Figura 5 una línea de tiempo en la cual se resume el desarrollo y principales mejoras en los sistemas de aislamiento de máquinas eléctricas rotativas en el último siglo.

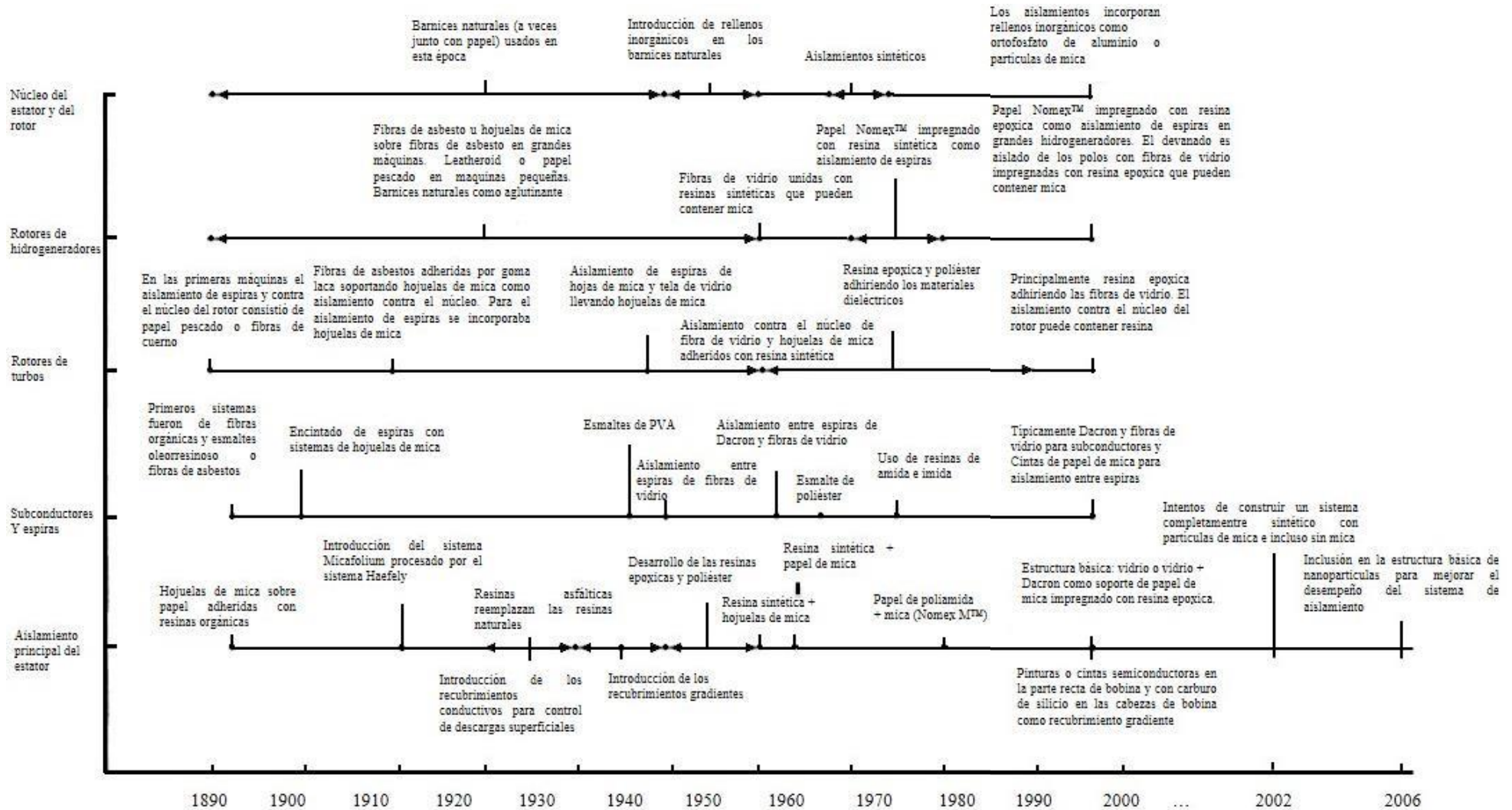


Figura 5. Desarrollo y principales mejoras en los sistemas de aislamiento de máquinas eléctricas rotativas que llevaron a los sistemas disponibles en la actualidad.

## 2.2 RESINAS SINTÉTICAS

Materiales de alta calidad y procesos de fabricación controlados son aspectos de alto impacto en la construcción de sistemas de aislamiento confiables y de extensa vida útil. La selección de las resinas de impregnación y el proceso industrial para incorporarlas en un sistema de aislamiento eléctrico es un gran reto para los fabricantes de máquinas eléctricas ya que las resinas en los devanados de alto voltaje tienen que ser extremadamente versátiles con el fin de laminar y unir las cintas de mica, llenar cualquier espacio de aire dentro del aislamiento, garantizar una excelente adhesión a los conductores de cobre, proporcionar resistencia mecánica a toda la estructura, protegerla de productos químicos, suciedad y humedad al mismo tiempo que aporta excelentes propiedades eléctricas, térmicas y mecánicas [28].

Desde los años 50 el agente adhesivo utilizado en todos los nuevos sistemas de aislamiento han sido resinas sintéticas las cuales reemplazaron las resinas asfálticas anteriores. La investigación en la química de resinas poliméricas comenzó en 1907 con el químico belga L.H. Baekeland quien desarrolló el proceso industrial requerido para la producción de productos de reacción de fenol y formaldehído. El trabajo de Baekeland condujo al desarrollo de resinas "Fenólicas"; productos de condensación de fenoles y cresoles con formaldehídos, que se utilizaron como modificadores para mejorar la resistencia térmica de otras resinas. Estos "nuevos" materiales aislantes estuvieron disponibles inicialmente para servir a la industria de las comunicaciones telegráficas, de ahí encontrarían aplicación en casi todos los campos de la industria reemplazando los hasta entonces usados materiales naturales.

A mediados de 1923 entraron al mercado resinas del tipo alquídicas para revestimiento e impregnación encontrando aplicación en muchos aparatos y dispositivos eléctricos. Estas resinas se obtenían como el producto de reacción de un alcohol polihídrico con un ácido orgánico dibásico modificado con un ácido graso derivado de los aceites vegetales, por ejemplo de linaza [29] con desprendimiento de subproductos de bajo peso molecular. Las propiedades de secado de los aceites vegetales modifican algunas características de las resinas alquídicas tales como su naturaleza auto-oxidativa, su tiempo de secado, dureza, color, resistencia a la humedad, su tipo, y su grado de insaturación (sitios de reticulación disponibles). Por otra parte, debido al contenido de aceites secantes, las resinas de revestimiento alquídicas tienen una resistencia química y a la humedad limitada por lo que no pueden ser utilizadas en ambientes ácidos/alcalinos. Su combinación con compuestos fenólicos mejora la resistencia al agua y a los alcalinos, se consigue una mejor adhesión mezclándolos con resinas epóxicas y cuando se combinan con siliconas incrementan las propiedades térmicas y dieléctricas del producto final [29]. Para entonces, los barnices aislantes eléctricos usados comúnmente eran mezclas de resinas fenólicas y alquídicas disueltas en un solvente no reactivo como el xileno. Una amplia gama de propiedades eran obtenidas variando la relación entre la resina fenólica y la resina alquídica. La adición de solventes no reactivos impedían la polimerización de la resina durante el almacenamiento. Cuando el barniz después de un largo tiempo en almacenamiento comenzaba a reaccionar químicamente se adicionaba más solvente y esto era suficiente para detener la reacción y reducir de nuevo la viscosidad del barniz. El proceso de curado de estas resinas o barnices se lleva a cabo por reacciones de oxidación con el aire luego de la evaporación del solvente no reactivo. Como es de esperarse, la evaporación de los solventes daba lugar a la formación de inclusiones gaseosas y con esto a la reducción del desempeño del aislamiento. La cantidad de

compuestos orgánicos volátiles (VOCs) liberados a la atmósfera por la evaporación de solventes se convirtió en una preocupación tanto para el medio ambiente como para la salud del personal involucrado. Las preocupaciones técnicas presionaron el desarrollo de resinas sin solventes más rápido que las preocupaciones del tipo medio ambiental hasta mediados de 1966 cuando el Distrito de Control de Polución del Aire de Los Ángeles estableció la Regla 66 para regular la cantidad de solventes aromáticos no reactivos arrojados a la atmósfera. Hoy esta regla ambiental es obsoleta pero fue el primer intento por limpiar el aire de la atmósfera [30]. Antes de la aparición en escena de las resinas modernas a mediados de 1940, hubo otros materiales aislantes de uso frecuente en la industria tales como el cloruro de polivinilo (PVC) que sustituyó al caucho natural en cables subterráneos de bajo voltaje y en cables para redes domésticas, la urea-formaldehído desarrollada en 1929, el acrílico en 1936 y el poliestireno y el nylon en 1938.

En 1949, la Westinghouse puso en servicio el primer sistema completo de aislamiento de resina de poliéster y algunos años más tarde, en 1954 General Electric desarrolló un sistema completo de aislamiento a base de resina epóxica. En los primeros sistemas de poliéster, la resina se impregnaba fácilmente en las cintas de mica y luego las bobinas eran curadas por horneado. El aislamiento resultante tenía una flexibilidad superior con una excelente trayectoria a través de los años. Durante la instalación en el estator, las bobinas con resinas poliéstericas podían ser dobladas hasta cierto límite con bajo riesgo de fatiga o agrietamiento del aislamiento principal. Las resinas epoxicas por su parte tenían mayor resistencia dieléctrica que las resinas de poliéster y como resultado, las paredes de aislamiento podrían ser más delgadas liberando espacio adicional para acomodar una sección transversal de cobre más grande. Pero por otro lado, las resinas epoxicas eran más costosas que el poliéster y requerían un control más riguroso para su aplicación a las bobinas [31].

Actualmente las resinas de poliéster y epoxicas se utilizan en todo tipo de sistemas de aislamiento para máquinas rotativas de alto voltaje. Dada su importancia en la industria las propiedades y características de estos dos principales tipos de resina se discutirán a continuación.

### **2.2.1 RESINAS POLIÉSTER**

En forma general, las resinas empleadas en la fabricación de sistemas de aislamiento son algún tipo de resina polimérica. Esto significa que estas resinas se forman por una reacción química en la que moléculas de estructura simple y de bajo peso molecular llamadas monómeros se unen para formar moléculas grandes, a menudo complejas, en una configuración semejante a la unión de eslabones de una cadena. Las propiedades de la macromolécula resultante dependen del proceso por el cual los monómeros se enlazan entre sí (polimerización), el tipo de monómero y el entrecruzamiento que puede o no existir entre cadenas. De acuerdo con las uniones entre las cadenas, las resinas poliméricas se pueden clasificar en dos grandes clases: resinas termoestables y resinas termoplásticas. Las resinas asfálticas, incluso cuando se modifican con aceites secantes para conseguir un estado sólido y fuerte después del curado, se ablandan a temperaturas relativamente altas (aproximadamente 80° C) y se endurecen al enfriarse repetidamente. Algunas resinas poliméricas presentan este mismo comportamiento por lo que se conocen como resinas termoplásticas. Las resinas termoplásticas están compuestas de moléculas lineales que forman largas cadenas sin entrecruzamiento entre ellas. Los polímeros termoendurecibles o termoformados experimentan reacciones químicas de curado cuando se calientan transformándose en materiales infusibles e

insolubles de alto peso molecular. Estas propiedades del polímero curado surgen debido a que las cadenas poliméricas forman una estructura de red tridimensional, característica que se conoce como reticulación o entrecruzamiento de cadenas. Un estudio exhaustivo de la química de los polímeros está por fuera del alcance de esta investigación. En cambio, tiene lugar en este estudio la revisión de los fundamentos conceptuales de la composición de las resinas poliméricas y sus características de degradación que permiten explicar los fenómenos que ocurren en el aislamiento cuando son sometidos a programas de envejecimiento acelerado.

Desde el punto de vista de los mecanismos de polimerización, todas las resinas de poliéster se producen de tres componentes básicos: el primer componente es la base, que podría ser un monómero o un conjunto de monómeros formando una molécula más grande (base de poliéster). El segundo componente son los monómeros reactivos necesarios para disolver la base de poliéster a temperatura ambiente y para reaccionar con ella o con otros monómeros durante las reacciones de curado. El tercer componente es el catalizador el cual con la adición de calor inicia y facilita las reacciones de curado [32].

Las resinas poliéstericas son producidas en forma de laminados, productos de moldeo, fibras, películas, para recubrimiento de superficies, como plastificantes entre muchos otros. El factor común en esta amplia gama de productos es que todos ellos contienen un número de enlaces éster (-COO-) en la cadena principal del polímero.

Entre las resinas poliéster para impregnación de estructuras aislantes de equipos eléctricos pueden diferenciarse dos tipos principales: resinas poliéster alquílicas y de poliéster insaturado. Las resinas poliéster alquílicas son producidas por la esterificación parcial de un alcohol polihídrico con un ácido graso seguido por la reacción con un ácido dibásico. Algunas características destacadas de estas resinas son su bajo costo, durabilidad, flexibilidad y resistencia razonable al calor. Sin embargo, el curado o endurecimiento de las resinas alquílicas se lleva a cabo por medio de reacciones de oxidación con el aire exigiendo aplicar la resina en películas muy delgadas para obtener resultados satisfactorios [33]. Entre los alcoholes polihídricos más frecuentes se encuentran el glicol, el glicerol, el poliglicerol y el pentaeritritol. Entre los ácidos grasos se pueden encontrar derivados de aceites vegetales como de linaza, soya, cártamo, perilla y castor. Entre los ácidos polibásicos están los ácidos ftálicos, isoftálicos, maleico, adípico y sebásico [34].

Las resinas de poliéster insaturadas resolvieron las desventajas con el curado de las resinas alquílicas. Las resinas de poliéster sin solventes evolucionaron para su aplicación en procesos VPI ya que casi eliminaron la formación de cavidades de aire en el aislamiento al eliminar la evaporación de solventes durante el curado. Las resinas de poliéster insaturadas son obtenidas por la reacción de un ácido polibásico insaturado, frecuentemente fumárico y maleico, con un alcohol dihidroxílico tal como el etileno, propileno, dietileno o el glicol dipropileno. La formulación también puede incluir ácidos saturados para controlar la insaturación haciendo la resina final más fuerte y a la vez más flexible [34], entre ellos 1,2-propylen glicol, glicol etileno y glicerol [35].

En el proceso de curado, un monómero del tipo vinil reacciona con los dobles enlaces de la base de poliéster incrementando la densidad del entrecruzamiento del producto final. El estireno es el monómero más ampliamente utilizado para poliésteres insaturados. En la formulación, los ácidos insaturados proporcionan sitios reactivos para el entrecruzamiento mientras que el ácido saturado se utiliza para contrarrestar los sitios de reticulación y por lo tanto controlar la fragilidad de la resina resultante. El anhídrido de ácido ftálico es el componente saturado más utilizado debido a su bajo precio y porque proporciona enlaces rígidos y firmeza a la resina curada [33]. El 1,2-propilenglicol y etilenglicol son los alcoholes



más comunes. El anhídrido fumárico reacciona mejor con el estireno, pero debido a su alto precio, se prefiere el anhídrido maleico. En cualquier caso, los anhídridos se prefieren a su ácido correspondiente debido a su mayor reactividad [35].

El proceso de curado de las resinas poliéster insaturadas es por copolimerización por radicales libres que reaccionan con las insaturaciones en la base de poliéster y en los monómeros. La fuente de radicales libres es la adición de peróxidos orgánicos, tales como peróxido de dicumil, calor o luz ultravioleta. Dependiendo de la temperatura de curado, se añaden promotores o aceleradores a la formulación para descomponer los peróxidos rápidamente en radicales libres.

Una característica importante de las resinas de poliéster insaturadas es la presencia de grupos funcionales carbonilo (C=O). Estos grupos carbonilo son polares y por lo tanto son responsables de la absorción de agua y humedad, aumento de las pérdidas dieléctricas y una mayor constante dieléctrica. En los compuestos altamente reticulados, el momento polar neto es cero, pero como se discutirá más adelante, los mecanismos de degradación rompen las cadenas poliméricas principales dando origen a cadenas cortas con grupos polares reactivos que disminuyen el desempeño del aislamiento.

### 2.2.2 RESINAS EPÓXICAS

Las resinas epóxicas son polímeros termoformados con propiedades dieléctricas y térmicas mejoradas en comparación con las resinas poliéstericas para uso en sistemas de aislamiento de alto voltaje. Para 1974 una extensa mayoría de motores y generadores contaban con sistemas de aislamiento de mica y algún tipo de resina epóxica a causa de su buena adhesión a la mayoría de los materiales incluyendo metales, su resistencia a la humedad, a los solventes y a otros numerosos químicos, su menor constante dieléctrica y su menor nivel de encogimiento luego del curado.

Por otra parte, en los primeros años de desarrollo de las resinas epóxicas para aplicación en sistemas de aislamiento de alto voltaje, la alta viscosidad de este tipo de resinas forzó a un método de procesamiento diferente al método de impregnación VPI usado con las resinas de poliéster de baja viscosidad. En el proceso Resin Rich las cintas de mica son impregnadas previamente con resina epóxica parcialmente curada y solo después se aplican sobre los conductores de las bobinas. La parte de ranura de las bobinas es curada por temperatura en una prensa caliente hasta alcanzar las dimensiones requeridas. La resina fluye axialmente desde la parte de la ranura hasta las cabezas de bobina. Luego las bobinas son llevadas a un horno donde se termina el curado. En término Resin Rich hace alusión al hecho de que las cintas de mica previamente a su aplicación sobre los conductores contienen un excedente de resina. Para asegurar la impregnación de la mayor cantidad posible de espacios de aire dentro de las cintas de mica en un tiempo razonable se debía adicionar solventes a las resina epóxica con el propósito de controlar su viscosidad. Una vez que las cintas estaban completamente impregnadas eran llevadas a un horno de secado donde se eliminaba el solvente y se curaba parcialmente la resina. Aun así, entre 0.5-1% del solvente permanecía en las cintas. La totalidad de los solventes debía ser eliminada durante el curado en las prensas calientes, de lo contrario estos podían producir inclusiones gaseosas con las implicaciones adversas de estos defectos en el desempeño del sistema de aislamiento. A mediados de 1960 se desarrollaron sistemas epóxicos sin solventes eliminado con esto el proceso de secado de las cintas luego de la impregnación y permitiendo a los fabricantes construir bobinas con un menor contenido de

inclusiones gaseosas y por lo tanto con menores pérdidas dieléctricas [36]. La versatilidad de las resinas epóxicas era incluso mayor y en 1967 fue presentado en la industria un tipo de resina epóxica modificada de baja viscosidad compatible y apropiado para su uso en sistemas VPI.

Respecto a la química de las resinas epóxicas, ellas son los productos de reacción de una resina base, por ejemplo una resina aromática, ciclo alifáticas, novolac o fenólica, y un endurecedor reactivo tales como las poliaminas, los anhídridos y las poliamidas con o sin ayuda de un catalizador. Todas las resinas base tienen en común el grupo funcional epoxi o también llamado grupo oxirano, compuesto por un átomo de oxígeno unido a dos átomos de carbono formando una estructura de anillo como se ilustra en la Figura 6.

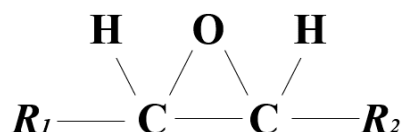


Figura 6. Grupo funcional epoxi.

Los grupos epoxi proporcionan los sitios de enlace para las otras moléculas. Una gran variedad de resinas epóxicas pueden ser formuladas a partir de una combinación específica de resina base, endurecedor y un catalizador. Sin embargo, aún es posible clasificarlas como se propone en la Figura 7 [37].

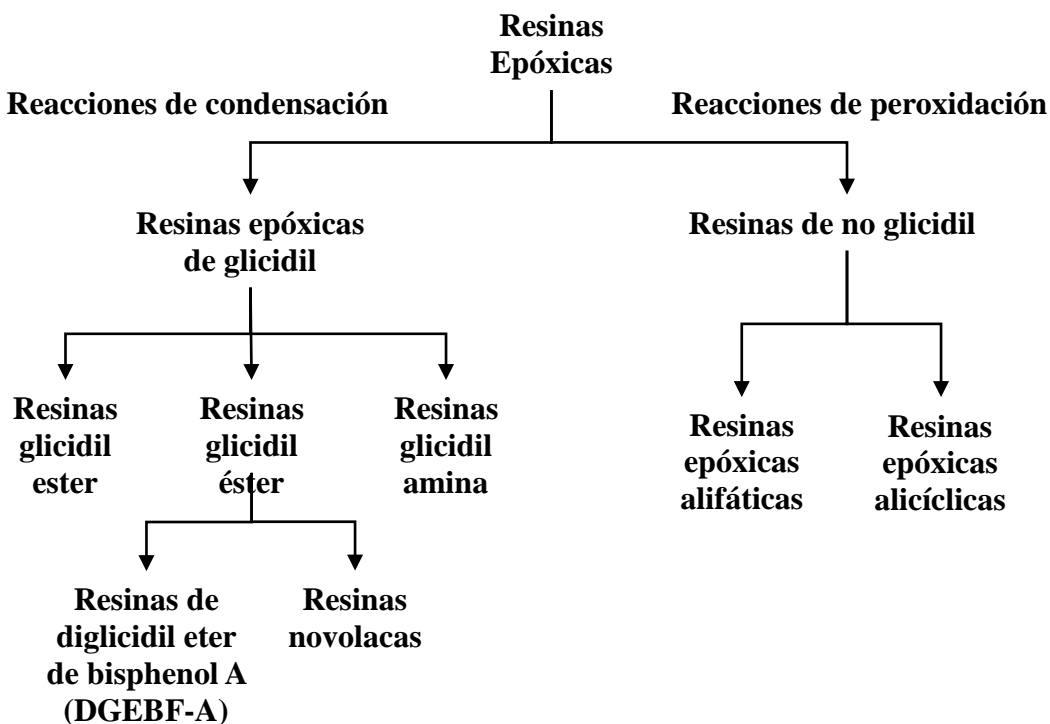


Figura 7. Clasificación general de las resinas epóxicas.

Según esta clasificación, ellas son del tipo resinas epóxicas de glicidil cuando se obtienen por las reacciones de condensación de un compuesto dihidroxílico, un ácido dibásico o una diamina y epíclorodrin o son del tipo resina epóxica no glicidil cuando son obtenidas por peroxidación de los enlaces dobles en las olefinas. Ejemplos de las resinas de glicidil son las

resinas de glicidil éter, de glicidil éster y de glicidil amina, mientras que pertenecen al tipo de resinas no glicidil las resinas epóxicas alifáticas y las alicíclicas. Cuando la epiclorodrina en las resinas epóxicas de glicidil éter reacciona con el bisfenol A la reacción da origen a la resina de diglicidil éter de bisfenol A (DGEBA). Si en cambio reacciona con resinas novolaca fenólicas la reacción resulta en resinas epóxicas novolacas.

Los dos anteriores tipos de resina son las más comúnmente usadas en sistemas de aislamiento de máquinas de alto voltaje. La estructura química fácilmente diferenciable de ambas resinas se muestra en la Figura 8.

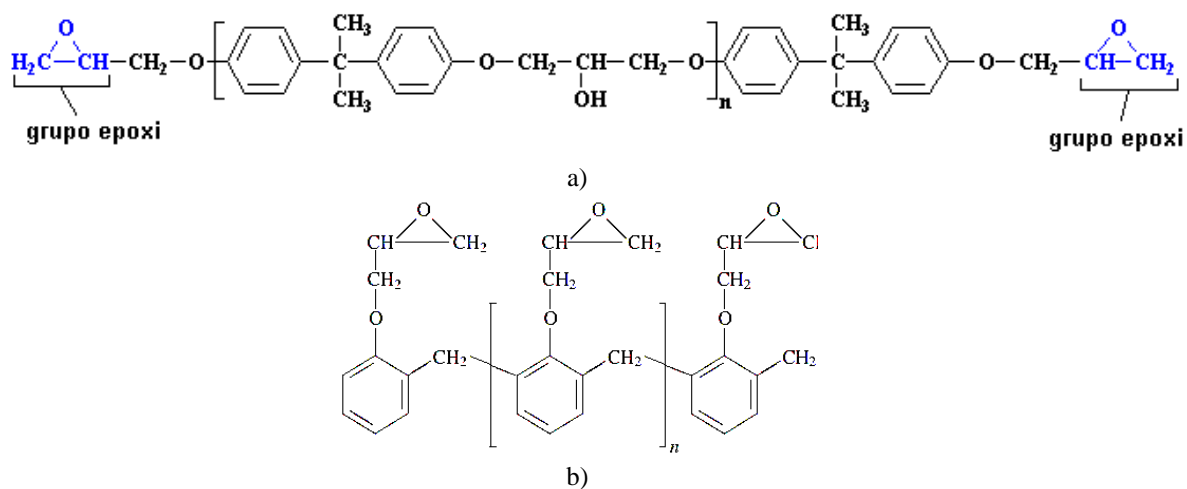


Figura 8. Estructura química de las resinas epóxicas de a) bisfenol-A y b) novolacas.

Las resinas epoxi novolacas típicamente tienen mejor desempeño a altas temperaturas, mayor resistencia a los ataques químicos y una mayor adhesión que las resinas de bisfenol A [38]. Así mismo el número de grupos epoxi en la estructura molecular de las resinas novolacas es mayor que en las resinas de bisfenol A lo que le confiere mejor estabilidad térmica, propiedades mecánicas, propiedades dieléctricas y resistencia al agua. La mayor cantidad de grupos epoxi también resulta en una estructura densamente reticulada. Por sus características, las resinas epoxi novolacas son principalmente empleadas en procesos Resin Rich y las de bisfenol A en sistemas VPI.

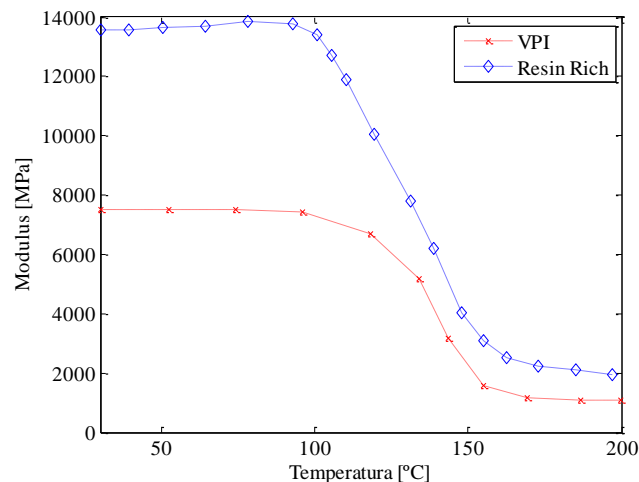


Figura 9. Diferencia en la dureza de sistemas Resin Rich y VPI medida por el módulo elástico versus temperatura.

La alta densidad de los entrecruzamientos de las resinas novolacas torna los aislamientos tratados mediante Resin Rich más rígidos y frágiles en comparación con los aislamientos VPI de resinas de bisfenol. Esto puede fácilmente constatarse por medio del módulo de almacenamiento que como muestra la Figura 9 es mayor en sistemas Resin Rich tanto por encima como por debajo de la temperatura de transición vítrea. La rigidez mecánica de las resinas novolacas también afecta sus coeficientes espaciales de expansión térmica tal que origina mayores esfuerzos de cizallamiento en particular durante ciclos de parada/arranque o durante cambios en la carga de la máquina [39].

Las resinas epóxicas curadas por anhídridos se prefieren para sistemas VPI debido a sus excelentes propiedades eléctricas, aunque en forma líquida son propensas a la absorción de la humedad del aire, que tiende a disminuir el tiempo de gel y aumentar la viscosidad de la resina. Las resinas epóxicas alifáticas curadas mediante poliaminas polimerizan a temperatura ambiente o a una temperatura moderadamente elevadas contrario a las resinas curadas por poliamidas que están diseñadas para aplicaciones por debajo de 65 ° C [40]. En comparación con la amina, los anhídridos tienden a producir resinas con una temperatura de transición vítrea más alta con grupos éster en su estructura polimérica y más susceptibles a los daños por hidrólisis [41].

En la formulación, los endurecedores abren los anillos epóxicos formando radicales libres disponibles para reaccionar. El proceso de curado puede ser de dos tipos: por homopolimerización, cuando las moléculas de los grupos epóxicos reaccionan entre sí, o por adición o curado catalítico, cuando el grupo epóxico reacciona con otras moléculas reactivas (endurecedor) [42]. En este último caso, el endurecedor será parte del producto final, por ende su elección se hace según las propiedades físicas, químicas, térmicas y eléctricas requeridas para la resina curada. De ahí que exista una amplia variedad de opciones de endurecedores para todo tipo de aplicaciones.

En algunas formulaciones se puede añadir un acelerador para abrir la estructura de anillo de grupos epóxicos y activar el proceso de curado. Los aceleradores son especialmente necesarios en resinas curadas por un anhídrido debido a su baja reactividad con resinas epóxicas. Las aminas terciarias, el tricloruro de boro ( $\text{BCl}_3$ ) y las sales metálicas como el naftenato de zinc son aceleradores usados comúnmente para este propósito. Especialmente los dos últimos aceleradores mencionados se utilizan en sistemas de aislamiento de máquinas eléctricas de alto voltaje. El naftenato de zinc puede ser cargado en las cintas de mica resultando en un aumento de la vida útil de la mezcla de resina, menores pérdidas dieléctricas, mayor rigidez dieléctrica, y mayor resistencia a la tracción si se compara con el  $\text{BCl}_3$ . Su principal desventaja es su estabilidad térmica limitada [38].

La densidad de la reticulación de resina curada depende fuertemente de la resina epóxica base utilizada. Si después del curado, los grupos epóxidos se ubican cerca el uno al otro la densidad de reticulación será alta, y viceversa. Las resinas epóxicas novolaca tienen una densidad de reticulación más alta que las resinas epóxicas bisfenol A, y como resultado, son más rígidas y quebradizas [38]. El peso molecular de la resina base impacta en el volumen de la resina curada. En este sentido, las resinas de poliéster se forman a partir de moléculas de bajo peso y menor tamaño, mientras que la mayoría de los monómeros de las resinas epóxicas son de mayor peso molecular. En la polimerización de monómeros de bajo peso molecular una gran proporción de espacios intramoleculares serán reemplazados por nuevos enlaces interatómicos contrayendo la estructura de la resina. En consecuencia, las resinas de poliéster se encogen alrededor de 8-10%, mientras que las resinas epóxicas solo entre 1-5%. Cuando se añaden rellenos como la sílica este encogimiento puede llegar a niveles de 0.25% [43]. El

anillo epóxico también impacta el nivel de contracción de la resina curada. Por ejemplo, su energía relativamente baja de disociación implica menos calor de polimerización lo que se traduce en una menor contracción cuando se ha completado el curado. Además, el cambio de un anillo de tres miembros a una cadena provoca menos contracción que el cambio de un doble enlace a una cadena. Por último, un menor nivel de contracción significa menos tensiones mecánicas residuales en la resina curada a temperatura ambiente [41].

Estatores y armaduras de bajo voltaje que requieren un procesamiento rápido son impregnadas con mezclas de resinas base de bisfenol curadas mediante un amino como endurecedor. Motores y generadores de medio y alta voltaje con aislamientos VPI se impregnan con resinas epóxicas de bisfenol A o F curadas con anhídridos como endurecedor [44]. El catalizador para las resinas epóxicas curadas con anhídridos es comúnmente un compuesto de zinc orgánico cargado en las cintas de mica, o el  $\text{BF}_3$  para las resinas novolacas en sistemas Resin Rich [4]. Las resinas novolacas cuando son usadas en procesos VPI, se limitan a devanados de bajo voltaje donde la impregnación del aislamiento no es tan crítica como lo es para devanados de alto voltaje [45].

### 2.3 MATERIALES DE SOPORTE MECÁNICO

La mica es la principal barrera dieléctrica del sistema de aislamiento. La mica naturalmente se encuentra disponible en pequeñas hojuelas, escamas o industrialmente en forma de cinta de papel. Por sí mismo, cualquier producto de mica no tiene suficiente resistencia mecánica para ser aplicada manualmente y mucho menos por medio de una máquina. Por lo tanto, es necesario aplicarla sobre un portador o material de soporte. La unión de las capas de cinta mica no podría ser posible sin un material de soporte que retenga la resina de impregnación y de forma a la estructura de aislamiento. El material de soporte no sólo juega un papel de portador o soporte, sino que también es parte integral del aislamiento de modo que debe ser cuidadosamente seleccionado para resistir descargas parciales, esfuerzos tracción y cizallamiento y para maximizar la transferencia de calor con el fin de aumentar las temperaturas de operación y la eficiencia de la máquina en general.

El desarrollo a finales de 1930 de hilos de vidrio permitió la fabricación de tejidos de vidrio que reemplazaron los antiguos sistemas de soporte hecho a partir de fibras naturales. El reto en adelante era mejorar el proceso de fabricación con el fin de producir un material de soporte más delgado que aumentara el contenido de mica dentro del aislamiento. Entre 1940 y 1950, el espesor de los tejidos de vidrio disminuyó de 0.12mm y 0.075mm a 0.05mm. En 1960, se construyó tejidos de 0.025 mm, pero debido a su alto costo, el espesor de 0.05mm fue adoptado como el estándar. La estructura física de la fibra de vidrio llamó la atención de los fabricantes. La relación entre los hilos de trama y urdimbre (hilos tejidos verticalmente y horizontalmente) fue tenida en cuenta ya que definían propiedades como la facilidad de impregnación, la resistencia mecánica y las pérdidas dieléctricas. Al convertirse en un componente esencial del sistema de aislamiento su costo se convirtió en un tema de interés. Tejidos abiertos de vidrio, es decir tejidos con relativamente pocos hilos de urdimbre y trama, y tejidos de hilos unidireccionales fueron considerados en su momento. Incluso hubo intentos de utilizar combinaciones de tejidos de vidrio con tejidos y papeles de poliéster pero con menos éxito [46]. El uso de tejidos de vidrio permitió a los sistemas de aislamiento Resin Rich y VPI, trabajar a temperaturas más altas, limitados ahora por la temperatura de diseño del sistema de resina elegido y son por mucho, los materiales de soporte más utilizado para cintas de papel de mica de la actualidad.

A pesar de las mejoras alcanzadas hasta entonces, el objetivo de los ingenieros continuaba siendo el mismo: aislamientos más delgados para mejorar la conductividad térmica pero con una mayor resistencia dieléctrica y un menor costo de procesamiento. Por lo tanto, los hasta entonces nuevos materiales de poliéster fueron empleados en diferentes formas como material de soporte, e incluso como aislamiento entre conductores y de espiras. Previamente a la introducción total de cintas de papel de mica, se utilizó papel de poliéster para formar una estructura de vidrio- mica-poliéster para prevenir desprendimientos de mica del soporte de vidrio durante la fabricación del aislamiento. Los tejidos de poliéster también pueden ser encontrados como materiales de soporte para cintas de mica gracias a sus características de contracción [46]. Mezclas de fibras de vidrio y fibras de poliéster han sido empleadas como aislamiento de subconductores en barras Roebel debido a su flexibilidad [28].

Desde 1940, se utilizaron películas de tereftalato de polietileno (PET) en pequeños motores con voltajes nominales hasta 6.6kV, pero su uso en aislamientos de alto voltaje sólo se consideró hasta 1970. En comparación con los tejidos de vidrio, las películas de poliéster pueden llegar a ser tan delgadas con 0.025mm de espesor, ofrecen mayor rigidez dieléctrica incluso después del envejecimiento, presentan un menor factor de disipación, son más fáciles de manejar, pueden ser aplicadas con mayor tensión, proporcionan al sistema una cierta resistencia a los daños durante el proceso de bobinado y permiten obtener un aislamiento con espesor más uniforme. Con todo, las cintas de papel de mica y película de PET tuvieron que superar algunas desventajas antes de su uso masivo en los sistemas de aislamiento de alto voltaje. Algunas de estas desventajas eran su poca permeabilidad a la resina epóxica durante el proceso VPI incrementando la posibilidad de formación de inclusiones gaseosas e incluso delaminación. Además, se creía que era más difícil para la resina epóxica unir películas que unir cintas de tejido de vidrio. Pero, el principal factor en contra del uso de películas PET fue su pobre resistencia a las descargas parciales. Tras el ataque de las descargas parciales, los subproductos de la descomposición de las películas aceleran la descomposición y contribuyen a la formación de caminos de carbonización que finalmente llevan a la falla del aislamiento [47]. Para 1970, año en el que las películas de poliéster se introdujeron por primera vez, muchas de las grandes empresas de servicios públicos en los EE.UU. y Canadá reprobaron su uso en los devanados de motores y generadores mientras que compañías europeas apoyaron su uso. La prohibición fue impuesta por la creencia de que las fallas prematuras presentadas en un gran número de estatores VPI tuvieron su origen en las películas de poliéster sirviendo de soporte al papel de mica [48]. El debate continuó y muchos fabricantes llevaron a cabo pruebas experimentales para validar las dudas sobre el uso de las películas de poliéster en sistemas de aislamiento de alto voltaje. En 1993, la compañía GEC Alstom reportó en un artículo técnico que las características dieléctricas durante pruebas de envejecimiento acelerado de las películas usadas como material de soporte eran similares a las obtenidas con los tejidos de vidrio [49]. Años más tarde, en el año 2000, se reportaron resultados de pruebas en los que se comparó el desempeño de cintas de mica soportadas por tejidos vidrio, películas de poliéster o combinaciones de ellas. Aunque el voltaje de ruptura dieléctrica de largo plazo fue mayor en todos los tipos o combinaciones de películas de poliéster, el autor afirmó que aún eran requeridos modelos físicos adicionales para explicar el papel positivo de las películas de poliéster en los sistemas de aislamiento de 13.8kV.

Recientemente, la división de energía de la General Electric presentó en la 2011 IEEE Electrical Insulation Conference, resultados de pruebas apoyando el uso de la película de poliéster como material de soporte de las cintas de mica luego de comprobar la integridad de la unión entre las capas de su nuevo sistema de aislamiento durante pruebas de envejecimiento

acelerado [48]. Por otro lado, otros autores han continuado investigando mejoras a los sistemas de soporte a base de vidrio como se reporta en [50][51][43][44][54]. Entre los hallazgos más destacados está que reemplazando los hilos trenzados que forman la urdimbre de los tejidos de vidrio convencionales por hilos de vidrios planos se consigue sistemas de aislamiento con mejores características de impregnación, mejor control dimensional, menor volumen de inclusiones gaseosas, mayor contenido de mica y mayores voltajes de ruptura dieléctrica. Esta disposición de los hilos de urdimbre del tejido fue introducida en 2005 por la compañía Isovolta con el nombre comercial PowerFab. Su principal característica es un menor espesor el cual impacta el aislamiento en aspectos como su conductividad térmica. Por ejemplo, una pared de aislamiento de 1.4 mm de PowerFab tiene la misma conductividad térmica que una pared de 2 mm de espesor de aislamiento convencional. Adicionalmente pueden ser aplicados tanto en procesos VPI como Resin Rich. Conservando las dimensiones del núcleo, con este nuevo sistema se pueden utilizar más capas de aislamiento incrementando el contenido de mica y la resistencia a la aplicación de voltaje. Si en cambio se conserva la misma potencia de salida de la máquina, las dimensiones del núcleo se pueden reducir.

Con los grandes avances y mejoras que han tenido los sistemas de soporte en las últimas décadas, puede afirmarse que tanto los sistemas de tejidos de vidrio como los a base de películas poliméricas son apropiados para su uso en sistemas de aislamiento de alto voltaje y la investigación continua.

## 2.4 BARRERAS DIELECTRICAS DE MICA

Hoy en día no se concibe un sistema de aislamiento para máquinas rotativas de alto voltaje sin el uso de mica como su principal barrera dieléctrica. Sin embargo, en los inicios de la industria el uso de la mica no estuvo presente. El trabajo del aislamiento se lograba por completo con materiales naturales combinados con algún tipo de aglutinante orgánico. Fue después de la inclusión de la mica que los sistemas de aislamiento y los procesos de fabricación comenzaron un desarrollo vertiginoso. Una breve discusión del proceso de fabricación y de las propiedades dieléctricas y mecánicas de la mica se muestra a continuación.

Las hojuelas o escamas de mica en su estado natural no son adecuadas para su uso en sistemas de aislamiento. Cuando se combinan con resinas y materiales de soporte le consigue una estructura aislante con propiedades dieléctricas y mecánicas excepcionales. Uno de los primeros sistemas aislantes de mica fue desarrollado en 1983 por Jefferson y Dyer en el cual diminutos trozos de mica eran acomodados en capas y después aglutinados y prensados bajo calor formando hojas [55][56]. Aquel producto de mica “apilada” fue conocido como Micanita y fue extensivamente usado como aislamiento de conmutadores, devanados de transformadores y en equipos para calefacción donde además se requería un aislamiento flexible. En la medida que las hojas de Micanita se hicieron más grandes hubo problemas para mantener la mica en su lugar. Como contribución a la solución de este problema, Emil Haefely propuso adherir los trozos de mica con resina goma laca a una hoja de papel y consolidar la estructura bajo presión. Posteriormente este método de procesamiento de la mica sería conocido como sistema Micafolium. Sin embargo, fue el colega de Haefely, Alber Borer, quién en 1903 consolidó el papel de mica mediante un proceso de calandrado consiguiendo secciones de papel más grandes [4]. Los sistemas de asfalto-micafolium estuvieron disponibles en 1915 convirtiéndose en el sistema de aislamiento más avanzado para la época. Una

descripción más detallada del proceso de fabricación del sistema Micafolium puede encontrarse en la referencia [57].

Durante la Segunda Guerra Mundial, los métodos de procesamiento de la mica tuvieron un desarrollo significativo. El químico Jacques Bardet descubrió después de un “error experimental” la forma para procesar hojas de mica continuas a partir de pequeñas plaquetas adheridas entre sí. El objetivo inicial de Bardet era producir polvo de mica moscovita por medio de un proceso termomecánico. Luego de lavar, filtrar y secar la mica no encontró polvo sino en cambio una hoja coherente de mica aunque con una débil cohesión. Las propiedades mecánicas y dieléctricas del papel de mica así obtenido son más bajas que las de la mica en su forma natural, sin embargo, combinándolos con agentes de unión adecuados permite tener productos de papel de mica superiores. Por ejemplo, una pequeña cantidad de una resina de formaldehído de melanina en una dispersión coloidal ácida proporciona a la estructura suficiente rigidez para su procesamiento al mismo tiempo que mejora su resistencia a la humedad [55]. El impacto del papel de mica en la industria del aislamiento eléctrico fue tal que entre industrias francesas y suizas trabajando en cooperación produjeron en 1947 (tras el registro de la patente en 1944) 30 toneladas de material y la producción aumentó a 950 toneladas para el siguiente año [4]. El desarrollo del papel de mica se produjo en un momento en que la mica de tamaño apropiado comenzó a escasear incrementando su costo. Paralelamente se llevaron a cabo una serie de estudios experimentales para producir mica artificial y reducir la dependencia de las fuentes naturales de mica de otros países. Producir papel de mica a partir de recortes o desechos de mica también resultaba más económico que la producción de productos de hojuelas de mica. Técnicamente, las propiedades del papel de mica dependen de la fuente de la mica y del proceso de producción. La mica como mineral es inerte, tiene una alta estabilidad química y térmica, tiene una alta resistencia a la radiación lo cual es bastante importante ya que determina su resistencia al ataque de descargas parciales. Al caracterizarse por ser altamente exfoliable su estructura cristalina puede dividirse en láminas extremadamente delgadas, ásperas y flexibles. Su alta rigidez dieléctrica se obtiene entonces perpendicularmente al plano de exfoliación.

La moscovita y flogopita son los dos tipos de minerales de mica más utilizados en la fabricación de sistemas de aislamiento. Entre ellos dos, la moscovita, es comúnmente conocida como mica blanca (debido a su color) y es preferida debido a su mayor resistencia eléctrica. Desde el punto de vista químico la mica moscovita y flogopita tiene la composición  $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$  y  $\text{KMg}_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ .

Como se observarse la diferencia principal entre ellas es la sustitución del aluminio en la moscovita por magnesio en la flogopita lo que se traduce en propiedades fisicoquímicas bien definidas para cada una de ellas. Una pared de aislamiento de apenas algunos milímetros no hubiese sido posible sin la rigidez dieléctrica proporcionada por las ultra delgadas láminas de mica. Esta extraordinaria característica de exfoliación se debe a su estructura fundamental compuesta de capas de distintos elementos coordinados poliédricamente formado una estructura de sándwich y donde continuos “sándwiches” son unidos organizadamente entre sí por iones de potasio. La estructura fundamental de la flogopita está compuesta por una capa de brucita entre dos capas de silicatos de aluminio. La brucita o hidróxido de magnesio  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  es un mineral de magnesio octaédricamente coordinado (O) a los iones OH formando capas coplanares. Ambos lados de la capa de brucita se une a una capa tetraédricamente coordinada (T) de silicio donde un cuarto de los tetraedros de silicio se reemplazan por aluminio. Los tetraedros se unen a los vértices de la brucita formando anillos de seis tetraedros. En los



vértices donde se unen los tetraedros y octaedros existe un átomo de oxígeno, mientras que los otros vértices siguen siendo grupos OH. La estructura resultante no es eléctricamente neutra. Iones de potasio con una carga positiva de +1 se unen a los átomos de aluminio para equilibrar la carga eléctrica. En el caso de la moscovita, dos tercios de los octaedros de magnesio que forman la brucita se reemplazan por octaedros de aluminio. Infinitas estructuras fundamentales -TOT- se apilan una sobre la otra gracias a las fuerzas electrostáticas existentes entre los iones de potasio y capas tetraédricas exteriores. La fuerza electrostática que une las unidades -TOT- es débil convirtiendo la capa de potasio en el plano de exfoliación de la mica como se ilustra en la Figura 10. La estructura descrita anteriormente es una representación teórica de la mica pura. En los depósitos de mica natural están presentes algunos trazos de impurezas de otros elementos como el hierro, titanio, calcio, etcétera [58].

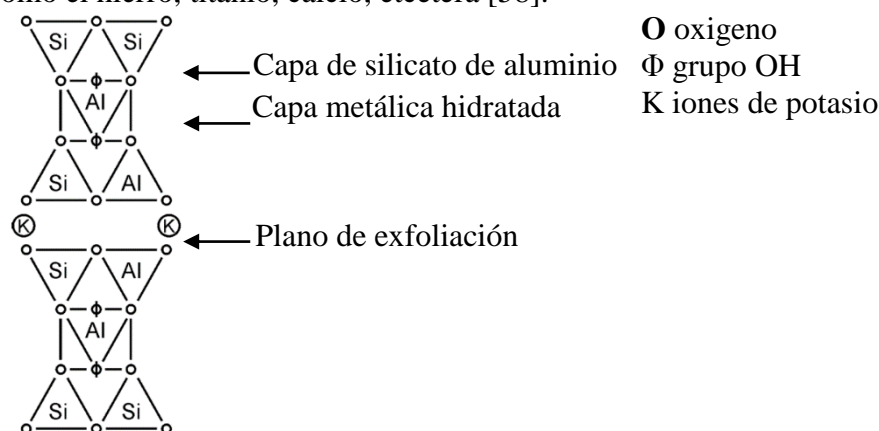


Figura 10. Sección transversal esquemática de la mica moscovita mostrando el plano de exfoliación y los planos octaédricos y tetraédricos.

Con la introducción de los sistemas de aislamiento termoestables el uso de la mica cambió de grandes hojuelas a minúsculas escamas haciendo parte de cintas de papel. El método para la fabricación de papel a partir de recortes o desechos de mica moscovita y flogopita, o papel mica reconstituida como a menudo se conoce, en sus aspectos básicos se puede dividir en tres etapas: reducción del tamaño de las hojuelas de mica, suspensión de las partículas resultantes en agua y procesamiento de las partículas en suspensión en una manera similar a la utilizada en la fabricación de papel de pulpa de madera. Varios métodos se diferencian en la forma en la que se exfolia la mica en bruto. En procesos termomecánicos los recortes de mica se calcinan y se mezclan con sustancias químicas para expandirlas y finalmente se introducen en una trituradora de alta turbulencia. En procesos termoquímicos el método es similar al termomecánico con la diferencia que la desintegración es por medio de un proceso de enfriado rápido en agua. Un tercer método es por procesos hidromecánicos en el que se exfolia la mica por medio de chorros de agua. Los tres métodos se pueden aplicar para el procesamiento de papel de mica moscovita pero el papel de mica flogopita sólo se procesa a través de procesos hidromecánicos. Una distinción importante resulta de acuerdo con el método de exfoliación: en los procesos térmicos se produce el papel de mica calcinada y mientras que en el proceso hidromecánico se produce el papel de mica sin calcinar. El tamaño y disposición de las escamas de mica en el papel de mica también afectan las propiedades finales de cintas de papel de mica. El papel de mica calcinada está formado por hojuelas de mica más pequeñas lo que le confiere alta resistencia a la tracción, alta rigidez dieléctrica y de media a baja porosidad. Por su parte el papel de mica no calcinada se forma con hojuelas de mayor tamaño resultando en papeles de menores propiedades pero de mayor porosidad lo que las hace

óptimas para su uso en sistemas VPI [4]. En los sistemas Resin Rich donde es importante garantizar que la resina no se drene por fuera de las cintas durante el almacenamiento y tampoco durante su manipulación, se suele emplear cintas de mica calcinada. Con respecto a su apariencia visual, el papel de mica calcinada es opaco y el de mica no calcinada es brillante y tiende a desprender más polvo de mica [59].

El desempeño del sistema de aislamiento principal basado en papel de mica calcinada y no calcinada es bastante similar al menos en lo que se refiere a las pérdidas dieléctricas y a la resistencia a las descargas parciales. En cuando al voltaje de ruptura dieléctrica si parecieran existir algunas diferencias como se menciona en [59]. Resultados experimentales mostraron que la rigidez dieléctrica del papel de mica calcinada es aproximadamente 30% mayor que el de papel de mica no calcinada. Mediciones en barras de prueba reales con una pared de aislamiento de 1mm procesadas mediante VPI y Resin Rich, arrojaron que la mayor rigidez dieléctrica se obtuvo en las barras de prueba cuyo aislamiento era de cintas de mica moscovita calcinada procesado mediante VPI. La menor rigidez dieléctrica fue para los aislamientos Resin Rich de cintas de mica moscovita no calcinada. La mayor rigidez de las cintas de papel de mica calcinada posiblemente se debe a que están formada por hojuelas más delgadas arreglas de tal forma que se obtiene una estructura más homogénea.

### 3 ENVEJECIMIENTO DEL AISLAMIENTO PRINCIPAL

Este capítulo se encargará de poner en contexto las causas y efectos del envejecimiento en los sistemas de aislamiento. La dificultad de esta cuestión es que es un campo extenso; innumerables factores pueden producir degradación, así como también uno solo de ellos puede desencadenar una multiplicidad de efectos en el aislamiento. Resulta entonces lógico que esta sección sin riesgo de perder rigurosidad trate el problema del envejecimiento desde una perspectiva sistémica. Se discutirán los esfuerzos de operación y posteriormente, entrando más en detalle, se revisarán los efectos de estos esfuerzos en el aislamiento. Se presentará como los esfuerzos de operación a las condiciones externas adversas que el sistema de aislamiento debe resistir y como mecanismos de degradación a aquellos procesos o defectos que reducen sus propiedades y que a su vez son causados por los esfuerzos de operación. Otra variable que hace compleja la revisión del tema es que los esfuerzos de operación tienen un carácter sinérgico por lo tanto es difícil aislar completamente la causa de un mecanismo de degradación en particular. En adelante se utilizarán los términos envejecimiento, deterioro y degradación indistintamente para hacer referencia a la pérdida de las propiedades del aislamiento cualquiera que sea su causa, a pesar de que algunos autores señalen que estos términos no significan lo mismo [60].

#### 3.1 ESFUERZOS DE OPERACIÓN

Durante la operación de las máquinas rotativas de alto voltaje el aislamiento principal del estator es sometido a esfuerzos térmicos, eléctricos, ambientales y mecánicos. En la literatura es común referirse a estos esfuerzos mediante el uso de su primera letra formando la palabra “TEAM” para enfatizar la naturaleza sinérgica y compleja de los efectos de estos esfuerzos sobre el aislamiento. Incluso en régimen de funcionamiento nominal, estos esfuerzos deterioran las propiedades eléctricas y mecánicas del sistema de aislamiento llevándolo eventualmente a la falla. Cuando los materiales, el proceso de fabricación y el diseño en sí son elegidos correctamente, los sistemas de aislamiento pueden alcanzar una vida útil de aproximadamente de 20 años o más. En otras palabras, la velocidad de la degradación es lenta en condiciones nominales de operación de la máquina pero aumenta vertiginosamente ante problemas de diseño o si los modos de operación elevan los esfuerzos más allá de su límite permitido. Problemas como una irregular impregnación, zonas con acumulación de resina y un volumen elevado de inclusiones gaseosas producto de un deficiente proceso de fabricación reduce apreciablemente el desempeño del sistema de aislamiento aun si la calidad de los materiales empleados es óptima.

Puede afirmarse que el mecanismo de degradación más simple y subsecuente falla del sistema de aislamiento comienza con los inevitables **espacios de aire** sometidos a actividad de descargas parciales durante la operación de la máquina, dejados por el proceso de fabricación (Figura 11a). Hasta cierto punto las descargas parciales en inclusiones gaseosas no suponen un peligro inminente para el funcionamiento de la máquina. El proceso de impregnación no es perfecto así que se espera un pequeño volumen de inclusiones gaseosas en virtualmente todos los sistemas de aislamiento. Si los esfuerzos de operación superan los límites del diseño por un tiempo prolongado, las inclusiones gaseosas presentes comienzan a crecer rápidamente creando puentes entre ellas e incluso se formarán nuevas inclusiones motivadas por la actividad de descargas parciales. Con más descargas parciales, pronto las inclusiones gaseosas se

esparcirán logrando en casos severos el desprendimiento de las capas individuales del aislamiento formando lo que se conoce como **delaminación** (Figura 11b).

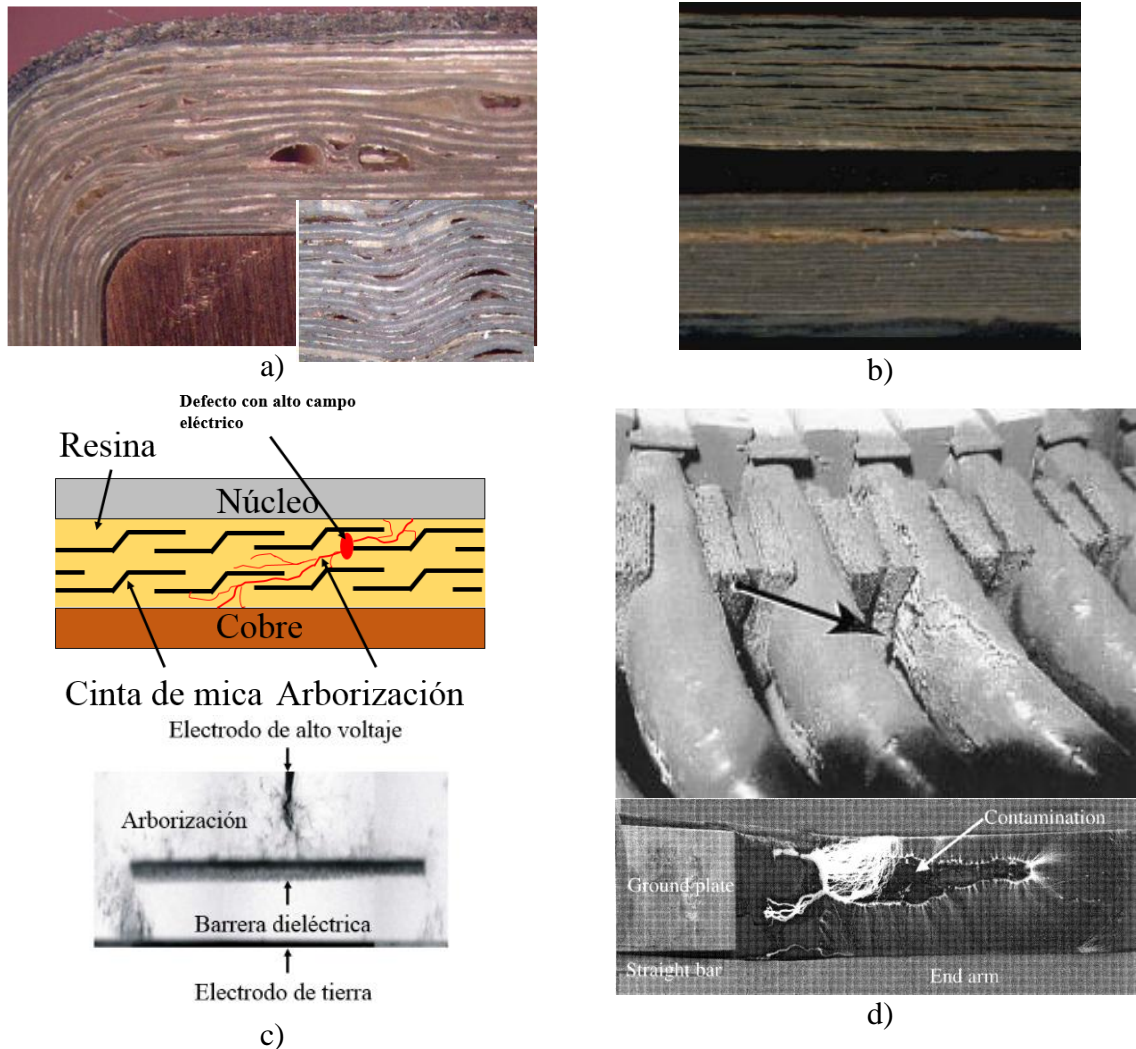


Figura 11. Mecanismos de degradación del aislamiento principal: a) Inclusiones gaseosas. b) Delaminación o separación de las cintas del aislamiento. c) Arborizaciones eléctricas d) “Electrical tracking” o caminos de carbonización.

Las **arborizaciones eléctricas** son otro ejemplo de degradación severa en el aislamiento caracterizados por ser caminos de degradación que se abren paso a través de las capas de aislamiento, hasta cortocircuitar los conductores de cobre con el núcleo a tierra del estator o carcasa. En un arreglo de electrodos punta-plano embebido en resina con una barrera dieléctrica de mica como el de la Figura 11c puede observarse que las descargas parciales originadas en el electrodo de alto voltaje erosionan la resina formando caminos ramificados y bordeando la barrera de mica hasta alcanzar el electrodo de tierra.

El término arborización proviene del aspecto ramificado de los caminos de degradación. Este tipo de defectos se producen por concentraciones de campo eléctrico originadas en el interior del aislamiento por contaminantes metálicos, bordes afilados y puntiagudos de los conductores de cobre, sitios de concentración de resina, inclusiones gaseosas, entre otros. El campo eléctrico intenso en estos puntos incrementa la actividad de

descargas parciales las cuales atacan los componentes del aislamiento, especialmente la resina, posibilitando que las arborizaciones se desplacen a través del aislamiento. Cuando este alto campo eléctrico se presenta en la superficie de las cabezas de bobina las descargas parciales atacan el aislamiento formando **camino de carbonización** (Figura 11d) sobre todo si hay depósitos de contaminación en las cabezas que permitan la circulación de corrientes.

Los mecanismos de degradación desencadenados por los esfuerzos mecánicos (en este contexto vibraciones mecánicas) y ambientales pueden mantenerse en un nivel seguro y en la mayoría de los casos, su impacto sobre el aislamiento puede disminuirse fácilmente mediante mantenimientos programados.

Los problemas relacionados con las vibraciones mecánicas de las bobinas pueden surgir por el aflojamiento de las cuñas que sujetan firmemente las bobinas dentro de las ranuras del estator o por un amarre deficiente de las cabezas de bobina entre sí y contra la estructura de soporte mecánico. Sin embargo, el cambio o reajuste de las cuñas del estator debería ser suficiente para prevenir las vibraciones de las bobinas deteniendo la erosión o abrasión del aislamiento contra el núcleo. Tanto en un estado estable y en condiciones de falla, las bobinas del estator vibran debido a las fuerzas electromagnéticas al doble de la frecuencia industrial y proporcional al cuadrado de la corriente de carga. Durante fallas en el sistema de potencia, por ejemplo un cortocircuito franco, el devanado del estator se somete a una gran corriente transitoria pudiendo superar la corriente nominal de 4 a 15 veces. Las fuerzas electrodinámicas que actúan sobre los conductores aumentan en proporción al cuadrado de la corriente de falla, de manera que las fuerzas mecánicas ejercidas sobre las bobinas durante un cortocircuito franco pueden ser 16 a 225 veces superiores que en funcionamiento normal [61]. La vibración de las bobinas en las ranuras ha sido durante mucho tiempo un problema para la vida útil de las máquinas sobre todo en estatores no VPI con sistemas de aislamiento termoestables. El desgaste mecánico causado por la vibración inicia por la capa semiconductor y continua con el aislamiento principal. Como resultado se producen descargas parciales conocidas como **descargas de ranura** entre la superficie de la bobina desgastada y el núcleo del estator, lo que aumenta aún más la tasa de deterioro.

Los cambios rápidos de la corriente del estator producen al mismo tiempo un rápido aumento de la temperatura de operación y en consecuencia esfuerzos cortantes en las interfaces cobre/aislamiento y aislamiento/aislamiento y esfuerzos de tracción en el volumen del aislamiento. Los esfuerzos mecánicos aparecen por las diferencias en los coeficientes de expansión térmica entre el cobre y el aislamiento, que pueden llegar a variar en un factor de 10. Algunos valores para estos coeficientes se reportan en [62]–[64]. La delaminación del aislamiento ocurre cuando los esfuerzos contantes exceden la fuerza de adhesión de las capas del aislamiento. La vibración de las bobinas en las ranuras en ciertos tipos de estatores puede desencadenar otro mecanismo de degradación conocido como “**vibration sparking**” o descargas por vibración. Si la capa semiconductor tiene la suficiente conductividad el campo magnético de la máquina hará fluir una corriente a través del bucle formado por la capa semiconductor, las laminaciones de acero de núcleo y las estructuras metálicas que apilan el núcleo. Cuando la vibración de la bobina hace que la capa semiconductor pierda contacto con el núcleo, la corriente se interrumpe y se crea un arco eléctrico o descarga parcial en el punto de pérdida de contacto. Este mecanismo de degradación erosiona peligrosamente la capa semiconductor y luego el aislamiento, lo que puede conducir a una falla en poco tiempo, alrededor de 5 a 10 años [65].

Los esfuerzos ambientales son comúnmente relacionados con la contaminación del devanado por agua, aceite de rodamientos, partículas provenientes de los sistemas de

ventilación, productos químicos y otras sustancias conductoras. Una capa conductiva de contaminación sobre las cabezas de bobina puede dar lugar a descargas parciales superficiales y circulación de corrientes de fuga que en casos severos carbonizan los separadores y amarras de las cabezas de bobina. El ataque de la contaminación ambiental no sólo está limitado a la superficie sino también al volumen interno del aislamiento. Dependiendo de los componentes del sistema de aislamiento, la absorción de agua podría ser un problema importante. Por ejemplo, los sistemas de aislamiento termoplásticos son más propensos a la absorción de agua que los sistemas termoformados lo que los hace más propensos a la degradación por reacciones de hidrólisis. El efecto de las reacciones de hidrólisis en las películas de PET es la escisión aleatoria de las cadenas polimérica que conduce a una rápida disminución de su peso molecular [66]. El ataque químico finalmente provoca ruptura de los enlaces químicos, hinchamiento de la estructura y pérdida de la adhesión de las interfaces del aislamiento. Igualmente aumentan las pérdidas dieléctricas debido a que las moléculas de agua son altamente polares. En ciertas aplicaciones como en los generadores de plantas nucleares, el ataque de la radiación puede afectar fuertemente los compuestos orgánicos del aislamiento provocando tanto reacciones de entrecruzamiento como de escisión de cadena. Ambos tipos de reacciones reducen la resistencia a la tracción del aislamiento. Reacciones excesivas de entrecruzamiento pueden transformar el aislamiento en un material muy duro y quebradizo [67].

Tal como se mencionó anteriormente, algunos mecanismos de degradación surgen directamente como consecuencia de un esfuerzo en particular. Sin embargo, teniendo en cuenta el comportamiento sinérgico de los esfuerzos TEAM, uno o más mecanismos de degradación pueden surgir indirectamente a causa del efecto de otros esfuerzos. Por ejemplo, si materiales contaminantes ingresan a la máquina bloqueando los ductos de ventilación la capacidad para disipar las pérdidas eléctricas disminuye drásticamente. En esta situación, el esfuerzo ambiental aumenta los esfuerzos térmicos con el desencadenamiento de mayores mecanismos de degradación. Aunque los esfuerzos ambientales pueden resultar perjudiciales para la vida útil de la máquina es relativamente sencillo mantenerlos controlados mediante un adecuado mantenimiento.

Los esfuerzos térmicos y eléctricos son factores de envejecimiento predominantes y complejos inherentes a la operación misma de la máquina. En conjunto los esfuerzos termoeléctricos reducen las propiedades físicas y químicas del sistema de aislamiento por lo tanto su diseño debe ser cuidadosamente seleccionado con el fin de limitar al máximo la tasa de degradación. La mica y los materiales de soporte de tejidos de vidrio son los componentes más resistentes a los esfuerzos termoeléctricos mientras que la resina y los materiales de soporte poliméricos son más vulnerables.

Algunos investigadores han afirmado que el esfuerzo eléctrico es el más severo para la operación de la máquina puesto que es éste el que finalmente produce la falla dieléctrica del aislamiento. En cambio algunos otros aseguran que la degradación del aislamiento es un problema de envejecimiento térmico de la resina y de esfuerzos mecánicos causados por la vibración de las bobinas y por las diferencias en los coeficientes de expansión térmica de los materiales involucrados [68]. Por su importancia, la siguiente sección se dedicará a revisar más en detalle los mecanismos de degradación experimentados en el sistema de aislamiento por los esfuerzos termoeléctricos.

### 3.2 ENVEJECIMIENTO POR ESFUERZOS ELÉCTRICOS

Las descargas parciales son el principal mecanismo de degradación causada por el esfuerzo eléctrico. Ellas ocurren en zonas o puntos de alto campo eléctrico tales como en cavidades gaseosas en el interior del aislamiento o en zonas sobre su superficie. Las descargas parciales implican la producción y el movimiento a alta velocidad de electrones e iones en un espacio reducido, algunos de ellos con suficiente energía para producir radicales e interacción molecular con la superficie del material que rodea la atmósfera de descarga. La descarga parcial ocurre como una avalancha de carga eléctrica con producción de subproductos y gases reactivos.

La degradación del aislamiento por el ataque de las descargas parciales puede clasificarse en dos categorías: debida al bombardeo de iones y electrones y debida a las reacciones químicas que desencadenan. La degradación de la superficie de la mica es un claro ejemplo de degradación por bombardeo iónico. A su vez, la avalancha de electrones actúa como una fuente de calor que activa reacciones químicas de degradación en los materiales poliméricos del aislamiento. El mecanismo de bombardeo de iones es un proceso bastante complejo en el que la colisión entre un electrón y una superficie molecular dependerá de la estructura y el estado energético de las especies impactadas y de la energía de los electrones. Algunas de las posibles formas de interacción/colisión son [69]:

- Un electrón transfiere parte de su energía cinética a las moléculas, sin unirse a ella. La molécula excitada puede emitir un fotón o chocar con otra molécula y el electrón continuo su trayectoria con una velocidad más baja.
- Un electrón choca con una molécula y se une a ella.
- Un electrón con suficiente energía colisiona con una molécula y extrae un electrón de ella. La molécula se convierte en especie iónica (con carga positiva) y ahora hay dos electrones capaces de colisionar con otras especies moleculares.
- Un electrón se une a una molécula y provoca su división en subespecies cargadas y neutras.

En la medida que se forman especies iónicas por las colisiones anteriores, éstas pueden a su vez colisionar con otros electrones en alguna de las siguientes maneras:

- Un electrón impacta un ion molecular negativo y produce una molécula neutra.
- Un electrón colisiona con un ion molecular negativo y produce una molécula doblemente negativa.
- Un electrón impacta un ion molecular positivo y produce una molécula neutra y cualquier exceso de energía se libera como un fotón.

Los fotones liberados de las colisiones pueden, a su vez, actuar como nuevas fuentes de ionización que dan lugar a una serie de posibles formas de ionización:

- El fotón transfiere su energía a una molécula ionizándola.
- El fotón divide una molécula en subespecies iónicas.
- El fotón divide una molécula en subespecies iónicas y neutras, además de un electrón.
- El fotón divide una molécula en radicales libres que son altamente reactivos.

- El fotón libera un electrón de un ion negativo.
- El fotón libera un electrón de un ion positivo.
- El fotón divide un ion negativo en especies neutras y cargadas.
- El fotón divide un ion positivo en especies neutras y cargadas.

Los múltiples procesos de colisión ionizantes y no ionizantes descritos anteriormente muestran que la disponibilidad de un electrón de inicio no garantiza el proceso de avalancha. Ya que un electrón de inicio puede o no producir una descarga parcial, el proceso de descarga adquiere un comportamiento estocástico. La formación de especies iónicas con cada descarga parcial explica claramente el origen de las reacciones químicas de degradación que experimentan los componentes del aislamiento alrededor de la descarga.

Una reacción química importante que tiene lugar sobre la superficie de la mica es la que se produce entre el ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ), subproducto de las descargas parciales en atmósfera de aire, y el plano de potasio de la mica. El resultado de tal reacción es la formación de sales como el nitrato de potasio ( $\text{KNO}_3$ ) a expensas de la eliminación de los cationes de potasio en la estructura laminar de la mica. Macroscópicamente, el efecto de tales sales es la fractura de la superficie afectada de la mica. En una atmósfera de nitrógeno (mucho menos reactiva), la degradación de la mica se origina por los efectos disociativos del bombardeo de electrones. El daño causado por los electrones que impactan la superficie de la mica es a causa del choque térmico tras la absorción de la energía de los electrones o por la ruptura de enlaces en la estructura de la mica. Los resultados experimentales en [70] indicaron que en atmósfera de nitrógeno las descargas parciales produjeron daños físicos generalizados en la superficie de la mica por el bombardeo de electrones sin evidencia de reacciones químicas. En atmósfera de aire, a causa de la alta reactividad de las especies formadas por las descargas parciales es de esperar reacciones químicas que afecten directa o indirectamente la mica.

La composición química de la mica también juega un papel importante en cuanto a su estabilidad y a la interacción con las descargas parciales se refiere. Por ejemplo, se puede decir que la mica rubí-moscovita tiene una mayor resistencia a las descargas parciales cuando se compara con la flogopita a causa del aluminio  $\text{Al}^{3+}$  en su capa octaédrica que le proporciona seis veces más fuerza de unión a su estructura que el magnesio/hierro  $\text{Mg}^{2+}/\text{Fe}^{2+}$  en la capa octaédrica de la mica ámbar-flogopita. Así mismo existe una mayor adhesión a la capa de potasio  $\text{K}^+$  en la moscovita que en la de flogopita [70]. La resistencia de la adhesión entre las capas estructurales de la mica, y por lo tanto, su estabilidad se puede entender cuando la estructura de la mica se piensa como un sistema de enlaces iónicos bajo tensión, compresión y torsión en el que los átomos están cerca el uno del otro en el límite de repulsión. En consecuencia la estructura ideal laminada de la mica mostrada en la Figura 10 se deforma. La fuerza de repulsión entre cationes es la fuerza que produce más distorsión en las capas octaédricas, condición que crece aún más si todos los sitios de cationes disponibles están ocupados. En términos comparativos la estructura de la moscovita está más distorsionada que la de la flogopita. Las unidades fundamentales de la mica se unen a otras compartiendo carga entre sus átomos de oxígeno y los iones en la capa de potasio. Sin embargo, debido al desplazamiento de silicio en las capas tetraédricas, algunos átomos de oxígeno requieren compartir una carga desigual y así la capa de potasio debe distorsionarse hasta lograr el equilibrio de las fuerzas de Coulomb. En la flogopita, los iones de potasio están más cerca a los protones de las moléculas OH, lo que resulta en una fuerza de repulsión que debilita la fuerza de unión entre las unidades fundamentales de la mica. Cuando el bombardeo de



electrones de la descarga parcial ataca la superficie de la mica se remueven los cationes metálicos de potasio, colapsando el equilibrio entre las fuerzas de Coulomb. Este mismo efecto de colapso es causado por el ácido nítrico subproducto de las descargas parciales. El reordenamiento de los átomos después del colapso produce cambios en la superficie de la mica y esfuerzos mecánicos que son aliviados por el agrietamiento de la superficie (degradación) [71]. La dislocación o remoción de los cationes de potasio los trae más en contacto con las especies reactivas incrementando las probabilidades de reacciones químicas. Esto sugiere entonces un aumento de la concentración de potasio en los sitios de fractura en la mica [70]. La secuencia de imágenes en la Figura 12 muestra la degradación de la mica desde el inicio del agrietamiento de la superficie hasta la formación de “dendritas” de silicio donde el campo electrostático puede concentrarse causando mayor actividad de descargas parciales.

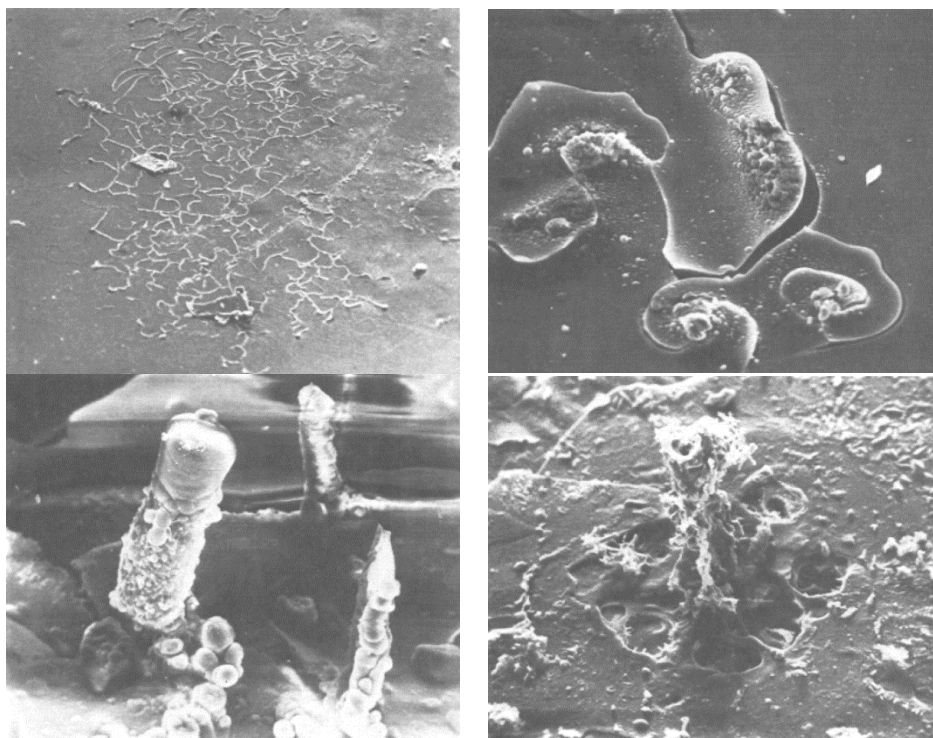


Figura 12. Degradación de la superficie de la mica expuesta a descargas parciales resultando en el colapso de su estructura.

Pese a su degradación, las estructuras de mica son altamente resistentes al ataque de las descargas parciales. La degradación en los materiales poliméricos proviene no solo por el impacto mismo de las partículas cargadas sino también por la energía térmica liberada. La degradación térmica de los polímeros será discutida en la siguiente sección.

Finalmente, desde el punto de vista macroscópico, defectos como los caminos de carbonización representados en Figura 11d son un ejemplo claro y visible del ataque de las descargas parciales sobre el aislamiento. Depósitos de contaminación y humedad sobre las cabezas de bobina proporcionan condiciones ideales para que los esfuerzos eléctricos produzcan este tipo de defectos. En esta escala, la degradación inicia por las corrientes de fuga superficiales. Tras la circulación de estas corrientes la capa de contaminación conductora se calienta de manera no uniforme dejando bandas secas rodeando zonas húmedas. Al cambiar la

humedad y la conductividad superficial se distorsiona la distribución del voltaje sobre la superficie llevando a que altos potenciales eléctricos se establezcan a través de las bandas secas causando descargas parciales en estas zonas. La temperatura del arco eléctrico es suficiente para descomponer el material localmente [72] formando caminos de carbonización ramificados.

En el interior del aislamiento estos caminos de carbonización ramificados toman el nombre de arborizaciones eléctricas. Ellas se originan a partir defectos donde pueda establecerse un alto campo eléctrico. Las subsecuentes descargas parciales comienzan a erosionar el aislamiento y a avanzar a través de él formando ramificaciones con una relativa baja conductividad. Eventualmente estos finos canales alcanzarán el núcleo aterrizado del estator. A partir de este momento la conductividad comienza a crecer a causa de la actividad sostenida de descargas parciales hasta que es tan alta que una gran corriente de falla comenzará a fluir. Este tipo de defectos son los más perjudiciales e implican un riesgo inminente de falla para la máquina. Por su importancia muchos intentos se han llevado a cabo para detectar y establecer el crecimiento de las arborizaciones eléctricas por medio de mediciones de descargas parciales que puedan ser usadas como método de diagnóstico [74][75].

### **3.3 ENVEJECIMIENTO POR ESFUERZOS TÉRMICOS**

En el sistema de aislamiento se producirán diversas reacciones químicas dada la aplicación de suficiente energía térmica. Las fuentes de calor son múltiples. A nivel macroscópico la principal fuente de energía térmica proviene del efecto Joule en los conductores. A nivel microscópico la energía térmica es suministrada localmente por la actividad de descargas parciales, por la reestructuración de enlaces químicos incluso por la energía inyectada en el sistema por vibraciones mecánicas. La energía térmica inyectada en las inclusiones gaseosas por la descarga parcial proviene del impacto de partículas las cuales transfieren su energía cinética al material impactado y por la absorción de energía de fotones liberados en el proceso de descarga. El incremento de la temperatura del gas será máxima en la vecindad del canal de descarga y en la superficie impactada del aislamiento [75]. En [80] se afirma que, a pesar del aumento de la temperatura local debido a una descarga parcial, esta es generalmente insuficiente para la descomposición térmica de la resina, pero suficiente para producir reacciones termo oxidativas. Las pérdidas eléctricas se disipan en forma de calor y aumentan la temperatura global de toda la máquina. Si existen problemas en el sistema de refrigeración o de contaminación excesiva en las cabezas de bobina pueden surgir puntos calientes en el aislamiento que contribuyen aún más a la distribución no uniforme de la temperatura. Aunque la estructura completa del sistema de aislamiento sufre degradación a causa de los esfuerzos térmicos, la resina polimérica de impregnación y ciertos materiales de soporte, tales como películas de PET, son bastante propensas a la degradación térmica en los rangos de la temperatura de operación de la máquina. En este rango, sin embargo, no se espera que la mica experimente degradación térmica, aunque si podría reaccionar con los subproductos de las descargas parciales como se indicó anteriormente. Las macromoléculas orgánicas de los materiales poliméricos formadas principalmente por carbón, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno son estables hasta un cierto rango de temperatura. Superado este límite las moléculas orgánicas se descomponen en sus monómeros u otros subproductos como los radicales libres, iones, H<sub>2</sub>, CO, etc a través de alguna o varias de las siguientes posibles reacciones:

**Reacciones de degradación térmica.** Son reacciones de descomposición que ocurren cuando la energía aportada por los esfuerzos térmicos es mayor que la energía de disociación de los enlaces atómicos. Naturalmente la energía de disociación de los enlaces del polímero requiere temperaturas muy por encima de la temperatura de operación de la máquina. De acuerdo con [76], la degradación térmica produce despolimerización y escisión aleatoria de las cadenas poliméricas. Ambas reacciones degradan el polímero a un material de bajo peso molecular. La escisión aleatoria ocurre como escisiones de cualquier enlace en las cadenas poliméricas, cuyos subproductos de degradación serán una mezcla de grandes y pequeñas moléculas. Una rápida disminución del peso molecular se produce desde el principio de la reacción pero el proceso tiene que llevarse a cabo durante mucho tiempo hasta que las moléculas sean lo suficientemente pequeñas para ser volátiles y poder escapar del polímero. La despolimerización son reacciones de escisión ordenadas partiendo de un extremo de la cadena próximo a radicales libres. Esta reacción puede describirse como un desempaquetamiento o como el proceso contrario a la polimerización, a menudo formando grandes cantidades de monómeros. Con frecuencia estos dos términos se utilizan indistintamente. Las reacciones de escisión de la cadena pueden provocar o conducir a reacciones de despolimerización a partir de extremos radicales, transferencia de radical y desproporción o estabilización de fragmentos, por ejemplo, ciclación de las cadenas. Una tercera reacción de degradación térmica es la ruptura de los grupos laterales del polímero también llamados reacciones sustituyentes. Esto produce fragmentos inestables sometidos a reacciones adicionales, tales como escisión de la cadena y ciclación. Por último, una cuarta reacción posible es la condensación entre cadenas o reticulación entre los fragmentos, originada como una reacción consecutiva de ciclación de grupos laterales acompañada por la disociación de pequeñas moléculas con formación de grandes cantidades de residuos de carbón. Una representación esquemática de las principales reacciones que se producen durante la degradación térmica de los polímeros se muestra en la Figura 13.

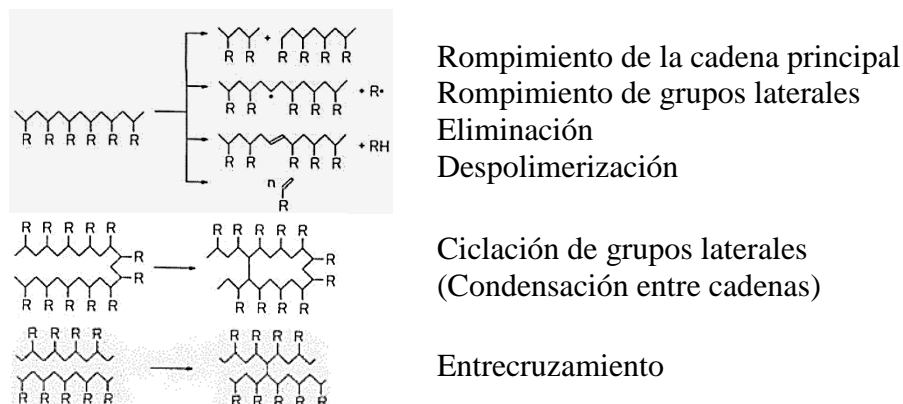


Figura 13. Representación esquemática de las principales reacciones que ocurren durante la degradación térmica en polímeros.

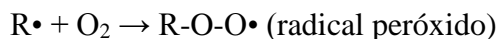
En general, las reacciones antes mencionadas siguen el mecanismo de radicales libres descrito a continuación. La ruptura de enlaces atómicos aleatoriamente, de las cadenas laterales o de los grupos en los extremos de la cadena está acompañada de la formación de radicales libres altamente reactivos (etapa de iniciación). La ruptura de enlaces aleatoriamente se produce en los puntos de insaturación (enlaces dobles de átomos de carbón) y la ruptura de las cadenas laterales en los puntos donde la cadena principal se ramifica. La ruptura en las

reacciones de despolimerización se produce en puntos débiles en la cadena principal donde pueden existir impurezas como catalizadores o disolventes incorporados en la cadena principal durante el proceso de polimerización o en irregularidades de la estructura como consecuencia de un tratamiento físico o químico. Estos puntos débiles se encuentran a menudo en los extremos de la cadena [77]. La formación de radicales libres no está limitada a las reacciones térmicas, sino que también pueden originarse por las descargas parciales a través del bombardeo de iones, electrones y fotones [78], por radiación de alta energía, radiación UV, esfuerzos mecánicos y algunas impurezas. Las especies radicales formadas reaccionan entre ellas y con la estructura principal polimérica en un proceso de polimerización inversa y en un proceso de transferencia en el que los radicales se unen a otros radicales, ambos procesos produciendo nuevos radicales (etapa de propagación). Finalmente la reacción se termina por reacciones de reticulación del polímero o de recombinación (etapa de terminación).

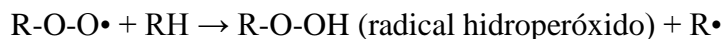
**Reacciones termo-oxidativas.** Las reacciones de oxidación tienen lugar tras un aumento de la temperatura de servicio y/o por la actividad de descargas parciales. Contrario a las reacciones de descomposición térmica, las reacciones de oxidación en condiciones favorables ocurren en un rango de temperatura más bajo. Tanto la mica como la resina sufren deterioro de sus propiedades como resultado de las reacciones de termo-oxidación. El oxígeno necesario para estas reacciones es suministrado por el propio medio ambiente, por el gas en el interior de los defectos del aislamiento (inclusiones gaseosas) y como subproducto de las descargas parciales las cuales producen oxígeno altamente reactivo y ozono. La absorción y difusión del oxígeno a través del aislamiento es una función de la temperatura y de la estructura y reticulación de la matriz de polímero. Las regiones amorfas de los polímeros son bastante propensas a la absorción de oxígeno de modo que puedan experimentar reacciones de oxidación fácilmente. Al igual que en las reacciones de degradación térmica, las reacciones termo-oxidativas siguen un mecanismo de radicales libres siendo la etapa de iniciación igual para ambos procesos. Las etapas de propagación y terminación relacionadas con las reacciones de degradación del polímero se describen en la literatura de la siguiente manera.



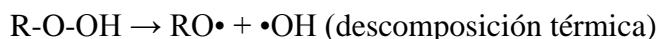
La energía térmica o de radiación proveniente de las descargas parciales ataca las cadenas del polímero formando radicales libres (etapa de iniciación)



Los radicales reaccionan con el oxígeno formando radicales peróxido



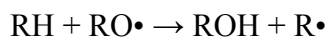
capaces de extraer un hidrogeno de otras cadenas poliméricas así formando otro radical y convirtiéndose en un hidroperóxido



Los hidroperóxidos son inestables y por lo que se descomponen en radicales alcoxil (RO•) e hidroxilo (•OH).



Los radicales (RO•) substraen átomos de hidrogeno de las cadenas poliméricas formando nuevos radicales y produciendo escisión, entrecruzamiento y ramificación de la cadena.



Reacciones entre los radicales alcoxi y el polímero resulta en grupos hidroxilo unidos a las cadenas poliméricas [79].

Las reacciones de terminación se producen cuando varios tipos de radicales se recombinan formando productos inertes y limitando la concentración de hidroperóxido a un valor estable, así como también debido a reacciones con antioxidantes [80]. El proceso por el cual pequeños defectos sometidos a descargas parciales crecen hasta formar arborizaciones eléctricas se puede explicar por medio de reacciones de escisión de la cadena repetitivas derivadas de las reacciones de auto-oxidación. Un hecho que favorece la inyección de arborizaciones eléctricas en el aislamiento es la baja energía de activación de las reacciones de auto-oxidación. En la Figura 14 se muestra el proceso de escisión de cadena por del polietileno por reacciones de auto-oxidación que conduce a la inyección de arborizaciones eléctricas. Vale la pena mencionar que estas arborizaciones eléctricas pueden surgir a partir de la formación de cavidades gaseosas donde se producen descargas parciales como en el caso de los sistemas de aislamiento de máquinas rotativas o sin presencia de descargas parciales como en el caso del aislamiento polimérico de cables de alto voltaje.

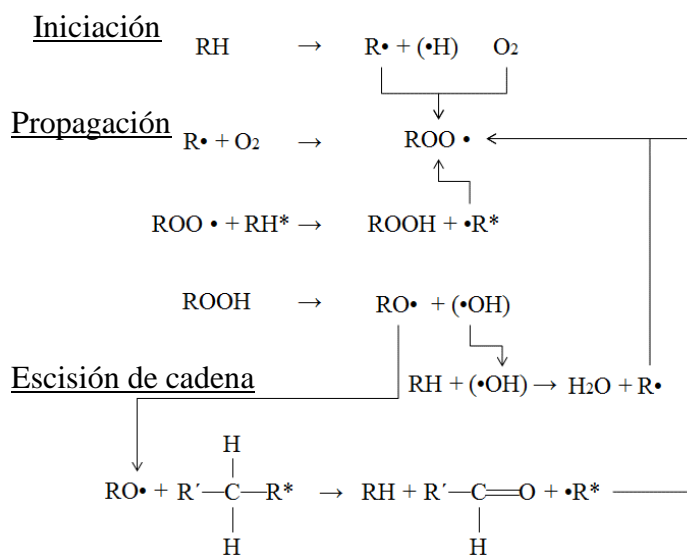


Figura 14. Reacción de auto-oxidación del polietileno que da lugar a escisión de cadena formando micro cavidades.

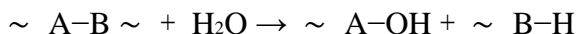
La baja energía de activación y la reactividad de las reacciones de oxidación permiten inferir que las máquinas rotativas refrigeradas por aire son más propensas a la formación de defectos como las arborizaciones debido a una mayor disponibilidad de oxígeno. De hecho, la disponibilidad de oxígeno juega un papel fundamental en los mecanismos de degradación tanto en máquinas refrigeradas por hidrógeno y por aire. En una atmósfera de descarga de aire, 10 ppm de oxígeno parece ser el umbral crítico para la iniciación de arborizaciones eléctricas [81].

En la mica, las reacciones de degradación térmica y de oxidación se producen a temperaturas en el orden de cientos de grados centígrados como se reportó en la referencia [82], donde se sometieron grados de mica moscovita rubí y de flogopita ámbar a esfuerzos térmicos. Los resultados arrojaron que la mica en ambos grados solo sufrió metamorfosis

mineralógica permanente (delaminación de su estructura) por encima de 700°C. Las reacciones de oxidación originadas entre la mica caliente y la atmósfera produjeron fragilidad de la capa superficial de la mica y delaminación. Los autores concluyeron que en condiciones de descarga, los cambios cristalográficos en la estructura de la mica no son resultado directo de degradación térmica. En lugar de ello, concluyeron en un artículo relacionando que la degradación de la mica es debido a las reacciones con subproductos formados por la actividad de descargas parciales que a su vez dependen de la composición de la atmósfera de descarga [82].

**Reacciones de hidrólisis.** La hidrólisis es la reacción química del agua con el material aislante. Los materiales utilizados en los sistemas de aislamiento siempre absorben agua del medio ambiente. La cantidad de agua absorbida depende de la humedad del aire circundante y de la estructura del material. Las moléculas de agua también pueden estar disponibles luego de la reacción de los grupos OH con los sustratos poliméricos. Químicamente, la hidrólisis es una reacción de iones, causada por iones de hidrógenos H<sup>+</sup> en condiciones neutras o ácidas. Estas reacciones atacan principalmente los enlaces éster R-COO-R' en los polímeros obtenidos por condensación como las resinas de poliéster, de poliamida y de poliimida. Aunque el rompimiento de los enlaces éster también se presenta en las resinas epóxicas, esto tiene poco efecto sobre sus propiedades. Las reacciones de hidrólisis producen ácidos y bases dentro del aislamiento que actúan como catalizadores de la reacción.

Esquemáticamente la reacción de la resina epóxica con moléculas de agua puede describirse como



donde A y B son grupos químicos en la cadena principal epóxica. La absorción de agua adicionalmente conduce a la escisión de las cadenas del polímero. A medida que avanza las reacciones de hidrólisis, el número de sitios reactivos aumenta, y con esto la probabilidad de que las cadenas entrecruzadas sean cortadas en dos o más partes, facilitando la separación y posterior "lixiviación" de los segmentos separados, lo que conduce a una pérdida de masa [83]. En [84] el autor concluyó que las reacciones de hidrólisis en las resinas epóxicas producen ácido nítrico que a su vez ataca la capa de potasio de la mica en un proceso de degradación que conduce a la delaminación de mica. La condición física del polímero juega un papel importante en el proceso de sorción y difusión de las moléculas de agua. En este contexto, si el devanado de la máquina está en óptimas condiciones el ingreso de agua es mínimo o inexistente. Si por el contrario existen grietas en el devanado, el ingreso de humedad y por lo tanto las reacciones de hidrolisis podrían intensificarse significativamente [85].

En [86] se revisan los cambios físicos en polímeros epóxicos debido a la absorción de agua. Se señala que el número de grupos hidroxilos y la temperatura de transición vítrea influyen la absorción de agua y que el equilibrio de absorción de humedad puede estar en el intervalo de 1-7%. En la resina, las moléculas de agua absorbidas pueden llenar los intersticios o el micro volumen libre en la matriz o encontrarse como agua fuertemente ligada a sitios polares que normalmente corresponden a lugares donde existen grupos hidroxilo. La ubicación de las moléculas de agua dentro de la estructura del polímero afecta sus propiedades físicas. Por ejemplo, el agua en el volumen libre no causa hinchamiento del polímero mientras que el agua ligada si lo hace. La plastificación de la resina es otro efecto del agua ligada lo que a su vez puede disminuir severamente su temperatura de transición vítrea. La magnitud de esta reducción está en el orden de 20°C/1% de ingreso de humedad. Con la plastificación de la

resina también ocurre una disminución en el módulo de elasticidad. La propagación de las moléculas de agua desplaza las moléculas del polímero reduciendo los enlaces secundarios cadena-cadena (debilitamiento del entrecruzamiento) y proporcionando mayor espacio para que las moléculas del polímero se muevan con mayor libertad. Así el polímero se hace más suave y fácilmente deformable. El agrietamiento de las resinas epóxicas es otra consecuencia de la reducción del módulo de elasticidad que conduce a disminuir su resistencia mecánica.

Cuando se considera el rendimiento global del sistema de aislamiento, todos los parámetros dieléctricos claramente empeoraron con un ingreso de agua superior a 0.4%. Con este nivel de absorción de agua la resistividad disminuye en siete órdenes de magnitud al mismo tiempo que aumentan los diferentes mecanismos de polarización responsables del incremento en el factor de disipación según se reporta en [87]. Si en el devanado existen clústeres de moléculas de agua, estas podrían hervir con el incremento de las pérdidas eléctricas destruyendo localmente la estructura del aislamiento. La alta permitividad relativa del agua (aproximadamente 80 y aún más a baja frecuencia) fortalece el campo eléctrico de los materiales circundantes [88] incrementando la probabilidad de que se produzcan descarga parciales.

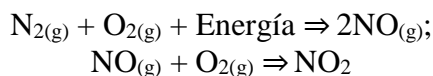
### 3.4 SUBPRODUCTOS DE DEGRADACIÓN DEL ENVEJECIMIENTO TERMOELÉCTRICO

Las reacciones químicas que tienen lugar bajo el ataque de las descargas parciales producen especies químicamente activadas y subproductos de descomposición de los materiales aislantes sometidos a dichas reacciones químicas. La composición del gas de la atmósfera de descarga influye fuertemente en las especies reactivas y los subproductos formados. En máquinas refrigeradas por aire, la composición de la atmósfera es una mezcla de varios gases, cuyos principales componentes son el nitrógeno y el oxígeno con una menor concentración de argón, vapor de agua y óxidos de carbono. Por lo tanto, la composición más probable de iones y especies moleculares formadas por las descargas parciales en esta atmósfera son combinaciones de nitrógeno, oxígeno, óxidos de carbono e hidrógeno. Mediciones experimentales con descargas tipo corana [89] arrojaron diferentes tipos de especies reactivas dependiendo de la polaridad de la descarga. Por lo tanto las descargas de corriente alterna formarán las especies propias de cada polaridad además de nuevas especies formadas por la interacción entre ellas. Cualquier molécula de agua presente en la atmósfera de descarga y no disociada por la descarga parcial es atraída y ligada a estas especies cargadas debido a su naturaleza polar. Las especies formadas por cada polaridad del electrodo de alta tensión pueden ser muy diferentes, como se muestra en la Tabla 1, algunos de ellas con grupos (H<sub>2</sub>O)<sub>n</sub> ligados (especies hidratadas).

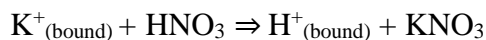
Descarga con electrodo negativo	Descarga con electrodo positivo	Descarga con electrodo positivo Especies hidratadas
$CO_2^-$	$O^+$	$H^+$
$CO_3^-$	$O_2^+$	$N^+$
$O_2^-$	$N^+$	$NO^+$
$O_3^-$	$NO^+$	$N_2^+NO$
$NO_3^-$		$NO_2^+$
		$NO^+NO$

Tabla 1. Especies iónicas formadas por descargas parciales de polaridad negativa y positiva.

La alta electronegatividad del oxígeno en las moléculas de agua conduce a una aglomeración molecular y a la formación de agrupaciones de gran masa, incluso en ausencia de la atracción adicional producida por la ionización de las descargas parciales [75]. Las especies reactivas de oxígeno y los óxidos de nitrógeno listadas más arriba son de mayor importancia en los mecanismos de degradación debidos a la acción de las descargas parciales. El ozono (O<sub>3</sub>) es un fuerte agente oxidante que reacciona con dobles enlaces de carbón como aquellos en los anillos aromáticos de la estructura de la resina. Los óxidos de nitrógeno son conocidos por reaccionar con el aire de la atmósfera para formar ácido nítrico, que degrada fuertemente los materiales aislantes orgánicos y ataca las capas de potasio de la mica. Estas reacciones pueden esquematizarse como [70][71]:



El ácido nítrico así formado reacciona con la mica para formar nitrato de potasio a través de la siguiente reacción



Algunos autores han reportado que otros gases pueden resultar del proceso de degradación por descargas parciales, entre ellos las especies de C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, CH<sub>4</sub>, and H<sub>2</sub>, aunque para compuestos orgánicos comunes como los epóxicos y poliéster, los gases CO y CO<sub>2</sub> representan el 90% de los gases formados [90]. Otros autores han encontrado subproductos de composición similares producto de las reacciones de oxidación térmica del poliéster y otras películas [91].

### 3.5 EFECTOS DEL ENVEJECIMIENTO TERMOELÉCTRICO EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL AISLAMIENTO

En una condición avanzada las reacciones de degradación anteriormente descritas se manifiestan como cambios en las propiedades físicas del sistema de aislamiento. Tradicionalmente los ingenieros de pruebas han estado más familiarizados con la evaluación de los cambios en la condición física de los devanados que con el estudio de reacciones químicas a nivel molecular. Muchos de estos cambios físicos son fácilmente asociados con cambios en los comportamientos característicos de los parámetros dieléctricos del aislamiento. Por ejemplo, sólo por mencionar el caso más simple, es bien aceptado que si un devanado ha estado en servicio con una temperatura superior a la temperatura nominal por un tiempo prolongado aumenta drásticamente su resistencia de aislamiento lo cual puede asociarse con la cristalización del material. Característica que lo torna duro y frágil.

Esta sección tiene como objetivo relacionar las reacciones de degradación fisicoquímica con los cambios físicos (más tangibles y comunes para los ingenieros no químicos) en el sistema de aislamiento tales como fusión, de ablandamiento, volatilización, endurecimiento y agrietamiento producto de las reacciones químicas de degradación.

**Fusión.** Este es un cambio físico que define la transición de sólido a líquido por incremento de la temperatura que conduce a la alteración permanente de la forma del aislamiento siempre que se mantenga bajo esfuerzo mecánico. Los sistemas de aislamiento termoestables realmente no se funden debido a la estructura reticulada de la resina que mantiene unidos todos los



componentes del aislamiento. En lugar de ello, sufren de ablandamiento a alta temperatura. Aunque las resinas termoestables no se funden, los sitios sometidos a reacciones de degradación durante un tiempo prolongado por ejemplo, ataques de descargas parciales, pueden despolimerizarse hasta transformarse en materiales de bajo peso molecular que de hecho sí se funden [92]. La fusión es una característica encontrada con mayor frecuencia en los antiguos aislamientos asfálticos de naturaleza termoplástica. En sistemas termoestables, un proceso similar a la fusión ocurre en última instancia como consecuencia de grandes corrientes de falla que aumentan localmente la temperatura hasta varios cientos de grados centígrados. En tal caso, los conductores de cobre, el núcleo del estator y el aislamiento se funden. Por lo tanto, la fusión no es propiamente un mecanismo de degradación del aislamiento, sino la consecuencia de una falla.

**Reblandecimiento/Ablandamiento.** Los sistemas de aislamiento termoestables modernos son considerados sistemas rígidos mecánicamente debido a que esta es su condición final después del curado de la resina. Sin embargo, pueden tornarse más suaves o blandos a temperaturas elevadas. Esto significa que no se funden, pero si experimentan una fuerte transición de un material rígido con un alto módulo elástico a un material blando con un bajo módulo elástico a altas temperaturas. Conceptualmente, una resina blanda es el resultado de una mayor movilidad permitida por un bajo grado de reticulación entre las cadenas. El reblandecimiento no ocurre a una temperatura específica sino a lo largo de un rango de temperaturas determinado por la química de la resina. Las resinas epóxicas aromáticas son generalmente más blandas que las epóxicas alifáticas debido a que se componen de grupos epoxi que producen un menor número de reticulaciones entre las cadenas moleculares. En lo que se refiere a las propiedades dieléctricas, cuanto más blanda es la resina, mayor es la conductividad eléctrica, el factor de disipación y la constante dieléctrica. El empeoramiento de las propiedades dieléctricas surge de la mayor movilidad iónica y dipolar [43] del material. El reblandecimiento es un fenómeno de mayor importancia en los sistemas de aislamiento asfáltico y termoplástico que tienden a fluir cuando la temperatura aumenta por encima de 70°C. La separación de cinta es el principal mecanismo de degradación en sistemas termoplásticos sometidos a gran cantidad de ciclos de carga [7]. La mayoría de las reacciones químicas de degradación provocan escisión de las cadenas poliméricas y como resultado la reticulación de la matriz se reduce. Las cadenas poliméricas son ahora más libres para moverse resultando en un ablandamiento de la resina. A su vez, el aumento de la movilidad de las cadenas incrementa significativamente la probabilidad de que un sitio reactivo esté disponible para reaccionar. El ingreso de humedad también produce ablandamiento de la resina. Por otra parte, cierto grado de ablandamiento puede ser beneficio para el aislamiento como se reporta en [79] donde se investigó el efecto de la temperatura sobre la degradación por descargas parciales. El estudio concluyó que el ablandamiento de las muestras de resina epóxica cerca de la temperatura de transición vítrea inhibió o redujo la erosión de la superficie sometida a las descargas parciales. A partir de las observaciones puede afirmarse que una estructura polimérica blanda puede disipar parte de la energía de las descargas gracias a los movimientos segmentarios de sus cadenas. Los experimentos realizados en [64] incluso señalaron que justo por encima de la transición vítrea, esto es en el rango de 100 a 130 ° C, la vida útil del aislamiento mejora, ya que el ablandamiento de la resina reduce las tensiones internas y la probabilidad de formación de grietas. Un aumento adicional de la temperatura contrarresta el beneficio del reblandecimiento y a partir de entonces el aislamiento comenzará a degradarse a un mayor ritmo.

**Volatilización.** Se trata de un proceso lento en el intervalo de la temperatura de servicio, pero la velocidad de reacción puede aumentar significativamente cerca de la temperatura de ebullición del material. Las reacciones de degradación que afectan la resina producen subproductos de bajo peso molecular que podrían escapar del aislamiento (volatilización). Si la resina contiene plastificantes, la volatilización de ellos se puede producir sin ninguna reacción química dependiendo de la presión de vapor parcial del componente volátil. Los subproductos polares son atraídos electrostáticamente a otras moléculas impidiendo su volatilización [92]. Algunos subproductos gaseosos volátiles incluyen H<sub>2</sub>O, CO y CO<sub>2</sub>, así como subproductos de bajo peso molecular y oligómeros sólidos que se encuentran atrapados en la resina. Como estos componentes son en su mayoría polares, aumentan las pérdidas dieléctricas del aislamiento [93]. La temperatura y la composición de la atmósfera afectan a las reacciones de subproductos volátiles que son detectados por cambios en los parámetros químicos de la resina. Las reacciones que implican subproductos volátiles también dan lugar a una modificación de la temperatura de transición vítrea, lo que significa un cambio de movilidad de la cadena polimérica.

**Endurecimiento.** Las características mecánicas y dieléctricas finales de la estructura del aislamiento se obtienen después del endurecimiento de la resina de impregnación. Durante el curado las reacciones de reticulación endurecen la resina hasta el nivel deseado. Ciertos mecanismos de degradación promueven la reticulación excesiva de la resina transformándolo en un material más denso, más rígido y quebradizo con movilidad reducida de sus segmentos moleculares. La resina puede incorporar aditivos plastificantes para proporcionar flexibilidad después del curado. Estos aditivos son sustancias de bajo peso molecular que cuando se volatizan, es decir cuando se evaporan, lentamente puede llevar al endurecimiento de la resina. Las reacciones de oxidación no solo son responsables de la reticulación entre cadenas vecinas, sino también del acortamiento de ellas. El efecto neto de esto es incrementar la dureza a expensas de la reducción en la flexión y capacidad de elongación de la resina [94]. Incluso en los sistemas termoestables se requiere una cierta flexibilidad en las bobinas para que puedan ajustarse completamente a las ranuras del estator. Un aislamiento duro y quebradizo, más de lo necesario, pierde su capacidad de adaptarse a la forma de ranura terminando en vibración de las bobinas y erosión del aislamiento. Otro efecto de la reticulación es el encogimiento de la estructura del polímero medida por la pérdida de masa. En los grandes generadores la pérdida de masa de la resina de impregnación no debería ser mayor al 5-6% luego de un ensayo de laboratorio a la máxima temperatura permitida por su clase térmica, en contraste con el 25% de pérdida de masa permitida para los devanados de electrodomésticos [95]. Adicionalmente, el encogimiento inducido por reticulación puede provocar tensiones mecánicas internas y localizadas en la resina polimérica, debilitando la fuerza de la adhesión entre las interfaces mica/resina. Si un mecanismo de escisión de cadenas prevalece sobre las reacciones de reticulación se produce una reducción en la resistencia a la tracción. En esta condición, el aislamiento puede romperse o agrietarse bajo las tensiones impuestas por los cambios de temperatura, vibraciones u otras fuerzas mecánicas que ocurran durante la operación [92].

**Agrietamiento.** Es una condición de degradación severa del aislamiento. Se produce como consecuencia del endurecimiento o reticulación excesiva de la resina y posterior sometimiento a fuerzas mecánicas tales que superan su límite de fluencia mecánica. La pérdida de componentes plastificantes, que pueden ser incluidos en las formulaciones de resina,

contribuye también al agrietamiento. Los ciclos de expansión y contracción térmica imponen grandes esfuerzos que puede superar la resistencia a la tracción de la resina [92]. Por supuesto, otros factores de estrés externos, es decir, no inherentes a la degradación termoeléctrica del propio aislamiento pueden conducir a la rotura de la estructura del aislamiento. Algunos de ellos son los esfuerzos mecánicos impuestos durante el ensamble de las bobinas en el estator, las fuerzas de vibración electromagnética, un incorrecto sistema de soporte mecánico de las cabezas de bobina permitiendo grandes esfuerzos de flexión tipo cantiléver o por el contrario limitando excesivamente los movimientos de expansión y contracción del devanado.

Estructuralmente, el agrietamiento puede ser pensado como el resultado final de los procesos de envejecimiento. El crecimiento de los defectos en el interior del aislamiento comienza a partir de las cavidades de aire dejadas por el proceso de impregnación. Particularmente, las grandes burbujas de resina son un foco ideal para el crecimiento de defectos ya que el volumen de resina en su interior fácilmente puede agrietarse tras el encogimiento provocado por las reacciones de curado. Con el ataque de los esfuerzos tipo TEAM, estos inicialmente pequeños defectos comienzan a crecer, eventualmente uniéndose entre sí para formar estructuras de mayor tamaño como delaminaciones. Si el tamaño de los defectos es lo suficientemente grande, la rigidez mecánica del devanado en la zona afectada desciende rápidamente posiblemente terminando en una grieta en el aislamiento. La fragilización de la resina que se produce simultáneamente con la formación de delaminaciones también aumenta la probabilidad de formación de grietas [96]. Una grieta puede propagarse desde la superficie hacia el interior del aislamiento a medida que absorbe humedad y permite la acumulación de contaminación en su interior. Estas grietas contaminadas y parcialmente conductivas no cambian muchos de los parámetros dieléctricos de pérdidas de AC, excepto el voltaje de ruptura dieléctrica [97][98]. Aun así la falla dieléctrica del aislamiento ocurre antes si en el aislamiento existen defectos severos como arborizaciones eléctricas que por la presencia de grietas [96]. Un aislamiento agrietado puede tener una corriente de conducción atípicamente alta que de hecho puede ser fácilmente detectada por una prueba rampa de voltaje DC. Los puntos sobre las cabezas de bobina cerca al núcleo del estator son los lugares más probables para la formación de grietas ya que estas zonas están sometidas a grandes esfuerzos mecánicos [99].

## 4 PARÁMETROS DIELECTRICOS DEL AISLAMIENTO

Durante su operación el sistema de aislamiento es afectado por los diferentes esfuerzos tipo TEAM de tal forma que su estructura microscópica es alterada irreversiblemente. Las pérdidas intrínsecas del aislamiento resultan como producto de las reacciones químicas de degradación experimentadas por sus distintos materiales, por ionización y por la naturaleza polar del aislamiento. Otro tipo de pérdidas pueden ocurrir por agentes externos, como en el caso de las corrientes de fuga que circulan por la contaminación de las cabezas de bobina.

En las máquinas rotativas las pérdidas dieléctricas de los sistemas de aislamiento son medidas directa e indirectamente. En forma directa el resultado de la medición arroja valores en unidades de mW. Para su forma indirecta se han utilizado parámetros dieléctricos relacionados: capacitancia, corriente de fuga, factor de disipación y descargas parciales entre otros. Tradicionalmente los ingenieros han analizado la tendencia en el tiempo de este conjunto de parámetros y su variación respecto al voltaje de prueba y, en los últimos años, respecto a la frecuencia con propósitos de diagnóstico.

Permitiendo una representación fasorial, la Figura 15 muestra las componentes de la corriente de fuga o corriente de pérdidas que circula a través del devanado cuando se aplica un voltaje de prueba alterno [100].

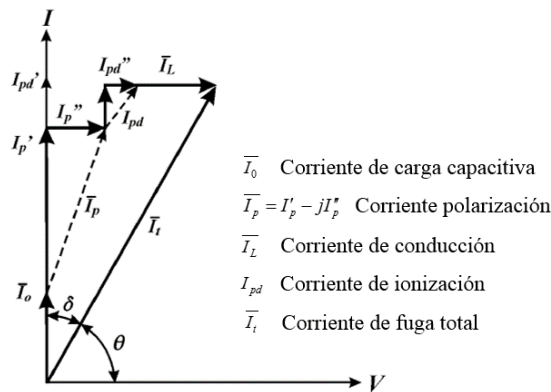


Figura 15. Componentes de las pérdidas dieléctricas de los sistemas de aislamiento.

La primera componente de la corriente de fuga es la corriente de carga capacitiva geométrica  $\bar{I}_0$  completamente en cuadratura y que no representa pérdidas. La parte imaginaria de la corriente de polarización  $I_p''$  también está en cuadratura con el voltaje. Por su parte, la parte real de la corriente de polarización  $I_p'$  representa las pérdidas por la absorción de energía, fricción dipolar y la carga espacial relacionada con la polarización del aislamiento. Los electrones e iones libres en el interior del volumen del aislamiento son responsables de las pérdidas por conducción representadas por la corriente  $\bar{I}_L$ . Si el voltaje de prueba es lo suficientemente alto produce descargas parciales cuya corriente equivalente  $I_{pd}$  tiene dos componentes: la componente real  $I_{pd}'$  que representa las pérdidas por ionización y la componente imaginaria  $I_{pd}''$  que aunque no produce pérdidas si produce un incremento en la capacitancia del aislamiento. Estrictamente hablando la corriente de ionización no puede ser representada fasorialmente con las componentes fundamentales de las otras corrientes de pérdidas. Sin embargo se acepta esta representación para indicar que solo una parte de dicha corriente aporta a las pérdidas.

#### 4.1 DESCARGAS PARCIALES

Un sistema de medición digital de descargas parciales está formado por tres componentes básicos: un circuito sensor/detector de los pulsos (CD,  $Z_{mi}$ ), un dispositivo de acoplamiento ( $C_k$ ) y una unidad de procesamiento y almacenamiento (MI) como se ilustra en la Figura 16. La impedancia  $Z$  mostrada actúa como filtro evitando que los pulsos provenientes de la fuente de alto voltaje alcancen el circuito detector.

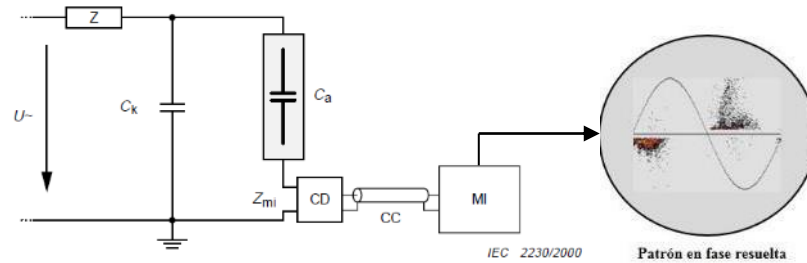


Figura 16. Componentes fundamentales de un sistema de medición: circuito detector, circuito interface y unidad de procesamiento.

Durante el tiempo de adquisición o tiempo durante el cual se está realizando la medición, los pulsos de corriente que llegan al circuito detector producen una caída de voltaje en la impedancia RCL de detección.

La señal detectada es una oscilación transitoria cuyo valor pico es considerado proporcional al área del pulso de entrada (descarga parcial). Luego, a través de un procedimiento de calibración el instrumento de medida establece la relación entre  $mV_{pico}/pC$  y con esto entrega el valor de *carga aparente* de la señal medida.

La polaridad del pico detectado también define la polaridad de la descarga. Sin embargo la detección de este pico con su polaridad puede presentar dificultades como las que se mencionan en el documento técnico IEC60270-2000, a causa de que la oscilación de la señal detectada depende, entre otros, del ancho de banda de la impedancia de detección.

Definir la carga aparente de la descarga como proporcional a la amplitud del pico de la señal oscilatoria se conoce como cuasi-integración de la señal.

La carga real transferida localmente (por ejemplo, en una inclusión gaseosa) por una descarga parcial no puede ser directamente medida. Como se mencionó anteriormente, en la práctica lo que es posible es medir la respuesta de una impedancia a la carga transferida a los electrodos producto de la descarga parcial. En este sentido, el término carga aparente resulta apropiado para hacer alusión a que no es la carga real transferida por la descarga parcial. En adelante en este documento, cada vez que se utilice el termino carga se entenderá que es la carga aparente.

Para obtener los diagramas en fase resuelta (PRPD), el paso siguiente es transformar los pulsos adquiridos del dominio del tiempo al dominio de la fase. En otras palabras se trata de convertir la totalidad de ciclos de la onda de voltaje en un solo ciclo de fase de 0 hasta  $360^\circ$ . En el dominio de la fase cada pulso es registrado respecto al ángulo de fase del voltaje de prueba al que ocurrió. En la práctica, la fase del voltaje se divide en ventanas de fase, usualmente cientos de ellas. Los pulsos pertenecientes a cada ventana de fase se procesan para obtener el valor promedio de carga, el número de pulsos, la carga máxima, etc. Los patrones de descargas parciales en fase resuelta se obtienen cuando la carga aparente de cada pulso registrado es graficada en función del ángulo y del número de pulsos. Esto origina una gráfica en tres dimensiones, sin embargo, la forma más común de representar los patrones en fase

resuelta es mediante una gráfica en dos dimensiones donde el número de pulsos se representa en una escala de colores y no en un eje coordenado. Una forma esquemática sencilla del proceso de transformación de los pulsos de descargas parciales del dominio del tiempo en el dominio de la fase para producir los patrones en fase resuelta se ilustra en la Figura 17.

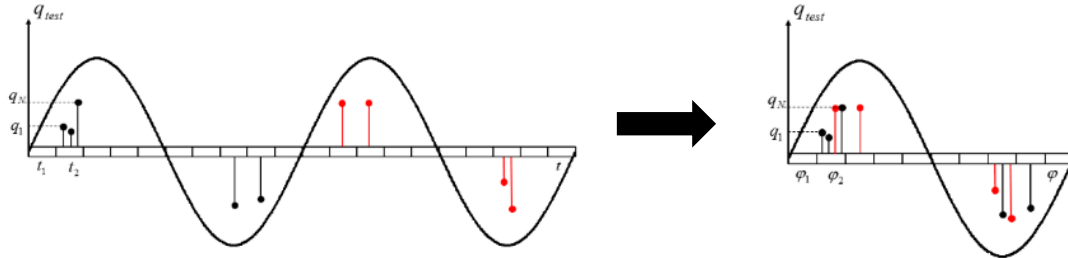


Figura 17. Proceso de transformación de los pulsos de descarga del dominio del tiempo al dominio de la fase obteniendo como resultado un patrón en fase resuelta.

Para cada patrón en fase resuelta e incluso en cada ventana de fase es posible calcular las siguientes cantidades básicas o fundamentales:

- Carga promedio:  $q_m^\pm = \frac{Q^\pm}{N^\pm}$ ; donde  $Q^\pm$  es la suma de todas las cargas en todas las ventanas de fase y  $N^\pm$  es el número total de descargas que ocurrieron en el semiciclo positivo o negativo respectivamente.
- Carga máxima:  $q_{\max}^\pm = \max(q_1, q_2, \dots, q_i)$  ocurrida tanto en el semiciclo positivo como negativo.
- Repetición:  $n^\pm = \frac{N^\pm}{T} = N^\pm f$ ; entendida como el número total de descargas en el semiciclo positivo o negativo que ocurrieron en una unidad de tiempo de referencia, en este caso el periodo de la forma de onda del voltaje de prueba  $1/f$ .

Los patrones en fase resuelta toman formas características dependiendo de la fuente de las descargas parciales las cuales pueden ser interpretadas por un experto. Con el propósito de reconocer y “cuantificar” los patrones, tal como menciona A. Krivda in [101], se han utilizado técnicas de sistemas expertos, funciones de identificación, redes neurales, modelos de Markov y parámetros estadísticos.

Ya desde 1978 hubo un marcado interés por utilizar los parámetros de forma de las distribuciones estadísticas para reconocer y clasificar las fuentes de descargas parciales. Tanaka and Okamoto fueron pioneros en el desarrollo de un sistema de medición controlado por computador que utilizaba el método de los parámetros estadísticos para medir el grado de deterioro del sistema de aislamiento resultante de las descargas parciales y las arborizaciones eléctricas [102]. Este sistema constituyó uno de los primeros avances hacia el desarrollo de un método de cálculo automatizado.

El ancho de banda de los instrumentos de medida es un parámetro de gran importancia en la medición de descargas parciales. Los sistemas digitales comerciales pueden decirse detectores convencionales de banda angosta cuando son diseñados para operar en una banda entre 9kHz y 30kHz o de banda ancha cuando operan en una banda entre 100kHz y 400kHz. Estos sistemas son dispositivos que integran carga que pueden ser calibrados para ser proporcional a la magnitud de las descargas directamente en pC [78].

En años recientes, se han desarrollado equipos de ultra banda ancha en el orden de los GHz con igualmente elevada frecuencia de muestreo catalogados como sistemas no convencionales.

Con la disponibilidad de estos equipos se ha logrado resolver en el tiempo la forma de cada pulso con gran exactitud y asociar dicha forma a las diferentes fuentes de descarga. Así mismo, estos han permitido implementar funciones de localización y separación de ruido.

#### 4.1.1 DISTRIBUCIONES ESTADÍSTICAS DE LOS PATRONES EN FASE RESUELTA

En esta investigación se utilizó el método de los parámetros estadísticos para identificar los patrones en fase resuelta obtenidos experimentalmente y para calcular el ángulo de fase promedio de las descargas parciales. Este método consistió en obtener distribuciones estadísticas univariadas a partir de los patrones de descargas parciales y posteriormente calcular sus parámetros de forma.

A partir de las tres variables de los patrones en fase resuelta, fase-carga-repetición de los pulsos, se definen las siguientes distribuciones univariadas.

$Hq_n^\pm(\varphi)$ : distribución de la carga promedio (magnitud del pulso)  $q_m$  en cada ventana de fase en función del ángulo de fase  $\varphi$ . En cada ventana de fase el valor de  $q_m$  es la suma de las amplitudes de todos los pulsos registrados dividida por el número total de pulsos que ocurrieron en dicha ventana de fase.

$Hq_{max}^\pm(\varphi)$ : distribución de la amplitud máxima de los pulsos en cada ventana de fase  $q_{max}$  en función del ángulo de fase  $\varphi$ .

$Hn^\pm(\varphi)$ : distribución del número de pulsos  $n$  en cada ventana de fase en función del ángulo de fase  $\varphi$ .

$Hn^\pm(qn)$ : distribución del número de pulsos  $n$  en cada ventana de fase en función de la carga  $q_m$ , también llamada histograma de la amplitud del pulso (PDHD)

Durante un evento de descarga parcial, pulsos de corriente de diferente magnitud y polaridad fluirán a través del circuito detector motivados por el voltaje de prueba aplicado. El resultado final será un patrón en fase resuelta cuya forma para cada semiciclo podrá ser igual o diferente dependiendo de la fuente que origina las descargas. Por lo tanto, las distribuciones estadísticas se calculan para cada semiciclo. En este sentido el superíndice " $\pm$ " hace referencia a la polaridad del semiciclo de voltaje para el cual se está calculando la distribución.

#### 4.1.2 PARÁMETROS DE FORMA DE LAS DISTRIBUCIONES ESTADÍSTICAS

En el campo de la estadística, cuando una muestra de datos tiene una fuerte tendencia a agruparse en torno a un determinado valor, la forma de la distribución se vuelve de gran interés. Algunos de los parámetros de forma aplicados a distribuciones estadísticas son la asimetría  $S_k(\pm)$ , la curtosis  $Ku(\pm)$ , el factor de correlación cruzada  $CC$ , la asimetría  $Asy$  y el factor de fase  $phP$ . En el campo del diagnóstico del aislamiento del estator, los investigadores han calculado conjuntos de estos parámetros estadísticos para las distribuciones de los valores de distintas fuentes de descargas parciales y los han recopilado como huellas dactilares [101][103]. El objetivo era comparar matemáticamente los resultados de una medición

particular con la base de datos de huellas dactilares para reconocimiento y clasificación de la fuente de las descargas parciales. Otros estudios investigaron el comportamiento de los diferentes parámetros estadísticos individualmente respecto al tiempo de envejecimiento y en relación al voltaje de ruptura dieléctrica. En [102] se concluyó que la asimetría es un indicativo de la forma de los defectos donde están ocurriendo las descargas parciales. En mediciones hechas en discos de resina con defectos artificiales, los valores de  $S_k(\pm)$  resultaron positivos, disminuyendo y volviéndose negativos en la medida que los defectos crecieron y se hicieron estrechos en la dirección del campo eléctrico formando arborizaciones eléctricas. A mediados de 1986 se propuso un plano de asimetría en el cual los resultados de  $S_k(+)$  y  $S_k(-)$  se grafican como una pareja ordenada para monitorear defectos severos como las arborizaciones. El tercer cuadrante del plano donde ambos parámetros son negativos se consideró como una zona de peligro inminente de falla del aislamiento. E. Gulski en 1992 también reportó valores de asimetría negativos para defectos como arborizaciones eléctricas y positivos para pequeñas inclusiones gaseosas [104]. A comienzos del año 2000 se validó la tendencia de la asimetría  $S_k(\pm)$  hacia valores negativos con la formación de arborizaciones eléctricas en barras estatísticas reales [105][106]. El interés por los parámetros estadísticos se ha mantenido vigente hasta hoy. En 2013 los resultados de un estudio confirmaron que las distribuciones de los patrones en fase resuelta cambian marcadamente con el tiempo de envejecimiento. Adicionalmente se encontró que entre los parámetros estadísticos, la asimetría  $S_k(\pm)$  es el parámetro más sensible a los cambios en la actividad de descargas parciales durante el envejecimiento. Mientras que los valores de  $S_k(\pm)$  decrecieron consistentemente con la degradación del aislamiento, otros parámetros pudieron presentar comportamientos no tan obvios. Esto mismo llevó a que la asimetría presentará el factor de correlación más alto con el voltaje de ruptura [107].

Por su importancia, a continuación se definirán y se mostrarán los métodos de cálculo de los parámetros estadístico haciendo énfasis en el parámetro asimetría.

**Sesgo o asimetría (Skewness).** Se calcula similar al tercer momento estadístico de una distribución y mide el grado de asimetría de una distribución con respecto a una distribución normal. Toma valores negativos para una distribución sesgada o asimétrica a la derecha o en otras palabras, para una distribución cuyo valor medio se desplaza hacia la derecha del valor medio de una distribución normal, 0 para una distribución simétrica y valores positivos si la distribución es sesgada a la izquierda.

En el caso puramente estadístico, la asimetría de una muestra de valores discretos  $V=(v_1, v_2, \dots, v_K)$  es definida como se muestra en (4.1).

$$S_k = \frac{\sum_1^{K_{pd}} (v_i - \mu)^3}{\sigma^3}; \quad \mu = \frac{\sum_1^{K_{pd}} v_i}{K_{pd}}; \quad \sigma^2 = \frac{\sum_1^{K_{pd}} (v_i - \mu)^2}{K_{pd} - 1} \quad (4.1)$$

Sin embargo la mayoría de los artículos y documentos técnicos relacionados con el diagnóstico del aislamiento del estator definen la asimetría alternativamente como en (4.2).

$$S_k(\pm) = \frac{\sum_1^{N_w} (q_i - \mu)^3 p_i}{\sigma^3}; \quad \mu = \sum_1^{N_w} q_i p_i; \quad \sigma^2 = \sum_1^{N_w} (q_i - \mu)^2 p_i \quad (4.2)$$

donde  $\mu$  es el valor medio,  $\sigma^2$  es la varianza y  $q_i$  es la variable de interés de la distribución, y  $p_i$  es su probabilidad de ocurrir en la  $i$ -ésima ventana de fase.



La diferencia entre ambos métodos es la definición de los datos de entrada. En el primer método los datos no están agrupados mientras que en el segundo sí. En los equipos de medición diseñados para producir patrones en fase resuelta, cada pulso de descarga parcial se agrega a su correspondiente ventana de fase, por lo tanto, los pulsos adquiridos no son tratados individualmente sino agrupados. Es fácil ver que de hecho esto construye una distribución, puesto que se tiene el valor de la variable y el número de veces que se repite. Cuando los datos están organizados o disponibles de esta forma el cálculo de la asimetría puede hacerse por el método según la ecuación (4.2). Si en cambio los datos no están agrupados puede usarse el método (4.1). Nótese que el límite superior de la sumatoria para el método (4.1) es el número total de pulsos registrados  $K_{pd}$  y para el método (4.2) es el número total de ventanas de fase  $N_w$ .

En la literatura ambos métodos de cálculo y sus variables se definen de forma superficial sin entrar en detalles ya que estos parámetros estadísticos son calculados directamente por el equipo de medición. Cuando por motivos de investigación se requiere aplicar el método de cálculo, la información disponible resulta escasa y en muchos casos ambigua. Como se verá en las próximas secciones, la necesidad de esta investigación de calcular el ángulo de fase promedio de las descargas parciales llevó a la implementación del método (4.2). Para ello se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones.

- Los datos de entrada serán datos agrupados formando un matriz de dimensión  $N \times N$  como la que se muestra en (4.3).

$$PD = \begin{matrix} & \varphi_1 & \varphi_2 & \varphi_3 & \varphi_4 & \varphi_5 & \dots & \varphi_N \\ \begin{matrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_5 \\ \vdots \\ q_N \end{matrix} & \begin{matrix} \\ 123 \\ 453 \\ \\ \\ \\ 90 \end{matrix} & \begin{matrix} \\ 66 \\ 754 \\ 45 \\ 689 \\ \\ \end{matrix} & \begin{matrix} 765 \\ 67 \\ 334 \\ 45 \\ \\ \\ \end{matrix} & \begin{matrix} \\ \\ \\ 678 \\ 45 \\ \\ \end{matrix} & \begin{matrix} 876 \\ \\ 642 \\ 334 \\ 55 \\ \\ \end{matrix} & \begin{matrix} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{matrix} & \begin{matrix} \\ 123 \\ 418 \\ \\ 77 \\ \\ \end{matrix} \end{matrix} \quad (4.3)$$

Donde las columnas en la matriz PD representan las ventanas de fase y las filas los niveles de carga que el equipo de medición es capaz de resolver. Así el elemento  $PD(2 \times 3) = 67$  significa que se registraron 67 pulsos de magnitud  $q_2$  en la ventana de fase  $\varphi_3$ .

- Las distribuciones del tipo  $Hx(\varphi)$  implican que la variable independiente o de interés es el ángulo de fase  $\varphi$  y por lo tanto en (4.2) la variable  $q_i$  debe reemplazarse por  $\varphi_i$ . Con frecuencia en la literatura se utiliza la variable  $q_i$  la cual con facilidad puede confundirse con los valores de carga cuando en realidad también puede representar valores de ángulo. Durante la revisión bibliográfica se advirtió que solamente en [108] el autor definió la ecuación (4.2) en términos del ángulo  $\varphi_i$ . La variable “ $x$ ” en  $Hx(\varphi)$  hace referencia a la variable de interés, es decir,  $q_m$ ,  $q_{max}$  o  $n$  respecto al cual se hará la distribución.
- La expresión (4.4) calcula el valor promedio ponderado de la variable independiente “ $q_i$ ”.

$$\mu = \sum_1^N q_i p_i \quad (4.4)$$

En un ejemplo puntual considérese la distribución  $Hn^+(\varphi)$ . En este caso, la variable independiente es el ángulo de fase  $\varphi$ , entonces en (4.4)  $q_i = \varphi_i$  y la probabilidad  $p_i$  es el “peso” que se le otorga a cada valor de  $\varphi$  dependiendo de la repetición  $n$  que tengan todos los pulsos de descargas parciales detectados a ese ángulo  $\varphi$ . Así,  $p_i$  se determina sumando la repetición  $n$  de todas las descargas que ocurren en el ángulo  $\varphi_i$  y después dividiendo este valor por la suma total de la repetición para todas las descargas en todos los ángulos  $\varphi$  positivos (por tratarse de la distribución  $(\varphi)$  para el semiciclo positivo).

De esta forma, el resultado de (4.4) resulta en el valor del ángulo de fase promedio ponderado por el número de pulsos en cada ventana de fase. El mismo análisis aplica para la distribución  $Hqn(\varphi)$ . En este caso,  $q_m$  es la variable de ponderación y el resultado de (4.4) tiende al ángulo de fase donde se registró la mayor carga promedio.

**Curtosis.** Se define como el cuarto momento estadístico de una distribución y se calcula mediante la expresión (4.5).

$$Ku(\pm) = \frac{\sum_1^N (q_i - \mu)^4 p_i}{\sigma^4} - 3 \quad (4.5)$$

Este parámetro es bastante similar a la definición de la skewness en (4.2). La curtosis cuantifica que tan “puntiaguda” es la forma de la distribución en comparación a una distribución normal. Si el valor de la curtosis es positivo significa que la distribución es más puntiaguda que la distribución normal. Cuando ambas distribuciones tienen el mismo grado de apuntalamiento el valor de la curtosis es cero y resulta menor que cero cuando la distribución es más plana que la distribución normal.

**Número de picos.** Es el número de puntas o cimas  $P_e$  que puede presentar una distribución. En distribuciones unimodales solo existe una cima o punto máximo.

**Factor de correlación cruzada.** Cuantifica la diferencia en la forma entre la distribución del semiciclo positivo y negativo mediante la expresión (4.6).

$$CC = \frac{\sum_1^{N_w} x_i y_i - \sum_1^{N_w} x_i \sum_1^{N_w} y_i / N_w}{\sqrt{\left[ \sum_1^{N_w} x_i^2 - \left( \sum_1^{N_w} x_i \right)^2 / N \right] \left[ \sum_1^{N_w} y_i^2 - \left( \sum_1^{N_w} y_i \right)^2 / N_w \right]}} \quad (4.6)$$

Donde, por ejemplo para la distribución  $Hqn(\varphi)$ ,  $x_i$  e  $y_i$  son la carga promedio en la  $i$ -ésima ventana de fase del semiciclo positivo y negativo respectivamente y  $N_w$  es el número total de ventanas de fase. Dado que este parámetro es una comparación entre la forma de dos distribuciones, entonces toma el valor de 1 si las distribuciones son simétricas. Caso contrario, cuanto menor es el grado de simetría, menor el factor de correlación cruzada.

**Asimetría.** Es un parámetro similar al factor de correlación cruzada que cuantifica que tan similar son las distribuciones del semiciclo positivo y negativo entre si comparando sus primeros momentos estadísticos o valores promedios como se muestra en (4.7)

$$Asy = \frac{\sum_1^N q_i^- p_i}{\sum_1^N q_i^+ p_i} \quad (4.7)$$

**Factor de fase.** Es la relación entre el ángulo de fase del voltaje de inyección de descarga en el semiciclo negativo y el voltaje de inyección de descarga para el semiciclo positivo (4.8).

$$PhF = \frac{\varphi_{DIV}^-}{\varphi_{DIV}^+} \quad (4.8)$$

## 4.2 CORRIENTE DE FUGA

La corriente de fuga que fluye a través de un sistema de aislamiento en buenas condiciones es principalmente debida a la corriente capacitiva total, contribuyendo en mejor medida la corriente de conducción y de ionización. En los antiguos sistemas asfálticos la corriente de conducción tiene una mayor contribución en la corriente de fuga total debido a la naturaleza de la resina termoplástica. Con la degradación del aislamiento crecerán los defectos en el aislamiento capaces de experimentar descargas parciales. Entonces la corriente de ionización comienza a ser significativa en la corriente de fuga total. Ya que la corriente de ionización solo circula cuando se ha superado el voltaje de inyección de descarga de los defectos en el aislamiento, la relación corriente-voltaje se vuelve no lineal. Los recubrimientos gradientes de las cabezas de bobina acentúan la no linealidad de la relación corriente-voltaje. En condiciones de laboratorio es posible eliminar dicha contribución al usar arreglos de medición de tres electrodos o electrodos guarda.

Por debajo del voltaje de inyección de descarga, la corriente que fluye por el devanado es proporcional a la admitancia total  $Y$ . Esta admitancia es representada por la pendiente de la línea recta que forma un ángulo  $\theta_0$  en la curva de corriente-voltaje que se muestra en la Figura 18. Si el voltaje de prueba se incrementa continuamente hasta superar el voltaje de inyección de las descargas parciales (DIV) que ocurren en los defectos dentro del aislamiento, la corriente crecerá con una pendiente mayor formando un ángulo  $\theta_1 > \theta_0$ . El punto de inflexión en la curva correspondiente al DIV se conoce en la literatura como como el primer voltaje de crecimiento rápido de la corriente  $U_{i1}$ . Un segundo voltaje de crecimiento rápido de la corriente  $U_{i2}$  puede aparecer como consecuencia de la interconexión de defectos entre sí. La aparición de los voltajes  $U_{i1}$  y  $U_{i2}$  está asociado al nivel de degradación del aislamiento. En aislamiento en óptimas condiciones es posible  $U_{i1}$  sea mucho mayor al voltaje nominal. En aislamiento con degradación aceptable  $U_{i1}$  es menor que el voltaje nominal. En condiciones de degradación severa incluso  $U_{i2}$  puede ser menor al voltaje nominal.

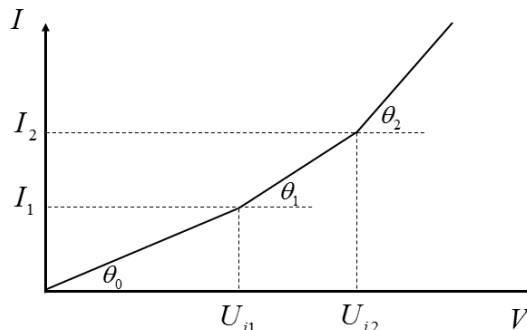


Figura 18. Comportamiento de la corriente de fuga en función del voltaje de prueba.

Ya que  $U_{i1}$  y  $U_{i2}$  están estrechamente relacionados con la condición de aislamiento, muchos investigadores han estudiado su correlación con el voltaje de ruptura dieléctrica (BDV). En 1980, T. Tsukui [109] reportó un amplio conjunto de mediciones realizadas en diferentes muestras de sistemas de aislamiento correlacionando sus parámetros no destructivos con el BDV obtenido a partir de diferentes formas de onda (AC, DC e Impulso). En los casos de estudio la mayor correlación se obtuvo entre  $U_{i2}$  y el BDV en AC. Sin embargo, el factor de correlación fue solo de 0.5 y no está claro si se utilizó o no un arreglo de medición de tres electrodos. Contemporáneamente, otros intentos [103] usando para ello en las mediciones devanados completos de motores de 3kV en servicio durante más de 15 años, encontraron buena correlación entre  $U_{i1}$  y el BDV llegando a la conclusión de que cuando  $U_{i1}$  cayó por debajo del voltaje nominal (3kV), el BDV tendió al valor límite de  $2V_{LL} + 1$  kV, donde  $V_{LL}$  es el voltaje de línea a línea. A pesar de esto, el autor fue cuidadoso en señalar que este criterio podría no ser aplicable a aislamientos epóxicos de papel de mica con un voltaje nominal mayor. Con el pasar de los años el interés por correlacionar el BDV con los parámetros dieléctricos se ha mantenido. En el año 2000, se publicaron los resultados de mediciones en una gran cantidad de barras pertenecientes a un motor de 780kW/6kV [110]. En este estudio la correlación entre el BDV y  $U_{i2}$  fue 72% además que se obtuvieron tendencias claramente decrecientes de  $U_{i1}$  y  $U_{i2}$  con el tiempo de envejecimiento. El hecho de que  $U_{i2}$  resultara menor que voltaje nominal se atribuyó a la actividad de descargas parciales ocurriendo en arborizaciones eléctricas dentro del aislamiento. Lo anterior confirma la importancia del valor de  $U_{i2}$  como criterio de diagnóstico.

Aparte de los voltajes  $U_{i1}$  y  $U_{i2}$ , otros parámetros derivados de la característica de corriente-voltaje han sido de interés para la evaluación de la condición del aislamiento.

El factor de crecimiento de la corriente es uno de ellos, el cual se define como en (4.9)

$$m_1 = \frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_0}; \quad m_2 = \frac{\tan \theta_2}{\tan \theta_0} \quad (4.9)$$

donde  $\tan \theta_i$  es la pendiente de la línea recta que forma un ángulo  $\theta_i$  con el eje horizontal. Los parámetros  $m_1$  y  $m_2$  pueden pensarse también como el aumento de la admitancia  $Y$  cuando se aplican voltajes superiores a  $U_{i1}$  y  $U_{i2}$  respectivamente originado por la actividad de descargas parciales. En [110] se reportó que el parámetro  $m_2$  mostró poca variación antes de treinta y cinco días de envejecimiento, a partir de este tiempo aumentó considerablemente. Los autores consideraron este tiempo como indicativo de un incremento acelerado en la degradación del aislamiento. La correlación entre  $m_2$  y el BDV también fue investigada. Pese a que el factor de correlación entre ambos parámetros fue tan solo de 0.16, se observó que cuando el BDV caía cerca de 2.5 veces el voltaje nominal el valor de  $m_2$  se aproximaba al valor límite de 1.8. Incluso el valor de 1.8 fue propuesto como criterio para la sustitución del devanado [111]–[113].

Otro parámetro derivado de la característica de corriente es el incremento de corriente  $\Delta I$ . Este parámetro cuantifica la contribución de las descargas parciales en la corriente total de fuga y se define como la diferencia normalizada entre la corriente de fuga real a cierto voltaje de prueba  $V_{test}$  y una corriente hipotética que circularía sin el efecto de las descargas parciales como se muestra en (4.10). Gráficamente, la diferencia entre la corriente real y la corriente hipotética está representada por el segmento  $\overline{I\overline{I}_0}$  en la Figura 19.

$$\Delta I = \frac{I - I_0}{I_0} \times 100 \quad (4.10)$$

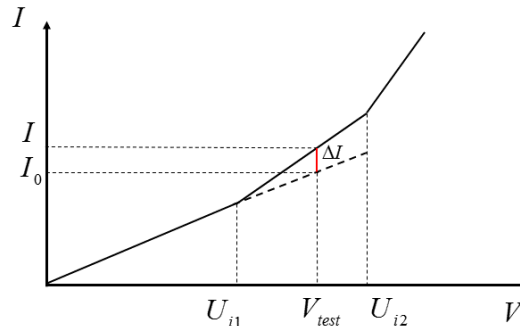


Figura 19. Característica de corriente-voltaje mostrando la corriente de fuga real y la corriente hipotética que circularía sin la presencia de las descargas parciales.

Hee-Dong Kim ha aplicado extensamente el incremento de corriente  $\Delta I$  y otros parámetros de diagnóstico en pruebas de campo, principalmente en motores desde 3kV a 13kV con un importante acuerdo entre los resultados y el estado real del aislamiento [114]–[119]. Particularmente, en [120] el autor publicó los resultados de pruebas de diagnóstico en once motores de 6kV cuyos devanados presentaban diferentes niveles de degradación. Los valores de  $\Delta I$  cayeron en un amplio rango desde 0.9% hasta 9.29%. De acuerdo a las conclusiones del autor, en este rango de valores de  $\Delta I$ , los parámetros  $\Delta C$  y  $\Delta \tan \delta$  estuvieron por debajo de los valores límite por lo tanto los casos de estudio fueron diagnosticados como en buenas condiciones. Resultó llamativo el hecho de que se tomara un valor de 8.5% como criterio para el máximo valor de  $\Delta \tan \delta$ . Pese a lo anterior, la importancia de estos resultados estriba en que establecen un primer rango para lo que se serían valores aceptables del parámetro  $\Delta I$ , lo que por supuesto es susceptible de discusión. Desafortunadamente, las referencias a estos criterios y parámetros no estuvieron disponibles en el momento de escribir este documento, de modo que en algunos casos no fue posible conocer los datos nominales de las barras y devanados en los cuales se aplicaron estos criterios.

El comportamiento de  $\Delta I$  durante prueba de envejecimiento acelerado también fue investigado [121], [122]. En [121] dos barras estáticas construidas para un generador de 500MVA/22kV fueron sometidos a pruebas de envejecimiento acelerado por 17.600 horas. Los parámetros  $\Delta I$ ,  $\Delta \tan \delta$ ,  $\Delta C$  y de descargas parciales fueron medidos regularmente con diferentes voltajes de prueba. Después del programa de envejecimiento la barra #1 terminó completamente degradada mientras que la barra #2 terminó con una degradación moderada, lo que permitió comparar el orden de los parámetros entre dos escenarios de envejecimiento completamente diferentes. En la barra # 2, los valores de  $\Delta I$  aumentaron constantemente desde 2.53 hasta 4.18% con el tiempo de envejecimiento. En contraste, en la barra # 1, el aumento de  $\Delta I$  fue de 1.33 hasta 44.71%, medido al voltaje de fase  $V_{LN}$  de 12.7kV. Los valores de  $\Delta I$  también fueron calculados para un generador de 350MW/24kV que estuvo en servicio por más de 30 años. En este caso, los resultados estuvieron por debajo de 4% medidos a  $1.25V_{LN}$ , en bastante buen acuerdo con la aceptable condición de su sistema de aislamiento. En la referencia de los resultados se utilizó un valor de  $\Delta I < 5\%$  como criterio de evaluación para aislamientos en buenas condiciones. Un hecho a favor de este parámetro como criterio de diagnóstico es que ha sido aplicado tanto en barras individuales como en devanados completos (provistos con cintas gradientes) mostrando una adecuada correlación con la condición real del aislamiento. El comportamiento de  $\Delta I$  inclusive ha sido estudiado como función de la

temperatura. En [123] se reportó que el valor de  $\Delta I$  se duplicó al incrementar la temperatura desde 40 hasta 80°C.

### 4.3 CAPACITANCIA Y FACTOR DE DISIPACIÓN

La estructura del aislamiento es un arreglo capacitivo con pérdidas dieléctricas. En razón a esto la corriente de fuga que circula a través del aislamiento no está completamente en cuadratura respecto al voltaje de prueba aplicado. Por debajo del voltaje de inyección de descarga, es decir, sin pérdidas por ionización, la corriente formará un ángulo complementario  $\delta_0$  respecto al voltaje aplicado. La Figura 20 muestra que el ángulo  $\delta_0$  aparece a causa de las pérdidas por polarización y conducción.

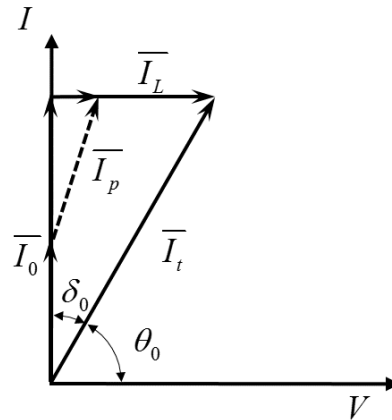


Figura 20. Ángulo de pérdidas dieléctricas  $\delta$  por debajo del voltaje de inyección de descarga donde no ocurren pérdidas por ionización.

Las componentes en cuadratura y en eje directo de la corriente de fuga entonces corresponden a la corriente capacitiva  $I_c$  que circula por el capacitor ideal  $C$  que representa idealmente al aislamiento y a la corriente  $I_R$  a través de la resistencia  $R$  representando las pérdidas dieléctricas respectivamente. A frecuencia industrial (50/60Hz) el factor de disipación es la tangente del ángulo de pérdidas  $\delta$ . En términos de las componentes de corriente y de las impedancias el factor de disipación toma las formas en (4.11)

$$DF = \tan \delta = \frac{I_R}{I_C} \tag{4.11}$$

$$DF = \tan \delta = \frac{1}{\omega RC}$$

Nótese que en la práctica la segunda forma del factor de disipación no puede evaluarse porque los valores de  $R$  y  $C$  son desconocidos. Así, los equipos disponibles en el mercado calculan la capacitancia y el factor de disipación mediante la medición directa de la corriente o por medio de puentes balanceados de Schering [124]. La representación esquemática de ambos métodos se ilustra en la Figura 21.

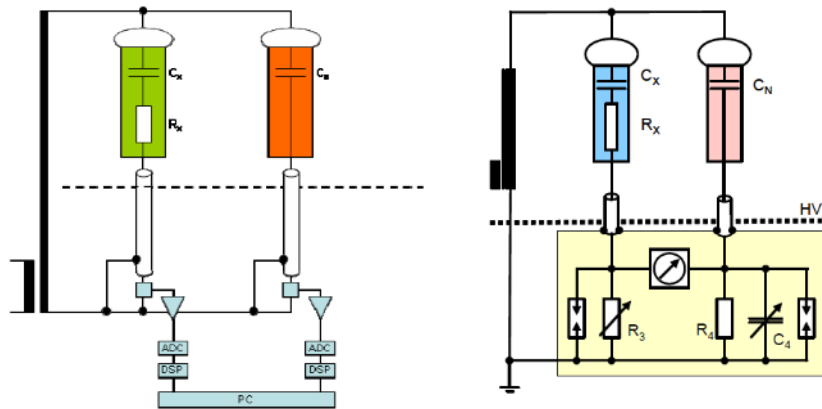


Figura 21. Métodos típicos para la medición de capacitancia y factor de disipación: a) Método de impedancia vectorial en el dominio de la frecuencia y b) Método de puente balanceado de Schering.

Cuando las mediciones se realizan en el dominio de la frecuencia, el factor de disipación y la capacitancia se evalúan en términos de la capacitancia compleja como se discutirá en la sección 4.4.

Si ahora el voltaje de prueba se incrementa lo suficiente como para producir descargas parciales, se sumará a la corriente de fuga la corriente de ionización. En esta nueva condición el ángulo  $\delta\theta$  crecerá hasta su nueva posición marcada como  $\delta$  en la Figura 22

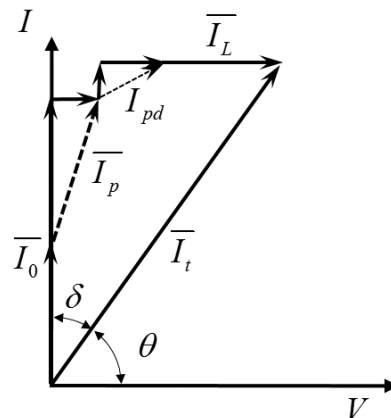


Figura 22. Ángulo de pérdidas dieléctricas  $\delta$  a alto voltaje incluyendo las pérdidas por ionización.

De nuevo otorgando un carácter fasorial a la corriente de ionización, se podría aseverar que la componente real incrementa el factor de disipación y la componente imaginaria incrementa la capacitancia del aislamiento. Estos incrementos son por lo tanto una cuantificación indirecta de las descargas parciales afectando la corriente de fuga total del aislamiento. En campo, el incremento con el voltaje de prueba de la capacitancia y del factor de disipación es un parámetro de gran utilidad para el diagnóstico, para el cual los fabricantes e investigadores han establecido criterios para sus valores máximos permitidos.

Las magnitudes de las componentes de la corriente de ionización definen la proporción en la que crecerá la capacitancia y el factor de disipación con el voltaje de prueba. En este sentido T. Dakin relacionó magistralmente la magnitud de dicho incremento con el ángulo de fase de las descargas parciales [125]. Partiendo de que los incrementos en la capacitancia y en el factor de disipación son producidos por la misma corriente de ionización, entonces es de esperar una estrecha correlación entre ellos. Esta relación entre ambos incrementos ha tenido

poca o ninguna atención. Solo en [126] se hace referencia a esta relación sin discutir su significado en el diagnóstico.

Asumiendo el aislamiento del devanado como un capacitor ideal en el que ocurren descargas parciales, entonces la corriente que fluirá a través de él cuando se aplica un voltaje  $v(t)_{real} = V_m \sin \omega t$  será

$$i(t) = \frac{dQ}{dt} = V_m \omega C_0 \cos \omega t + \frac{\Delta Q_i}{\Delta t_i} \quad (4.12)$$

donde  $\Delta Q_i$  es la carga aparente transferida a los electrodos durante el instante de tiempo  $\Delta t_i$ . Si no ocurrieran descargas parciales la corriente sería la de un capacitor ideal  $C_0$ .

Las pérdidas de energía ocasionadas por esta corriente se obtienen del producto  $i(t)v(t)_{real}$ .

$$i(t)v(t)_{real} = V_m^2 \omega C_0 (\cos \omega t)(\sin \omega t) + \frac{V_m \Delta Q_i \sin \omega t}{\Delta t_i} \quad (4.13)$$

donde el subíndice  $i$  aplicado a  $t$  indica el tiempo de la descarga  $\Delta Q_i$ . Si ahora se toma el valor promedio de la expresión (4.13) sobre un ciclo se obtiene una expresión para las pérdidas por ionización.

$$P_{pd} = 0 + f V_m \sum \Delta Q_i \sin \omega t \quad (4.14)$$

Reescribiendo las pérdidas dieléctricas por las descargas parciales en términos de la conductancia  $G_{pd}$

$$P_{pd} = \frac{V_m^2}{2} G_{pd} = \frac{V_m^2}{2} \left[ \frac{2f}{V_m} \sum \Delta Q_i \sin \omega t \right] \quad (4.15)$$

Adicionando cualesquiera otras pérdidas que sean independientes del voltaje de prueba entonces la conductancia total del aislamiento tendrá la forma

$$G = \omega C_0 \tan \delta_0 + \left[ \frac{2f}{V_m} \sum \Delta Q_i \sin \omega t \right] \quad (4.16)$$

La componente reactiva de la potencia disipada resulta al multiplicar la corriente  $i(t)$  por la componente en cuadratura del voltaje,  $v(t)_{react} = V_m \cos \omega t$

$$i(t)v(t)_{react} = V_m^2 \omega C_0 \cos^2 \omega t + \frac{V_m \Delta Q_i \cos \omega t}{\Delta t_i} \quad (4.17)$$

Haciendo una analogía con la potencia reactiva de un capacitor, el valor medio de (4.17) sobre un ciclo conduce a

$$Q_C = V_m^2 \omega C_0 + f V_m \sum \Delta Q_i \cos \omega t \quad (4.18)$$

Reescribiendo la ecuación (4.18) en términos de la capacitancia se tiene

$$Q_C = \frac{V_m^2}{2} \omega \left[ C_0 + \frac{1}{\pi V_m} \sum \Delta Q_i \cos \omega t \right] \quad (4.19)$$

En esta última expresión, la parte dentro del corchete solo depende de la capacitancia sin pérdidas  $C_0$  y de la contribución de las descargas parciales. A partir de esto, se llega a una expresión en la que se cuantifica el incremento de la capacitancia debido a las descargas parciales  $\Delta C$ .



$$Q_c = \frac{V_m^2}{2} \omega [C_0 + \Delta C] \quad (4.20)$$

$$\Delta C = \frac{1}{\pi V_m} \sum^{1/f} \Delta Q_i \cos \omega t$$

Finalmente el factor de disipación a alto voltaje en presencia de descargas parciales se obtiene como la relación entre (4.16) y (4.19), omitiendo el término  $\frac{V_m^2}{2}$  en (4.19).

$$\tan \delta = \frac{\frac{1}{\pi V_m C_0} \left[ \sum^{1/f} \Delta Q_i \sin \omega t_i \right] + \tan \delta_0}{1 + \frac{1}{\pi V_m C_0} \sum^{1/f} \Delta Q_i \cos \omega t_i} \quad (4.21)$$

En esta última expresión no es tan evidente separar la componente del incremento a alto voltaje de la componente sin pérdidas por ionización. Sin embargo los términos seno y coseno en ella proporcionan pistas para predecir el comportamiento del factor de disipación en relación al ángulo de las descargas parciales. Al respecto el autor concluyó que:

- Las descargas que ocurren en fase con la parte real del voltaje y por lo tanto que son multiplicadas por el término seno del ángulo de fase contribuyen al incremento del factor de disipación
- Las descargas que ocurren cerca del cruce por cero del voltaje aplicado y que son multiplicadas por el término coseno del ángulo de fase contribuyen más al incremento de la capacitancia.

Considerando cada evento de descarga parcial uno a la vez, la contribución tanto a la capacitancia como al factor de disipación dependerá del ángulo de fase relativo al voltaje de prueba al que ocurra cada descarga y de su magnitud. Si en cambio se analiza una adquisición real de miles de pulsos de descarga bien se podría pensar que la contribución total a cada parámetro se establece por el ángulo promedio al que ocurren todas las descargas. Esta hipótesis será validada en la discusión de los resultados experimentales donde además se evaluarán los límites de las relaciones descritas como factor de diagnóstico.

En la práctica, el incremento de la capacitancia con el voltaje de prueba definido en (4.20) se obtiene substrayendo del valor total de la capacitancia a alto voltaje  $C$  el valor de la capacitancia a bajo voltaje  $C_0$  como se muestra en (4.22). Nótese que el incremento está normalizado al valor a bajo voltaje y que además se expresa en unidades de porcentaje, lo cual da una idea más tangible de la magnitud del crecimiento.

$$\Delta C = 100 \times \frac{(C - C_0)}{C_0} \quad [\%] \quad (4.22)$$

Lo mismo aplica para calcular el incremento a alto voltaje del factor de disipación  $\Delta \tan \delta$ .

$$\Delta \tan \delta = \tan \delta - \tan \delta_0 \quad [\%] \quad (4.23)$$

Los parámetros  $\Delta C$  y  $\Delta \tan \delta$  también son conocidos como los valores tip-up de la capacitancia y del factor de disipación respectivamente.

#### 4.4 RESPUESTA DIELECTRICA

Las pérdidas por polarización en un material dieléctrico aparecen como producto de la interacción del material con un campo eléctrico externo, a lo que se conoce como respuesta dieléctrica del material. El concepto de capacitancia de un par de placas metálicas paralelas separadas una pequeña distancia  $d$  es a menudo utilizado como punto de partida para dilucidar la naturaleza de las pérdidas por polarización en un dieléctrico.

Si este arreglo de placas paralelas es puesto en el vacío y sometido a una diferencia de potencial entre las placas,  $\Delta V_0$ , en cada una de las placas aparecerá una carga eléctrica de igual magnitud y signo contrario  $Q$ . Al cociente entre la carga eléctrica establecida por la diferencia de potencial se denomina capacitancia del vacío o espacio libre  $C_0$ .

$$C_0 = \frac{Q}{\Delta V_0} \quad (4.24)$$

La distribución de carga sobre cada una de las placas produce un campo eléctrico  $E_0$  que idealmente se considera homogéneo y perpendicular a las placas metálicas cuando la separación  $d$  es mucho menor que las longitudes de las placas. Este campo eléctrico establecido en el vacío entonces puede representarse como líneas de campo que parten de la placa positiva hacia la placa negativa.

En el momento en el que el espacio libre (vacío) es reemplazado por un material dieléctrico al mismo tiempo que la carga eléctrica se mantiene constante se apreciará una disminución en la diferencia de potencial entre las placas y correspondientemente un incremento en la capacitancia hasta un valor  $C$ . La relación entre la capacitancia del vacío y la capacitancia con el material dieléctrico define la constante dieléctrica o *permitividad relativa* del material  $\epsilon_r$ .

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0} \quad (4.25)$$

Por definición  $\epsilon_r$  es igual a 1 para el vacío y mayor que 1 para cualquier material dieléctrico.

Considerando la geometría de las placas, esto es su área  $A$  y su separación  $d$ , la capacitancia del sistema de placas paralelas con dieléctrico también puede reescribirse como en la ecuación (4.26).

$$C = \epsilon \frac{A}{d}, \epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (4.26)$$

donde  $\epsilon_0$  es la permitividad del vacío. Aunque la capacitancia de un devanado real no puede ser calculada por el modelo sobresimplificado de la ecuación (4.26), es posible concluir a partir de él que la capacitancia crecerá conforme crece la longitud del devanado por cuenta de un mayor número de bobinas en él, que puede considerarse como un crecimiento equivalente del área  $A$ . Una disminución en el espesor del aislamiento implicará una disminución en la separación de las placas  $d$  que conduce a su vez a un incremento en la capacitancia. Así mismo, la capacitancia puede crecer debido a un incremento en la constante dieléctrica  $\epsilon$  cuyo valor es fuertemente dependiente de la estructura molecular del dieléctrico y particularmente de la *polarizabilidad* de sus moléculas.

Los materiales dieléctricos se caracterizan porque contienen o pueden formar dipolos eléctricos: cargas eléctricas positivas y negativas ligadas y separadas una cierta distancia que

no son libres de moverse más allá de fracciones de longitud en una escala atómica cuando un campo eléctrico externo ejerce una fuerza de atracción/repulsión sobre ellas. Estas cargas son conocidas como carga ligada mientras que aquella minoría que es capaz de desplazarse enteramente a través del material y neutralizarse en los electrodos o incluso escapar del material es conocida como carga libre. El transporte de carga libre establece una corriente de conducción. El pequeño desplazamiento de la carga ligada por acción del campo eléctrico que tiende a alinear las cargas positivas hacia el electrodo negativo y viceversa define el concepto de *polarización*. De acuerdo a la interpretación cualitativa dada en [100] la polarización dieléctrica puede visualizarse como cadenas de dipolos inducidos por el campo eléctrico que se *ligan* a cargas del signo opuesto en los electrodos como puede apreciarse en la Figura 23.

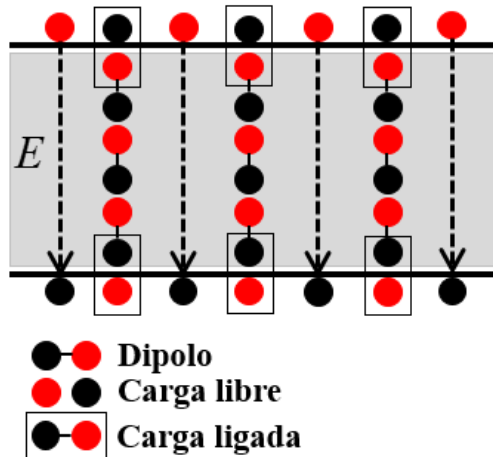


Figura 23. Representación esquemática de la polarización en un material dieléctrico.

La inserción del dieléctrico a su vez conduce a una disminución del campo eléctrico externo  $E_0$  establecido antes de la inserción del material dieléctrico cuyo nuevo valor en términos de la permitividad relativa es

$$E = \frac{E_0}{\epsilon_r} \quad (4.27)$$

En virtud de que disminuir la carga eléctrica en las placas paralelas también hubiera acarreado una disminución del campo eléctrico, entonces podría asumirse que la polarización tiende a neutralizar las cargas en la superficie de las placas responsable de la disminución del campo eléctrico en la ecuación (4.27). En un material conforme crece el número de dipolos por unidad de volumen, también crece su permitividad relativa y en consecuencia la magnitud con la que se reduce el campo eléctrico externo. En la práctica, los mecanismos de polarización originados por la acción del campo eléctrico pueden clasificarse en polarización por deformación (electrónica/atómica), polarización por orientación o dipolar y polarización interfacial o de carga espacial.

**Polarización por deformación.** Este tipo de polarización se produce a nivel atómico cuando el campo eléctrico al ejercer una fuerza de atracción/repulsión sobre las nubes de electrones y sobre el núcleo atómico positivo altera la posición de equilibrio entre ambas cargas produciendo una deformación. También es posible hablar de polarización por deformación a nivel molecular. En este caso el campo eléctrico deforma la posición de

equilibrio de la distribución de las cargas que se forma cuando átomos de diferentes tipos comparten electrones de forma no simétrica.

**Polarización por orientación o dipolar.** Se dice que una molécula es polar cuando el centro de concentración o centro de gravedad de las cargas positivas y negativas en ella no coincide formando dipolos eléctricos. Estos dipolos están apuntando en cualquier dirección dentro del material y continuamente cambian de orientación debido a la agitación térmica. Ya que en cualquier momento los dipolos están orientados de forma aleatoria, entonces el momento dipolar neto será cero. Sin embargo, luego de aplicar un campo eléctrico externo los dipolos tienden a alinearse en dirección del campo. La molécula de agua es un ejemplo claro de una molécula que experimenta polarización dipolar. A diferencia de la polarización por deformación, cuando se elimina el campo eléctrico externo las moléculas permanecen formando dipolos eléctricos, mientras que en el primero de los casos los átomos o moléculas retornan a un estado no polar.

**Polarización interfacial o por carga espacial.** En los materiales dieléctricos existen portadores de carga libre que pueden moverse a través del dieléctrico bajo la influencia de un campo eléctrico. Este desplazamiento sería total a través del dieléctrico a no ser por las barreras formadas por las interfaces entre los diferentes materiales que conforman el sistema de aislamiento. Dado que la constante dieléctrica y la conductividad de cada material es diferente, en las interfaces se establece una frontera que impide el libre transporte de los portadores de carga, en cambio motivan su acumulación. Así la acumulación de cargas positivas y negativas en la vecindad de una interface podría considerarse como un dipolo eléctrico. La interacción entre los dipolos así creados y el campo eléctrico da lugar a la polarización interfacial o por carga espacial. Este tipo de dipolos establecen un campo eléctrico interno de magnitud tal que reduce aún más el campo eléctrico externo resultando en una fuerte interacción molecular.

La temperatura tiene diversos efectos sobre cada uno de los mecanismos de polarización. En los dieléctricos con el aumento de la temperatura se reduce el número de átomos y moléculas por unidad de volumen por lo tanto la polarización electrónica decae ligeramente con la reducción de la densidad volumétrica. La agitación térmica promovida por el incremento de la temperatura causa un movimiento aleatorio de las moléculas así como también una distribución aleatoria de las orientaciones de las moléculas polares dentro del material. Cuanto mayor es el desorden en las vibraciones moleculares y en la dirección de los dipolos mayor es su dificultad para alinearse con el campo eléctrico y en consecuencia la polarización dipolar se reduce con la temperatura. En contraste, la concentración de especies iónica o portadores de carga incrementa con la temperatura al igual que su movilidad por cuenta de una mayor energía cinética por lo que la polarización interfacial experimenta un incremento a mayor temperatura.

Una característica importante y particular de cada mecanismo de polarización es el tiempo que tarda la polarización en responder a la aplicación del campo eléctrico, también conocido como tiempo de relajación. La polarización por deformación (electrónica/molecular) se establece en tiempos extremadamente cortos tanto como  $10^{-14}$  segundos. La polarización dipolar típicamente determina una amplia distribución de tiempos de relajación que dependen marcadamente de la inercia de los dipolos, de la estructura molecular del dieléctrico y de la temperatura. Típicamente los tiempos de relajación en la polarización dipolar recaen en el

rango entre  $10^{-3}$  y  $10^{-10}$  segundos mientras que para la polarización interfacial este tiempo crece varios ordenes de magnitud hasta entre 1 y  $10^{-3}$  segundos. En la polarización interfacial la conductividad y la disposición de los diferentes materiales que conforman el dieléctrico afectan el tiempo de relajación.

Si ahora el campo eléctrico varía con en el tiempo, los mecanismos de polarización son forzados a seguir la variación del campo tan rápidamente como lo determinen sus tiempos de relajación. Esta respuesta dinámica de la polarización determina la relajación dieléctrica del material. En este sentido, la polarización por deformación ocurre como un proceso completamente elástico sin pérdidas de energía cuando el campo eléctrico varía con frecuencia industrial e incluso no presenta un retraso apreciable hasta frecuencias por debajo del rango ultravioleta ( $8 \times 10^{14}$  Hz). El mayor tiempo de relajación en la polarización dipolar comparado con el de la polarización por deformación resulta en que la relajación dieléctrica ya no se comporta más como un proceso elástico sino como un proceso que se desarrolla en un medio viscoso y por lo tanto con consumo de energía disipada como calor debido a la fricción entre dipolos y con las moléculas o átomos adyacentes. La polarización interfacial es un proceso muy lento que lo hace activo en el rango de frecuencia industrial e incluso por debajo de esta.

Considerando una vez más el sistema de placas paralelas en el vacío, la densidad de flujo eléctrico (o desplazamiento eléctrico)  $D$  se relaciona con un campo eléctrico variable en el tiempo  $E(t)$  por medio de la permitividad del vacío  $\epsilon_0$ .

$$D(t) = \epsilon_0 E(t) \quad (4.28)$$

Si se introduce un material dieléctrico “isotrópico” entre las placas, la polarización dieléctrica del material  $P$  incrementa el desplazamiento eléctrico como se indica en la ecuación (4.29).

$$\begin{aligned} D(t) &= \epsilon_0 E(t) + P(t) \\ D(t) &= \epsilon_0 [1 + \chi(t)] E(t) \\ \epsilon_r &= 1 + \chi(t) \end{aligned} \quad (4.29)$$

Donde  $\chi$  es la susceptibilidad eléctrica del material. El término  $P(t)$  en la expresión para  $D(t)$  indica que todo proceso de polarización induce carga eléctrica en los electrodos, en este caso en las placas paralelas. Sin embargo, su mayor contribución es el hecho de que permite visualizar que la dependencia del tiempo de la polarización no es igual a la dependencia del tiempo del campo eléctrico por cuenta que de los mecanismos de polarización tienen tiempos de relajación diferentes respecto a la aplicación del campo eléctrico. La diferencia en la dependencia del tiempo entre  $P(t)$  y  $E(t)$  es causada por la dependencia del tiempo de la susceptibilidad eléctrica del material:  $\chi = \chi(t)$  [127]. Por lo anterior, el dieléctrico puede ser caracterizado tanto por su susceptibilidad como por su polarización, ambos dependientes del tiempo, las cuales representan la respuesta dieléctrica del material.

La Figura 24 muestra de forma esquemática la respuesta dieléctrica de un material ante un campo eléctrico tipo escalón. Del gráfico es fácil observar que en el instante  $t_0$  cuando se aplica el campo eléctrico la polarización adquiere el valor  $P_\infty$  producto de los mecanismos de polarización considerados como instantáneos (polarización por deformación). En este escenario la polarización ocurre en fase con el campo eléctrico aplicado. Usualmente la contribución al desplazamiento eléctrico de la permitividad del vacío y de la polarización instantánea se trata como un solo valor de permitividad de alta frecuencia  $\epsilon_\infty$  para separarlos de los mecanismos de polarización más lentos.

$$D(t) = \varepsilon_{\infty} E(t) + P(t) \quad (4.30)$$

Para tiempos tales que  $t \rightarrow \infty$  la polarización se tornará estática ( $P_s$ ) debido al carácter finito de los mecanismos de polarización conllevando a que la polarización y el campo eléctrico estén en fase. En esta condición la permitividad se considera estática adquiriendo el valor  $\varepsilon_s$ . La diferencia entre  $P_s - P_{\infty}$  es la cantidad de polarización debido a los mecanismos que son tratados como dinámicos para los cuales la polarización se atrasa respecto al campo eléctrico aplicado.

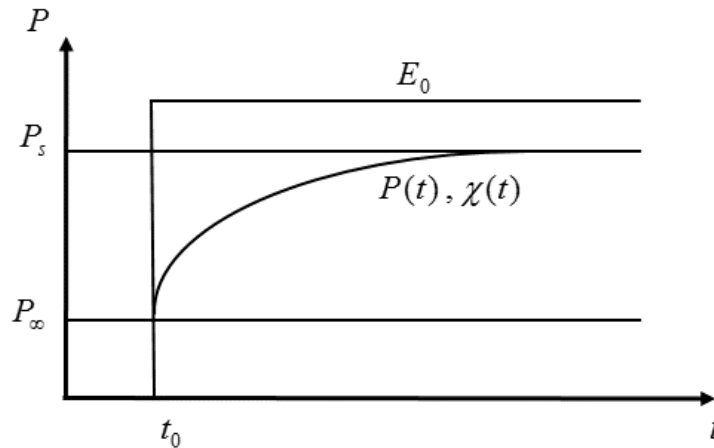


Figura 24. Representación esquemática de la respuesta dieléctrica de un material ante la aplicación de un campo eléctrico tipo escalón.

De esta forma, la respuesta dieléctrica total de un material ante un campo eléctrico tipo escalón que de forma simplificada se comporta en la forma de la gráfica en la Figura 24, puede definirse como

$$\begin{aligned} P(t) &= P_{\infty} + (P_s - P_{\infty})g(t - t_0) \\ P(t) &= \varepsilon_0 [\chi_{\infty} + (\chi_s - \chi_{\infty})g(t - t_0)]E \\ P(t) &= \varepsilon_0 [(\varepsilon_{\infty} - 1) + (\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty})g(t - t_0)]E \end{aligned} \quad (4.31)$$

donde  $g(t-t_0)$  es una función monótona creciente. A partir de la solución para la respuesta dieléctrica ante un campo eléctrico tipo escalón mostrada en la ecuación (4.31) es posible calcular la polarización dependiente del tiempo para cualquier otra función de campo eléctrico dependiente del tiempo aplicando una convolución en el dominio del tiempo.

$$P(t) = \varepsilon_0 \chi_{\infty} E(t) + \varepsilon_0 \int_{-\infty}^t f(t - \tau) E(\tau) d\tau \quad (4.32)$$

donde  $f(t)$  es la función de respuesta dieléctrica que representa los procesos de polarización “lentos” mientras el primer término de la izquierda representa los procesos de polarización rápidos o instantáneos. Es preciso puntualizar que los términos lento y rápido se refieren a la rapidez con la que ocurren los procesos de polarización comparados con la variación del campo eléctrico.

La solución de la ecuación (4.32) en el dominio de la frecuencia permite hacer simplificaciones significativas en los cálculos al mismo tiempo que se obtiene la excitación de campo eléctrico por medio de su componente fundamental. La polarización dieléctrica en el dominio de la frecuencia se define entonces como [128].

$$P(\omega) = \varepsilon_0 \chi_\infty E(\omega) + \varepsilon_0 f(\omega) E(\omega) \quad (4.33)$$

Ahora la integral de convolución que representa los procesos de polarización lentos se transformó en un simple producto en el dominio de la frecuencia. Aplicando la transformada de Fourier a la función de respuesta dieléctrica  $f(t)$

$$f(\omega) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (4.34)$$

se obtiene la susceptibilidad compleja en el dominio de la frecuencia  $\chi(\omega)$

$$\chi(\omega) = \chi'(\omega) - j\chi''(\omega) \quad (4.35)$$

donde matemáticamente la parte real de la solución en la ecuación (4.35) corresponde a los términos coseno y la parte imaginaria a los términos seno de la transformada de Fourier.

$$\chi'(\omega) = \int_0^{\infty} f(t) \cos(\omega t) dt \quad (4.36)$$

$$\chi''(\omega) = \int_0^{\infty} f(t) \sin(\omega t) dt$$

La susceptibilidad eléctrica compleja entonces define la relación entre el campo eléctrico aplicado y la polarización en función de la frecuencia

$$P(\omega) = \varepsilon_0 \chi(\omega) E(\omega) \quad (4.37)$$

y en consecuencia el desplazamiento eléctrico debido a la permitividad del vacío y de todos los mecanismos de polarización se expresa como

$$D(\omega) = [\varepsilon_\infty + \varepsilon_0 \chi'(\omega) - j\varepsilon_0 \chi''(\omega)] E(\omega) \quad (4.38)$$

El término entre corchetes podría agruparse en términos de la permitividad compleja

$$\begin{aligned} \varepsilon(\omega) &= [\varepsilon_\infty + \Delta\varepsilon'(\omega)] - j\varepsilon''(\omega) \\ \varepsilon(\omega) &= \varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega) \\ \varepsilon(\omega) &= \varepsilon_0 [\varepsilon_r'(\omega) - j\varepsilon_r''(\omega)] \end{aligned} \quad (4.39)$$

donde la componente real  $\varepsilon'$  de la permitividad compleja puede entenderse como compuesta de una parte instantánea y un parte dinámica. Sin embargo, estas cantidades no son directamente medibles en la práctica por lo que se prefiere utilizar otras magnitudes como la de la capacitancia en la ecuación (4.40).

Así la permitividad dieléctrica compleja de un material dieléctrico determina la capacitancia compleja  $C(\omega)$  como

$$\begin{aligned} C(\omega) &= \varepsilon(\omega) C_0 \\ C(\omega) &= C'(\omega) - jC''(\omega) \end{aligned} \quad (4.40)$$

El término imaginario en la susceptibilidad eléctrica compleja  $\chi(\omega)$  por cuanto fue resultado de los mecanismos de polarización lentos da cuenta del retraso que experimenta la polarización con respecto al campo eléctrico aplicado. Dicho desfase o retraso es el origen de las pérdidas dieléctricas cuya magnitud está estrechamente relacionada con la frecuencia del campo aplicado. Cuando se considera la capacitancia compleja  $C(\omega)$ , la parte real es el aporte de la polarización a la capacitancia o a la permitividad que se origina sin pérdidas y la parte imaginaria continua representando las pérdidas dieléctricas por polarización.

En la práctica el valor de las pérdidas dieléctricas es mejor representado en términos del factor de disipación o la tangente del ángulo que forman la componente imaginaria y real de la respuesta dieléctrica compleja.

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} = \frac{C''}{C'} \quad (4.41)$$

Si bien la respuesta dieléctrica es una función de la frecuencia, cabe anotar que los tiempos de relajación de los mecanismos de polarización  $\tau$  son una característica intrínseca del material y por lo tanto cada uno de los mecanismos de polarización hará su mayor contribución a la respuesta dieléctrica cuando su frecuencia equivalente  $1/\tau$  sea mucho mayor que la frecuencia del campo eléctrico aplicado  $f_e$ . Si la frecuencia  $f_e$  se aproxima a  $1/\tau$  la contribución de la polarización a la permitividad compleja comienza a reducirse. Finalmente cuando la frecuencia  $f_e$  supera por mucho a  $1/\tau$  el mecanismo de polarización se hace inactivo debido a que ya no puede seguir la rápida variación del campo eléctrico y así ya no contribuye a la permitividad. Para campos eléctricos de baja frecuencia incluso llegando hasta los kHz, los mecanismos de polarización por deformación, dipolar y por carga espacial contribuyen a la permitividad. Si la frecuencia continua creciendo eventualmente se alcanzarán las frecuencias de relajación características de cada mecanismo de polarización donde la componente real de la permitividad decrece y la componente de imaginaria de pérdidas alcanza su punto máximo.

En la práctica, el valor de la solución de la ecuación (4.40) se calcula a partir de la corriente medida  $I(\omega)$  que circula a través del objeto de prueba sobre el que se aplica un voltaje sinusoidal  $V(\omega)$ . Por lo tanto la capacitancia compleja medida toma el valor de

$$C(\omega) = C'(\omega) - jC''(\omega) = \frac{I(\omega)}{j\omega V(\omega)} \quad (4.42)$$

Los resultados de la ecuación (4.42) difieren respecto a los de la ecuación (4.40) en que la primera incluye los efectos de la conductividad del material  $\sigma$  en su parte imaginaria. Por lo anterior la ecuación (4.40) se modifica de la siguiente forma

$$C(\omega) = C'(\omega) - jC''(\omega) = [C_\infty + \Delta C'(\omega)] - j \left[ C''_{pol}(\omega) + \frac{\sigma}{\omega} \right] \quad (4.43)$$

Nótese que ahora la parte imaginaria de la capacitancia compleja medida  $C''$  contiene el término  $C''_{pol}$  que corresponde a la componente imaginaria pura (ideal) debido a la polarización.

#### 4.4.1 RELACIONES DE KRAMERS-KRONIG

La importancia de la susceptibilidad eléctrica compleja en el estudio de la respuesta dieléctrica de materiales dieléctricos está en que su parte imaginaria es consecuencia directa del carácter “tardío” de la respuesta dieléctrica del material. De ahí que la función de respuesta dieléctrica  $f(t)$  sea invariablemente una función decreciente en el tiempo. Las pérdidas dieléctricas por polarización cuantificadas por medio de  $\chi''(\omega)$  se originan porque la polarización no puede seguir instantáneamente al campo eléctrico. Un hecho sobresaliente sobre el comportamiento de  $\chi(\omega)$  es que un cambio en  $\chi'$  con la frecuencia (*dispersión*) siempre está acompañado de un cambio en las pérdidas dieléctricas  $\chi''$ . La anterior relación es deducida directamente si se recuerda que tanto la parte real como la imaginaria de la susceptibilidad eléctrica en la ecuación (4.35) fueron derivadas a partir de la misma función de respuesta dieléctrica, o si se prefiere como los términos seno y coseno de su transformada de Fourier.



Cuando  $f(t)$  es una función lineal, causal, finita y tiene una integral finita entre cero e infinito, la relación entre estas dos componentes va más allá de tal forma que cualquiera de ellas puede ser calculada a partir de la otra. Así, la relación entre la parte real e imaginaria de  $\chi(\omega)$  puede establecerse matemáticamente por medio de las llamadas relaciones de Kramers-Kronig.

$$\chi'(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{x\chi''(x)}{x^2 - \omega^2} dx \quad (4.44)$$

$$\chi''(\omega) = -\frac{2\omega}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\chi'(x)}{x^2 - \omega^2} dx$$

Un caso particular de (4.44) es para cuando  $\omega=0$ , es decir para la polarización estática. En este caso

$$\chi'(\omega=0) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \chi''(x) d(\ln x) \quad (4.1)$$

Este resultado relaciona el área bajo la curva de la parte imaginaria de la susceptibilidad eléctrica graficada contra el logaritmo natural de la frecuencia con la parte real de la susceptibilidad eléctrica. Adicionalmente este resultado muestra que para cada mecanismo de polarización existe un correspondiente pico en las pérdidas dieléctricas que ocurre en su frecuencia de relajación [128] tal como se muestra en la Figura 25.

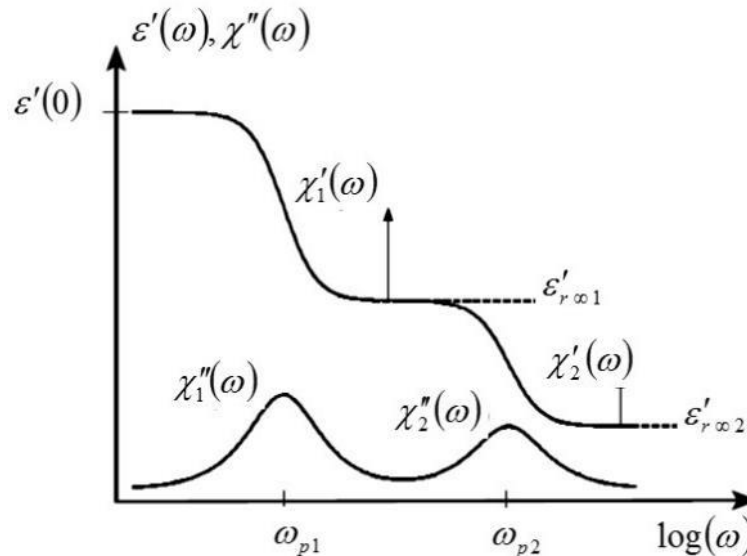


Figura 25. Representación de dos mecanismos de polarización con sus correspondientes picos en las pérdidas dieléctricas ocurriendo en las frecuencias  $\omega_{p1}$  y  $\omega_{p2}$ .

Los picos en las pérdidas dieléctricas que ocurren en las frecuencias  $\omega_{p1}$  y  $\omega_{p2}$  sugieren que existen dos mecanismos de polarización en el ejemplo de la Figura 25. Nótese que la parte real de la permitividad varía a escalones cuya transición se da en la región donde ocurre el pico en la curva de pérdidas dieléctricas. En la región alrededor de  $\chi'(\omega)$  el valor de la permitividad es casi constante e igual a  $\epsilon'_{\infty 1}$  y las pérdidas tienen un valor muy bajo indicando que en esta región los mecanismos de polarización siguen de forma instantánea al campo eléctrico sin

ningún retraso (y por tanto idealmente sin pérdidas dieléctricas). Conforme la frecuencia del campo eléctrico disminuye desde un valor  $\omega < \omega_{p2}$  y se aproxima a  $\omega_{p1}$  la polarización ahora ya no sigue instantáneamente al campo eléctrico aplicado. En esta región la permitividad y las pérdidas dieléctricas comienzan a crecer. Justo por debajo de la frecuencia  $\omega_{p1}$  el tiempo de relajación de los mecanismos de polarización es comparable con la frecuencia del campo eléctrico y por ende la polarización comienza a seguir cada vez más de cerca al campo eléctrico reduciéndose las pérdidas dieléctricas. Con una mayor reducción de la frecuencia los mecanismos de polarización podrán completamente seguir el campo eléctrico llevando a un valor muy bajo de las pérdidas dieléctricas y a un valor estático de la permitividad  $\epsilon'_{s1}$ . Aplicando un análisis similar para el segundo mecanismo de polarización con pico en  $\omega_{p2}$  es fácil advertir que para una frecuencia intermedia entre  $\omega_{p1}$  y  $\omega_{p2}$  el valor de la permitividad es la contribución de la polarización estática del segundo mecanismo de polarización,  $\epsilon'_{\infty1} = \epsilon'_{s2}$ .

Como se menciona en [129], independientemente de que el sistema dieléctrico bajo investigación contenga múltiples picos de relajación y del tipo de modelo empleado para describir el comportamiento de la función de respuesta dieléctrica las relaciones de Kramers-Kronig seguirán siendo válidas ya que las únicas consideraciones para que existan dichas relaciones son que  $f(t)$  sea lineal con respecto al campo eléctrico aplicado y que sea una función causal.

#### 4.4.2 FUNCIÓN DE RESPUESTA DIELECTRICA

El comportamiento de la función de respuesta dieléctrica de un material ha sido aproximado por medio del modelo de Debye y por el de Curie-Von Schweidler. El primero modelo corresponde a la función de respuesta dieléctrica más elemental donde se asume que no existe interacción entre los mecanismos de polarización y por lo tanto todos ellos tienen la misma probabilidad independiente del tiempo de relajarse bajo la influencia de un campo eléctrico: respuesta dieléctrica de un dieléctrico ideal. Bajo estas consideraciones la respuesta dieléctrica de acuerdo al modelo de Debye responde a un decaimiento exponencial de la forma

$$\begin{aligned} f(t) &\propto e^{-t/\tau} \\ f(\omega) &\propto \frac{1}{1 + j\omega\tau} \end{aligned} \quad (4.2)$$

En la práctica este comportamiento se ajusta de alguna forma a gases o soluciones diluidas de dipolos, pero de ninguna manera a los materiales dieléctricos sólidos. Algunas oposiciones a este modelo afirman que el mismo se ajusta a un fenómeno de “retraso” más que a uno de relajación [38]. El segundo modelo por su parte es el que mejor describe los mecanismos de polarización que ocurren en una vasta variedad de materiales dieléctricos, incluidos los sistemas de aislamiento. También conocido como el modelo de ley de potencia fraccionaria fue derivado a partir de datos experimentales donde se obtuvo que la función de respuesta dieléctrica obedecía a un decaimiento de la forma

$$\begin{aligned} f(t) &\propto t^{-n}, \quad 0 < n < 1 \\ f(\omega) &\propto (j\omega)^{n-1} = [\sin(n\pi/2) - j\cos(n\pi/2)]\omega^{n-1} \end{aligned} \quad (4.3)$$

la cual se ajusta a la característica real de varios tipos de dipolos siendo formados en un material bajo la influencia de un campo eléctrico. En virtud a su buen ajuste para una gran

cantidad de materiales dieléctricos reales suele llamarse a este modelo “ley universal de relajación dieléctrica”.

Cuando se grafica en una escala logarítmica-logarítmica, la función de respuesta dieléctrica de ley de potencia fraccionaria adquiere la forma de las curvas mostradas en la Figura 26.

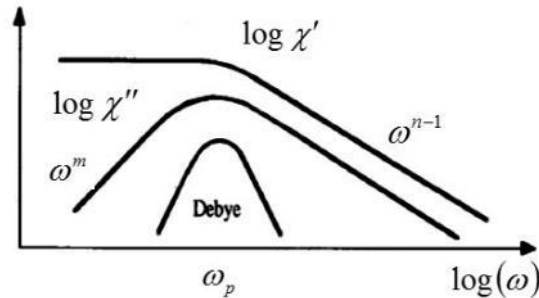


Figura 26. Comportamiento de la respuesta dieléctrica de acuerdo al modelo de decaimiento exponencial (modelo de Debye) y al modelo de ley de potencia fraccionaria (modelo de Curie-Von Schweidler).

Nótese que comparado con el modelo de ley de potencia fraccionaria la respuesta del modelo de Debye es más angosta y de hecho el pico que se muestra a la frecuencia  $\omega_p$  es el único que puede predecirse. En el modelo de potencia fraccionaria el pico en las pérdidas dieléctricas divide la respuesta dieléctrica resultando en dos leyes de potencia fraccionaria con pendientes  $m$  y  $n-1$  respectivamente. Otra característica sobresaliente del modelo de potencia fraccionaria es que para  $\omega > \omega_p$  tanto la parte real como la parte imaginaria de la susceptibilidad eléctrica compleja corren paralelas o lo que es lo mismo que su pendiente es igual independiente de la frecuencia.

Tomando el cociente entre la parte imaginaria y la real de la susceptibilidad eléctrica compleja predicha por el modelo de Debye se tiene

$$\frac{\chi''(\omega)}{\chi'(\omega)} = \omega\tau \quad (4.4)$$

Este resultado indica que las pérdidas crecen proporcionalmente a la frecuencia. Por su parte este mismo cociente para el modelo de potencia fraccionaria resulta en

$$\frac{\chi''(\omega)}{\chi'(\omega)} = \frac{\cos(n\pi/2)\omega^{n-1}}{\sin(n\pi/2)\omega^{n-1}} = \cot(n\pi/2) \quad (4.5)$$

donde se observa claramente que el cociente solo depende de la pendiente  $n$  y de ahí que las curvas de respuesta dieléctrica en el modelo de potencia fraccionaria sean paralelas independientes de la frecuencia.

Finalmente el valor de  $n$  está relacionado con la naturaleza de los materiales. Los buenos materiales aislantes se caracterizan por valores de  $n > 0.5$  resultado de una respuesta dieléctrica cambiando solo ligeramente con la frecuencia. La parte real (capacitancia) de la respuesta dieléctrica es mucho mayor que la imaginaria (pérdidas), ambos creciendo lentamente hacia las bajas frecuencias. Para valores de  $n < 0.5$  la respuesta dieléctrica tiene un cambio mayor con la frecuencia, la parte imaginaria es mucho mayor que la parte real de la respuesta dieléctrica y su incremento (de ambos parámetros) es rápido hacia las bajas frecuencias [130]. En la parte del análisis de los resultados experimentales se evaluarán los valores de  $n$  y los cambios que puedan presentar en las diferentes condiciones del sistema de aislamiento de las barras de prueba.

## 5 PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL AISLAMIENTO

Las máquinas eléctricas rotativas son un activo de alto costo para las plantas industriales y de generación eléctrica y como tales se requiere que su confiabilidad sea tan alta como sea posible durante todo el periodo de su vida útil. Esta necesidad de una alta confiabilidad ha motivado continuamente la persecución de mejores o en algunos casos completamente nuevas técnicas de diagnóstico. Los ensayos fisicoquímicos son una de aquellas nuevas técnicas que vienen siendo aplicadas desde hace algunas pocas décadas para el diagnóstico de sistemas de aislamiento de máquinas eléctricas. Sin embargo, estos siempre han jugado un papel fundamental en el diseño de sistemas de aislamiento y en la cualificación de materiales. Han sido especialmente determinantes para la formulación de las resinas de impregnación y durante el proceso mismo de fabricación de los devanados estáticos. La degradación del sistema de aislamiento es un problema de reacciones químicas y por lo tanto sus parámetros fisicoquímicos deberían estar correlacionados con cambios en su estructura química.

Generalmente hablando, las reacciones de degradación química descritas en el capítulo 3 conducen a un colapso de la estructura de los materiales del aislamiento con formación de subproductos. Ejemplo de ellas es el rompimiento de la estructura entrecruzada de la resina la cual a su vez tiene un impacto adverso en su temperatura de transición vítrea y en muchas de las propiedades viscoso elásticas.

El análisis térmico como el llevado a cabo por las técnicas de calorimetría diferencial de barrido (DSC) y de análisis termogravimétrico (TGA) son especialmente adecuadas para cuantificar los cambios en la temperatura de transición vítrea  $T_g$  y en los perfiles de pérdida de masa de los componentes del aislamiento, principalmente de la resina de impregnación, que tienen lugar durante el envejecimiento. Por su parte, los subproductos de descomposición pueden ser investigados por medio de técnicas de espectrometría infrarroja (FTIR).

En esta sección se discutirá la aplicación de estas herramientas de análisis en el estudio de la degradación de los materiales que componen un sistema de aislamiento, primero proporcionando al lector una descripción de los fenómenos en los que se fundamenta la técnica seguido por los resultados que se han obtenido de ella en diferentes experiencias en laboratorio y que permitirán al lector dilucidar cómo la degradación afecta el aislamiento en diferentes niveles.

### 5.1 TEMPERATURA DE TRANSICIÓN VÍTREA

En sistemas de aislamiento de máquinas rotativas de alto voltaje formados a partir de una matriz de mica/resina/vidrio las propiedades finales como su alta estabilidad térmica, su estabilidad dimensional, su resistencia a los solventes y a muchos otros agentes químicos, así como sus bajas pérdidas dieléctricas son completamente alcanzadas solo después del curado de la resina de impregnación.

Así, el desempeño final y global del sistema de aislamiento está fuertemente ligado al buen desempeño de la resina de impregnación. La cinta de mica como única barrera dieléctrica y la fibra de vidrio como material de soporte de la matriz cumplen sus funciones sin requerir una mayor preparación o transformación siempre que hayan sido fabricadas correctamente. Caso contrario ocurre con la resina, la cual debe comportarse como un líquido de baja viscosidad adecuado para una impregnación eficiente de todas las capas durante el proceso de fabricación del aislamiento y como un sólido rígido y resistente después del curado. Esta exigente

habilidad de modificar el estado de la resina se logra a través de un cuidadoso control de las reacciones de polimerización.

Las resinas poliméricas que empiezan como fluidos y después se solidifican tras la aplicación de calor u otros medios son conocidas como polímeros termoformados o termoendurecidos. Los sistemas de aislamiento modernos de resina epóxica o poliéster son resinas termoformadas debido a que el proceso de solidificación involucra un mecanismo de entrecruzamiento irreversible, contrario a los sistemas de aislamiento antiguos como los de mica-asfalto que si experimentan un cambio de una material sólido a un material viscoso consecuencia de una estructura no entrecruzada. Las resinas de este tipo son conocidas como resinas termoplásticas.

El proceso de solidificación o curado inicia con pequeñas moléculas o monómeros en estado líquido que a través de una de las varias posibles reacciones de polimerización reaccionan entre si formando moléculas de alto peso molecular caracterizadas por un crecimiento ramificado. Al inicio de la reacción la viscosidad de la resina es baja indicando un bajo grado de conversión. Con el progreso de la polimerización la viscosidad gradualmente se incrementa hasta alcanzar el punto de gel en el cual una gran cantidad de moléculas agrupadas ramificadamente se han fusionado formando una estructura de red incipiente. En el punto de gel la resina tiene algo de integridad mecánica lo que significa que ya no fluye y es capaz de soportar una carga mecánica. En la medida que avanzan las reacciones de polimerización, las moléculas aun sin reaccionar se unen a la red principal formando una macromolécula con la estructura entrecruzada característica de los polímeros termoformados. Es precisamente esta estructura entrecruzada la responsable de la irreversibilidad del proceso de solidificación.

Un fenómeno importante durante la polimerización es el inicio de la vitrificación, estado en el que las reacciones de entrecruzamiento han alcanzado un punto al que con el nivel energético actual de la resina no es posible traspasar las barreras rotacionales que impiden el movimiento de las cadenas (aunque la estructura aún puede moverse hasta cierto pequeño límite) y como resultado la resina se torna rígida y la velocidad de las reacciones de polimerización cae pronunciadamente.

La resina se dice curada solo hasta después de alcanzar el punto de vitrificación. Si la temperatura de una resina curada se eleva gradualmente, su energía interna incrementará hasta eventualmente ser suficiente para sobrepasar las barreras rotacionales que impiden el movimiento y se producirá una transición de un material vidrioso a un material con un comportamiento similar al del caucho. Aunque las moléculas en este estado pueden cooperativamente relajarse y desplazarse de alguna manera, el entrecruzamiento de las cadenas evita que el material fluya como un líquido. La temperatura a la cual se da esta transición es conocida como la temperatura de transición vítrea  $T_g$  [131]. En polímeros lineales (no entrecruzados) debido a su estructura cristalina las moléculas pueden deslizarse una sobre la otra resultando en la fusión de la resina. Esta temperatura en polímeros termoplásticos se conoce como temperatura de fusión.

Una variedad de propiedades en los polímeros presentan cambios durante la transición vítrea los cuales pueden ser usados como un medio para determinar la  $T_g$ . Entre las propiedades que se han empleado para determinar la transición vítrea están el volumen, algunos parámetros dieléctricos, otros mecánicos como el módulo de almacenamiento elástico y parámetros físicos como la capacidad calorífica de la resina. La forma en la que se han utilizado cada uno de estos se discute a continuación.

En los polímeros termoformados como consecuencia del estado amorfo de su estructura molecular existe un espacio libre significativo, entendido como el volumen específico en

exceso comparado con el que tuviera en estado cristalino a una temperatura dada. La presencia de este volumen libre tiene un gran impacto en el comportamiento del polímero con la temperatura. A alta temperatura donde el polímero está en su estado gomoso el volumen específico cambia linealmente con la temperatura como lo indica la línea de equilibrio amorfo en la Figura 27a. En esta región el polímero está también en equilibrio termodinámico porque el volumen específico permanece constante independiente del tiempo al que permanezca sometido a una temperatura determinada. Si el polímero es enfriado desde su estado gomoso la relación entre la temperatura y el volumen específico empieza a desviarse de la línea de equilibrio termodinámico a partir de la temperatura  $T_s$ . Si la temperatura continua decreciendo el polímero entra a la región del estado vítreo donde a la temperatura  $T_e$  se establece una nueva línea con una pendiente menor que la del equilibrio termodinámico. Comúnmente el rango entre  $T_s$  y  $T_e$  define el rango de temperatura de la transición vítrea y el punto medio se toma como el valor puntual de la  $T_g$ . Cualquier valor puntual de la temperatura de transición vítrea es de hecho una representación del rango de temperaturas en el cual la propiedad física medida está cambiando. La reducción en la razón de cambio a la que se encoje el volumen del polímero por debajo de la  $T_g$  se debe a que se alcanza un punto crítico en el que la movilidad de las cadenas es fuertemente reducida debido a su propia estructura entrecruzada que evita que alcance un estado cristalino. En contraste, el comportamiento del volumen específico en un polímero termoplástico si muestra una discontinuidad a la temperatura de fusión que divide la curva en dos segmentos como se aprecia en la Figura 27b.

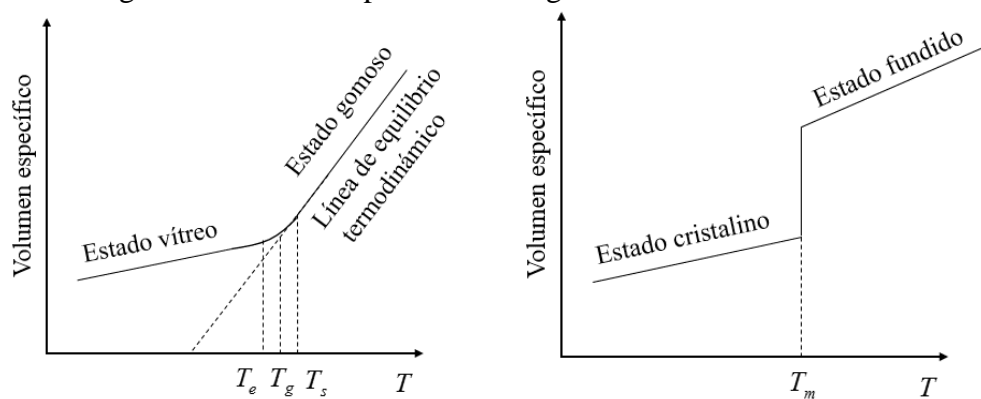


Figura 27. Comportamiento comparativo del volumen específico en función de la temperatura entre a) un polímero termoformado y b) un polímero termoplástico.

En cuando a los parámetros dieléctricos, dada la relación existente entre el factor de pérdidas dieléctricas o factor de disipación y la movilidad de los dipolos eléctricos, este factor ha sido utilizado para estudiar los cambios en la estructura molecular de la resina, especialmente durante el curado. El factor de disipación cuantifica entre otros la energía consumida en el material para alinear los dipolos eléctricos con el campo eléctrico variable. Cuanto mayor es el número de dipolos y menor el tiempo de relajación dieléctrica, mayor es la energía consumida en este proceso y así mayores serán las pérdidas dieléctricas en la resina. Por lo anterior es de esperarse que los diferentes factores que afectan la movilidad de las cadenas poliméricas tengan un efecto medible en el factor de disipación. Cuantitativamente, el factor de disipación incrementa muy poco a baja temperatura. Cuando se alcanza la  $T_g$  las moléculas de la resina ganan una alta movilidad conduciendo a un pronunciado incremento de las pérdidas. Este comportamiento es aprovechado para estudiar el grado de curado de la resina [132]. A modo de ilustración, los autores de esta referencia citaron la Figura 28a, en la

cual se puede observar un pronunciado incremento en el factor de disipación por encima de la  $T_g$ . Los autores también sugirieron que el valor de la  $T_g$  puede ser determinado como la proyección sobre el eje de las abscisas de la línea recta que aproxima los valores del factor de disipación a altas temperaturas o como en [133] como el punto de inflexión donde la curva crece rápidamente. En oposición a este método, en algunos estudios se suele tomar el valor de la  $T_g$  como el valor de la temperatura donde ocurre el valor máximo del factor de disipación. Por ejemplo, en [134] los autores estudiaron el comportamiento del factor de disipación en función de la temperatura y del contenido por peso de nano partículas de silicio en la resina epóxica. En los análisis el valor de la  $T_g$  fue tomado como el valor máximo de las curvas como se aprecia en la Figura 28b. Los dos métodos descritos probablemente resultarían en valores diferentes de  $T_g$ .

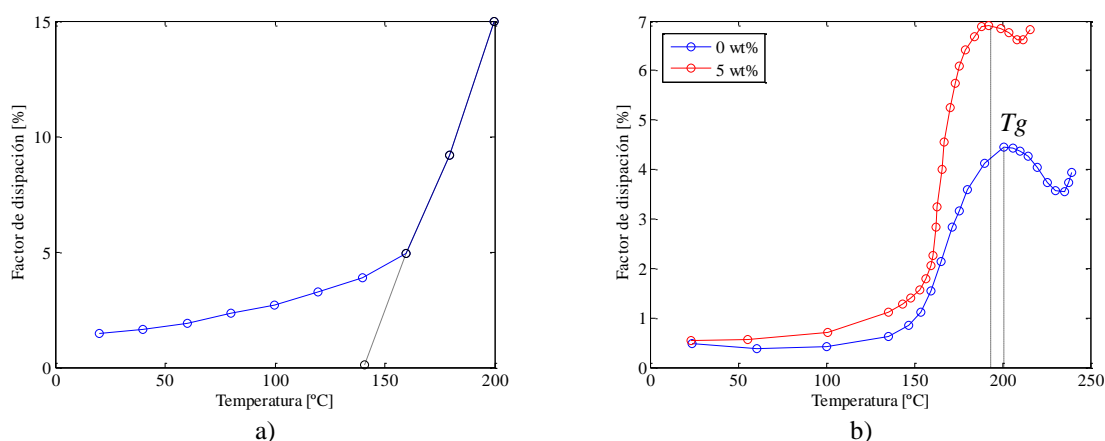


Figura 28. Comportamiento del factor de disipación versus temperatura usado para determinar la  $T_g$  de un aislamiento a) parcialmente curado y b) de un aislamiento completamente curado.

De la Figura 28a se evidencia claramente que la dependencia de las pérdidas dieléctricas de la temperatura se hace más plana por debajo de la  $T_g$ . Para aislamientos completamente curados y en óptimas condiciones el factor de disipación es prácticamente independiente de la temperatura por debajo de la  $T_g$  como se aprecia en la Figura 28b.

Entre los parámetros mecánicos empleados para determinar la temperatura de transición vítrea está la medición de los parámetros viscoelásticos de la resina en ensayos de análisis mecánico dinámico (DMA) y termomecánico (TMA). En los ensayos de DMA una tensión o esfuerzo sinusoidal es aplicado a una muestra y se obtiene su respuesta como función de la frecuencia y de la temperatura. Debido a la naturaleza viscoelástica de la resina a altas temperaturas ella requiere cierto periodo de tiempo para recomodarse/relajarse molecularmente tras la aplicación de una fuerza dinámica y como resultado la deformación o desplazamiento medido estará fuera de fase en relación al esfuerzo aplicado. Este desplazamiento de fase define las propiedades viscoelásticas de la muestra en términos de su módulo de almacenamiento dinámico ( $E'$ ), módulo de pérdidas dinámico ( $E''$ ) y en términos de la tangente del ángulo de pérdidas dinámico ( $\tan\delta_m$ ).  $E'$  cuantifica la energía almacenada en la muestra elásticamente después de aplicar el esfuerzo,  $E''$  representa la energía disipada como calor que se da por el movimiento de las cadenas poliméricas y  $\tan\delta_m$  cuantifica la relación de la energía disipada y la energía almacenada ( $E''/E'$ ). Cuando estos parámetros son medidos en función de la temperatura se obtiene una gráfica típica como la mostrada en la Figura 29. El valor de  $\tan\delta_m$  por debajo de la  $T_g$  es pequeño a raíz de que las cadenas poliméricas están “congeladas”, así las deformaciones son principalmente elásticas. A la

temperatura de transición vítrea el valor de  $\tan \delta_m$  alcanza su punto máximo ya que la mayoría de las cadenas poliméricas ahora pueden moverse cooperativamente. Por encima de la  $T_g$  las cadenas han alcanzado tal movilidad al punto que hay muy poca resistencia oponiéndose a dicho movimiento y entonces el valor de  $\tan \delta_m$  decrece [135].

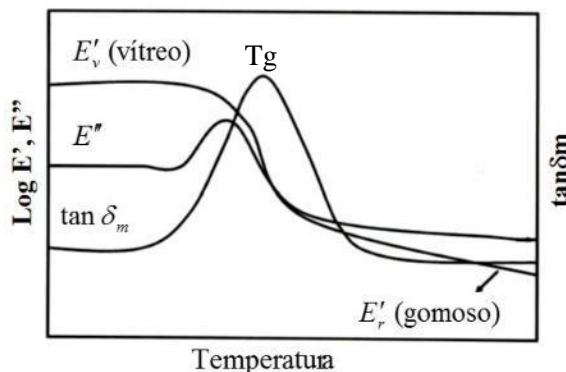


Figura 29. Parámetros viscoelásticos como función de la temperatura usados para determinar la temperatura  $T_g$  de un polímero termoformado.

En un ensayo de TMA por su parte se mide la deformación o cambios dimensionales de la muestra en función de la temperatura. El procesamiento de estos resultados conduce a la determinación de la  $T_g$  y de los coeficientes de expansión térmica. El valor de la  $T_g$  queda determinado como la temperatura a la cual los coeficientes de expansión térmica exhiben un cambio pronunciado. Los resultados mediante esta técnica son dependientes de las condiciones experimentales y de cómo el instrumento de medición produce la deformación (modo de deformación). Algunas de las limitaciones para la aplicación de mediciones de TMA en el estudio de sistemas de aislamiento son que se requiere un control dimensional exhaustivo de la muestra, tamaños relativamente grandes y una alta regularidad en su forma. Los análisis por medio de TMA han arrojado resultados interesantes tanto para el estudio de la temperatura óptima de curado de sistemas de aislamiento [136] como para la caracterización de la resistencia a la delaminación [39]. En la aplicación del primer caso se concluyó que la temperatura óptima de curado es la que corresponde a la temperatura que lleva la  $T_g$  a su valor máximo. En la segunda aplicación se midieron los coeficientes de expansión térmica espaciales, es decir a lo largo del eje x, y y z, en muestras de estructuras dieléctricas obtenidas mediante las técnicas de fabricación VPI y Resin Rich. Los resultados mostraron diferencias entre los coeficientes atribuidas a la técnicas de fabricación. El coeficiente de expansión medido a lo largo del eje z para las muestras procesadas mediante Resin Rich fueron menores que aquellos para las muestras procesadas mediante VPI sobre todo cuando fue medido por encima de la  $T_g$ . Estos resultados confirman que los aislamientos del tipo Resin Rich resultan en estructuras bastante rígidas que al exhibir una menor expansión térmica podrían presentar mayores esfuerzos internos y de ahí posiblemente una menor resistencia a la delaminación.

Finalmente en esta clasificación está la determinación de la temperatura de transición vítrea a través de la medición de la capacidad calorífica llevada a cabo en ensayos de calorimetría diferencial de barrido (DSC). La capacidad calorífica de la resina representa la energía requerida para calentar una masa determinada desde una temperatura A hasta una temperatura B. El cambio en forma de escalón que experimenta la capacidad calorífica durante el enfriamiento o calentamiento es el fenómeno que aprovecha un instrumento de DSC para determinar la temperatura de transición vítrea. El valor puntual de la  $T_g$  se obtiene como el



punto medio del cambio en la capacidad calorífica al pasar del estado vítreo al estado gomoso. Los límites para cada estado están indicados de forma similar por  $T_s$  y  $T_e$  tal como se indicó en la Figura 27a.

Cada una de las técnicas de medición descritas por supuesto tiene ventajas y desventajas aunque hasta ahora no parece existir un consenso respecto a qué técnica se ajusta mejor para el análisis de muestras de aislamientos compuestos de mica/resina/vidrio. Mientras en [137] los autores afirman que debido a que el contenido de resina en el aislamiento es solo entre 20-25%, entonces aplicar DSC no sería lo suficientemente sensible para determinar un valor de  $T_g$  siendo el análisis por DMA mucho más conveniente. En contravía, una vasta cantidad de pruebas de laboratorio han reportado resultados satisfactorios al aplicar la técnica de DSC y en muchos otros casos ambas técnicas (DSC-DMA) arrojan resultados similares. Se considera que un factor determinante en la obtención de resultados satisfactorios es sin duda la preparación y forma de la muestra analizada. Lo que sin duda no debe perderse de vista es el hecho de que los cambios en las propiedades que tienen lugar a la temperatura de transición vítrea se comportan en general algo diferente durante el calentamiento que durante el enfriamiento y por lo tanto como se concluye en [138] las técnicas de DSC, TMA y DMA deberían arrojar valores similares de  $T_g$  pero no necesariamente los mismos.

En el caso particular de esta investigación, uno de los objetivos fue complementar las técnicas de medición dieléctricas con mediciones fisicoquímicas en barras estatóricas reales. Para ello, garantizar la integridad del aislamiento en términos de evitar una reducción peligrosa de la rigidez dieléctrica del aislamiento de la bobina se convirtió en el factor principal para la selección de la técnica de medición fisicoquímica más adecuada. Esto perfiló como la técnica más adecuada aquella que requiriera muestras con la menor cantidad de material. Considerando esta limitación de tamaño de la muestra, se seleccionó la técnica de DSC y por ende a continuación se proporcionarán más detalles sobre los instrumentos de medición y se discutirá los parámetros y factores que afectan los resultados de una medición de DSC.

Un instrumento de DSC aprovecha el cambio marcado que ocurre en la capacidad calorífica de la resina para determinar el valor de la  $T_g$ . En un polímero la transición vítrea es un proceso endotérmico (absorbe calor del sistema) en el que el cambio medido en la capacidad calorífica  $\Delta C_p$  siempre es positivo tanto si dicha transición es observada durante el calentamiento o enfriamiento de la muestra [131]. Esta característica proporciona una forma de distinguir un proceso de transición vítrea de otros cambios o reacciones que pueden detectarse en una medición de DSC en forma de cambios también endotérmicos y lógicamente exotérmicos.

Un método para reconocer una transición vítrea es por medio de su característico cambio endotérmico en forma de escalón. En la práctica, la región en la que ocurre la transición vítrea pueden ser influenciada e incluso distorsionada por otros procesos o reacciones ocurriendo simultáneamente. La Figura 30a ilustra este fenómeno mostrando un pico endotérmico en lugar del cambio tipo escalón esperado en la región donde ocurriría la transición vítrea. De acuerdo a [37] se cree que este pico endotérmico puede ser por un proceso de relajación entálpica también entendido como un proceso de envejecimiento físico de la resina.

Por debajo de la  $T_g$  un polímero en su estado vítreo no está en equilibrio termodinámico. En cuanto el polímero es calentado superando su  $T_g$  se da un incremento de la capacidad calorífica medida lo que significa se requiere más energía para promover el movimiento molecular de la resina en su estado gomoso. Cuando el polímero ha sufrido envejecimiento físico su entalpía tiende a disminuir hacia la entalpía del equilibrio termodinámico dándole la posibilidad a las moléculas de relajarse. Cuanto menor es la entalpía del polímero mayor es la

energía requerida para iniciar el movimiento molecular en el estado gomoso y este es el por qué un pico endotérmico podría aparecer en lugar del cambio tipo escalón que se da alrededor de la temperatura de transición vítrea. Si después de calentar el polímero, este se enfría desde una alta temperatura la entalpía final será mayor que la que tenía al inicio del calentamiento. Sucesivos ciclos de calentamiento/enfriamiento hacen que la entalpía a baja temperatura sea mayor hasta que eventualmente el pico endotérmico desaparecerá y aparecerá un cambio tipo escalón alrededor de la  $T_g$ . Este fenómeno es un problema inherente al proceso de medición el cual puede ser resuelto aplicando un programa de temperatura calentamiento/enfriamiento como se discutirá más adelante.

En la Figura 30b el pico endotérmico ha desaparecido dando lugar al característico cambio tipo escalón de la transición vítrea luego de que se acondicionara la muestra a través de un ciclo calentamiento/enfriamiento.

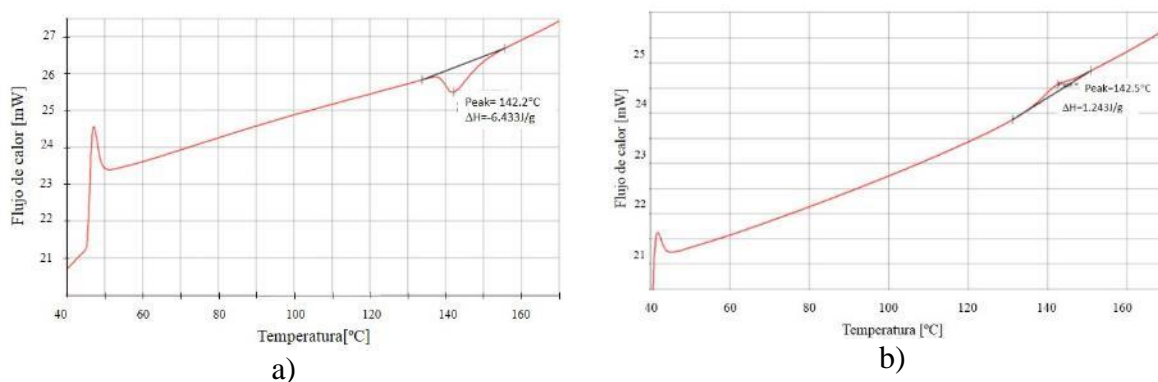


Figura 30. Medición de DSC para un polímero a) durante un primer calentamiento mostrando un pico endotérmico y b) luego de un ciclo calentamiento/enfriamiento/calentamiento mostrando un cambio escalón endotérmico alrededor de la temperatura de transición vítrea.

Otro ejemplo de proceso que enmascara la detección de una transición vítrea son las reacciones de postcurado. En dicho caso en la gráfica de DSC aparecerá un pico endotérmico seguido por un pico exotérmico. De igual forma una segunda medición luego de un ciclo de calentamiento/enfriamiento debería ser suficiente para conducir a un cambio escalón.

Así como las reacciones y fenómenos que tienen lugar en los polímeros pueden distorsionar los resultados de las mediciones de DSC, los parámetros de configuración de la medición también afectan los resultados. Previo a la discusión de cómo estos parámetros afectan las mediciones de  $T_g$  es necesario primero describir cómo se obtiene una medición de DSC.

El principio teórico detrás de una medición de DSC es la medición de la energía necesaria para establecer una diferencia cero entre la temperatura de la muestra y la de un material de referencia inerte cuando ambos son sometidos a un programa idéntico de temperatura controlada en una misma atmósfera.

El instrumento de DSC está provisto con dos crisoles o portamuestras ubicados cada uno justo encima de un elemento calefactor. Uno de los crisoles es cargado con la muestra a ser analizada mientras que el otro actuará como referencia dejándose entonces vacío. Ambos elementos calefactores son finamente controlados por un computador garantizando la misma razón de incremento de la temperatura en ambos crisoles. El programa de temperatura también incluye reducción de la temperatura de prueba, en este caso el computador controlador ajusta un sistema de enfriamiento para que ambas muestras se enfríen a la misma velocidad. Si alguna reacción o evento térmico se presenta simultáneamente en ambos crisoles la energía térmica proporcionada por cada elemento calefactor se suministrará a la misma razón. Sin

embargo, si una reacción ocurre solo en el crisol que contiene la muestra analizada a una temperatura dada el elemento calefactor debajo de él tendrá que proporcionar más/menos energía térmica para mantener nula la diferencia de temperatura entre los crisoles. La diferencia en la energía de salida entre los dos elementos calefactores es registrada por el computador controlador y convertida en el parámetro requerido. Si una reacción endotérmica ocurre en la muestra analizada, se requiere más energía del elemento calefactor para incrementar su temperatura. Caso contrario ocurre en una reacción exotérmica: menos energía se requiere del elemento calefactor para incrementar la temperatura de la muestra.

El procedimiento descrito corresponde a lo que es conocido como el método de compensación de potencia aludiendo a que la potencia de cada elemento calefactor es independientemente controlada. A parte del método de compensación de potencia, la diferencia nula de temperatura entre los crisoles puede ser llevada a cabo mediante el método de flujo de calor. En este método ambos crisoles son calentados por un único elemento calefactor conocido como disco termoeléctrico fabricado usualmente de constatan el cual constituye un camino de baja resistencia al flujo de calor entre el crisol de referencia y el que contiene la muestra analizada. Este sistema está provisto de sensores del tipo termopar para medir la temperatura de ambos crisoles programada por el controlador. Esencialmente el flujo de calor entre el disco termoeléctrico y el crisol con la muestra y entre el disco termoeléctrico y el crisol de referencia es el mismo. Cuando un proceso endotérmico o exotérmico ocurre en la muestra el exceso relativo de energía fluye entre el crisol de la muestra y el de referencia a través del disco termoeléctrico hasta que se alcanza de nuevo el equilibrio. La pequeña diferencia de temperatura que puede aparecer entre ambos crisoles es proporcional al flujo de calor entre ellos.

El resultado de una medición de DSC es un termograma como el mostrado en la Figura 30 donde el eje de las ordenadas es la señal de DSC, es decir el flujo de calor, y el eje de las abscisas corresponde a la temperatura o el tiempo. En el eje de las ordenas adicionalmente se debe indicar cuál es la dirección dada a los picos exotérmicos o endotérmicos. Para esto usualmente se utiliza junto al eje una flecha apuntando hacia arriba o hacia abajo o los símbolos “^” o “up” seguido de la etiqueta “exo” o “endo”. Así por ejemplo, si se utiliza una flecha hacia arriba seguida de la etiqueta “exo” quiere decir que los eventos exotérmicos en el termograma se muestran como picos o cambios hacia arriba y lógicamente hacia abajo los eventos endotérmicos. La unidad estándar para el flujo de calor es mW, pero también es frecuente utilizar W/g donde el flujo de calor ha sido dividido por la masa de la muestra. Dado que el flujo de calor es proporcional a la capacidad calorífica, por lo tanto la temperatura de transición vítrea puede ser determinada también por el cambio tipo escalón del flujo de calor en un termograma de DSC. La correlación teórica entre la capacidad calorífica y el flujo de calor está dada por la ecuación (5.1).

$$C_p = \left( \frac{dH}{dt} \right) / \left( \frac{dT}{dt} \right) = \frac{dH}{dT} \quad (5.1)$$

donde  $C_p$  es la capacidad calorífica,  $\frac{dH}{dt}$  es el flujo de calor medido y  $\frac{dT}{dt}$  es la velocidad de calentamiento en el programa de temperatura (parámetro de configuración).

Una vez entendido que los cambios en el flujo de calor siguen los cambios en la capacidad calorífica, entonces es claro que la precisión en la determinación del valor  $T_g$  a partir de un termograma DSC recae en la precisión con la que el instrumento mide la señal del flujo de calor.

Para procurar óptimos resultados, los usuarios especialmente aquellos sin una amplia experiencia en la realización de ensayos termoanalíticos deben como mínimo considerar los siguientes factores que afectan los resultados.

**Definición del programa de temperatura.** El programa de temperatura se refiere a la temperatura de prueba en función del tiempo caracterizado por una determinada razón de cambio. Aunque el flujo de calor en una medición de DSC puede ser medido durante el calentamiento o durante el enfriamiento de la muestra, se recomienda establecer un programa de temperatura de acondicionamiento tal como se muestra en la Figura 31, compuesto de dos etapas de incremento de la temperatura, una etapa de enfriamiento y dos periodos cortos a temperatura constante.

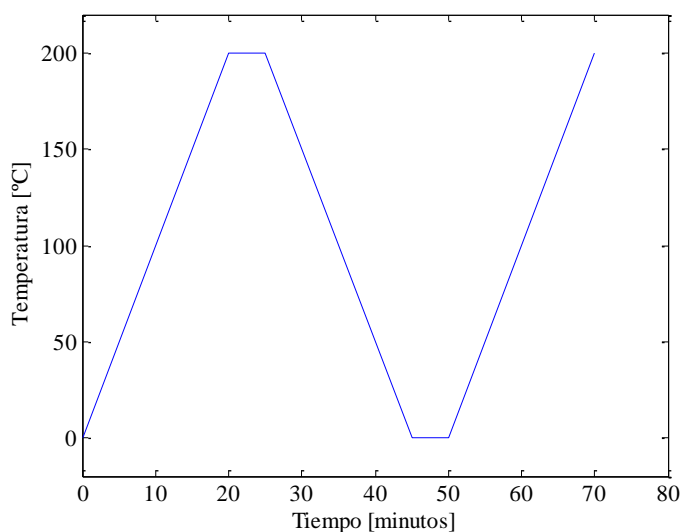


Figura 31. Programa de temperatura controlado calentamiento/enfriamiento recomendado para eliminar la historia térmica de la muestra.

Como se mencionó previamente, la relajación térmica o envejecimiento físico del polímero afecta la detección de la  $T_g$  por efecto de la reducción de su entalpía con el tiempo. Aplicar un programa de temperatura de calentamiento/enfriamiento recupera el polímero del envejecimiento físico por lo que se dice que un programa de temperatura de estas características tiene la capacidad de borrar la historia térmica del material.

Mientras que la medición del flujo de calor durante el primer calentamiento está influenciada por la historia térmica y mecánica de la muestra y por la evaporación de solventes y humedad, la medición del flujo de calor durante el segundo calentamiento está en teoría libre de estos factores adversos permitiendo una mejor detección de la temperatura de transición vítrea.

El rango de temperatura de la prueba debe ser elegido de tal forma que se cubra el rango de temperaturas donde se espera que ocurran las reacciones o procesos de intereses. Cuando se examinan muestras de un compuesto resina/mica/vidrio indudablemente las reacciones de mayor interés son aquellas que ocurren en la resina. En este caso la temperatura máxima bien podría ser establecida en 200°C permitiendo detectar la temperatura de transición vítrea. Como regla general, la temperatura final de la prueba debe estar unas pocas decenas de °C por encima del valor esperado del proceso de interés, la transición vítrea para este caso, pero al mismo tiempo no superando la temperatura de degradación, puesto que esto alteraría las

subsecuentes mediciones. La temperatura inicial comúnmente es la temperatura ambiente cuando las reacciones o fenómenos estudiados ocurren a altas temperaturas. Sin embargo algunos autores sugieren que la temperatura inicial debería llevarse muy por debajo de la temperatura de transición vítrea esperada con lo que se logra una mejor detección de la transición [139]. En [140] la temperatura inicial fue establecida en  $-50^{\circ}\text{C}$  para mediciones de DSC en muestras de resina epóxica del tipo bisfenol A.

**Velocidad de calentamiento/enfriamiento.** Es la razón de cambio con la cual la temperatura de prueba es incrementada o reducida. El valor de la velocidad de calentamiento es de gran importancia ya que es directamente proporcional a la señal detectada por el instrumento de DSC. Esto implica que la señal medida de DSC usando una velocidad de calentamiento de  $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$  es dos veces más intensa que si se usara una velocidad de  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . La selección de la velocidad de calentamiento es un compromiso entre la intensidad de la señal detectada y el tiempo disponible para que la muestra puede reaccionar. Entonces la velocidad de calentamiento debería ser lo más alta posible pero todavía dando el tiempo suficiente para que cualquier reacción en la muestra tenga lugar. El efecto de la velocidad de calentamiento sobre los resultados puede observarse claramente en la Figura 32, donde la temperatura de transición vítrea es claramente distinguible a partir de los  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . Una buena práctica es conservar la misma velocidad tanto para el calentamiento como para el enfriamiento. Los valores típicos para la velocidad de calentamiento están entre  $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$  y  $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , siendo  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$  el valor más ampliamente reportado en los estudios relacionados con los materiales empleados en los sistemas de aislamiento de máquinas eléctricas rotativas.

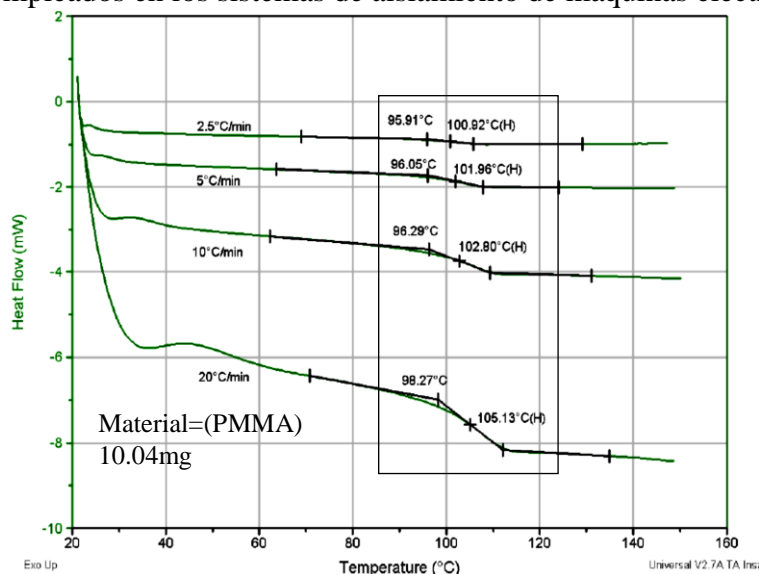


Figura 32. Efecto de la velocidad de calentamiento en la detección de la temperatura de transición vítrea.

**Tamaño de la muestra.** El incremento del tamaño de la muestra tiene el mismo efecto en la habilidad del instrumento de DSC para detectar una transición vítrea (sensibilidad) en la muestra que el incremento de la velocidad de calentamiento. Aunque una muestra de mayor tamaño incrementa la sensibilidad, también reduce la resolución debido a la posibilidad de formar mayores gradientes de temperatura en la muestra. Típicamente entre 10-20mg son suficientes para obtener buenos resultados. A pesar de esto algunos autores han utilizado muestras de solo 5mg. Cuando se analizan muestras de materiales puros, por ejemplo muestras de solo resina, esta pequeña cantidad podría ser suficiente, pero cuando se estudian muestras

compuestas es recomendable utilizar una mayor cantidad de material. Siempre que fue posible en esta investigación se prepararon muestras entre 10-20mg.

**Crisoles.** Los crisoles son los contenedores de las muestras cuyos materiales definen el rango de temperatura de la medición. Para bajas temperaturas se pueden utilizar crisoles de aluminio. Cuando se emplean instrumentos que simultáneamente pueden llevar a cabo mediciones de DSC/TGA deben considerarse crisoles de alúmina o cerámicos que permitan trabajar a las altas temperaturas utilizadas en los análisis de TGA. Otro factor importante es garantizar un buen contacto térmico entre el crisol y la muestra. Para ellos, el compuesto de mica/resina/vidrio debe ser cortado en trozos lo más pequeño y delgado posible, cuidando cubrir la mayor área posible en el fondo del crisol.

**Gas de purga.** Durante el programa de medición algunos volátiles pueden desprenderse de las muestras. A menos que sea el caso, estos volátiles se ventilan para evitar reacciones adicionales a través de un pequeño agujero en la tapa del crisol que a su vez permite rodear la muestra con una atmósfera inerte típicamente de nitrógeno o helio suministrado entre 50-80 mL/min.

Un resumen mostrando algunos valores frecuentes para los parámetros en una medición de DSC se muestra a continuación en la Tabla 2.

Temperatura Inicial [°C]	Temperatura final [°C]	Velocidad calentamiento [°C/min]	Tamaño de la muestra [mg]	Atmósfera/flujo [ml/min]	Ref
30	280	10	15	N/50	[141]
20	160	10	10-20	N	[142]
0	250	10	20	N/200	[143]
-60	300	2.5-20	10	N	[144]
40	170	5	10	--	[37]
--	--	20	5-15	--	[145]
20	300	9	6-10	80	[128]
20	180	20	5	--	[146]
-50	100	20	10-20	N/55	[140]
30	300	10	--	--	[147]
40	170	10	10	N	[148]
25	300	20	--	--	[134]

Tabla 2. Parámetros de configuración comunes en una medición de DSC.

### 5.1.1 ANÁLISIS DE CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO (DSC)

Muchos cambios en las propiedades del aislamiento del estator van a la par con aquellos de la resina de impregnación. Así, el comportamiento térmico de la resina impacta sobre el desempeño de todo el sistema de aislamiento. La temperatura de transición vítrea es uno de los parámetros que permite detectar cambios estructurales de la resina y como tal se la puede considerar un indicativo de la condición del aislamiento principal en una máquina eléctrica rotativa.

Debido a que la  $T_g$  habla del nivel de entrecruzamiento, sería razonable pensar en un desplazamiento de ella en la medida que la estructura de la resina se degrada durante el envejecimiento. El valor inicial de la  $T_g$  para aislamientos compuestos de mica-epoxi por supuesto depende de la formulación específica de la resina de acuerdo al fabricante, aunque en

la literatura se encuentran valores típicos que pueden variar entre 100 y 130°C. Una clasificación de la  $T_g$  en función de la clase térmica del aislamiento es dada en [149]. Los autores de esta referencia afirmaron que en aislamientos clase B del tipo epoxi la temperatura de transición vítrea está en el rango entre 145-155°C, mientras que para aislamiento clase F y H estos valores suben hasta los rangos 185-190 °C y 210-215 °C respectivamente. Aunque los valores de la  $T_g$  si se incrementan con su clase térmica, estos valores reportados parecen mucho más alto de lo esperado.

Tanto si la  $T_g$  tiende a mayores o menores valores con el envejecimiento depende de las reacciones de degradación predominantes. Si la reacción predominante es la escisión de cadenas entendida como el rompimiento en cualquier punto de la estructura entrecruzada de la resina, entonces se espera una reducción en la  $T_g$ . Contrariamente si prevalecen las reacciones de oxidación las cuales llevan a la formación de enlaces, entonces la  $T_g$  muestra un incremento. Por ejemplo, en [147] se reportó un incremento de la  $T_g$  desde 95.43°C hasta 113.43°C en muestras de un aislamiento compuesto envejecidos a 180°C durante 72 horas. El autor concluyó que tal incremento fue debido a las reacciones de oxidación que incrementaron el entrecruzamiento de la resina. Aunque los resultados anteriores mostraron una sola reacción predominante, lo cierto es que varias reacciones pueden estar compitiendo durante el envejecimiento térmico, especialmente a temperaturas por encima de la temperatura de transición vítrea.

En [150] los autores investigaron la  $T_g$  y la pérdida de masa de dos compuestos de resina epoxi diferentes bajo diferentes temperaturas y atmósferas incluyendo atmósfera de aire y altamente oxidante. Los resultados mostraron que la degradación por mecanismos de escisión de cadena incrementó con la temperatura sobre todo en la atmósfera rica en oxígeno y que los subproductos de reacción, como el agua formada en la atmósfera de oxígeno pueden conducir a la plastificación de la resina, reflejada como una reducción en su temperatura de transición vítrea. En los experimentos, inicialmente la  $T_g$  subió debido al incremento del entrecruzamiento y seguidamente decayó obedeciendo a las reacciones de escisión de cadena dejando ver que los mecanismos de degradación pueden evolucionar con el tiempo. También se encontró que las reacciones de escisión de cadena no impiden una densificación global de la matriz polimérica. Esto significa que los mecanismos de escisión de cadena pueden coexistir con las reacciones de entrecruzamiento durante el envejecimiento.

En [137] la  $T_g$  de un compuesto de mica/resina/vidrio expuesto a 180°C en una atmósfera oxidante presentó un comportamiento creciente y luego decreciente. El decrecimiento no fue atribuido a los mecanismos de escisión de cadena como se esperaba sino a la plastificación por agua como resultado de la oxidación de los subproductos de descomposición volátiles. Pese a la caída de la  $T_g$  un incremento en el módulo de almacenamiento elástico reveló que de hecho el entrecruzamiento global de la resina continuó creciendo. Finalmente los autores puntualizaron el rol de los peróxidos e hidroperóxidos formados en las reacciones de oxidación: a corto plazo, ellos reaccionan con la estructura principal de la resina incrementando el entrecruzamiento, a largo plazo las reacciones de escisión de cadena se vuelven predominantes conduciendo a la reducción de la  $T_g$ . Resultados similares son también obtenidos en [91] y [151].

La condición inicial de la resina de un aislamiento justo antes de ir a un programa de envejecimiento es un factor que afecta la tendencia de la  $T_g$ . A pesar de que los devanados del estator cuando entran en operación se dice están completamente curados, lo cierto es que la temperatura de operación es suficiente para continuar el curado de la matriz epóxica hasta cierto punto durante el periodo inicial de servicio, lo que se conoce como postcurado. En este

periodo las reacciones de entrecruzamiento continúan avanzando y por ende se presenta un incremento de la  $T_g$ . El efecto del postcurado en las propiedades mecánicas del aislamiento es benéfica dado que este permite una relajación del volumen y de las tensiones internas que pudieron haberse creado por el proceso mismo de polimerización. Las propiedades dieléctricas como la capacitancia y el factor de disipación también resultan mejoradas después del periodo de postcurado.

Los valores de la  $T_g$  son de gran importancia tanto para el diseño como para la evaluación de la condición del aislamiento debido a su estrecha relación con las propiedades físicas del aislamiento. Si la temperatura de operación de la máquina crece anormalmente por encima de la  $T_g$  prolongadamente las propiedades mecánicas de la resina como la resistencia a la tracción y a la compresión caen dramáticamente incrementando la probabilidad de falla dieléctrica de la máquina. A plena carga, se espera que la temperatura de diseño de operación esté por debajo de la  $T_g$  donde el aislamiento se comporta como un sólido duro pero a la vez frágil. Por lo tanto la densidad del entrecruzamiento tiene que ser controlada con el fin de proporcionarle algo de flexibilidad a la resina y por ende a toda la estructura del devanado.

Algunos métodos comunes para proporcionar flexibilidad a la resina son modificar el agente endurecedor, controlar el largo de las cadenas poliméricas en la resina base y adicionar agentes de flexibilización tales como resinas poliéster, elastómeros o glicéridos [41].

De acuerdo a [140] la absorción de agua también afecta las propiedades mecánicas del aislamiento y la densidad del entrecruzamiento. Las moléculas de agua absorbidas pueden desplazarse de un lado a otro rompiendo en su camino los enlaces entre las cadenas del polímero produciendo una reducción de la  $T_g$ . Esta afirmación también fue apoyada en investigaciones por Y. Li en [152] donde la reducción en el módulo de almacenamiento a una temperatura mayor a la  $T_g$  fue explicada por la reducción de la densidad del entrecruzamiento atribuible al efecto del agua en el polímero. El agua dentro del aislamiento puede existir debido a absorción del ambiente o como un subproducto de degradación. Los grupos funcionales hidroxilo formados por la apertura del anillo epoxi durante la polimerización entre otros hace la resina más susceptible a la absorción de agua. El efecto de la absorción del agua es dramático y tal como se reporta en [41] la humedad puede reducir en 30°C la  $T_g$  y entre 50-75% la resistencia a la tracción. Desde el punto de vista macroscópico el efecto del agua en el aislamiento es la ruptura de la interface cintas de mica/resina lo cual significa pérdida de la eficiencia con la que los esfuerzos mecánicos son transferidos entre la resina y las cintas de mica o en otras palabras delaminación.

## 5.2 PERFILES DE PÉRDIDA DE MASA

Los resultados de un ensayo de termogravimetría (TGA) es un termograma donde se reporta en el eje de las ordenadas la masa, relativa en % o absoluta en mg, de la muestra y en el eje de las abscisas la temperatura o el tiempo como se observa en la Figura 33.



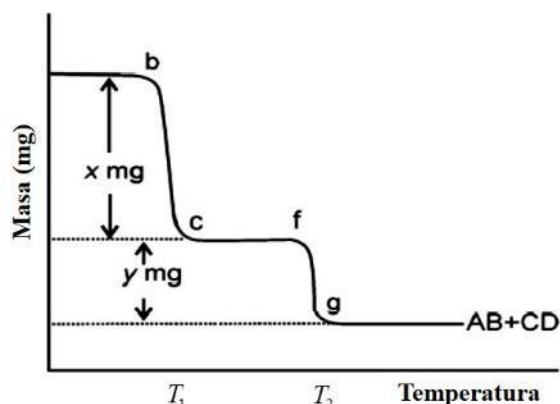


Figura 33. Representación esquemática de una curva TGA indicando dos procesos de descomposición.

Al mismo tiempo es frecuente sobreponer a la curva de TGA la curva DTA que es matemáticamente la derivada de la primera curva. La curva DTA arroja los valores de la temperatura o del tiempo en el que las reacciones están ocurriendo a la máxima velocidad, así como también permite identificar con mayor claridad los valores iniciales y finales de los procesos, y detectar la presencia de procesos solapados.

Una característica del termograma de la Figura 33 es que la curva tiene una forma “escalonada”. Entre un escalón y otro existe un cambio abrupto del peso de la muestra seguido por un periodo donde no hay cambios en la masa hasta el próximo escalón. El carácter escalonado del termograma es una indicación de que la muestra tiene dos componentes, cada uno con una temperatura de descomposición  $T_1$  y  $T_2$  respectivamente.

La forma del escalón también es un indicativo de los procesos que están ocurriendo. En la práctica un proceso de descomposición se detectada como un cambio abrupto pero sin llegar a verse como un escalón propiamente. Mientras que en el caso ideal de la Figura 33 la temperatura a la cual inicia y termina el proceso que origina el cambio de masa es fácilmente discernible, en la realidad el proceso de cambio de masa es más paulatino como se muestra en el ejemplo de la Figura 34. La temperatura inicial y final queda entonces definida por las intersecciones de las rectas tangentes que aproximan el cambio en la masa de la muestra.

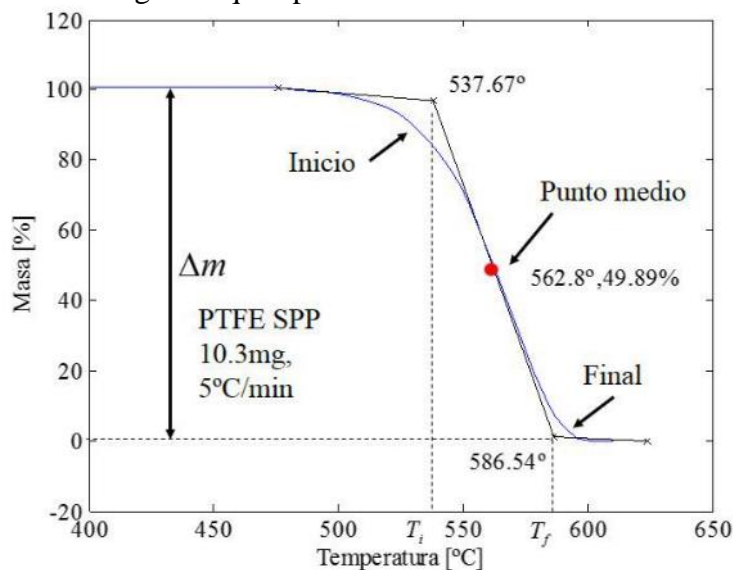


Figura 34. Definición de la pérdida de masa y de la temperatura inicial y final del proceso en una curva de TGA.

El análisis de termogravimetría TGA hace parte del conjunto de técnicas de análisis térmico usado para caracterizar una amplia variedad de materiales. Los análisis de TGA proporcionan información complementaria a la información obtenida de los análisis de calorimetría. De ahí que con mucha frecuencia ambas técnicas sean aplicadas conjuntamente.

Una gráfica de TGA se usa principalmente para determinar la estabilidad térmica y las reacciones que pueden desencadenarse en un material por efecto de la temperatura, así como también su composición. No todos los eventos térmicos producen un cambio en la masa de la muestra, por ejemplo las transiciones vítreas, la cristalización o la fusión, pero otros procesos como la absorción, sublimación, vaporización, oxidación, reducción y la descomposición si conllevan un cambio de masa, los cuales pueden ser estudiados mediante TGA. Cada uno de estos procesos es característico para un material dado en rangos específicos de temperatura y dependientes de su estructura molecular.

Entre los materiales que pueden ser analizados por medio de TGA están los polímeros incluyendo los termoplásticos, los termoformados, los elastómeros, los compuestos, las fibras, los recubrimientos e incluso pinturas.

Un instrumento de TGA es una termobalanza que consta de una microbalanza electrónica muy sensible con una precisión en el orden de los  $\mu\text{g}$ , un horno equipado con sus respectivos sensores de temperatura, por lo general del tipo termopar, un controlador de la atmósfera y una unidad de control y procesamiento.

Un sistema de TGA, en tanto que trabaja con cantidades de muestra significativamente pequeñas, debe incorporar sistemas de medición extremadamente sensibles. En instrumentos que emplean sistemas de fotodetección, la posición de equilibrio de la balanza se monitorea por medio de un haz de luz. Si el haz se mueve del horizonte, el controlador hace circular la corriente necesaria a un servomotor para regresar la balanza a su posición de equilibrio. En este caso, la fuerza generada por la corriente es proporcional al cambio en la masa. El horno lleva a cabo el incremento de la temperatura utilizando frecuentemente calentadores resistivos cuyos materiales están seleccionados según el rango de temperatura que se requiera. Resistencias de nicromo y cantal proporcionan un rango de temperatura hasta 1000-1200°C. A su vez, el rango de temperatura del análisis define el material de los crisoles o contenedores de la muestra. Para temperaturas máximas de 600°C se pueden emplear crisoles de aluminio, mientras que para mayores temperaturas se emplean crisoles de platino o de aleaciones de platino, entre otros.

La atmósfera en la que se sitúa la muestra también juega un papel fundamental. En este sentido la atmósfera puede ser dividida en interactiva y no interactiva. El nitrógeno o el helio son usados en atmósferas no interactivas para estandarizar las condiciones del experimento sin afectar la muestra. Por otra parte, atmósferas interactivas como el oxígeno afectan las reacciones que tienen lugar en la muestra. Adicionalmente cualquiera de estas atmósferas puede ser utilizada estática o dinámicamente. Una atmósfera dinámica garantiza un flujo de gas que remueve los gases producidos y evita así cualquier reacción de estos. Los materiales de los sensores de medición también dependen del rango de temperatura. Termocuplas de aluminio-cromo se emplean para temperaturas hasta 1100°C.

Las características únicas de los componentes mencionados dan una idea de la complejidad y alta sensibilidad de un instrumento de TGA. A raíz de estos existen factores que afectan la forma, la precisión y la exactitud de los resultados experimentales. Los factores de error afectando los resultados pueden dividirse en dos tipos: aquellos inherentes a la operación misma del instrumento que podrían no estar dentro del alcance del usuario final de los resultados y aquellos factores que son definidos por el usuario final.

En esta investigación los ensayos fisicoquímicos de TGA/DSC/FTIR fueron realizados por laboratorios externos/independientes, es decir la operación de los instrumentos no estuvo a cargo de los miembros de esta investigación. Así, se parte del hecho de que los factores de error inherentes a la operación misma del instrumento como la correcta calibración, la sensibilidad del sistema de registro de las variables, la ubicación de los sensores, etc fueron mantenidos al mínimo posible permitiendo una buena repetitividad de los ensayos. Los factores de error que afectan los resultados y que están dentro del alcance del usuario son:

**Velocidad de calentamiento.** A una temperatura dada, el grado de descomposición que puede experimentar una muestra es mayor cuanto menor sea la velocidad de calentamiento, de ahí que la forma de la curva de TGA pueda ser influenciada por la velocidad a la que se incrementa la temperatura. En general se podría decir que la temperatura a la cual se empieza a observar un proceso de descomposición y a la cual termina la descomposición se reducen con la reducción de la velocidad de calentamiento y por lo tanto la curva de TGA se desplaza hacia la izquierda o hacia menores valores. Resulta claro entonces que la base para una correcta comparación entre resultados de diferentes muestras es una misma velocidad de calentamiento. Una velocidad de 10°C/min, como la que se mencionó para los ensayos de DSC, resulta bastante adecuada.

**Masa de la muestra.** El principal efecto del tamaño de la muestra sobre los resultados es la posibilidad de crear grandes gradientes de temperatura a través de la muestra particularmente si esta tiene una baja conductividad térmica o si no existe un íntimo contacto entre la muestra y el crisol que la contiene. Las temperaturas de descomposición varían directamente con el tamaño de la muestra, tendiendo a menores valores conforme el tamaño de la muestra es menor. Como referencia, tamaños entre 10-20mg son usualmente utilizados en análisis de TGA dando buenos resultados.

**Crisoles.** El material así como la forma de los crisoles afectan los resultados. Los crisoles pueden ser planos u hondos de varias capacidades. El efecto de la forma de los crisoles en los resultados proviene del crisol no calentándose idénticamente. Los sensores de temperatura no están inmersos en el crisol en contacto con la muestra para evitar su deterioro sino lo más cercano posible a ella. La temperatura registrada entonces no es la temperatura real de la muestra. Esto conduce a una fuente de error debido a inercia térmica y al tiempo que toma causar un cambio detectable en la masa de la muestra. Los crisoles de aluminio son los de uso estándar por su bajo costo aunque su temperatura máxima es baja especialmente cuando se utilizan para análisis de DSC/TGA simultáneos. En estos casos los crisoles de platino o los de alumina incrementan la temperatura máxima así como también la conductividad térmica, siendo estos últimos los más utilizados para análisis de TGA.

**Gas de purga/atmósfera.** El efecto de la atmósfera en la curva de TGA depende del tipo de reacción, de la naturaleza de los subproductos de descomposición y del tipo de atmósfera. En casos cuando el interés son las reacciones de oxidación del material se emplean atmósferas altamente oxidantes como de oxígeno, en tanto que cuando se quiere evitar cualquier interacción de la muestra con la atmósfera o con sus subproductos de descomposición la atmósfera se ventila con un flujo de gas inerte como el nitrógeno.

Conocer el rango de temperatura esperado para la descomposición de los diferentes componentes de una muestra también ayuda al reconocimiento de procesos a partir de una curva de TGA. En un polímero compuesto, la humedad que pudiera estar contenida en la muestra se evapora a una baja temperatura comparada con la temperatura de la descomposición del polímero, mostrándose como un decrecimiento suave de la masa previo al cambio pronunciado correspondiente a la descomposición del polímero.

### 5.2.1 ANÁLISIS DE TERMOGRAVIMETRÍA (TGA)

Las mediciones de TGA aplicadas al estudio de sistemas de aislamiento suministran información básicamente respecto al contenido de resina en el aislamiento y a su estabilidad térmica. Mediciones de TGA realizadas en [141] a la cinta de mica y a la resina empleada en un sistema de aislamiento típico de una máquina rotativa permitieron soportar esta afirmación. Los perfiles de pérdida de masa reportados en la Figura 35 mostraron que en un amplio rango de temperatura, al menos hasta los 800°C, la cinta de mica es completamente estable solo presentando una apenas notable reducción en su masa, en tanto que la resina si mostró una pronunciada pérdida de masa correspondiente a su descomposición.

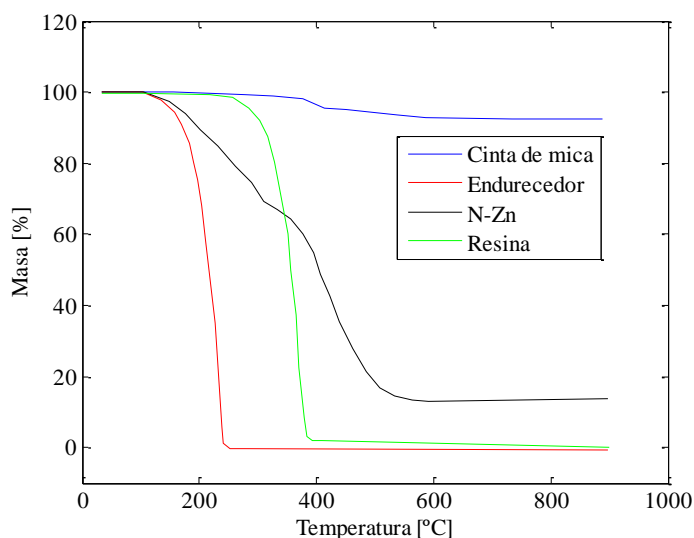


Figura 35. Mediciones de TGA para los componentes típicos de un sistema de aislamiento.

Para los fabricantes de sistemas de aislamiento, determinar el contenido de resina de muestras del material es útil para detectar el grado de impregnación y así comparar diferentes sistemas de resina y cintas de mica respecto a sus propiedades de impregnación. Un ejemplo de esta aplicación se muestra en [39] donde se fabricó un sistema de aislamiento parcialmente impregnado. Luego de remover muestras del aislamiento a diferentes profundidades y someterlas a mediciones de TGA se comprobó la efectividad de la técnica para cuantificar el contenido de resina. Las curvas de TGA obtenidas en este caso mostraron un muy leve cambio de masa (3%) para las muestras más profundas el cual se incrementó hasta 34% en la muestra más externa que se suponía fue impregnada completamente.

La descomposición de la resina puede ocurrir mediante reacciones de escisión de cadena, reacciones de despolimerización o combinación de ambas reacciones. Las reacciones de escisión de cadena rompen las cadenas principales del polímero produciendo radicales y otras especies reactivas. Los reactivos y especies así formadas pueden continuar sufriendo escisión

de cadenas progresivamente formándose nuevas especies cada vez más pequeñas. Estos subproductos pueden volatilizarse o entrecruzarse con otras cadenas del polímero. En el primero de los casos se presentará una pérdida de masa detectable en una medición de TGA, en contraste el incremento del entrecruzamiento torna el polímero menos propenso a la formación de volátiles en el mismo rango de temperatura que el primero de los casos. Es importante mencionar que la técnica de TGA no detecta ningún cambio asociado al entrecruzamiento ya que estos cambios no conllevan a un cambio de la masa.

Los cambios sufridos por la resina producto del envejecimiento estudiados por TGA, han sido investigados en [147][153] entre otros. De estos estudios sobresale que en ambas experiencias la pérdida de masa en las muestras nuevas fue ligeramente mayor que la pérdida de masa para las muestras envejecidas. La pérdida total de resina en [153] fue de aproximadamente 30%, lo cual se correlaciona consistentemente con el contenido total de resina en un sistema de aislamiento. El segundo resultado sobresaliente fue que para ambos estudios la temperatura a la cual inició la descomposición de la resina fue menor para las muestras sin envejecer. A la luz de las posibles reacciones de descomposición en la resina, los resultados mencionados anteriormente pueden ser explicados tentativamente como que en las muestras envejecidas predominó un incremento de las reacciones de entrecruzamiento y esto condujo a una menor producción de especies volátiles y por lo tanto menor pérdida de masa. Mediciones de DSC en [147] resultaron en un incremento de la  $T_g$  en la resina envejecida soportando el incremento en el entrecruzamiento de la resina. Una resina más entrecruzada es más rígida y como tal podría decirse más estable llevando a un incremento en la temperatura a la cual inicia su descomposición.

De los anteriores resultados es fácil entrever que la pérdida de masa está determinada por la resistencia de la resina a sufrir reacciones de oxidación y como estas afectan su estructura entrecruzada. Como se puede observar en los resultados de [150] cuando la resina es resistente a las reacciones de oxidación que lleven a un incremento de su entrecruzamiento, esta tiende a perder mayor masa con el incremento del envejecimiento. En este caso los autores concluyeron que el resultado final de las reacciones de oxidación fue la escisión de cadena de la resina que correspondientemente llevó a una reducción de su  $T_g$ . En este mismo estudio se investigó una resina que ante las reacciones de oxidación mostró un comportamiento compuesto. Al ser expuesta a una atmósfera altamente oxidante las reacciones de oxidación en las primeras etapas del envejecimiento provocaron un incremento de la masa atribuido a la fijación del oxígeno y un incremento de la  $T_g$ . En la medida que el envejecimiento continuó se detectó una reducción paulatina de la masa y una reducción de la  $T_g$ .

Mediciones de TGA también han sido realizadas en muestras de aislamiento envejecidas en condiciones de servicio reales como las reportada en [154]. En este estudio se compararon los perfiles de pérdida de masa de la resina en condición nueva y de la resina luego de 23 años de operación. Los resultados de pérdida de masa variaron para las muestras envejecidas debido posiblemente a la no homogeneidad del proceso de envejecimiento. Sin embargo fue posible observar que mientras las muestras nuevas mostraron un único proceso de descomposición, las curvas de TGA para algunas muestras envejecidas se caracterizaron por mostrar varios escalones indicados por los picos en la curva de DTG. La comparación de la curva de TGA entre la muestra nueva y una de las envejecidas se puede apreciar en la Figura 36.

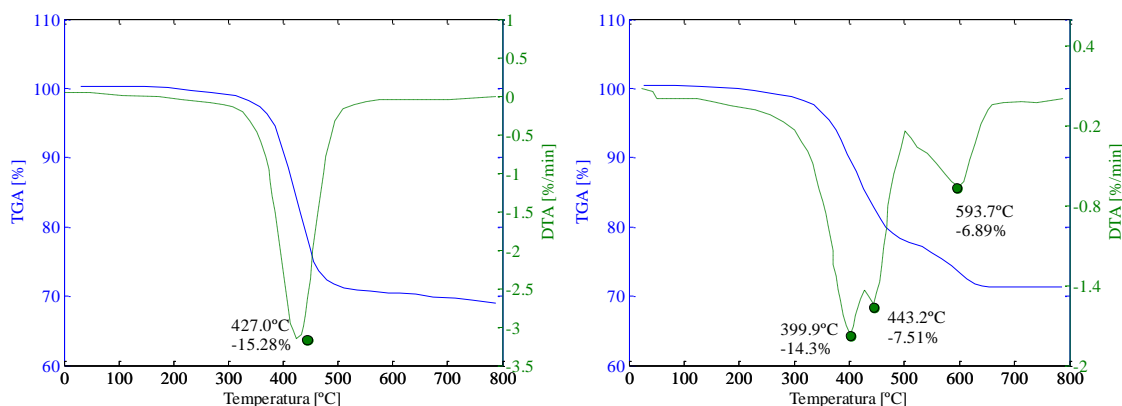


Figura 36. Perfiles de pérdida de masa para muestras con diferentes niveles de envejecimiento: a) muestras sin envejecer, b) muestras luego de 23 años en servicio.

Adicional al anterior resultado, se obtuvo ligeramente una mayor pérdida de masa en la muestra envejecida lo cual es explicado por los autores como que las reacciones de oxidación que tuvieron lugar en la resina incrementaron su peso molecular y esto conllevó a una mayor pérdida de masa. Esta explicación parece no estar en línea con los anteriores resultados citados en esta investigación, los cuales sugieren que un incremento del peso molecular implica reacciones de entrecruzamiento y por lo tanto una menor pérdida de masa. De hecho los autores citan la referencia [147] para soportar dicha conclusión. No obstante en [147] la mayor pérdida de masa se dio en las muestra nuevas que aún eran susceptibles de incrementar su peso molecular por entrecruzamiento.

### 5.3 DETECCIÓN DE CAMBIOS MOLECULARES

Desde el punto de vista de la naturaleza de los materiales que forman la estructura del aislamiento principal de los devanados del estator, se puede decir que ellos son una mezcla tanto de materiales orgánicos como materiales inorgánicos. La mica y la fibra de vidrio son por supuesto materiales inorgánicos, mientras que los materiales poliméricos usados en el sistema de aislamiento como la resina de impregnación o las cintas hechas de películas, cualquiera que sea su tipo, son materiales orgánicos.

Cuando se habla de envejecimiento y degradación, la naturaleza de los materiales tiene mucho que ver. Los materiales inorgánicos resultan prácticamente inafectados por el envejecimiento en el rango de las temperaturas de operación de la máquina e incluso son resistentes hasta cierto límite a la actividad de descargas parciales. Pero esta alta resistencia de los materiales inorgánicos al envejecimiento térmico y al ataque de las descargas parciales desaparece para los compuestos orgánicos como las resina. Aunque la resina es cuidadosamente diseñada para lograr la mayor resistencia a estos ataques, es inevitable su degradación.

La estructura de la resina está basada en el entrecruzamiento de largas cadenas poliméricas las cuales se descomponen durante el envejecimiento dando lugar a subproductos y modificaciones de la estructura. Algunas de estas posibles modificaciones incluyen unión de los nuevos compuestos formados (subproductos) a las cadenas principales, reacción entre ellos y desprendimiento de las unidades fundamentales de las cadenas. De alguna u otra forma estos cambios estructurales pueden estudiarse desde el punto de vista de la formación o rompimiento de los enlaces químicos en el polímero durante el envejecimiento. Una de las

técnicas de análisis para este propósito son el conjunto de técnicas de espectrometría infrarroja.

Para entender los conceptos teóricos detrás de una medición de espectrometría es preciso recordar que por encima del cero absoluto los átomos en las moléculas poseen cierto nivel energético responsable de su estado no estacionario. La distribución de la energía de una molécula  $E_m$  en cualquier momento dado está determinada por la ecuación (5.2).

$$E_m = E_{elect} + E_{vib} + E_{rot} + E_{trans} \quad (5.2)$$

Esta expresión sugiere que el movimiento molecular promovido por su energía interna es un movimiento complejo, compuesto de desplazamientos, rotaciones y vibraciones de la molécula. La energía de desplazamiento  $E_{trans}$  está asociada al movimiento de las moléculas inducido térmicamente. La energía rotacional  $E_{rot}$  es el movimiento de esta forma experimentado por la molécula cuando ésta absorbe energía en la región de las microondas. Por su parte la energía vibracional  $E_{vib}$  corresponde a la absorción de energía que produce la vibración de las moléculas alrededor del centro de sus enlaces químicos. La componente energética electrónica se asocia a las transiciones de energía de los electrones conforme se distribuyen a través de la molécula [155].

Los movimientos en una molécula también pueden ser descritos en términos de sus grados de libertad. Cada átomo en una molécula tiene tres grados de libertad, lo que quiere decir que puede moverse en cualquiera de las direcciones de un sistema de coordenadas cartesianas. Correspondientemente una molécula formada por  $n$  átomos tiene  $3n$  grados de libertad. De estos  $3n$  grados de libertad, tres involucran movimientos de todos los átomos simultáneamente a lo largo del sistema de coordenadas y otros tres corresponden a la rotación de todos los átomos alrededor de un mismo eje. Ninguno de estos seis grados de libertad implica un cambio en la distancia relativa de un átomo a otro mientras que los restantes  $3n-6$  grados de libertad sí conllevan a un cambio de la distancia entre los átomos y por lo tanto de la longitud de sus enlaces químicos. La naturaleza elástica de los enlaces químicos convierte estos desplazamientos en movimientos periódicos o vibraciones [156].

Pensar las vibraciones moleculares como producidas por  $3n-6$  grados de libertad es bastante más desafiante que si simplemente se recuerda un sistema físico compuesto por un par de masas conectadas por un resorte de constante  $k_{hook}$  y masa despreciable. La familiaridad con este sistema permite visualizar que en condiciones teóricas el par de masas describirán un movimiento oscilatorio o vibratorio permanente luego de aplicar una cierta fuerza mecánica. Haciendo un paralelo con las vibraciones moleculares las masas y el resorte en este sistema físico corresponden a los átomos y a los enlaces químicos respectivamente. Aunque en el sistema físico la ley de Hooke es suficiente para describir la oscilación del par de masas, ella no puede predecir exactamente las vibraciones moleculares. Sin embargo sí proporciona un buen modelo para explicar la energía requerida para que una molécula vibre y la frecuencia de dicha oscilación. En analogía con el sistema masa-resorte la ley de Hooke establece que la frecuencia de oscilación de una molécula depende de la elasticidad de los enlaces químicos entre dos átomos o entre fragmentos moleculares y de sus masas en tanto que la energía para producir tal oscilación proviene de la energía que absorbe la molécula cuando es irradiada [155]. Una molécula absorbe la mayor cantidad de energía cuando la frecuencia de la radiación es igual a su frecuencia de vibración, en otras palabras, cuando entra en resonancia con la fuente de radiación. Un material está compuesto por moléculas con diferentes frecuencias de vibración, por lo tanto el material puede absorber energía de radiación en un rango de frecuencias, que para los polímeros orgánicos recae en el espectro infrarrojo.

La energía de radiación absorbida es transformada en la molécula en uno o varios de los seis tipos particulares de vibración como lo son las vibraciones de estiramiento simétrico y asimétrico (symmetrical/assymetrical stretching), las vibraciones de tijereteo (scissoring), las vibraciones de balanceo (rocking), las vibraciones de torcedura (twisting) y las vibraciones de agitación (wagging), siendo estas dos últimas conocidas también como vibraciones de deformación fuera del plano. A partir de la Figura 37 es fácil asociar el nombre dado a cada vibración con el tipo de deformación experimentada por el enlace químico como resultado de la absorción de radiación.

La absorción que da lugar a los diferentes tipos de vibración molecular ocurre en el infrarrojo y de ahí que sea detectada y cuantificada por medio de las técnicas de espectroscopia infrarroja. El análisis de espectroscopia puede ser utilizado para discernir la estructura molecular de un material ya que la intensidad de las absorciones detectadas actúa como una indicación de la concentración de los diferentes enlaces químicos en él [156]. Cuando un conjunto de muestras son sometidas a un programa de envejecimiento, el análisis por espectroscopia permite detectar los cambios producidos en su estructura química debido a la degradación.

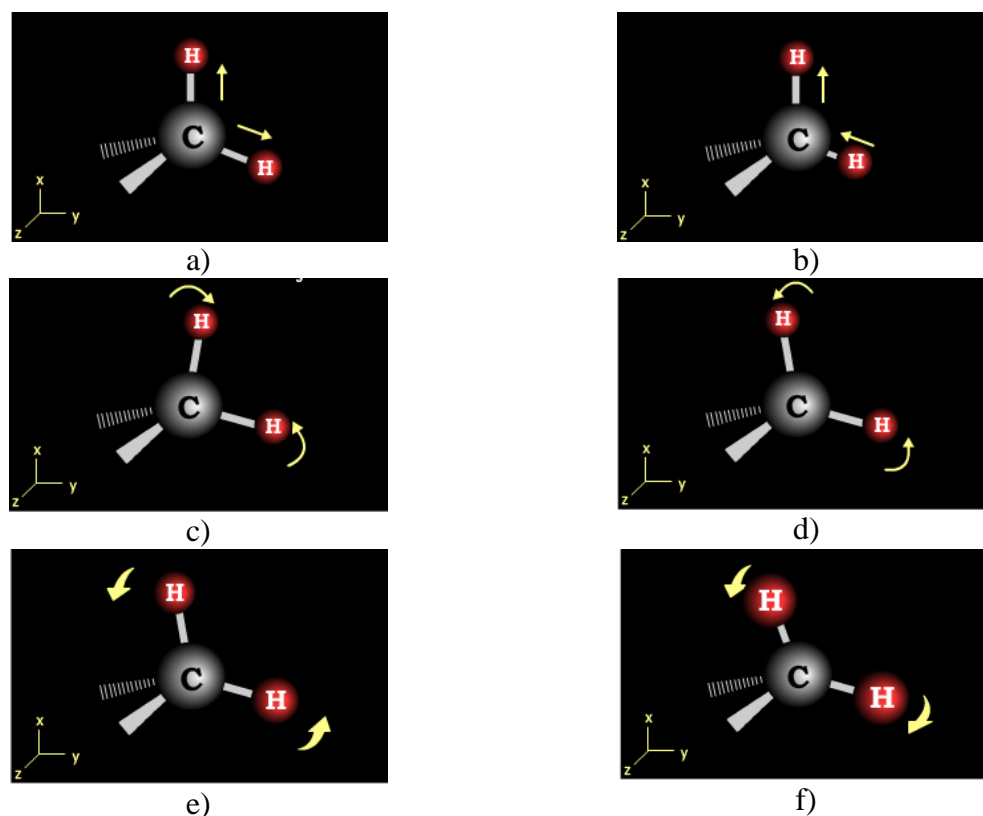


Figura 37. Modos de vibración posibles para un grupo no lineal  $\text{CH}_2$ : a) vibración de estiramiento simétrico, b) vibración de estiramiento asimétrico, c) vibración de tijereteo, d) vibración de balanceo, e) vibraciones de torcedura, f) vibración de agitación.

Los primeros sistemas de espectroscopia infrarroja fueron los dispersivos introducidos a mediados de los años 1940 vigentes por muchos años hasta el desarrollo en los años 60 de los espectrofotómetros infrarrojos con transformada de Fourier (FTIR). Con el incremento actual en la capacidad de procesamiento de los sistemas de cómputo a un menor costo los



espectrofotómetros FTIR han extendido los límites de la espectroscopia infrarroja a nuevas aplicaciones debido a su velocidad y sensibilidad superiores.

Un instrumento de FTIR consiste de tres componentes básicos: una fuente de radiación, un interferómetro y un detector como se muestra en la Figura 38.

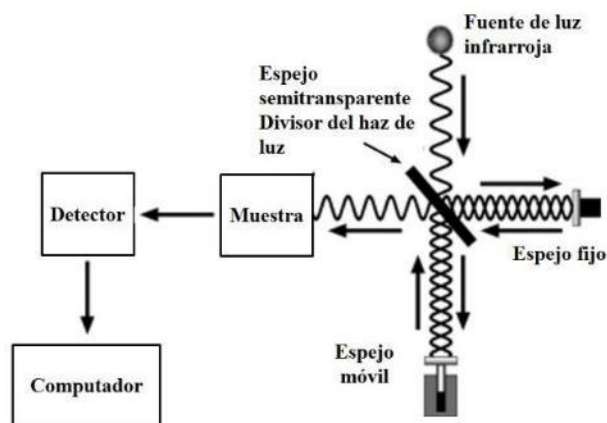


Figura 38. Representación esquemática de un instrumento de FTIR.

El interferómetro es un dispositivo compuesto de dos espejos; uno de ellos fijo y el otro móvil, y un divisor de haz de luz. Su función es dividir el haz de luz radiante en dos haces cada uno con una trayectoria óptica específica los cuales se reflejan en cada uno de los espejos y de nuevo se recombinan en el divisor de haz para formar una señal de interferencia repetitiva. La señal de interferencia se dirige sobre la muestra analizada alcanzando el detector donde la interacción entre la muestra y el haz de luz es procesada. Para conseguir una señal de interferencia el espejo móvil se mueve hacia adelante y hacia atrás de tal forma que se produzca una diferencia entre las trayectorias ópticas de ambos haces de luz. El haz de luz radiante es un espectro de múltiples longitudes de onda. Para cada posición del espejo algunas de las frecuencias interfieren destructivamente y otras constructivamente con las longitudes de onda del haz reflejado en el espejo fijo cuando se encuentran en el divisor de haz. Ya que el espejo se mueve con una velocidad constante, la intensidad de las señales de interferencia o interferograma es función del tiempo de barrido del espejo. Cuando el interferograma se dirige sobre la muestra, la intensidad de las longitudes de onda que coincidan con las longitudes de onda de las vibraciones características de las moléculas en la muestra se reduce debido a la absorción. El espectro resultante atenuado se analiza por medio de la transformada de Fourier para obtener la intensidad de las señales como función de la frecuencia, de ahí el nombre de esta técnica [157].

Una medición de FTIR arroja un espectro infrarrojo indicando las intensidades de las absorciones como una función de la frecuencia. En el espectro cuando ocurre una absorción, ésta se representa como un pico en la gráfica a la cual también se le denota banda de absorción. En el eje de las abscisas las frecuencias son representadas por sus correspondientes longitudes de onda ( $\mu\text{m}$ ) o por el número de onda ( $\text{cm}^{-1}$ ). El eje de las ordenadas puede tener unidades tanto de absorbancia como de transmitancia. La transmitancia  $T_{IR}$  es calculada como la razón entre la potencia radiante transmitida por la muestra  $P_{Ts}$  y la potencia radiante incidente sobre la muestra  $P_{T0}$ . La absorbancia  $A_{IR}$  es el logaritmo en base 10 del recíproco de la transmitancia como lo indica la ecuación (5.1).

$$A_{IR} = \log_{10} \left( \frac{1}{T_{IR}} \right) = -\log_{10} \left( \frac{P_{T0}}{P_{Ts}} \right) \quad (5.1)$$

Vale la pena mencionar que mientras los valores de la absorbancia pueden ir desde cero hasta infinito, la transmitancia por definición toma valores solo entre 0 y 100% lo que permite un mejor contraste entre bandas de absorción débiles e intensas. En un espectro FTIR con unidades de absorbancia, las bandas son mostradas como picos hacia arriba mientras que en un espectro de transmitancia son mostradas como picos hacia abajo.

Muy habitualmente el análisis de infrarrojo no se realiza entre los números de onda 13000 y 10  $\text{cm}^{-1}$  que corresponde a la totalidad del espectro infrarrojo, en cambio es centrado en las regiones del infrarrojo cercano, medio y lejano para lo cual el instrumento de medición debe ser provisto de fuentes de radiación construidas a partir de materiales específicos para cada región. Las mediciones de espectroscopia FTIR consideradas en esta investigación se realizarán en la región del infrarrojo medio entre 4000 y 400  $\text{cm}^{-1}$ . Algunos autores han incluso destacado que el infrarrojo medio es especialmente apropiado para estudiar resinas epoxi debido a que su espectro presenta dos bandas características en sus extremos en 915 y 3050  $\text{cm}^{-1}$  lo cual se ajusta a los límites del infrarrojo medio[158].

La adquisición de espectros precisos de alta calidad no termina con la selección adecuada del rango de frecuencia, adicional a esto la preparación de la muestra es también un factor fundamental ya que el estado físico de la muestra (sólido, líquido o gaseoso) interactúa de diferentes formas con la radiación. Algunos materiales son muy opacos como para transmitir el haz infrarrojo incidente resultando en espectros de baja calidad. Por este motivo la técnica de transmitancia directa alcanza su mayor desempeño con muestras transparentes. Cuando no es posible aplicar espectroscopia de transmitancia directa, existen otras técnicas disponibles que emplean accesorios ópticos acoplados al espectrofotómetro.

La espectroscopia FTIR por reflectancia difusa conocida por sus siglas en inglés como DRIFTS es una técnica en la cual como se muestra en la Figura 39 el haz de luz radiante es dirigido sobre la muestra y los modos de reflectancia difusa y especular resultantes son recolectados y reenocados por un conjunto de espejos elipsoidales para obtener el espectro infrarrojo de la muestra analizada.

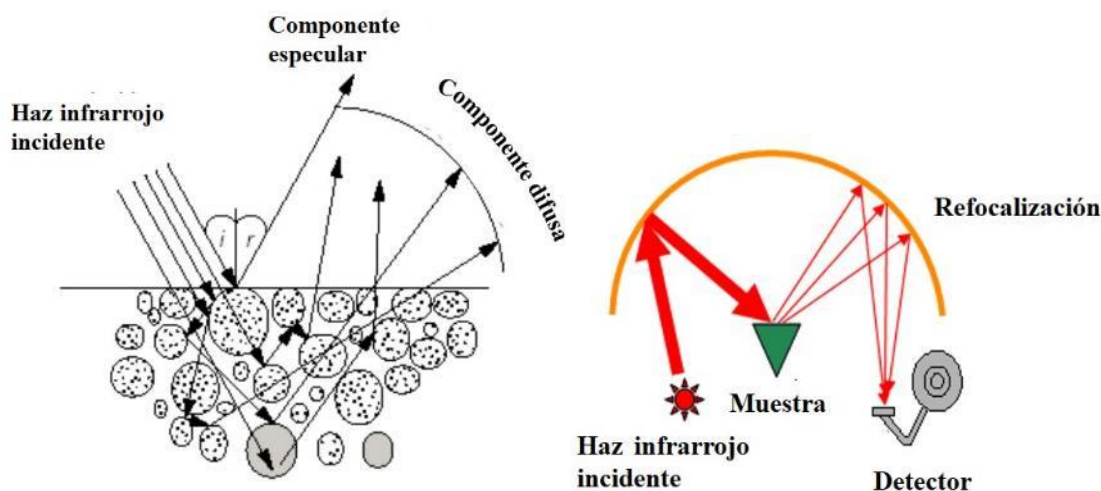


Figura 39. Representación esquemática de la descomposición de la radiación incidente en reflectancia difusa y especular y su refocalización en un instrumento FTIR-DRIFTS.

En esta técnica la muestra puede ser analizada directamente o si es necesario deben ser pulverizadas y mezcladas con una matriz transparente ante el infrarrojo como lo es el bromuro de potasio KBr o clorato de potasio KCl [157] formando una pastilla. Muestras en forma de polvo pueden ser directamente colocadas en un portamuestras para su análisis, aunque si el material es muy absorbente se pueden presentar dificultades para obtener espectros de calidad siendo necesario formar una pastilla con KBr. Podría decirse que la técnica FTIR-DRIFTS es ideal para trabajar muestras granuladas o en forma de polvo. Una característica particular de esta técnica es que la reflectancia especular resultante afecta y distorsiona el espectro infrarrojo final y por lo tanto el accesorio óptico para esta técnica debe ser diseñado de tal forma que se minimice la reflectancia especular y se maximice la reflectancia difusa. En cuanto a esto último, la preparación de la pastilla, específicamente el tamaño de las partículas del granulado/polvo, tiene un gran impacto. Así, el tamaño de las partículas debe estar en el rango de los  $\mu\text{m}$  de tal forma que el haz de luz tenga mayor opción de penetrar en la muestra y dispersarse en todas la dirección. Caso contrario se pueden obtener espectros distorsionados. Contrario a lo que se mencionó arriba, en un espectro obtenido por reflectancia difusa no existe una relación directa entre la intensidad de la banda de absorción y la concentración como en el caso de la técnica de transmitancia directa. Cuando se requiere realizar un análisis cuantitativo las relaciones de Kubelka–Munk permiten encontrar la dependencia entre la concentración y la intensidad de la radiación reflejada.

En la base de los requerimientos de preparación de la muestra, la técnica FTIR-DRIFTS puede ser aplicada en muestras de solo resina y con un poco más de dificultad en un compuesto mica/resina/ vidrio. Para estos casos existe la técnica de reflectancia total atenuada o ATR por sus siglas en inglés que prácticamente no requiere preparación de muestra.

Un espectro obtenido por ATR es similar al obtenido por transmitancia directa, luego se puede relacionar la intensidad de las bandas de absorción con la concentración. En la técnica de ATR se trabajan muestras con una superficie plana la cual se pone en contacto íntimo con un cristal que puede ser de seleniuro de zinc o germanio, entre otros, todos ellos caracterizados por ser ópticamente densos y tener un alto índice de refracción. El haz de luz radiante se dirige sobre el extremo biselado del cristal con un ángulo de incidencia mayor que el ángulo crítico con el fin reflejar la mayor fracción del haz. Debido a que el ángulo incidente y el índice de refracción son mayores que los de la muestra, el cristal actúa como una guía de onda concentrando la radiación dentro de los límites del cristal. Como se observa en la Figura 40 el haz de luz puede reflejarse dentro del cristal una o múltiples veces de acuerdo con el tipo de cristal empleado y análisis requerido. Cuando el haz de luz se refleja en la interface muestra/cristal se establece un campo eléctrico en la muestra producido por el campo eléctrico del haz de luz. La interacción del campo eléctrico con la estructura molecular de la muestra produce una correspondiente absorción óptica modificando el haz de luz que después es procesado. La desventaja de este método es que la profundidad de la penetración de la radiación incidente en la muestra es directamente proporcional a la longitud de onda. Así, la intensidad del espectro sufre un incremento a mayores números de onda distorsionando el espectro en comparación al obtenido por transmitancia directa [75] pero las bandas de absorción detectadas continúan siendo las mismas en ambas técnicas. La mayoría de los espectrofotómetros con ATR modernos implementan algoritmos de corrección por lo que este fenómeno no debería suponer un problema. La mínima o nula preparación de la muestra junto con la buena calidad de los espectros obtenidos con la técnica ATR la convirtió en la técnica FTIR utilizada en esta investigación para el análisis del aislamiento durante el envejecimiento.

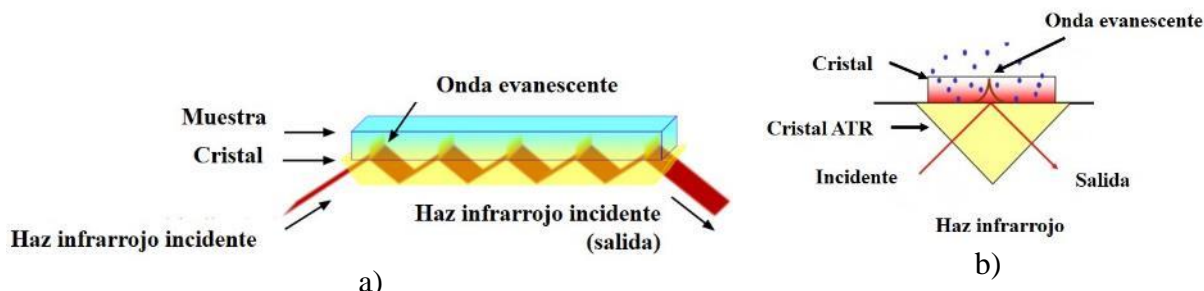


Figura 40. Representación esquemática de la interacción entre la radiación incidente y la muestra y del comportamiento del haz de luz dentro del cristal en un instrumento FTIR-ATR de a) múltiples reflexiones, b) única reflexión.

### 5.3.1 ESPECTROMETRÍA INFRARROJA FTIR

El espectro infrarrojo de una muestra es una propiedad física única y en este sentido puede ser considerada como una huella dactilar. Cuando el objetivo del análisis de espectroscopia es la identificación estructural de un material, su espectro infrarrojo se compara en bases de datos de referencia buscando coincidencias con los espectros de materiales plenamente identificados. Cuando la química o la naturaleza de las muestras son conocidas de antemano, el análisis podría recaer entonces en los efectos del envejecimiento sobre la estructura molecular de la muestra.

Nuevas bandas de absorción o cambios en la intensidad de las existentes puede ayudar a detectar las moléculas o grupos funcionales en la cadena principal en un polímero, a determinar si el polímero es lineal o entrecruzado, si existen lugares de insaturación o anillos aromáticos y a detectar la presencia de grupos funcionales específicos en el material.

El estudio de los sistemas de aislamiento por FTIR es un proceso de caracterización en el cual la primera tarea es la asignación o reconocimiento de las bandas de absorción presentes, seguido por el análisis del comportamiento de los espectros en el tiempo. Esto incluye detección de nuevas bandas de absorción, desaparición de picos existentes y cambios en la forma del espectro.

La principal consideración cuando se estudian muestras compuestas como las de un sistema de aislamiento es que el espectro infrarrojo final será la contribución de cada uno de los componentes de la muestra. En este sentido las bandas de absorción más significativas encontradas en la resina y en la mica/ vidrio pueden resumirse como se muestra a continuación.

La resina epóxica empleada en sistemas de aislamiento, ya sea del tipo DGEBF-A o del tipo novolac presenta las siguientes vibraciones características:

**Vibraciones del grupo epoxi.** Las resinas epóxicas están formadas por cadenas poliméricas que tienen el grupo funcional epóxido en los extremos de la cadena principal, los cuales presentan vibraciones en la región entre  $800-900\text{ cm}^{-1}$ . Durante el curado de la resina, el agente endurecedor abre la estructura en anillo de los grupos epóxido formando entrecruzamientos entre las cadenas principales, lo que conlleva a una reducción de esta banda. Así, cuando la resina está completamente curada la intensidad de la absorción del grupo epóxido es muy baja, o incluso nula.

**Vibraciones del grupo hidroxilo.** Los grupos hidroxilo OH se caracterizan por vibraciones en la región entre  $3700\text{-}3200\text{ cm}^{-1}$ , siendo la banda  $3500\text{ cm}^{-1}$  el valor reportado más común. Los grupos hidroxilos están presentes en la estructura de la resina base previa a la polimerización lo cual es común con los grupos epóxidos, aunque también aparecen como subproducto de las reacciones de degradación. De esta forma, la detección de los grupos hidroxilos en un indicador de varios procesos que pueden ocurrir en la resina incluso simultáneamente. Los grupos OH pueden estar unidos a otras moléculas resultando en una banda de absorción ancha resultado de la superposición de múltiples vibraciones.

**Vibraciones de los grupos carbonilo.** Los grupos carbonilo son enlaces dobles carbono-oxígeno  $\text{C}=\text{O}$ , que presentan vibraciones en la región alrededor de  $1730\text{ cm}^{-1}$ . Se puede distinguir por ser una banda intensa y estrecha cuya intensidad se relaciona con el avance de la degradación por reacciones de oxidación.

**Vibraciones de los grupos Metilo/Metileno.** Los grupos metilo  $\text{CH}_3$  y metileno  $\text{CH}_2$  en las resinas epoxi exhiben modos de vibración en la región comprendida entre aproximadamente  $3000\text{-}2800\text{ cm}^{-1}$ . Las absorciones detectadas corresponden a los estiramientos simétricos y asimétricos de los enlaces C-H en los grupos metilo y metileno. Los estiramientos de los grupos  $\text{CH}_3$  tienden al límite superior de este rango en tanto que los de los grupos  $\text{CH}_2$  tienden al límite inferior. Aunque existe una fuerte superposición de las absorciones de ambos grupos, es posible distinguir fácilmente entre 2 y 3 bandas claramente definidas en esta región.

**Vibraciones de los anillos aromáticos.** La cadena principal de las resinas tanto de DGEBF-A como del tipo novolac contiene grupos aromáticos o estructuras en anillo, a las cuales se les asocia varios modos de vibración en el rango comprendido entre  $1766\text{-}1460\text{ cm}^{-1}$ . Entre las vibraciones que se detectan están los estiramientos de los enlaces  $\text{C}=\text{C}$ ,  $\text{C}-\text{C}$ ,  $\text{C}=\text{O}$  y  $\text{C}-\text{O}$  así como en algunos casos se reporta el modo de respiración del anillo aromático, esto es el estiramiento simétrico simultaneo de todos los enlaces del anillo que se asemeje a una expansión y de ahí que se conozca a esta vibración como modo de respiración. También es posible detectar cambios como sustituciones del anillo aromático. Se ha reportado que la para-sustitución del anillo benceno se presenta a bajos números de onda alrededor de  $835\text{ cm}^{-1}$ .

En este punto cabe mencionar que las vibraciones de los enlaces C-H no solo se asocian a las vibraciones de los grupos metilo y metileno. El grupo epóxido por ejemplo también tiene enlaces C-H y por lo tanto vibraciones relacionadas a estos enlaces que ocurren por supuesto a otros números de onda. Por lo tanto, la anterior clasificación debe entenderse como las vibraciones moleculares de las resinas epoxi que frecuentemente son reportadas en la literatura relacionada con el estudio de sistemas de aislamiento eléctrico.

La mica y la fibra de vidrio tienen una estructura química similar que presenta, a diferencia de la resina epóxica, fuertes vibraciones en dos regiones específicas del espectro infrarrojo. En la mica, estas vibraciones corresponden a la región de los hidroxilos y las vibraciones de la región reticulada.

**Vibraciones de los grupos OH.** Las vibraciones de los grupos hidroxilos en la mica se presentan en la región entre  $3750\text{-}3550\text{ cm}^{-1}$ , distinguiéndose de las absorciones de los grupos OH en la resina por su mayor intensidad, porque las absorciones tienden a mayores números de onda y porque la banda es relativamente angosta.

**Vibraciones en la región reticulada.** Las vibraciones en la región reticulada corresponden a las vibraciones de las capas tetraédricas y octaédricas que dan lugar a la estructura organizada de la mica. A este grupo pertenecen las vibraciones de los enlaces del tetraedro  $\text{Si}(\text{Al})\text{O}_4$ , de los cationes magnesio octaédricos y de la capa de cationes interlaminares que definen el plano de clivaje de la mica. Los enlaces Si-O presentan estiramientos en la región entre  $1200\text{-}700\text{ cm}^{-1}$  y doblamientos entre  $600\text{-}300\text{ cm}^{-1}$ . Las vibraciones de los enlaces entre los cationes y el oxígeno octaédricos también recaen en esta última región. Las vibraciones de las capas de cationes interlaminares están localizadas en la región entre  $400\text{-}50\text{ cm}^{-1}$ .

En el rango del infrarrojo medio únicamente son detectables las vibraciones correspondientes a los grupos OH y a los enlaces Si-O y de la forma T-O-T donde T puede ser silicio o aluminio.

La relativa simplicidad del espectro de la mica puede observarse en la Figura 41.

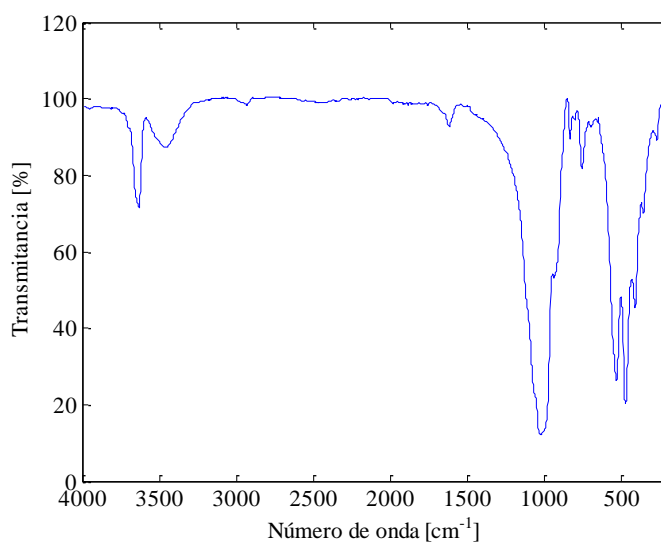


Figura 41. Espectro FTIR de una muestra de mica.

Partiendo de la forma del espectro infrarrojo de la mica se infiere directamente que en el espectro de una muestra compuesta de mica/resina/vidrio se presentarán superposiciones de las absorciones de los grupos OH y de las absorciones de los grupos epóxido con las vibraciones de los enlaces Si-O. La región intermedia entre las vibraciones de los grupos OH y de los enlaces Si-O ambos en la mica no presenta bandas de absorción significativas por lo que las bandas de absorción presentes en esta región en el espectro final de la muestra corresponderán principalmente a la resina.

En esta investigación la asignación de las bandas de absorción como parte del proceso de caracterización del aislamiento principal se apoyó en lo reportado en la literatura relacionada. Luego de hacer una revisión bibliográfica, se encontró que en el estado del desarrollo de la aplicación de las técnicas de espectrometría en el estudio específico y puntual de la degradación de sistemas de aislamiento si bien se reportan resultados desde hace varias décadas, la contribución en este campo ha sido esporádica, siendo los estudios donde se analizan muestras compuestas los más escasos. Las vibraciones moleculares así como la asignación que se le dio a cada una de ellas en la literatura consultada fueron recopiladas en la Tabla 1 del Anexo II permitiendo la identificación de las bandas de absorción obtenidas en los

resultados propios de esta investigación. El lector entonces está invitado a consultar cada una de las referencias por detalles específicos.

Establecer una regla general para el cambio o evolución de las bandas de absorción con el envejecimiento no es posible, ya que estos dependen de las reacciones o procesos específicos que estén ocurriendo en el material. A continuación se resumen los resultados de algunos estudios representativos que proporcionan algunas pistas sobre los posibles cambios en las vibraciones de los grupos epóxidos, carbonilos e hidroxilos y de los enlaces en los grupos metilo, metileno y en los anillos aromáticos. Para cada caso se menciona brevemente el tipo de muestras analizadas, el tratamiento al que fue sometida si aplica y la principal conclusión.

**Caso 1.** Materiales/Métodos: Resina epóxica curada con endurecedor de resina poliamina cicloalifática envejecida durante 3 horas a diferentes temperaturas entre 80-165°C [159].

Los resultados mostraron que la banda  $\text{-OH}$  cerca a los  $3410\text{ cm}^{-1}$  se hizo más ancha con el incremento de la temperatura de envejecimiento. Se detectó la aparición de una nueva banda de absorción a  $1735\text{ cm}^{-1}$  cuya intensidad se incrementó significativamente con la temperatura. Esta banda fue asociada a grupos carbonilos  $\text{C=O}$ . Así mismo se observó una fuerte reducción de la banda  $916\text{ cm}^{-1}$  asociada a la reacción de los grupos epóxidos con la temperatura de envejecimiento. La principal conclusión de este estudio fue que la temperatura de envejecimiento genera reacciones de oxidación que promueven la aparición consistente de grupos carbonilos a partir de los grupos epóxidos. De hecho se afirma que el incremento en la absorbancia del grupo carbonilo, la reducción del grupo epóxido y la desaparición de la absorción de los grupos  $\text{N-H}$  aproximadamente en la banda  $865\text{ cm}^{-1}$  sugieren los grupos carbonilos como subproductos de la apertura del anillo del grupo epóxido o bien que el entrecruzamiento conduce a la concentración de grupos carbonilos. También se menciona que ya que la resina fue curada a temperatura ambiente, grupos reactivos podrían haber quedado, los cuales con la temperatura de envejecimiento pudieron reaccionar incrementando el entrecruzamiento y por lo tanto explicando la disminución de los grupos epóxidos e incremento de los carbonilos.

**Caso 2.** Materiales/Métodos: Resina epóxica del tipo bisfenol-A curada con trietilentetramina (Triethylene Tetramine) como endurecedor, sometida a descargas parciales a 10kV. Se prepararon muestras de resina pura y mezclada con nanocompuestos [160].

En este estudio se tomaron los espectros FTIR para cada uno de los componentes (resina / nanocompuestos) y después se compararon con los obtenidos del compuesto sometido a descargas parciales. Los espectros de la resina pura mostraron un pico fuerte del grupo hidroxilo  $\text{OH}$  luego de 24 horas de exposición a descargas parciales. No presentaron mayor cambio en la región de bajos números de onda. En contraste la resina con nanopartículas mostró menos degradación (formación) del grupo  $\text{OH}$ . La absorbancia del grupo  $\text{OH}$  fue menor luego de que la resina resultara fuertemente unida debido a los enlaces de hidrogeno formados por las nanopartículas. Esto incrementó la resistencia de la resina a la degradación, lo que significa que los enlaces del polímero con nanocompuestos tienen una mayor resistencia a la energía de las descargas parciales. Otro resultado interesante en la resina pura fue la detección de una banda nueva a  $1659\text{ cm}^{-1}$  correspondiente a grupos carboxilos  $\text{C=O}$  (intra molecularly hydrogen bonded acids) y la detección de perácidos  $\text{-CO-OOH}$ , los cuales alteran la conductividad de la superficie de la muestra cuando es expuesta a descargas parciales y por lo tanto disminuyen la magnitud y repetición de las descargas.

**Caso 3. Materiales/Métodos:** Se utilizaron muestras de resina epóxica sin mencionar de qué tipo. Las barras de donde se extrajeron las muestras fueron sometidas a un programa de envejecimiento multiesfuerzo hasta por 2100 horas [86].

El espectro de la resina previo al envejecimiento mostró la existencia de grupos OH. Con el envejecimiento la absorbancia de la banda disminuyó marginalmente y el ancho de la banda aumentó. De igual forma la ubicación de la banda tendió a menores números de onda (de 3427.69 a 3415.84). Un punto clave que mencionó esta referencia fue la transformación que de la banda 1120  $\text{cm}^{-1}$  como consecuencia de formación de nuevos enlaces. Esta transformación se reflejó como que el pico inicial se redujo en absorbancia y se convirtió en varios otros picos de menor intensidad. De forma típica la banda 1740  $\text{cm}^{-1}$  asociada a los grupos carbonilos se incrementó significativamente en magnitud. El ancho de la banda también creció pero no tan significativamente. Así mismo los cambios en la forma de las bandas 1244, 1509 y 1604  $\text{cm}^{-1}$  se atribuyeron a cambios en la estructura de los anillos benceno (anillos aromáticos), los cuales hacen parte de la estructura de la resina.

**Caso 4. Materiales/Métodos:** Se utilizaron muestras de resina epoxi sin mencionar de qué tipo. Las muestras fueron sometidas a degradación por descargas parciales a 4kV. En este estudio se utilizó la técnica de FTIR-ATR de “una sola incidencia” argumentando que con esta técnica la medida es puntual, permitiendo estudiar la degradación como una función de la distancia al electrodo de alta tensión [161].

Este estudio concluyó que la degradación de la resina es dependiente de las especies químicas formadas por las descargas parciales que a su vez dependen de la atmósfera en la que ocurre la descarga. Inicialmente (1 hora después de aplicar el esfuerzo eléctrico) el esfuerzo eléctrico llevó al ataque/disminución/agotamiento de los grupos laterales metilo e hidroxilo seguido por la formación de anhídridos lineales. Con el incremento del tiempo de envejecimiento se detectó formación de ácidos/perácidos, compuestos de nitrógeno y fenoles, estos últimos debido a la ruptura de los anillos aromáticos (bisfenol-A) que a su vez crean regiones de insaturación. De nuevo se observaron los grupos carbonilo en la banda 1720  $\text{cm}^{-1}$ . La amplitud de esta banda se incrementó con el envejecimiento. En atmósfera de aire seco, se observaron menores cambios comparados con la atmósfera de aire normal luego de 1 hora de envejecimiento. Si bien las bandas correspondientes a los carbonilos, hidroxilos y metilos son comunes en ambas atmósferas, en aire seco no se observó la banda de los anhídridos lineales. Con el aumento del tiempo de envejecimiento, se detectó ligeramente bandas debido a estos anhídridos junto con fortalecimiento del hombro a 1284  $\text{cm}^{-1}$  indicando la formación de nuevos grupos ester lo cual puede relacionarse con el incremento del entrecruzamiento promovido por reacciones con oxígeno activo en la descarga (oxidación).

**Caso 5. Materiales/Métodos:** Muestras de resina epóxica novolac envejecida a 175°C durante una semana [162].

Si bien esta referencia se aleja un poco del contexto al trabajar muestras de resina epóxica novolac utilizada como encapsulamiento de componentes electrónicos, puede dar algunas pistas sobre la detección mediante FTIR del incremento de las reacciones de entrecruzamiento. Los autores atribuyeron la aparición de las bandas 1650 y 1750  $\text{cm}^{-1}$  a reacciones de oxidación las cuales se reflejaron como incremento en el entrecruzamiento. La oxidación de la resina ocurrió cuando los radicales libres extrajeron un hidrogeno de los grupos alifáticos  $\text{CH}_2$  presentes en la resina. Los nuevos radicales así formados se unieron a átomos de oxígeno y finalmente formaron puentes de oxigeno con otros radicales (otras porciones de cadena) dando



lugar al incremento del entrecruzamiento. Los picos detectados se asociaron a estiramientos de los grupos C=O originados a partir del ataque a los grupos CH<sub>2</sub>.

**Caso 6.** Materiales/Métodos: Se analizaron muestras de resina epóxica DGEBF-A con endurecedor anhídrido y acelerador de Zn-N [163]. Las muestras fueron extraídas de laminados de mica/resina/vidrio preparados mediante la técnica VPI.

Esta referencia proporciona información sobre la caracterización de los materiales de un sistema de aislamiento típico en su estado inicial o nuevo. De los resultados se menciona que la reacción del anhídrido endurecedor con la humedad forma ácidos que dejaron ver vibraciones de sus carbonilos en las bandas 1732 y 1712 cm<sup>-1</sup>. Así mismo se observó la banda característica de 3640 cm<sup>-1</sup> correspondiente a grupos hidroxilos OH en ácidos carboxílicos. Se afirma que estos grupos OH también indican la presencia de grupos alcohol unidos a la molécula epoxi (grupos terminales). Del mismo modo, se detectaron componentes estructurales de la resina como los grupos alifáticos C-H en la región de 2869-2949 cm<sup>-1</sup>. Los anillos aromáticos de la resina aparecieron entre las bandas 1500 y 1600 cm<sup>-1</sup>. Luego del curado a 175°C la intensidad de los grupos OH unidos “al cuerpo” de la cadena creció en relación a los OH de los ácidos también presentes ya que durante la polimerización estos OH fueron consumidos, apareciendo solamente como grupos terminales. También se menciona que entre las bandas 2854 y 3098 cm<sup>-1</sup> se detectaron bandas asociadas a los enlaces C-H en grupos aromáticos. Nótese que esta región se sobrepone con la región de las vibraciones de los enlaces C-H en grupos alifáticos. Luego de las reacciones de curado entre el anhídrido endurecedor y la resina epoxi base se formaron grupos éster cuya absorción se detectó por medio de las vibraciones de sus carbonilos en la banda 1742 cm<sup>-1</sup> además de una banda cerca de 1087 cm<sup>-1</sup> típicas de enlaces C-O igualmente en ésteres.

**Caso 7.** Materiales/Métodos: Se analizaron muestras extraídas de laminados epóxicos preparados mediante la técnica Resin Rich y VPI las cuales fueron sometidas a envejecimiento térmico a 200°C hasta por 2500 horas [153].

Esta referencia debe ser tratada con cuidado pues se afirma que de acuerdo a la “teoría” no hay banda carbonilo C=O en un espectro de resina epoxi. Intentando buscar la fuente de esta afirmación se encontró en documentos no referenciados que el autor de dicha afirmación quiso decir que en la resina epoxi de bisfenol no existe la banda 1774 cm<sup>-1</sup> asociada a carbonilos como si existe en el espectro del policarbonato. Las conclusiones más relevantes de esta referencia son que no se detectó una mayor diferencia entre los espectros antes y después del envejecimiento pero si se observó la aparición de la banda 1720 cm<sup>-1</sup> correspondiente a los grupos carbonilos C=O (no presente antes del envejecimiento) y el incremento de los grupos OH. Estos incrementos se asociaron con reacciones de oxidación en la resina.

**Caso 8.** Materiales/Métodos: Se analizaron muestras extraídas de barras reales y se sometieron a envejecimiento térmico a 180°C durante 72 horas. Se compararon los resultados entre las muestras sin envejecer y las envejecidas [147].

Las muestras envejecidas mostraron una nueva banda en los 1720 cm<sup>-1</sup> la cual está asociada a las absorciones de los grupos carbonilos C=O. La banda entre los 3200-3700 cm<sup>-1</sup> creció para la muestra envejecida. Tanto la presencia y crecimiento de los grupos C=O y OH respectivamente se asociaron a reacciones de oxidación. También se observó un incremento del grupo epóxido en la muestra envejecida. El artículo no concluye al respecto y de hecho es un comportamiento extraño ya que con el envejecimiento/temperatura se espera la oxidación

de los anillos epóxidos que pudieron haber quedado en la resina (postcurado) llevando a un agotamiento de estos grupos. Contrariamente se observó un incremento de los grupos epóxidos.

**Caso 9.** Materiales/Métodos: El artículo trabaja sobre muestras de aislamientos que emplearon resina epóxica tipo bisfenol A curada mediante un anhídrido y resina epóxica novolac. Las muestras fueron extraídas de estructuras típicas de sistemas de aislamiento (resina/mica/vidrio) preparadas por medio de procesos VPI y Resin Rich. Si bien el objetivo del estudio son los efectos de diferentes tipos de mezclas de gases naturales sobre las propiedades de los sistemas de aislamiento durante pruebas de envejecimiento, el mismo incluye alguna caracterización de los espectros de FTIR de las muestras previo al envejecimiento, lo cual puede ser utilizado como caracterización base para este estudio [145].

Los resultados reportados básicamente tienen que ver con la reducción de la banda  $915\text{ cm}^{-1}$  correspondiente al grupo epóxido, con la diferencia en los espectros en la región entre  $3000$  y  $3700\text{ cm}^{-1}$  y con la reducción de la banda  $1801\text{ cm}^{-1}$ . Los cambios entre  $3000$ - $3700\text{ cm}^{-1}$  y entre  $950$ - $850\text{ cm}^{-1}$  fueron causados por el agua presente en los gases utilizados en las pruebas de envejecimiento. Los grupos epóxidos que no reaccionaron durante el curado de la resina, si lo hicieron con el agua mediante la apertura del anillo epóxido dando lugar a la formación de grupos hidroxilos OH. Llama la atención que los autores afirman que en la resina contiene una gran cantidad de grupos hidroxilo y aun así esta banda es apenas detectable en los espectros reportados y no aparece para la muestra de resina sin envejecer. La banda  $1801\text{ cm}^{-1}$  detectada fue atribuida a los grupos anhídrido causantes de las reacciones de entrecruzamiento de la resina y que no reaccionaron durante el curado.

**Caso 10.** Materiales/Métodos: En este artículo se removieron muestras del aislamiento de una barra nueva y de otra en servicio durante 23 años de un generador de  $300\text{ MW}/18\text{ kV}$  con el propósito de comparar los espectros infrarrojos de cada una de ellas. Sobre la resina solo se especifica que es del tipo epóxica. El método de preparación de las muestras fue bastante cuidadoso puesto que se utilizó la técnica de FTIR por medio de pastillas de KBr lo que supeditó a que las muestras fueran “raspadas” hasta obtener la cantidad suficiente de polvo para realizar la pastilla y formar el disco de análisis. Las muestras fueron obtenidas de la parte media del aislamiento y también cercanas al conductor para la barra envejecida. Solo se preparó una muestra de la bobina nueva [154].

Esta referencia resalta porque considera las vibraciones detectadas procedentes de la mica y la fibra de vidrio y no solo de la resina. Particularmente se detectaron las bandas de absorción  $3629$  y  $1011\text{ cm}^{-1}$  debido a los grupos OH y Si-O en la mica. Según la referencia el espectro de absorción de la fibra de vidrio es similar al de la mica presentando bandas de absorción en  $1011$ ,  $749$  y  $719\text{ cm}^{-1}$ . La resina epoxi estudiada se caracterizó por las bandas de absorción entre  $3400$ - $3500\text{ cm}^{-1}$  debido a los grupos OH, a  $2960$  y  $2860\text{ cm}^{-1}$  debido a los grupos metilo  $\text{CH}_3$ , a  $2925\text{ cm}^{-1}$  debido a los grupos metileno  $\text{CH}_2$ , a  $1604$ ,  $1580$  y  $1510\text{ cm}^{-1}$  debido a los anillos benceno, entre  $1245$ - $1240\text{ cm}^{-1}$  debido a los grupos éter (de arilo), a  $1192\text{ cm}^{-1}$  debido a los enlaces C-C, a  $1040\text{ cm}^{-1}$  debido a los grupos éter basado en el grupo éster, entre  $831$ - $835\text{ cm}^{-1}$  debido a la para sustitución del benceno y a  $1742\text{ cm}^{-1}$  debido a los grupos carbonilos C=O.

La principal conclusión de este artículo es que comparando los espectros de la muestra de referencia sin envejecer con aquellos de las muestras de la barra envejecida, se observó claramente el incremento de los grupos C=O y OH y la reducción de los grupos  $\text{CH}_3$  y  $\text{CH}_2$ , lo

cual se atribuyó a la oxidación de las cadenas laterales en la resina. Por otra parte también se evidenció “desprendimiento” de las cadenas fundamentales/principales de la resina con el envejecimiento. Esta suposición se soportó por medio de la reducción en la absorción de la banda  $1183\text{ cm}^{-1}$  asociada a los enlaces C-C de las cadenas fundamentales de la resina y a la detección de procesos de descomposición en pruebas de termogravimetría asociados de igual forma a los productos formados por la ruptura de las cadenas fundamentales.

## 6 MÉTODO EXPERIMENTAL

Este capítulo describirá la totalidad de barras estatóricas de prueba disponibles en esta investigación, el conjunto de mediciones que se realizó en cada barra así como también los programas de envejecimiento que se definieron en función de los recursos técnicos disponibles. Respecto a la componente de análisis químico se define la metodología para la toma de muestras del aislamiento. Finalmente se resume el banco de pruebas y las instalaciones y sistemas que se construyeron enteramente para el desarrollo de esta investigación.

### 6.1 BARRAS DE PRUEBA

El desarrollo experimental se llevó a cabo en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle Colombia y en Laboratorio de Alta Tensión de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Royal Institute of Technology KTH, Estocolmo-Suecia.

En cada laboratorio se tuvo a disposición un número de barras estatóricas las cuales se sometieron a mediciones y a un programa de envejecimiento específico. En ambos casos las barras fueron probadas en sus tamaños y construcciones originales. Todas las barras tuvieron en común un sistema de aislamiento moderno del tipo mica-resina epóxica, clasificación térmica F y proceso de fabricación mediante VPI o Resin Rich. La zona de ranura de todas las barras estuvo provista de cinta semiconductora, mientras que las cabezas de bobina fueron terminadas con cinta gradiente de construcción original por el fabricante. En el caso de las barras VPI, la cinta gradiente se aplicó después de la impregnación de la resina pero antes del horneado final.

La nomenclatura utilizada para nombrar cada uno de las barras siguió las siguientes reglas.

**Primer grupo de barras.** Se conocerá como primer grupo de barras aquellas utilizadas en la Universidad KTH. Estas fueron siete barras estatóricas construidas para motores de alto voltaje de dos tensiones nominales diferentes: 6.6kV y 10kV, cuyo aislamiento se consolidó mediante proceso VPI, Figura 42.



Figura 42. Barras de prueba del primer grupo utilizadas en el laboratorio de Alta Tensión de la Universidad KTH – Suecia.

Pese a conservar la misma longitud y alto, el ancho de cada barra cambió de acuerdo a su nivel de voltaje nominal, siendo mayor para las barras de 6.6kV. Se nombró cada barra utilizando un conjunto de dos letras seguidas en algunos casos por un número y/o una letra. La primera letra de cada rótulo hizo alusión al tamaño de las barras: “L” para las barras grandes de 6.6kV y “S” para las barras más pequeñas de 10kV. La segunda letra identificó cualquier modificación realizada en las barras: “G” cuando se cortaron anillos guarda, “T” cuando se removieron muestras del material y “U” si no hubo ninguna modificación de la barra. El tercer dígito se utilizó para diferenciar barras de igual característica o para referirse al tipo de medición realizada. Las características para cada tipo de barras se resumen en la Tabla 3.

<b>Dimensiones de las barras de prueba grandes</b>	
Voltaje [kV]	6.6kV
Longitud [mm]	1384
Ancho [mm]	47.9
Alto [mm]	21.0
Espesor del aislamiento [mm]	1.8
Campo eléctrico [kV/mm]	2.11
<b>Nomenclatura de las barras de prueba</b>	<b>Descripción</b>
LU1, LU2	Barras grandes sin ninguna modificación
LTa	Barra grande de donde se extrajeron muestras del material dieléctrico

<b>Dimensiones de las barras de prueba pequeñas</b>	
Voltaje [kV]	10kV
Longitud [mm]	1384
Ancho [mm]	36.1
Alto [mm]	21.0
Espesor del aislamiento [mm]	2.5
Campo eléctrico [kV/mm]	2.30
<b>Nomenclatura de las barras de prueba</b>	<b>Descripción</b>
SU1, SU2	Barras pequeñas sin ninguna modificación
STa	Barra pequeña de donde se extrajeron muestras del material dieléctrico
SG[a,m,n,f]	Barra pequeña provista de anillos guarda, en la cual pueden realizarse mediciones de C/tan $\delta$ en cualquiera de las siguientes configuraciones SGa= en toda la barra SGm=solo en la parte recta de la barra SGn/f=en ambas cabezas de bobina

Tabla 3. Dimensiones y nomenclatura para el primer grupo de barras de prueba.

Las barras iniciaron el programa de envejecimiento con cero horas de servicio, es decir en una condición de nuevas donde aún eran susceptibles de experimentar reacciones de postcurado. Pocas horas luego del inicio del programa de envejecimiento se presentó inusualmente una falla en las barras LU2 y LTa. Solo la barra LTa experimentó falla dieléctrica. La barra LU2 en consecuencia presentó formación de grandes delaminaciones y deformación de su sección rectangular en la zona de ranura.

Pese a la degradación, hubo un alto interés en mantener estas barras significativamente degradadas en el programa de envejecimiento por propósitos comparativos. Las mediciones realizadas a cada barra se detallarán más adelante.

**Segundo grupo de barras.** El segundo grupo de barras mostradas en la Figura 43 consistió en seis barras estáticas con aislamiento tipo Resin Rich, pertenecientes a un hidrogenerador de 13.8kV/90MW en operación en la Central Hidroeléctrica de Salvajina ubicada en el Departamento de Cauca – Colombia. La Empresa de Energía del Pacífico EPSA S.A. E.S.P donó las barras a esta investigación, las cuales luego de su desmontaje garantizando sus características físicas y dieléctricas fueron trasladadas al laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Universidad del Valle.



Figura 43. Segundo grupo de barras de prueba utilizadas en el laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Universidad del Valle.

Este segundo grupo de barras iniciaron el programa de envejecimiento con varios años de servicio, por lo tanto se esperaba mayores valores en sus parámetros dieléctricos. Todas las barras fueron provistas de anillos guarda para eliminar el efecto de la cinta gradiente que dada su condición actual podría ser significativo. Las dos barras con mayores pérdidas dieléctricas y el mayor deterioro de las cabezas de bobina fueron excluidas de las mediciones. A las cuatro barras restantes se les extrajeron muestras del aislamiento para análisis químico. Las dimensiones y nomenclatura utilizada para referenciar cada una de las barras del segundo grupo se muestra en la Tabla 4.

<b>Dimensiones de las barras de prueba</b>	
Voltaje [kV]	13.8
Longitud [mm]	1500
Ancho [mm]	59
Alto [mm]	19
Espesor del aislamiento [mm]	3
Campo eléctrico [kV/mm]	2.65
<b>Nomenclatura de las barras de prueba</b>	<b>Descripción</b>
Bar1	Barra con anillos guarda
Bar2	Barra con anillos guarda
Bar4	Barra con anillos guarda
Bar6	Barra con anillos guarda

Tabla 4. Dimensiones y nomenclatura para el segundo grupo de barras de prueba.

## 6.2 PROGRAMA DE ENVEJECIMIENTO

El objetivo principal en los estudios de envejecimiento es establecer una relación entre los mecanismos de degradación y los esfuerzos que los causan, para sugerir modelos de vida útil, verificarlos y finalmente aplicarlos en condiciones nominales.

La definición de un programa de envejecimiento supone el problema de seleccionar los métodos y procesos más apropiados para envejecer la estructura del aislamiento en condiciones reales en un horizonte de tiempo razonable. Existe un compromiso entre la magnitud de los esfuerzos aplicados y la duración estimada para el programa de envejecimiento. Esfuerzos de gran magnitud podrían llevar a una degradación acelerada pero a través de mecanismos no activos en las condiciones de operación real de la máquina. Esfuerzos de muy baja magnitud resultarían en un ritmo de degradación muy bajo el cual tardaría una gran cantidad de tiempo hasta provocar cambios significativos en los parámetros del aislamiento.

El propósito del envejecimiento es también un parámetro decisivo en el programa seleccionado. Para validar un nuevo sistema de aislamiento típicamente se recurre a comparar su desempeño respecto al de un sistema ya probado en servicio. Documentos técnicos tales como la IEEE 275-1992 (R1998), IEEE 429-1994, IEEE 1776-2008 y en alguna forma la IEEE 1043-1996 (R2009) e IEEE 1553-2002 han establecido el tipo de esfuerzo, la magnitud y la secuencia de aplicación tal que luego de sucesivos ciclos de aplicación se pueda obtener el tiempo a la falla del sistema de aislamiento bajo clasificación y con esto extrapolar su vida útil en condiciones nominales.

Cuando en cambio, como es el caso de esta investigación, se busca estudiar y comprender los mecanismos de degradación, los esfuerzos aplicados y sus magnitudes son determinadas por el fenómeno de interés y por la capacidad de las instalaciones. Obviamente el programa de envejecimiento más realista es aquel que aplica al aislamiento los esfuerzos tipo TEAM simultáneamente. Aunque ideal, la infraestructura requerida es compleja y de elevado costo.

Como alternativa, numerosos estudios han aplicado los esfuerzos en una forma secuencial como la que se muestra en la Figura 44.



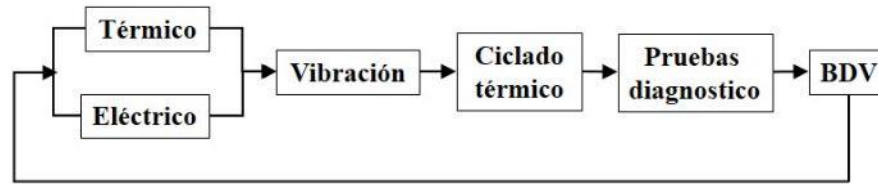


Figura 44. Programa de envejecimiento secuencial multiesfuerzo.

En este programa de envejecimiento se aplican a un grupo de barras de prueba esfuerzos termoeléctricos simultáneos por un tiempo determinado. Seguidamente el grupo de barras se lleva a un banco de pruebas donde se las somete a vibraciones mecánicas. Finalmente las barras son sometidas a ciclado térmico.

Una vez el grupo de barras ha pasado en secuencia por todos los esfuerzos, se llevan a cabo pruebas de diagnóstico y finalmente pruebas destructivas. Con cada ciclo completo de exposición a los esfuerzos y pruebas destructivas, el número de barras se reduce y en consecuencia este tipo de programa de envejecimiento solo es apropiado para cuando se dispone de una gran cantidad de barras.

Cuando el interés es un mecanismo de degradación en particular, lo usual es aplicar el esfuerzo que mejor permita reproducir dicho mecanismo. Por ejemplo, aplicar ciclado térmico es la mejor opción para producir delaminación del aislamiento.

Existen diferentes métodos para aplicar cada uno de los esfuerzos de envejecimiento. La elevación de la temperatura para producir el esfuerzo térmico puede lograrse mediante placas calefactoras como las especificadas en el documento IEEE 1043-1996 (R2009), mediante un horno o por medio de las pérdidas óhmicas disipadas por la circulación de una gran corriente.

Para la aplicación del esfuerzo eléctrico existen dos métodos. En el primero se selecciona un voltaje igual a un porcentaje del voltaje de ruptura estimado y se mantiene constante hasta alcanzar el tiempo de falla. En el segundo método el voltaje se incrementa constantemente hasta que la barra de prueba falla y se registra el voltaje de ruptura dieléctrica. La forma de onda del voltaje puede variar entre alterna, continua e impulso. Con tipos de onda alterna la frecuencia puede ser industrial o muy superior a esta [164]. El efecto de una elevada frecuencia podría tener el mismo efecto de una excesiva temperatura de prueba en cuanto a que los mecanismos de degradación desencadenados con muy poca probabilidad ocurrían en condiciones realistas.

Para los intereses de la presente investigación, las barras de prueba fueron sometidas a una combinación de *esfuerzos termoeléctricos* y *ciclado térmico* aplicados de la forma que se describe en las secciones 6.2.1 y 6.2.2. Este tipo particular de programa de envejecimiento fue seleccionado con el fin de producir básicamente defectos internos en el aislamiento principal.

Otros defectos comúnmente encontrados en la operación real de las máquinas y que representan un peligroso mecanismo de ruptura dieléctrica tal como lo es la abrasión de la cinta semiconductor que ocurre con la vibración de las barras dentro de las ranuras del estator no fueron objeto de análisis.

### 6.2.1 PROGRAMA DE ENVEJECIMIENTO EN EL PRIMER GRUPO DE BARRAS DE PRUEBA

El programa de envejecimiento se dividió en cinco ciclos que se extendieron por un total de 1142 horas. La duración de cada ciclo fue de 172, 250, 230, 260 y 230 horas continuas. Al inicio y luego de cada ciclo de envejecimiento, las barras se llevaron a temperatura ambiente y



sobre ellas se realizaron mediciones de tangente delta, de respuesta dieléctrica y de descargas parciales según la Tabla 5. La barra LTa se mantuvo en el programa bajo esfuerzo térmico con el propósito de extraer muestras del material para análisis químico. La barra LU2 no presentó falla dieléctrica por lo que se mantuvo bajo esfuerzo termoeléctrico. En esta barra las pruebas iniciales se consideraron las tomadas luego del primer ciclo de envejecimiento, es decir las tomadas a las 172 horas.

		172 h	250 h	230 h	260 h	230 h
LU1	C/tan $\delta$ DS PD	T C/tan $\delta$ DS PD	T C/tan $\delta$ DS PD	T C/tan $\delta$ DS PD	T C/tan $\delta$ DS PD	T C/tan $\delta$ DS PD
LU2		TE C/tan $\delta$ DS PD A.Q	TE C/tan $\delta$ DS PD A.Q	TE C/tan $\delta$ DS PD A.Q	TE C/tan $\delta$ DS	TE C/tan $\delta$ DS A.Q
LTa	A.Q	T A.Q	T A.Q	T A.Q	T	T A.Q
SU1	C/tan $\delta$ DS PD	TE C/tan $\delta$ DS PD	TE C/tan $\delta$ DS PD	TE C/tan $\delta$ DS PD	TE C/tan $\delta$ DS PD	TE C/tan $\delta$ DS PD
SU2	C/tan $\delta$ DS PD	T C/tan $\delta$ DS PD	T C/tan $\delta$ DS PD	T C/tan $\delta$ DS PD	T C/tan $\delta$ DS PD	T C/tan $\delta$ DS PD
STa	C/tan $\delta$ DS A.Q	TE C/tan $\delta$ DS A.Q	TE C/tan $\delta$ DS A.Q	TE C/tan $\delta$ DS A.Q	TE C/tan $\delta$ DS	TE C/tan $\delta$ DS A.Q
SGa	C/tan $\delta$ DS	T C/tan $\delta$ DS	T C/tan $\delta$ DS	T C/tan $\delta$ DS	T C/tan $\delta$ DS	T C/tan $\delta$ DS

T: esfuerzo térmico 170°C

E: esfuerzo eléctrico 10kV

TE: esfuerzo termoeléctrico simultáneo

C/tan $\delta$ : mediciones de capacitancia y factor de disipación a 60Hz desde 500 hasta 10kV en las barras SU1, SU2, SG, ST y hasta 7kV en las barras LU1 y LU2

DS: mediciones de respuesta dieléctrica a 1, 4, y 10kV desde 100Hz hasta 0.01Hz

PD: mediciones de descargas parciales a 7kV en las barras LU1 y LU2 y a 10kV en las barras SU1, SU2

A.Q: toma de muestras del material para análisis químico

Tabla 5. Programa de envejecimiento y mediciones realizadas en el primer grupo de barras de prueba.

Los valores de  $\Delta C$  and  $\Delta \tan\delta$  se calcularon siguiendo los niveles de voltaje mostrados en la Tabla 6. El voltaje de prueba mínimo fue de 500V y el máximo correspondió al voltaje nominal.

Barra	C [kV]	C <sub>0</sub> [V]	tanδ [kV]	tanδ <sub>0</sub> [V]
Barras S (SG, SU1, ...,etc)	10	500	10	500
Barras LU	7	500	7	500

Tabla 6. Niveles de voltaje para el cálculo de los valores tip-up del primer grupo de barras.

## 6.2.2 PROGRAMA DE ENVEJECIMIENTO EN EL SEGUNDO GRUPO DE BARRAS DE PRUEBA

El programa de envejecimiento se dividió en cinco ciclos que se extendieron por un total de 2678 horas. Varios programas de envejecimiento se aplicaron hasta el cuarto ciclo, a partir de ahí todas las cuatro barras se sometieron a envejecimiento termoeléctrico. El programa de envejecimiento particular de cada barra se muestra en la Tabla 7.

	411 h	506 h	575 h	602 h	584 h
	TC	TC	TC	TE	TE
	175°/100°C	175°/100°C	175°/50°C	180°C/10kV	180°C/10kV
Bar1	C/tanδ	C/tanδ	C/tanδ	C/tanδ	C/tanδ
Bar6	PD	PD	PD	PD	PD
	A.Q	A.Q	A.Q	A.Q	A.Q
	TE	TE	TE	TE	TE
	160°/9kV	160°/9kV	160°/9kV	180°C/10kV	180°C/10kV
Bar2	C/tanδ	C/tanδ	C/tanδ	C/tanδ	C/tanδ
	PD	PD	PD	PD	PD
	A.Q	A.Q	A.Q	A.Q	A.Q
	E	E	E	TE	TE
	9kV	9kV	9kV	180°C/10kV	180°C/10kV
Bar4	C/tanδ	C/tanδ	C/tanδ	C/tanδ	C/tanδ
	PD	PD	PD	PD	PD
	A.Q	A.Q	A.Q	A.Q	A.Q

T: esfuerzo térmico

E: esfuerzo eléctrico

TC: ciclado térmico entre T<sub>max</sub>/T<sub>min</sub>.

TE: esfuerzo termoeléctrico simultáneo

C/tand: mediciones de capacitancia y factor de disipación a 60Hz desde 500 hasta 10kV

PD: mediciones de descargas parciales a 10kV

A.Q: toma de muestras del material para análisis químico

Tabla 7. Programa de envejecimiento y mediciones realizadas en el segundo grupo de barras de prueba.

En las pruebas de ciclado térmico configurado entre 175°C/100°C, la temperatura del cobre de las barras se incrementó hasta 175°C en aproximadamente 13 minutos haciendo circular una corriente de 400A. El enfriamiento desde la temperatura máxima hasta los 100°C tomó 11 minutos aproximadamente. De esta forma cada ciclo de calentamiento/enfriamiento tuvo una duración de 24 minutos.

Los tiempos para las pruebas de ciclado térmico configurado entre 175°C/50°C fueron: 20 minutos para el calentamiento y 34 minutos para el enfriamiento. La duración de cada ciclo de calentamiento/enfriamiento fue de 54 minutos, y la corriente de calentamiento se mantuvo en 400A.

La selección de la temperatura máxima y mínima fue definida teniendo en cuenta que el propósito del ciclado térmico era efectivamente producir degradación del sistema de aislamiento. Cuando se trata de calificar la resistencia a la delaminación de un sistema de

aislamiento nuevo, es común seguir las recomendaciones, mediciones de diagnóstico y parámetros propuestos en el documento técnico IEEE 1310-2012. Esta guía de procedimiento recomienda una variación de la temperatura entre 40°C y el límite de clasificación térmica; 155°C para aislamientos clase F, en aproximadamente 45 minutos, tal como se ha aplicado en referencias como [165][166]. Otras referencias entre ellas [64], proponen establecer las temperaturas por debajo de la temperatura de transición vítrea del aislamiento, alrededor de 100°C, argumentado que el estado rígido y duro de la resina incrementa los esfuerzos mecánicos resultando en un método más efectivo para la producción de delaminaciones.

Si bien los límites de 155°C/40°C someten el aislamiento a fuertes esfuerzos mecánicos, la temperatura máxima es todavía relativamente baja y en consecuencia el envejecimiento térmico de la resina podría proceder de forma muy lenta.

Así, para los propósitos de esta investigación, la temperatura máxima se definió en 175°C y la mínima en 100°C. Con estos límites de prueba, se garantiza un gradiente térmico en el aislamiento que desencadena esfuerzos mecánicos y una temperatura que acelera los procesos de degradación térmica de la resina.

En el capítulo 7 se muestra como incluso con esta configuración de ciclado térmico, el aislamiento de las barras de prueba resistió sobresalientemente la delaminación. Por este motivo, para el último periodo de ciclado térmico la temperatura mínima se redujo hasta 50°C con lo cual se esperaba producir cambios significativos en el aislamiento.

En las demás barras de prueba, la magnitud de los esfuerzos aplicados se incrementó cuando no logró producir cambios significativos en los parámetros dieléctricos del aislamiento.

Los valores de  $\Delta C$  and  $\Delta \tan \delta$  en este segundo grupo de barras se calcularon a partir de las mediciones a 500V y 10kV, coincidiendo este último con el voltaje de prueba de las descargas parciales.

Pese a que el voltaje nominal de las barras de prueba fue de 13.8kV, el voltaje máximo en las mediciones fue de 10kV. Se evitó realizar mediciones a 13.8kV para reducir la probabilidad de falla de las bobinas teniendo en cuenta el mayor nivel de degradación del aislamiento en estas barras.

### 6.3 METODOLOGÍA PARA LA TOMA DE MUESTRAS

El diagnóstico por medio de análisis fisicoquímico requiere muestras del material removidas de cierta parte del aislamiento de las barras o bobinas. Técnicamente, unos pocos miligramos deberían ser suficientes para obtener resultados significativos. Esto no es un problema en estudios donde las muestras son específicamente preparadas para ir a través de una serie de ensayos de laboratorio, pero ciertamente lo es cuando las muestras provienen de barras reales que también han de ser probadas dieléctricamente. En este caso, se requiere que el tamaño de la muestra sea lo suficientemente grande para poder realizar análisis químico pero al mismo tiempo lo más pequeño posible para evitar reducir peligrosamente la rigidez dieléctrica del aislamiento o modificar significativamente los parámetros dieléctricos.

El lugar en la bobina de donde la muestra debe ser removida es otro factor importante a tener en cuenta dado que la magnitud de los esfuerzos cambia de una parte de la bobina a otra en operación real. Por ejemplo, la parte de la bobina en la ranura del estator está sometida a un campo eléctrico mayor que la parte más lejana de la cabeza de bobina y por ende a una mayor actividad de descargas parciales. Por su parte, las cabezas de bobina en máquinas con refrigeración indirecta son más propensas a ser contaminadas con sustancias activas que

podrían reaccionar con los materiales del aislamiento. A consecuencia de estos factores, resulta otra cuestión que debe ser considerada y es qué tan desigual es la degradación de la estructura del aislamiento. Aun si la degradación fuera completamente distinta en diferentes puntos de la bobina, los esfuerzos termoeléctricos inducirían reacciones químicas de degradación susceptibles de ser detectadas por medio de análisis químico.



Figura 45. Método de remoción de las muestras del aislamiento disolviendo la resina en acetona.

Teniendo en cuenta las restricciones de tamaño, varios métodos se han reportado en la literatura para el proceso de remoción de las muestras. Los métodos incluyen el corte de secciones del aislamiento mediante cierras circulares y el uso de escarpelos [39][150]. Otras técnicas han empleado acetona para diluir la resina [84]. Disolver la resina para extraerla de la cinta de mica es en principio el método deseado y más adecuado puesto que elimina de los resultados el efecto de los otros componentes del aislamiento; mica, vidrio, etc. La referencia que cita esta técnica no menciona ningún detalle respecto al proceso, entre ellas la relación masa de resina obtenida sobre masa del compuesto. Teóricamente en el mejor de los casos se esperaría que esta relación estuviera entre el 20-30% que corresponde al contenido de resina en un compuesto de mica-resina. Las ventajas que supone analizar únicamente la resina fue una razón para implementar este método.

Como se muestra en la Figura 45 varias láminas de aislamiento se sumergieron en 200 ml de acetona y se agitaron en una plancha magnética. Luego de la evaporación total de la acetona se obtuvo un polvo granular el cual fue analizado por medio de FTIR con la técnica KBr. Los resultados mostraron que el proceso de agitación desprendió también pequeños trozos de mica y por lo tanto la sustancia obtenida no correspondió a la resina 100%. Los resultados de esta técnica respecto a la cantidad de material requerido y en términos de trabajo

para la preparación de las muestras no presentaron ventajas significativas comparadas con la extracción de las muestras mecánicamente. Por lo anterior se descartó el método de diluir la resina en acetona y en cambio las muestras fueron obtenidas directamente cortándolas de las barras como se describe a continuación.

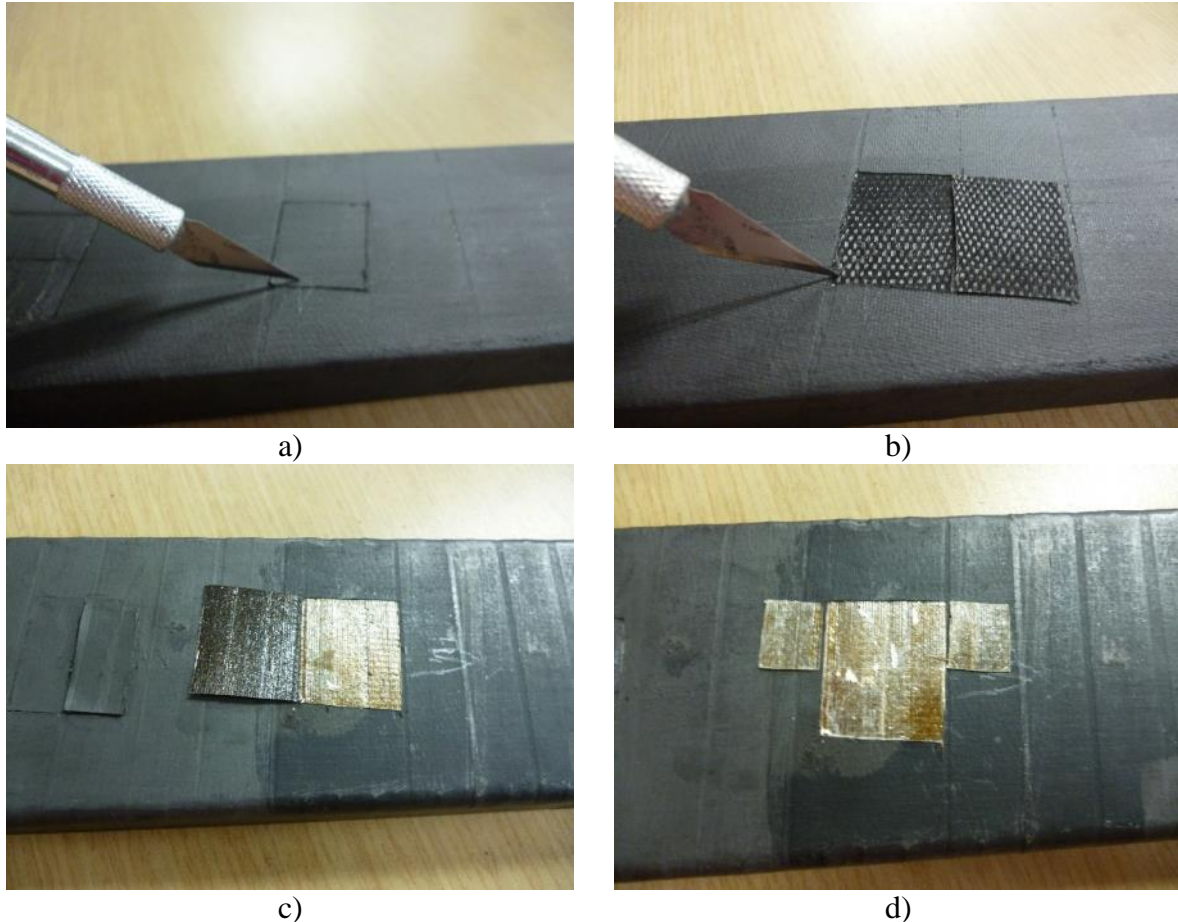


Figura 46. Método de remoción directa de las muestras del sistema de aislamiento.

El proceso de remoción de las muestras del material del aislamiento inició cortando rectángulos de la cinta semiconductora aproximadamente de 25x40 mm a lo largo del plano de encintado utilizando un escarpelo, Figura 46a. El corte de esta primera capa dejó descubierta una capa con restos de los materiales que componen la cinta semiconductora, Figura 46b. La primera capa del aislamiento apareció solo hasta después de limpiar las partículas dejadas por la cinta semiconductora, Figura 46c. Con el escarpelo se continuó profundizando el contorno formado apenas lo necesario para levantar la primera capa del aislamiento, Figura 46d. Dada la estructura laminada del aislamiento, resultó relativamente sencillo remover tan solo la primera capa. Siempre que fue necesario, se removieron más muestras de una zona inmediatamente adyacente y no en dirección del espesor del aislamiento. Finalmente la zona de donde se removieron las muestras fue tratada con pintura semiconductora. Todas las muestras se removieron de la zona de ranura de las barras empezando desde un extremo y continuando hacia el centro de la barra con cada ciclo de envejecimiento.



## 6.4 BANCO DE PRUEBAS E INSTALACIONES

Esta investigación fue pionera en su tipo al interior del grupo de Investigación en Conversión de Energía CONVERGIA de la Universidad del Valle y a nivel nacional se unió al creciente interés por el estudio de los mecanismos de falla en sistemas de aislamiento eléctrico y estimación de vida útil de equipos de alto voltaje. Si bien en años anteriores el grupo CONVERGIA llevó a cabo estudios relacionados, ninguno de ellos incluyó experimentación relacionada a envejecimiento acelerado. En consecuencia para cuando se inició este estudio no estaba disponible ningún tipo de infraestructura para la aplicación de esfuerzos de envejecimiento a barras estatóricas como era requerido. Así las cosas, el primer paso consistió en la consecución de los recursos para la implementación del banco de pruebas por medio de distintas fuentes de financiación. Tomó cerca de dos años, entre 2009 y 2012, lograr la aprobación de proyectos y con ello la asignación de recursos económicos.

El montaje del banco de pruebas se inició a principios de 2012 en el marco del proyecto “Implementación de un Banco para Pruebas de Envejecimiento Acelerado a Barras del Estator de Máquinas Rotativas” financiado por la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad del Valle. Con estos recursos se construyó en el laboratorio de Máquinas Rotativas de la Universidad del Valle los sistemas para la aplicación de ciclado térmico y para la aplicación de esfuerzos termoeléctricos. En el año 2013 se logró por medio del Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación COLCIENCIAS la financiación de la segunda fase de este proyecto<sup>2</sup> con lo cual se ampliaron las instalaciones y se incrementó su capacidad.

### 6.4.1 BANCO PARA APLICACIÓN DE CICLADO TÉRMICO

El método seleccionado para la aplicación de ciclos térmicos consistió en hacer circular una corriente de gran magnitud por las barras de prueba para incrementar la temperatura del cobre por efecto Joule. La fuente de corriente utilizada consistió en un grupo motor-generator de corriente continua de 500A/30Vdc. Como se aprecia en la Figura 47a la máquina se encontró fuera de funcionamiento al momento de ser requerida como fuente de corriente. Para su puesta en servicio fue necesario entonces fabricar algunas piezas faltantes, ensamblar y ajustar mecánicamente todos los componentes, Figura 47b.

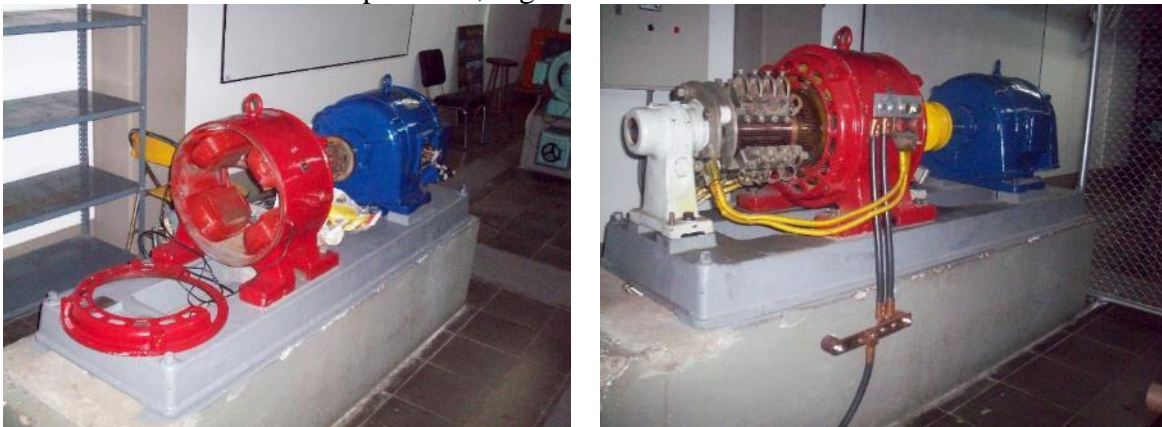


Figura 47. Grupo motor-generator de 500A/30Vdc. a) Estado inicial, b) Puesta en marcha.

<sup>2</sup> Recursos del Patrimonio Autónomo Fondo Nacional de Financiamiento para la Ciencia, la Tecnología y la Innovación, Francisco Jose de Caldas

Luego de la recuperación mecánica de la máquina, se diseñó e implementó una fuente con puente rectificador totalmente controlado para alimentar el devanado de campo del generador. La corriente de armadura se adecuó como señal de referencia y se llevó al circuito controlador de disparo de los SCR del puente rectificador formando un lazo cerrado de control de corriente como se muestra en el diagrama esquemático de la Figura 48.

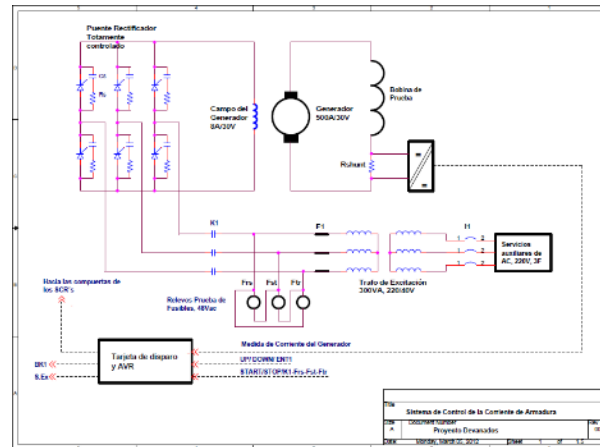


Figura 48. Sistema de control de la corriente de armadura del grupo motor-generador.

La implementación del sistema de control del grupo motor-generador para su funcionamiento como fuente de corriente en las pruebas de ciclado térmico se muestra en la Figura 49.



Figura 49. Implementación del sistema de control del grupo motor-generador.

Teniendo en cuenta que la corriente nominal de las barras de prueba estaba en el orden de 3.7kA y que la corriente máxima disponible en el laboratorio era solo de 500Adc, entonces fue necesario hacer grupos de subconductores conectados en serie para reducir el área transversal

del cobre y con esto incrementar la densidad de corriente. Como se muestra en la Figura 50 los subconductores fueron soldados apropiadamente hasta lograr un área lo suficientemente pequeña que permitió incrementar la temperatura rápidamente con la corriente disponible. Así, utilizando 400A dc la temperatura del cobre se elevó hasta 170°C en un lapso de 20 minutos aproximadamente.



Figura 50. Adecuación de las barras estáticas para las pruebas de ciclado térmico.

Todas las barras bajo ciclado térmico fueron provistas de termocuplas tipo J para sensar la temperatura tanto del cobre como de la superficie del aislamiento. Estas señales se enviaron a un registrador industrial Novus FieldLogger para ser monitoreadas y controladas desde computador. Cuando la temperatura del cobre alcanzaba la temperatura máxima programada en el registrador, éste enviaba una orden de apagado a la fuente de alimentación del devanado de campo con lo cual la corriente de armadura se reducía a cero. En este momento entraban en funcionamiento un conjunto de ventiladores para disminuir la temperatura de las barras. Alcanzada la temperatura mínima, el registrador enviaba la orden de apagado de los ventiladores y de encendido de la fuente con lo que se reestablecía la corriente de armadura y se iniciaba un nuevo ciclo térmico. La implementación del banco para pruebas de ciclado térmico se muestra en la Figura 51.



Figura 51. Implementación del banco para pruebas de ciclado térmico.



#### 6.4.2 BANCO PARA LA APLICACIÓN DE ESFUERZOS TERMOELÉCTRICOS EN LA UNIVERSIDAD DEL VALLE

Para la aplicación de los esfuerzos termoeléctricos se implementó un circuito de prueba similar al sugerido en la Figura 1 citada en el documento técnico IEEE 1043-1996(R2009). Este montaje incluyó un transformador monofásico elevador 13200/220V alimentado por un regulador de inducción 0-220V para la aplicación de esfuerzos eléctricos. Los esfuerzos térmicos se lograron por medio de placa calefactoras montadas sobre platinas de aluminio ajustadas a ambos lados de las barras de prueba. Este esquema permitió la aplicación de los esfuerzos tanto individual como simultáneamente. Como se aprecia en el detalle de la Figura 52 las platinas de aluminio fueron perforadas para ubicar en su interior termocuplas tipo J para la medición de temperatura.

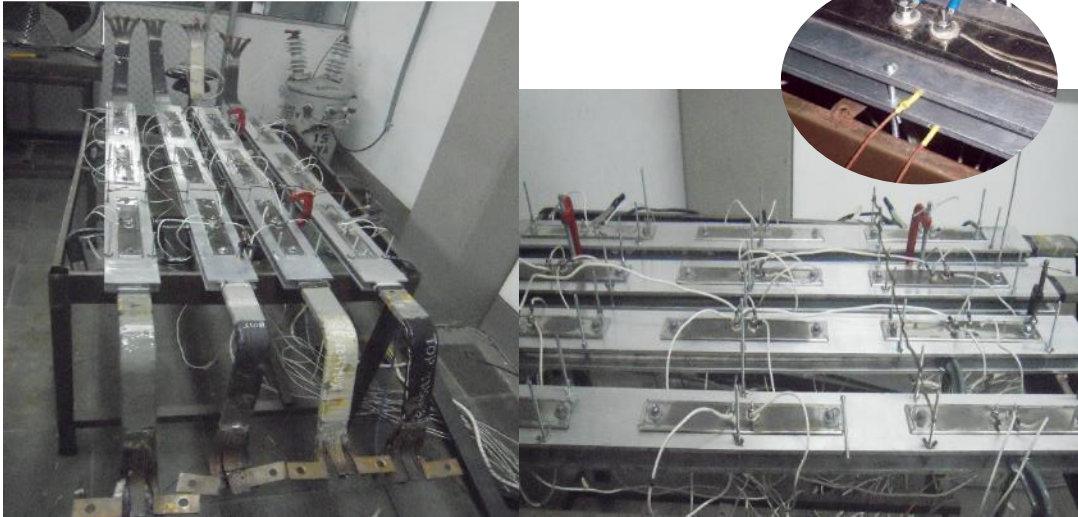


Figura 52. Método de placas calefactoras para la aplicación de esfuerzos térmicos.

El sistema de control de la Figura 53 se construyó específicamente para registrar las variables, mantener la temperatura de prueba constante dentro de un margen de  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  y ejecutar las acciones necesarias de seguridad del personal y de los equipos. Este tablero de control contenía el registrador industrial Novus FieldLogger acoplado con el sistema de control para ciclado térmico.



Figura 53. Sistemas de control y adquisición de temperaturas para la aplicación de esfuerzos termoeléctricos.

El banco de pruebas construido y mostrado en la Figura 54 tiene la capacidad de someter a un mismo programa de envejecimiento termoeléctrico un total de cuatro barras estáticas con longitudes de la parte de ranura de hasta 1.5 m. Para ello cada uno de los cuatro pares de platinas de aluminio fue provisto con seis resistencias calefactoras de 470W/220V. Con dichas resistencias la temperatura puede ser llevada hasta un máximo de 250°C. El máximo voltaje de prueba con este banco fue de 13.2kV.



Figura 54. Banco de pruebas para aplicación de esfuerzos termoeléctricos.

### **6.4.3 BANCO PARA LA APLICACIÓN DE ESFUERZOS TERMOELÉCTRICOS EN LA UNIVERSIDAD KTH**

Durante la pasantía de investigación realizada en la Universidad KTH fue necesaria la construcción del horno para la aplicación de los esfuerzos termoeléctricos que se muestra en la Figura 55. Este consistió de una estructura de 90x180x240cm en aluminio aislada térmicamente con paneles de fibra de vidrio recubriendo las paredes internas del horno. Las fuentes de calor consistieron de varios calentadores resistivos dispuestos a lo largo del horno controladas por un termostato. Una ventana apropiada a un costado de la estructura permitió conectar las bobinas en el interior del horno con el transformador monofásico elevador. Las temperaturas fueron registradas por medio de multímetros digitales con conexión a computador.



Figura 55. Implementación de un horno para aplicación de esfuerzos termoeléctricos (Universidad KTH-Suecia).

#### 6.4.4 LABORATORIO DE ENSAYO DE BOBINAS

Con la aprobación de un segundo proyecto por parte de COLCIENCIAS se obtuvieron los recursos para ampliar las instalaciones actuales del banco de pruebas e incrementar su capacidad. De esta forma el espacio dentro del Laboratorio de Máquinas Rotativas (Universidad del Valle) ocupado por los bancos de prueba para la aplicación tanto de ciclado térmico como de esfuerzos termoeléctricos se dedicó exclusivamente para ensayos de ciclado térmico. El banco para la aplicación de esfuerzos termoeléctricos fue trasladado al Laboratorio de Ensayo de Bobinas el cual está ubicado adyacente al Laboratorio de Máquinas Eléctricas. El trámite de creación y reconocimiento como espacio para pruebas dentro de la Universidad del Valle se llevó a cabo completamente durante esta investigación, desde su trámite administrativo hasta sus sistemas eléctricos, de comunicaciones, su nomenclatura y accesos de ingreso. Al mismo tiempo que se dio el traslado se modificaron los sistemas del banco de pruebas obteniéndose las siguientes mejoras y características:

- Mayor área de pruebas, de 40m<sup>2</sup>, e independiente del Laboratorio de Máquinas Rotativas
- Cerramientos del área de pruebas para seguridad del personal acordes con los niveles de voltaje utilizados
- Dos estaciones de trabajo permanentes



- Capacidad de ajustar motorizadamente el voltaje de prueba hasta 50kV con regulación del voltaje de entrada por medio de los controles del tablero mostrado en la Figura 56a.
- Control independiente de temperatura para cada barra de prueba sometida a envejecimiento termoeléctrico. Para ello fue necesario construir el tablero de la Figura 56b con el cual cada par de platinas y sus respectivas resistencias calefactoras pudo ser controlada de forma independiente



Figura 56. Sistemas de control del Laboratorio de Ensayo de Bobinas: a) Tablero principal de accionamiento y mando, b) Control de potencia independiente para cada barra sometida a esfuerzo térmico.

La infraestructura implementada y que queda como resultado representa una de las principales contribuciones obtenidas en el transcurso de la investigación. Inicialmente este laboratorio estará dedicado al desarrollo de investigación, motivo por el cual en esta segunda fase de implementación se adquirieron equipos complementarios que ahora mismo están siendo usados en el desarrollo de dos investigaciones adicionales; una a nivel de maestría y otra a nivel doctoral. Las proyecciones para el futuro cercano son el mejoramiento continuo de los sistemas y la consecución de las certificaciones necesarias para la prestación de servicios a la industria de la región. La implementación del Laboratorio de Ensayos de Bobinas se puede observar en la Figura 57.



Figura 57. Laboratorio de Ensayo de Bobinas.

### 6.4.5 DIAGRAMA DE CONEXIÓN PARA LAS MEDICIONES A ALTO VOLTAJE

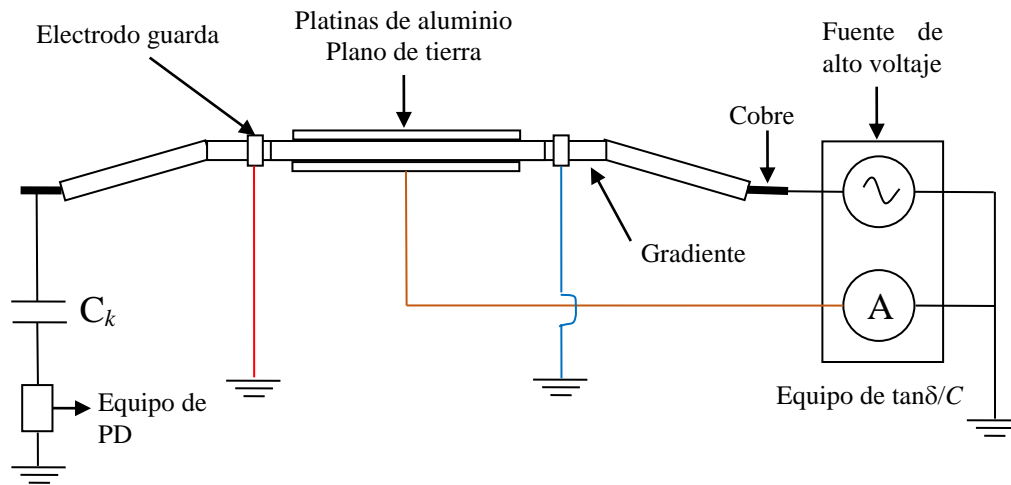


Figura 58. Diagrama de conexión para las mediciones de  $C/\tan\delta$  y descargas parciales

En la Figura 58 se muestra el diagrama de conexión para las mediciones de capacitancia/factor de disipación y descargas parciales. Durante las mediciones de  $\tan\delta/C$  el equipo de medición se configura en el modo GND-RB, con lo cual solo la corriente que proviene de las platinas de aluminio pasa a través del amperímetro del instrumento de medición. Las corrientes provenientes de los anillos guarda no influyen en la medición. El equipo de descargas parciales es desconectado durante las mediciones de  $\tan\delta/C$ , de lo contrario la capacitancia/perdidas del condensador de acople se adicionaría a los respectivos valores de la barra de prueba.

Durante las mediciones de descargas parciales, el equipo de  $\tan\delta/C$  fue utilizado como fuente de excitación.

### 6.4.6 EQUIPOS DE MEDICIÓN UTILIZADOS

Para las mediciones dieléctricas se utilizaron los siguientes equipos:

**Respuesta Dieléctrica.** Equipo Megger IDAX300 acoplado con amplificador de alto voltaje, Figura 59.

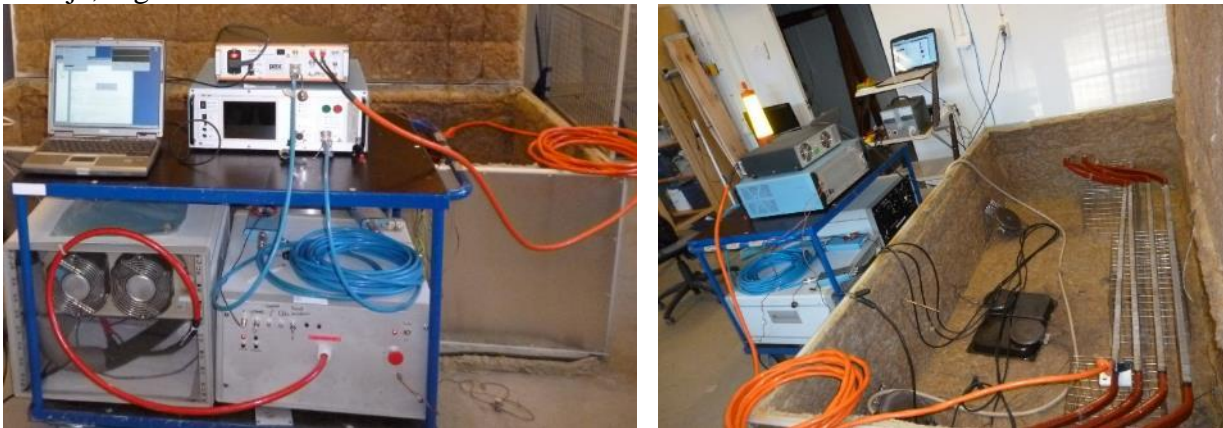


Figura 59. Equipo de medición de respuesta dieléctrica Megger Idax300.



**Capacitancia/Factor de disipación.** Las mediciones a 60Hz de capacitancia y factor de disipación se realizaron principalmente por medio del equipo Doble M4100, Figura 60, y en algunos casos se utilizaron los equipos Megger Delta4100, y Omicron CPC-100 + TD1 cuando estuvieron disponibles permitiendo hacer comparaciones entre las diferentes tecnologías.



Figura 60. Equipos de medición de capacitancia y factor de disipación a 60Hz Doble M4100, Omicron TD1 y Megger Delta4000.

**Descargas Parciales.** Cuando las mediciones de descargas parciales se hicieron en la Universidad KTH se utilizó el sistema ICMSystem de PowerDiagnostix, sistema de banda ancha WB (40kHz-800kHz) de acuerdo con IEC60270, haciendo uso de un condensador de acople de 25kV con impedancia de detección incorporada, Figura 61.

Durante las mediciones en la Universidad del Valle se empleó el sistema de detección de PDCheck MKIV de TechImp, sistema UWB (10kHz÷40MHz), igualmente con condensador de acople de 17kV con impedancia de detección incorporada, Figura 62.



Figura 61. Equipo de medición de descargas parciales PowerDiagnostix ICMSystem.



Figura 62. Equipo de medición de descargas parciales TechImp PDCheck MKIV.

**Equipos para análisis de FTIR/TGA/DSC.** Todas las mediciones del tipo fisicoquímicas incluidos en esta tesis fueron realizados de forma independiente por laboratorios externos empleando los siguientes instrumentos.

FTIR: Perkin-Elmer Spectrum 2000 de una sola reflexión equipado con cristal ATR MKII Golden Gate.

DSC 1: Mettler Toledo DSC-1 equipado con controlador de gas GC100.

DSC/TGA 2: TA Instruments SDT Q600.



## 7 EVALUACIÓN DEL AISLAMIENTO POR PARÁMETROS DIELECTRICOS

Este capítulo mostrará los resultados de las mediciones dieléctricas realizadas a cada una de las barras de prueba. El análisis de los resultados se enfocará a evaluar nuevos parámetros útiles en la estimación de la degradación del aislamiento. Se iniciará con el análisis de los resultados de respuesta dieléctrica y capacitancia/factor de disipación para el primer grupo de bobinas. De ahí se propondrán criterios de diagnóstico que serán validados o reforzados por medio de los resultados obtenidos del segundo grupo de barras de prueba.

### 7.1 MODELAMIENTO DE LA RESPUESTA DIELECTRICA

Modelar el comportamiento dieléctrico de las barras de prueba en función de la frecuencia es una herramienta que permite estudiar los cambios, principalmente a nivel molecular/estructural, de los materiales que conforman su sistema de aislamiento.

Mediciones de respuesta dieléctrica en el dominio del tiempo como las reportadas en [167] confirman que la función de respuesta dieléctrica de aislamientos de barras estatóricas se ajusta al modelo de Curie-von Schweidler o modelo de potencia fraccionaria mostrado en (7.1).

$$f(t) \propto At^{-n} \quad (7.1)$$

De los resultados de las mediciones se encontró que las constantes  $A$  y  $n$  de la función  $f(t)$  son sensibles a los cambios debidos a los mecanismos de degradación. Por ejemplo, las reacciones de postcurado produjeron una disminución en el exponente  $n$  el cual tendió a crecer con el tiempo de envejecimiento.

En virtud de que la función de respuesta dieléctrica está estrechamente ligada a la condición y naturaleza de los materiales del sistema de aislamiento, en [168] se utilizaron los parámetros  $A$  y  $n$  para caracterizar sistemas de aislamiento de diferentes tecnologías. Los sistemas epóxicos arrojaron valores de  $n$  mayores que para sistemas con mayores pérdidas como los asfálticos y poliestéricos.

En el dominio de la frecuencia la función de respuesta dieléctrica toma la forma mostrada en (7.2).

$$f(\omega) \propto (j\omega)^{n-1} \quad (7.2)$$

Análogamente a las mediciones en el dominio del tiempo, el exponente  $m=n-1$  del modelo en el dominio de la frecuencia debería tener relación con la condición del sistema de aislamiento. Teniendo en cuenta lo anterior, esta investigación estudió los cambios en el exponente  $m$  en función del tiempo de envejecimiento para las barras de prueba del primer grupo.

La capacitancia compleja de un sistema de aislamiento graficada en una escala log-log muestra dos líneas rectas y paralelas, similares a las mostradas en la Figura 26; una para la componente real y otra para componente imaginaria. Gráficamente, la pendiente de ambas rectas corresponde al valor del exponente  $m=n-1$ .

En la práctica, la capacitancia compleja pura difiere de la capacitancia compleja medida en que a la respuesta por polarización se le suma la respuesta debido a la capacitancia instantánea  $C_\infty$ . Adicionalmente, a causa de la conductividad superficial y/o volumétrica presente en

todos los materiales dieléctricos reales, la componente imaginaria se ve incrementada en la corriente de conducción  $\sigma/\omega$ . Dicho incremento es más pronunciado hacia menores frecuencias. De esta forma, la capacitancia compleja medida toma la forma de (7.3).

$$C(\omega) = C'(\omega) - jC''(\omega) = [C_\infty + \Delta C'(\omega)] - j \left[ C''_{pol}(\omega) + \frac{\sigma}{\omega} \right] \quad (7.3)$$

Debido a estas componentes adicionales, las curvas de la respuesta dieléctrica medida no resultan en dos líneas rectas paralelas, en cuyo caso el valor de la pendiente  $m$  no puede ser obtenido directamente de la capacitancia compleja medida.

Aprovechando el hecho de que las integrales de Kramers-Kronig son cero para valores constantes y de la forma  $1/\omega$ , es decir que ni  $C_\infty$  ni  $\sigma/\omega$  aportarían a las transformaciones, entonces basta con sustraer estos valores de las componentes real e imaginaria de la capacitancia compleja medida para obtener las componentes de la respuesta dieléctrica pura.  $\Delta C'(\omega)$  y  $C''_{pol}(\omega)$ .

Para lo anterior, el primer paso fue considerar que en la mayoría de los sistemas de aislamiento en buenas condiciones y a temperatura ambiente, la corriente de conducción  $\sigma/\omega$  hacia las altas frecuencias afecta poco a  $C''(\omega)$ , y por lo tanto la gráfica de  $C''(\omega)$  se sobrepone a la gráfica de  $C''_{pol}(\omega)$ .

$$C''(\omega) \approx C''_{pol}(\omega) \quad (7.4)$$

De este modo, la pendiente de la recta que mejor ajustó la curva medida de  $C''(\omega)$  se tomó como el valor de  $m$ . La Figura 63 muestra un ejemplo de respuesta dieléctrica, en la que la componente medida  $C''(\omega)$  se ajustó por medio de la línea recta en rojo, cuyo valor de pendiente  $m$  fue -0.1495.

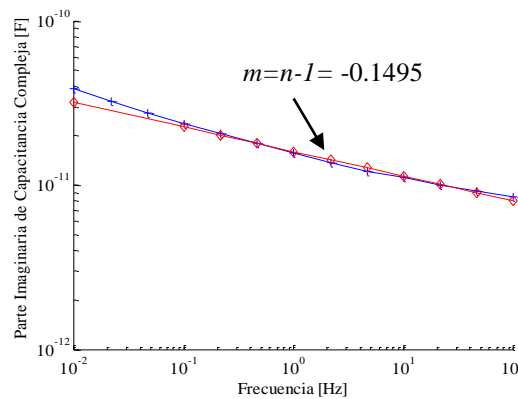


Figura 63. Ajuste de la curva  $C''(\omega)$  por medio de una línea recta (en rojo) de pendiente  $m$ .

En principio, al sustraer el valor constante de la capacitancia  $C_\infty$  de todos los valores medidos de  $C'(\omega)$  se obtiene la componente dinámica de la capacitancia compleja  $\Delta C'(\omega)$ . La gráfica de esta componente debería resultar en una línea recta también de pendiente  $m$ .

Para obtener  $\Delta C'(\omega)$  se implementó un proceso iterativo en el que se asumió un valor inicial o de referencia para  $C_\infty$ , el cual correspondió al valor de capacitancia medido a 100Hz.

Seguidamente, este valor se evaluó en la expresión (7.5). El valor asumido de  $C_\infty$  se aumentó o disminuyó hasta que la curva de  $C''(\omega)$  se aproximó a una línea recta con pendiente  $m$ .

$$\Delta C'(\omega) \approx C'(\omega) - C_\infty \quad (7.5)$$

En la Figura 64, puede observarse el efecto del valor de  $C_\infty$  en la curva de  $\Delta C'(\omega)$  para la respuesta dieléctrica del ejemplo de la Figura 63. La Figura 64a muestra que sustrayendo un valor de  $C_\infty = 1.8\text{nF}$  los valores de  $m$  no son aproximados. Aumentando el valor hasta  $C_\infty = 1.886\text{nF}$  se obtuvo ambas líneas rectas con la misma pendiente  $m$ .

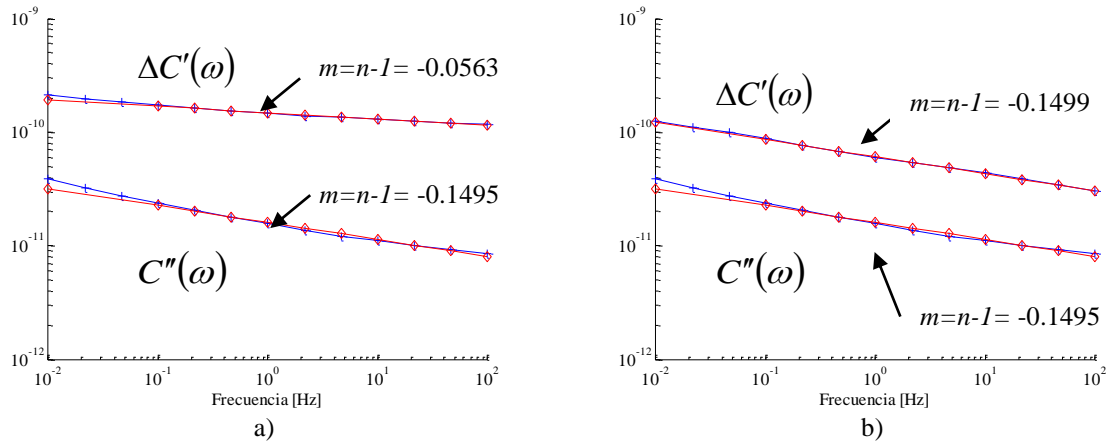


Figura 64. Curva ajustada de  $\Delta C'(\omega)$  luego de sustraer un valor de a)  $C_\infty : 1.8\text{nF}$  y b)  $1.886\text{nF}$ .

En todos los casos de estudio los valores de  $m$  obtenidos a partir de la línea recta de ajuste tanto de  $C''(\omega)$  como de  $\Delta C'(\omega)$  fueron muy aproximados, por lo que el valor de  $m$  se tomó como el valor promedio.

## 7.2 CAMBIOS EN LA RESPUESTA DIELECTRICA CON EL ENVEJECIMIENTO

Cuando se estudia la degradación de sistemas de aislamiento durante pruebas de envejecimiento acelerado, el tiempo se convierte en la variable independiente principal, por lo tanto el análisis del parámetro  $m$  se investigó en relación a su comportamiento en el tiempo.

En la Figura 65 se muestra el comportamiento con el tiempo de envejecimiento de la capacitancia compleja de la barra SG a 1kV y 10kV. Si bien claramente existe una tendencia decreciente de la capacitancia con la reducción del voltaje de prueba y con el aumento del tiempo de envejecimiento, la tendencia en la parte imaginaria no es tan evidente sobre todo a 10kV. Sin embargo, el comportamiento de las pérdidas no sorprende ya que de acuerdo al modelo de potencia fraccionaria la variación de las componentes de la capacitancia compleja con la frecuencia obedece a la respuesta dieléctrica del aislamiento la cual es una propiedad estrechamente ligada a su condición y nivel de degradación. Así, que el valor de las pérdidas para cada punto de frecuencia y para cada estado de envejecimiento muestre una tendencia marcada creciente o decreciente es un caso particular del comportamiento del aislamiento con el envejecimiento y no necesariamente una regla general.

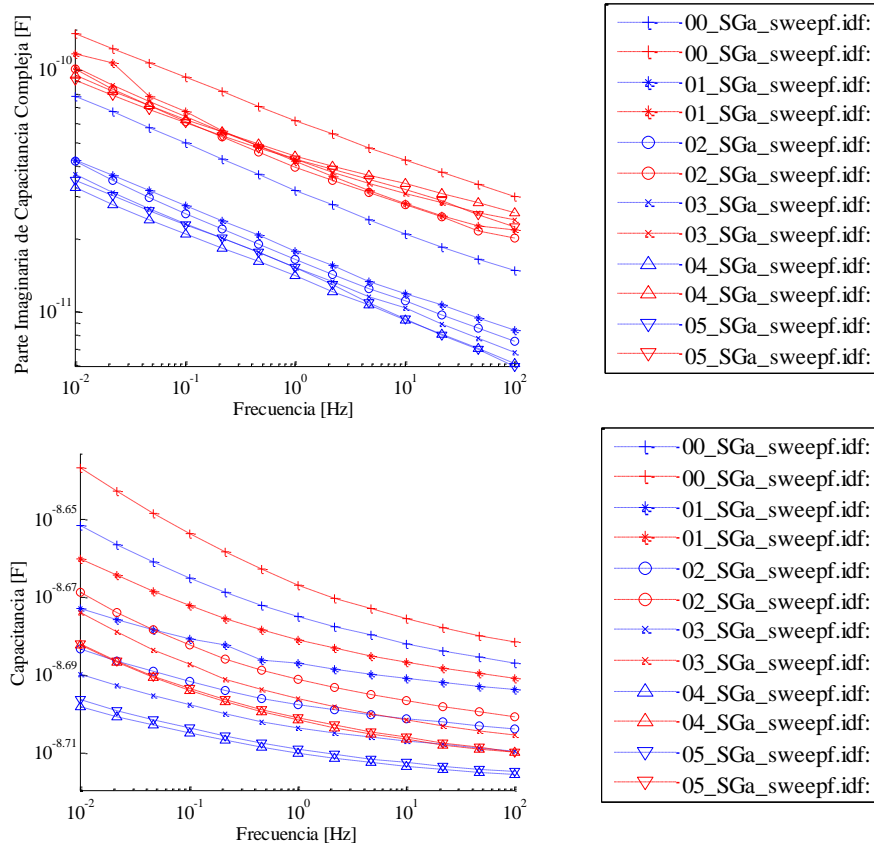


Figura 65. Respuesta dieléctrica de la barra SGa medida a 1kV y 10kV.

Siguiendo el procedimiento descrito en la sección 7.1, se obtuvieron para todos los casos de estudio los valores de las pendientes  $m$  de las rectas que mejor ajustaron los datos de la parte imaginaria de la capacitancia compleja. La Figura 66 muestra la evolución de  $m$  en el tiempo para la barra SGa.

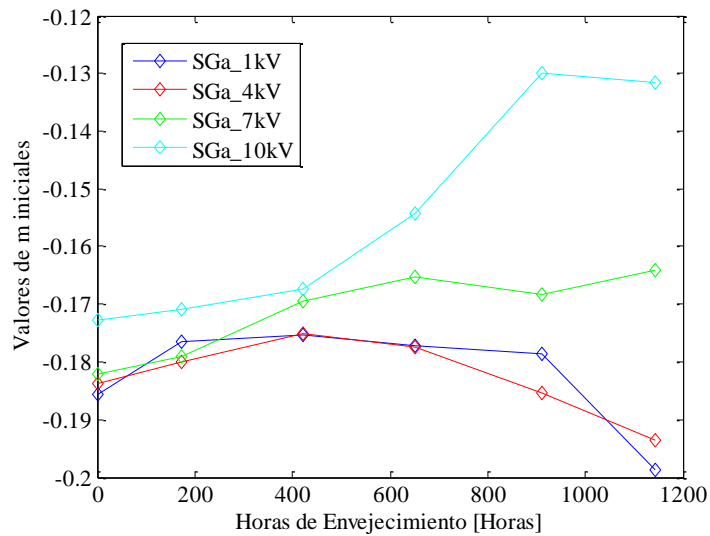


Figura 66. Evolución en el tiempo de los valores de  $m$  calculados para diferentes voltajes de prueba para la barra SGa.

A partir de la Figura 66 se pueden distinguir dos comportamientos: para los voltajes de pruebas más bajos (1kV y 4kV) los valores de  $m$  decrecen<sup>3</sup> paulatinamente con el tiempo de envejecimiento mientras que a 7kV y 10kV mostraron una tendencia creciente.

Para el caso particular de las pérdidas dieléctricas medidas a 1kV (curvas azules), la Figura 65 muestra un efecto benéfico de la temperatura, indicado como una reducción paulatina de las pérdidas, en tanto que el decrecimiento pronunciado de  $m$  al final del envejecimiento en la Figura 66 sugiere que se alcanzó el límite de esta reducción.

Debido a que el valor de la pendiente  $m=(n-1)$  es común tanto para la característica de perdidas como para la característica  $\Delta C'(\omega)$ , la dinámica de las perdidas con la frecuencia y con el tiempo de envejecimiento se ve reflejada en el comportamiento de la capacitancia. En correspondencia las curvas de capacitancia en la Figura 65 también mostraron una tendencia decreciente hasta el cuarto ciclo de envejecimiento, a partir ahí la tendencia cambió hacia un incremento de la capacitancia.

Basados en los resultados anteriores, probablemente si se llevara la barra SGa de nuevo a un programa de envejecimiento, entonces las perdidas y la capacitancia tomarían una tendencia creciente con el tiempo de envejecimiento. No obstante, antes de una posible generalización de la dinámica del envejecimiento, es preciso evaluar los posibles factores que inciden en los resultados de las mediciones de respuesta dieléctrica tales como el voltaje de prueba y el efecto de la cinta gradiente.

### 7.2.1 EFECTOS DEL VOLTAJE DE PRUEBA

Si ahora el análisis de los resultados de SGa se dirige a los valores obtenidos a 7kV y 10kV se esperaría que las conclusiones obtenidas para 1kV y 4kV fueran todavía verdaderas debido a que teóricamente la polarizabilidad  $\chi(\omega)$  es una propiedad del material dieléctrico que no depende del campo eléctrico aplicado y sí por ejemplo de su nivel de degradación. A pesar de esto, los valores de  $m$  a 7kV y 10kV tuvieron una tendencia creciente con el tiempo de envejecimiento, lo que erróneamente indicaría un menor crecimiento de las pérdidas hacia las bajas frecuencias en oposición a lo obtenido a 1kV y 4kV donde se obtuvo un mayor crecimiento de las pérdidas hacia las bajas frecuencias.

Observando la Figura 67, el valor de la capacitancia tip-up calculado a 100Hz y 10kV decreció luego del primer ciclo de envejecimiento e inmediatamente después mostró una tendencia significativamente creciente. El decrecimiento inicial (observado también en otras barras de prueba) es atribuible a los cambios en la resina (postcurado) justo después de someterla a esfuerzos térmicos. El posterior crecimiento de los valores tip-up es un claro indicativo de que con el tiempo de envejecimiento la actividad de descargas parciales se incrementó en el interior del aislamiento, contribuyendo a las pérdidas dieléctricas. Por su parte, los valores medidos a 4kV presentaron una tendencia decreciente desde el inicio del programa de envejecimiento.

Considerando que los valores de  $m$  a 7kV y 10kV son mayores que a 1kV y 4kV luego de los primeros ciclos de envejecimiento, entonces hay razones para sospechar que la contribución de las descargas parciales a las pérdidas es dependiente de la frecuencia, siendo menor su contribución hacia las bajas frecuencias.

<sup>3</sup> Un crecimiento de  $m$  se refiere a un incremento en su valor numérico, esto es por ejemplo que pasó de -0.14 a -0.08 y no debe entenderse como un incremento en la inclinación de la recta. De hecho la línea recta con  $m=-0.08$  visualmente se percibiría como una línea menos inclinada que la que tiene  $m=-0.14$ .

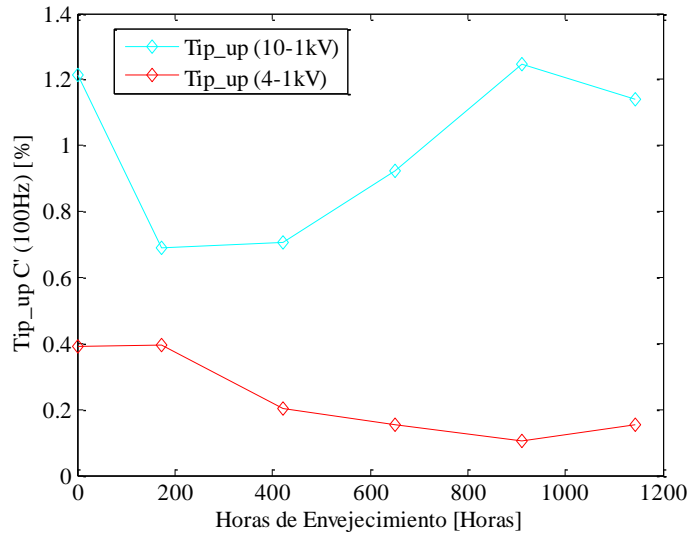


Figura 67. Evolución de la actividad de descargas parciales medida como un incremento en la capacitancia tip-up medida entre 10 y 1kV para la barra SGa.

Si la suposición de la similitud de las descargas parciales en el rango de frecuencia aquí considerado fuera válida, entonces los valores de  $m$  deberían ser independientes del voltaje de prueba. En cambio y como puede percibirse en la Figura 68, la recta de pérdidas dieléctricas disminuyó su inclinación (incremento de los valores de  $m$ ) con el incremento del voltaje de prueba.

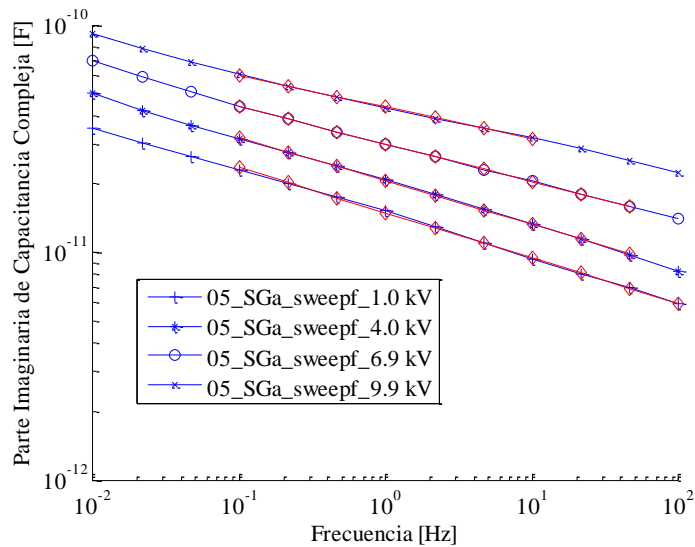


Figura 68. Efecto de las descargas parciales sobre parte imaginaria de la respuesta dieléctrica de la barra SGa.

Las rectas en rojo que ajustan las rectas de pérdidas dieléctricas ayudan a percibir mejor el cambio en su inclinación.

La dependencia de la frecuencia de la contribución de las descargas parciales a las pérdidas dieléctricas observada es soportada en [169] donde se exponen algunos argumentos a favor de este resultado:

- La dependencia de las descargas parciales de la frecuencia de la fuente de excitación está fuertemente ligada a la naturaleza de las descargas. Se ha encontrado que las descargas corona producidas por un sistema de electrodos punta-semiesfera a bajas frecuencias no dependen de otra cosa más que del valor instantáneo del voltaje. Lo anterior no es cierto para descargas en cavidades gaseosas como las que se presentan en los sistemas de aislamiento.
- Ciertas características de las descargas en cavidades tales como el tiempo hasta la descarga (*time-lag*), y las constantes del decaimiento de la carga en la superficie de la cavidad afectan su dependencia de la frecuencia. El tiempo hasta la descarga juega un papel cuando éste es comparable con el periodo de la excitación. A menores frecuencias en cambio la amplitud de la descarga incluso se reduce. Así mismo, conforme se reduce la frecuencia, se incrementa la posibilidad para las cargas libres en el gas o en la superficie de la cavidad de recombinarse disminuyendo la disponibilidad de electrones para iniciar la descarga e incrementando el tiempo hasta la descarga. La conductividad de la superficie proporciona carga en los extremos de la cavidad la cual forma dipolos que se cargan y descargan con el evento de la descarga parcial. Las bajas frecuencias proporcionan mayores tiempos para el movimiento de carga por conducción y por lo tanto menos carga será transferida por la actividad de descargas parciales. De hecho en el escenario de una alta conductividad o a muy bajas frecuencias, las cavidades podrían resultar “apantalladas” cesando toda actividad de descargas parciales.

Por otra parte, si las descargas parciales y su dependencia de la frecuencia afectan la respuesta dieléctrica medida a alto voltaje entonces cabría pensar que ante la ausencia de ellas, los valores de  $m$  resultarían independientes del voltaje prueba. Para comprobar esta hipótesis se compararon los valores de  $m$  a 1kV, 4kV, 7kV y 10kV para todos los casos de estudio previo al envejecimiento, estado en el cual se espera que la actividad de descargas parciales sea mínima.

En el diagrama de barras de la Figura 69a puede verse que los valores de  $m$  son prácticamente independientes del voltaje de prueba desde 1kV hasta 7kV. A partir de 10kV en cambio, consistentemente se obtuvo un incremento en los valores de  $m$  lo que puede interpretarse como que incluso previo al envejecimiento el aislamiento no estaba completamente libre de descargar parciales. El mayor incremento de  $m$  a 10kV se dio en las barras SG, LG y SU1, las mismas para las cuales se midieron descargas parciales antes del programa de envejecimiento. En la sección 7.4 se reportarán los resultados de las mediciones de descargas parciales de la barra SU1.

En contraste con los resultados previos, al final del envejecimiento la dependencia de los valores de  $m$  del voltaje de prueba se hizo más evidente tal como puede apreciarse en la Figura 69b. El mayor incremento en los valores de  $m$  se observó a 7kV y 10kV, aunque en las barras SU2 y LU1 este incremento de  $m$  se dio incluso a 4kV, lo que podría bien sugerir una mayor degradación del aislamiento para estas dos barras.

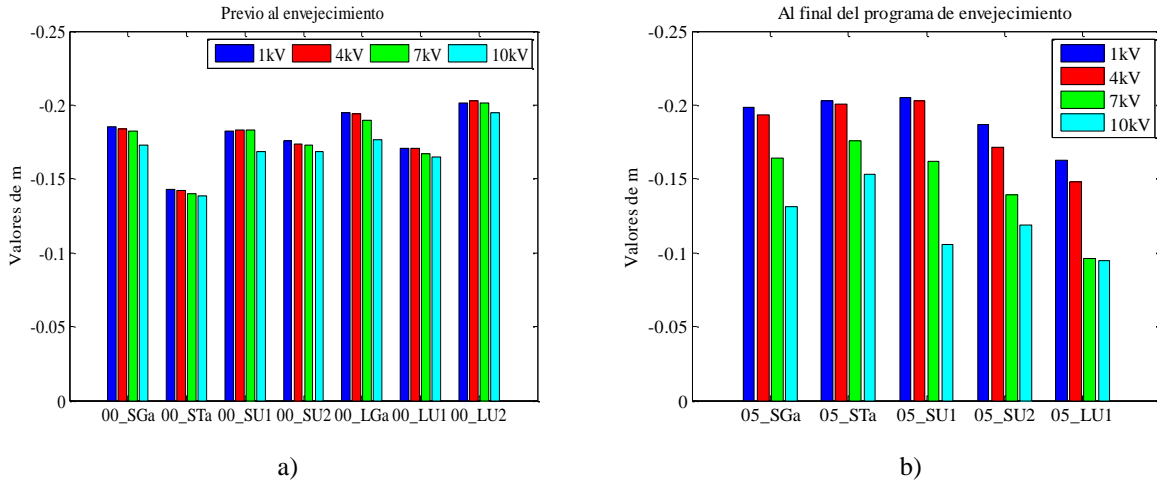


Figura 69. Valores de  $m$  calculados a 1, 4, 7 y 10kV para todos los casos de estudio que involucraron mediciones en las barras completas a) antes y b) después del programa de envejecimiento.

### 7.2.2 EFECTOS DE LA CINTA GRADIENTE

La corriente adicional aportada por la cinta gradiente en las cabezas de bobina y su comportamiento no lineal con el voltaje de prueba, al igual que las descargas parciales podrían influenciar los resultados de  $m$ . Para investigar este efecto, los valores de  $m$  se recalcularon para la barra SG a partir de los resultados de las mediciones con electrodos guarda (medición en la configuración SGm) con lo cual se eliminó el efecto de la cinta gradiente.

La Figura 70 y Figura 71 muestran la comparación entre la respuesta dieléctrica de la barra SG medida con y sin el efecto de la cinta gradiente, es decir, medida en las configuraciones SGa y SGm respectivamente. El efecto de la cinta gradiente evidentemente es hacia mayores pérdidas y hacia una mayor capacitancia con el incremento del voltaje de prueba. En la configuración con electrodos guarda (SGm) se evidencia una mínima dependencia de la respuesta dieléctrica del voltaje de prueba comparada con los resultados que incluyeron el efecto de la cinta gradiente (SGa).

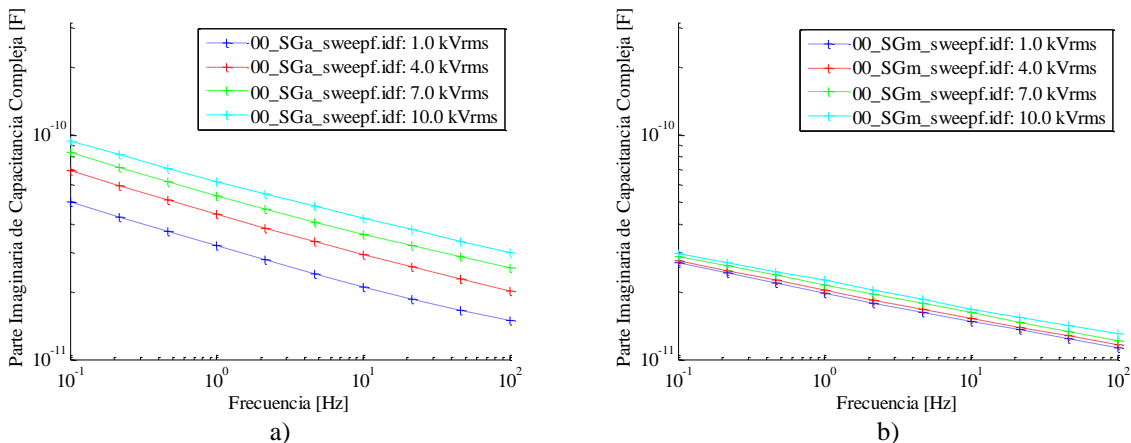


Figura 70. Parte imaginaria de la respuesta dieléctrica para la barra SG: a) medición en la barra completa SGa, b) medición con anillos guarda.



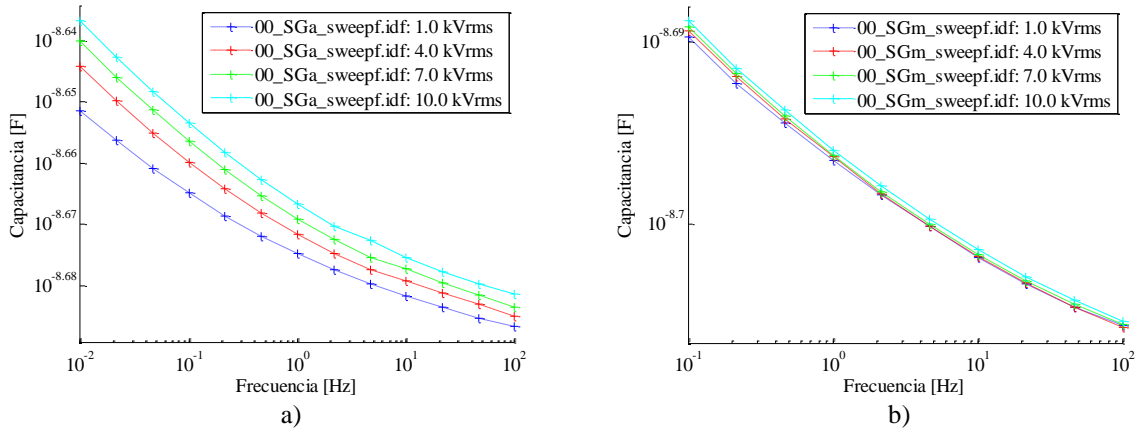


Figura 71. Parte real de la respuesta dieléctrica para la barra SG: a) medición en la barra completa SGa, b) medición con anillos guarda.

Los valores de  $m$  calculados sin el efecto de la cinta gradiente se grafican en la Figura 72. Las mediciones con electrodos guarda condujeron a mayores valores iniciales de  $m$ , lo que puede incluso percibirse en la Figura 70 como líneas rectas con menor inclinación comparadas con las obtenidas en la configuración SGa. Los valores de  $m$  correspondientes a las respuestas dieléctricas en la Figura 70 se muestran en la Figura 73 en conjunto con los de la respuesta dieléctrica de las cabezas de bobina: configuración SGn y SGf.

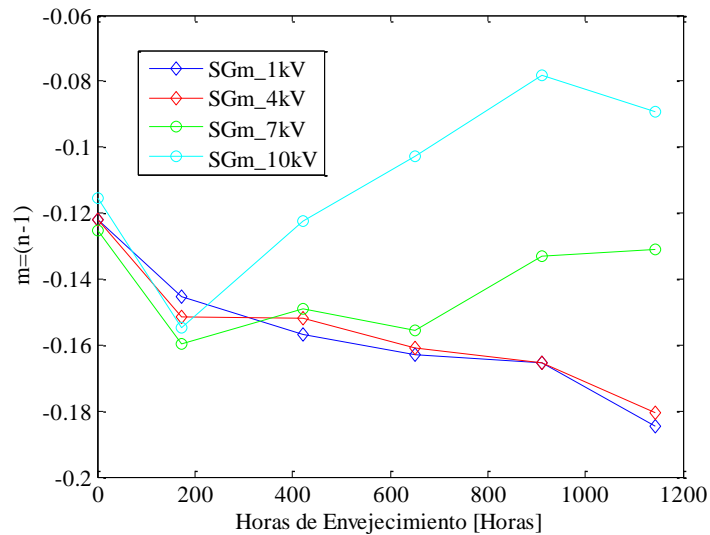


Figura 72. Evolución en el tiempo de los valores de  $m$  calculados para diferentes voltajes de prueba para la barra SGm.

kV	00_SGa	00_SGm	00_SGf	00_SGn
1	-0.1855	-0.1254	-0.2827	-0.3031
4	-0.1837	-0.1245	-0.2236	-0.2431
7	-0.1822	-0.1251	-0.1967	-0.2088
10	-0.1727	-0.1206	-0.1897	-0.1893

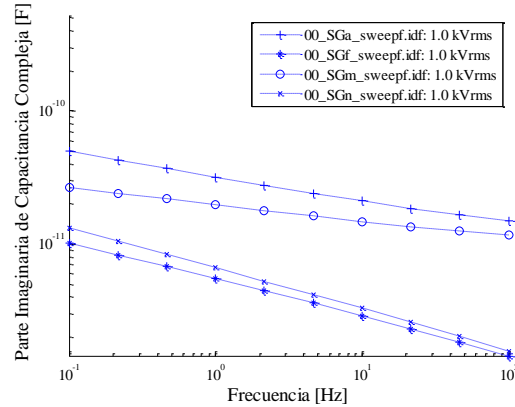


Figura 73. Valores de  $m$  evaluados en las configuraciones de medición SGa (toda la barra), SGm (zona de ranura), SGf (cabeza de bobina 1) y SGn (cabeza de bobina 2) previo al programa de envejecimiento.

Como puede observarse los valores de  $m$  en la configuración SGm fueron mayores que los correspondientes en la configuración SGa. La interpretación de este resultado no debe confundirse con el dado en la sección 7.2.1, donde el incremento en los valores de  $m$  se atribuyó al efecto de las descargas parciales. En este caso, la diferencia se debe a que en la configuración SGa está incluido el efecto de la respuesta dieléctrica de las cabezas de bobina. Para 1kV la respuesta dieléctrica de las cabezas de bobina arrojó valores de  $m$  alrededor de -0.29, mientras que en la configuración SGa y SGm el valor de  $m$  fue solo de -0.1855 y -0.1254 respectivamente. El menor valor de  $m$  en la configuración SG[nf] implica que la polarización en las cabezas de bobina, conforme se reduce, la frecuencia crece a un mayor ritmo que la polarización de la parte recta de la barra; configuración SGm. De este modo la mayor polarización de las cabezas de bobina “empuja” la respuesta dieléctrica de la barra completa hacia menores valores de  $m$ . Cabe destacar que en el rango de frecuencia trabajado las pérdidas de las cabezas de bobina varían aproximadamente un orden de magnitud por lo tanto su contribución se vuelve más significativa solo hacia las bajas frecuencias. Esto tiene una implicación importante y es que entonces los valores de  $m$  para la barra completa estarán más próximos a los valores de  $m$  de la parte recta de la bobina que a los de las cabezas de bobina tal como se aprecia en la Figura 73.

En el análisis anterior se discutieron los valores de  $m$  previo al envejecimiento luego de eliminar el efecto de la cinta gradiente. Ahora el estudio examinará el efecto del envejecimiento manteniendo por fuera de las mediciones la contribución de la cinta gradiente.

La evolución de los valores de  $m$  mostrada en la Figura 72 confirma que, aun sin el efecto de la cinta gradiente, con el tiempo de envejecimiento aumenta la dependencia de los resultados del voltaje de prueba. En consecuencia los valores de  $m$  a 10kV incrementaron desde los primeros ciclos de envejecimiento. A 7kV los valores de  $m$  también incrementaron, con la diferencia que dicho incremento tuvo lugar más tarde en el envejecimiento. A 1kV y 4kV la tendencia fue decreciente durante todo el envejecimiento. Ya que estos resultados fueron obtenidos incluso luego de eliminar la corriente aportada por la cinta gradiente entonces es posible concluir que el origen de tal dependencia son las descargas parciales ocurriendo en la zona de ranura o parte recta de la barra.

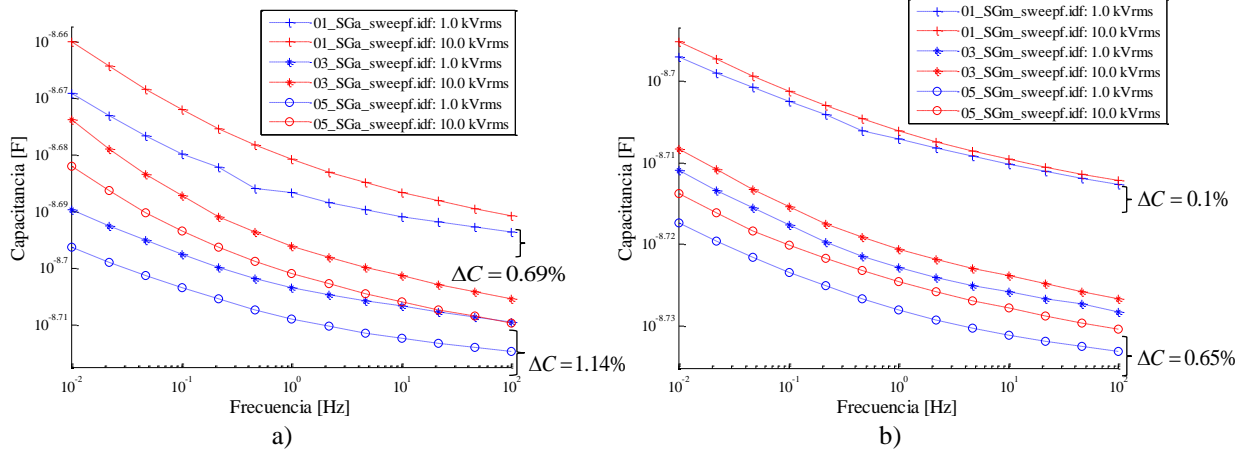


Figura 74. Evolución de la actividad de descargas parciales medida como un incremento en la parte real de la capacitancia compleja (capacitancia) entre 10 y 10kV para a) la barra completa SGa y b) con electrodos guarda SGm.

La actividad de descargas parciales se manifiesta en la Figura 74 como el incremento progresivo de la capacitancia medida entre 10kV y 10kV. Tanto para la configuración SGa como para SGm se observa que el incremento de la capacitancia a 10kV es mayor conforme avanza el envejecimiento. En el caso particular de la configuración SGm este incremento se da en una menor proporción que en la configuración SGa como se muestra en la Tabla 8.

Env	SGm			SGa		
	C/1kV [nF]	C/10kV [nF]	$\Delta C$ [%]	C/1kV [nF]	C/10kV [nF]	$\Delta C$ [%]
0	1.97	1.971	0.05	2.057	2.082	1.21
3	1.87	1.876	0.32	1.952	1.97	0.97
5	1.849	1.861	0.64	1.929	1.951	1.14

Tabla 8. Comparación de la capacitancia tip-up para las configuraciones SGa y SGm.

Los valores de la capacitancia tip-up en la Tabla 8 indican por un lado que la actividad de descargas parciales en la parte recta de la bobina es muy baja lo que a su vez sugiere que el parámetro  $m$  es sensible incluso a una actividad de descargas parciales provocando incrementos de la capacitancia en el orden de fracciones de 1%. Por otra parte puede afirmarse que la mayor contribución a la capacitancia tip-up de las barras completas (SGa) proviene de las cabezas de bobina pese a que su capacitancia es solo un pequeño porcentaje de la capacitancia de la parte recta de la barra. Para el caso particular de la barra SG se obtuvo que la capacitancia de las cabezas de bobina es aproximadamente 4% del valor de la capacitancia de la parte recta. Por esta razón el valor de la capacitancia de la barra completa y de la zona de ranura prácticamente se ven superpuestas en la Figura 75.

Frecuencia [Hz]	$C_{ew}/C_{ranura}$ [%]		
	Env 00	Env 03	Env 05
100.00	4.5228	4.3770	4.3402
46.415	4.5750	4.3933	4.3555
21.544	4.6394	4.4145	4.3732
10.000	4.7182	4.4415	4.3990
4.6416	4.8195	4.4724	4.4283
2.1544	4.9505	4.5132	4.4654
1.0000	5.1069	4.5626	4.5083
0.4642	5.3073	4.6277	4.5698
0.2154	5.5569	4.7037	4.6407
0.1000	5.8644	4.7991	4.7308

$C_{ew}$ : Capacitancia de las cabezas de bobina.

$C_{ranura}$ : Capacitancia de la zona de ranura.

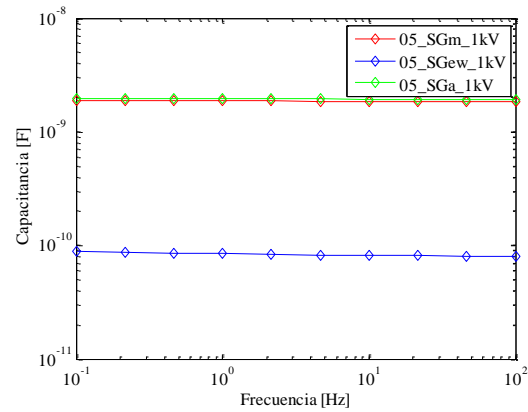


Figura 75. Contribución de las cabezas de bobina a la capacitancia total de la barra SGa.

### 7.2.3 DINÁMICA DEL ENVEJECIMIENTO

En las secciones anteriores se investigó el parámetro  $m$  que caracteriza la respuesta dieléctrica del sistema de aislamiento de las barras de estudio. Este parámetro desde el punto de vista matemático corresponde a la pendiente de la línea recta que mejor ajusta la curva de pérdidas y de capacitancia en una escala logarítmica-logarítmica. Una interpretación más física asocia el valor de  $m$  con el incremento de las pérdidas/capacitancia conforme se desciende en la frecuencia aproximándose a la frecuencia crítica de relajación. Cuanto más cerca se está de la frecuencia crítica de relajación, donde se da el pico en las pérdidas por polarización, menor será el valor de  $m$  o en otras palabras las pérdidas/capacitancia crecerá a un mayor ritmo con la disminución de la frecuencia. Para estimar la evolución de la degradación del sistema de aislamiento es preciso complementar la información proporcionada por el parámetro  $m$  con los valores de capacitancia o de pérdidas para un cierto nivel de envejecimiento. De esta forma luego de sucesivas mediciones se podría observar los cambios en el tiempo.

Si la condición del aislamiento luego de un cierto número de ciclos de envejecimiento puede ser representada por las parejas ordenadas  $(m, C'_{i,rel})$  y  $(m, C''_{i,rel})$  entonces el movimiento de ellas (las parejas ordenadas) en cada uno de los cuadrantes de un plano cartesiano  $m-C'_{i,rel}$  y  $m-C''_{i,rel}$  podría usarse como una guía para la estimación de la dinámica del envejecimiento del aislamiento. Las cantidades  $C'_{i,rel}$  y  $C''_{i,rel}$  corresponden a los valores de las pérdidas (componente imaginaria de la capacitancia compleja) y de la capacitancia respectivamente, normalizadas a su valor inicial o antes del programa de envejecimiento y a la mayor frecuencia estudiada, en este caso 100Hz. La normalización de los valores de capacitancia y de pérdidas permitió analizar en un mismo plano la evolución del envejecimiento de barras con distintas dimensiones y geometrías. Después de todo resulta ser más significativo para la estimación de la degradación el valor de los parámetros relativo a sus valores iniciales. Para este análisis los cuadrantes en el plano están definidos por la línea horizontal que corta el eje de las ordenadas en 1 y por la línea vertical que corta el eje de las abscisas en el valor inicial de  $m$  para cada uno de los casos de estudio.

A continuación se muestran los planos  $m-C'_{i,rel}$  y  $m-C''_{i,rel}$  construidos para cada uno de los casos de estudio. Para efectos comparativos se incluyeron los resultados de las mediciones en la barra LU2 que como se mencionó en la sección 6.1 inició el programa de envejecimiento con una degradación severa más allá de lo que podría ocurrir en operación real.

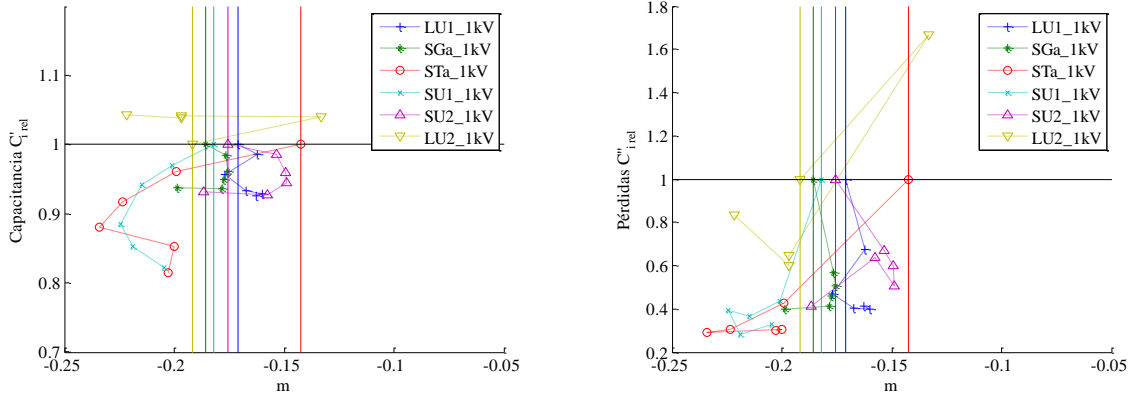


Figura 76. Evolución de la capacitancia compleja con el envejecimiento medido a 1kV.

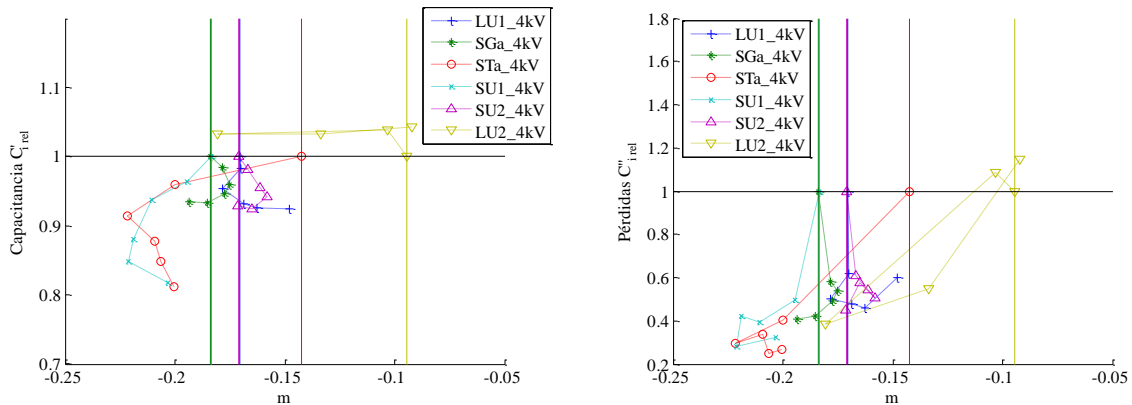


Figura 77. Evolución de la capacitancia compleja con el envejecimiento medido a 4kV.

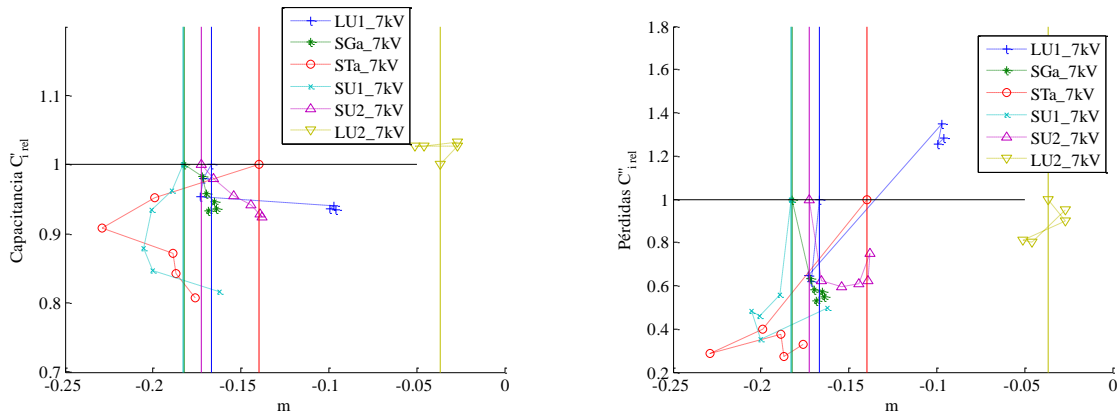


Figura 78. Evolución de la capacitancia compleja con el envejecimiento medido a 7kV.

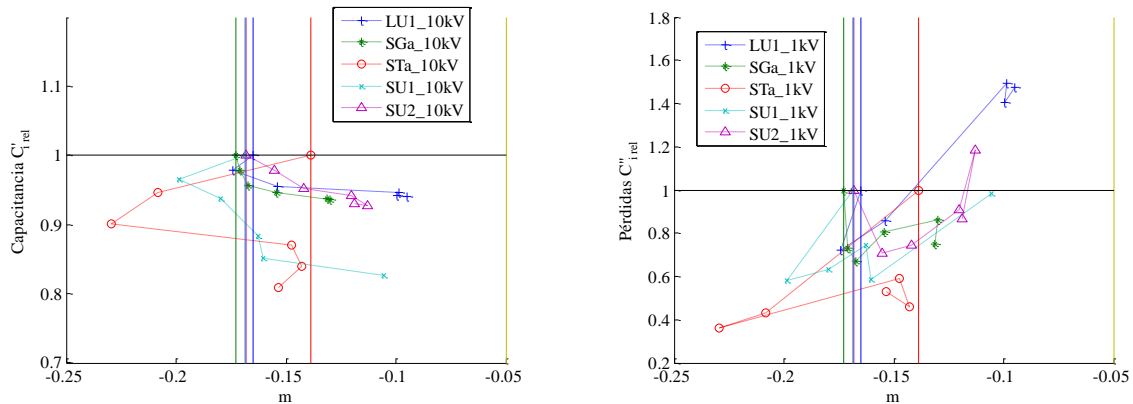


Figura 79. Evolución de la capacitancia compleja con el envejecimiento medido a 10kV.

Las principales conclusiones derivadas de la Figura 76 a la Figura 79 pueden resumirse como:

**Indicativos de delaminación severa.** Los valores de capacitancia de la barra LU2 estuvieron por encima de su valor inicial durante todo el programa de envejecimiento, lo cual no fue observado en ninguno de los otros casos de estudio. El crecimiento de la capacitancia no fue paulatino, en cambio (para todos los niveles de voltaje de prueba) se encontró que la capacitancia creció luego del primer ciclo de envejecimiento y a partir de ahí se mantuvo prácticamente constante. De este comportamiento es tentador pensar que el incremento de la capacitancia fue resultado de una degradación severa y que dicho incremento tuvo lugar hasta cierto límite, después de eso los parámetros se mantuvieron constantes. Simplificando la barra a un sencillo capacitor de placas paralelas por medio de la relación  $C = \varepsilon A/d$  el crecimiento de la capacitancia pudo ocurrir por un incremento de la permitividad del aislamiento o del “área equivalente”  $A$  de la barra o por una disminución del espesor efectivo  $d$  del aislamiento. La inspección visual permitió identificar grandes inclusiones gaseosas como delaminaciones en toda la zona recta de la barra LU2. La permitividad relativa del gas en las inclusiones gaseosas puede ser tomada como 1 y así su efecto sería la reducción de la permitividad total del aislamiento llevando a una reducción de la capacitancia del aislamiento. Por otra parte en [106] y [170] se han reportado relaciones entre el incremento de la capacitancia y defectos como caminos de elevada conductividad o arborizaciones eléctricas que reducen el espesor efectivo del aislamiento. Este escenario pareciera ser el más probable y predominante para el caso de la barra LU2 y por lo tanto el valor de la capacitancia creció. El comportamiento de las pérdidas por su parte creció después del primer ciclo de envejecimiento, luego de esto no mostró una tendencia clara.

**Efecto benéfico del esfuerzo térmico.** Los casos de estudio SU1 y STa se caracterizaron porque sus valores de capacitancia y de pérdidas tuvieron la mayor reducción con el tiempo de envejecimiento. Este comportamiento observado en ambos parámetros es indicativo del efecto “benéfico” de la temperatura sobre el aislamiento. Los resultados en [171] atribuyen la disminución de la capacitancia compleja en un programa de envejecimiento a reacciones de postcurado en la resina. Los resultados tanto dieléctricos como fisicoquímicos que se presentarán más adelante en este documento soportan esta conclusión. Conforme la resina se

hace más densa debido al postcurado se reduce su movilidad disminuyendo sobre todo la polarización por orientación (dipolar). La reducción de las pérdidas dieléctricas se detuvo aproximadamente luego del tercer ciclo de envejecimiento (652 horas). A partir de ahí, las pérdidas se estabilizaron mostrando un crecimiento marginal.

**Efectos del envejecimiento térmico y termoeléctrico.** Para todos los casos de estudio sometidos a esfuerzo únicamente térmico los valores de  $m$  pudieron estar tanto a la derecha como a la izquierda del valor inicial sobre todo a 1kV y 4kV. Para las barras SU1 y STa sometidas a envejecimiento termoeléctrico los valores de  $m$  estuvieron siempre por debajo de sus valores iniciales, sugiriendo que la estructura entrecruzada de la resina está siendo atacada por la actividad de descargas parciales debido al esfuerzo eléctrico. Tanto las reacciones de entrecruzamiento (postcurado) como las reacciones de escisión de cadena (ataque por descargas parciales) estarían ocurriendo simultáneamente en el aislamiento. En la Figura 76 puede verse como a partir del tercer ciclo de envejecimiento, los valores de  $m$  cambiaron hacia una tendencia creciente. En [160] se sugiere que las resinas cargadas con nano partículas de relleno producen una estructura fuertemente entrecruzada, la cual tiene una resistencia mayor al ataque de las descargas parciales que las resinas sin rellenos. La resina no completamente curada de las barras SU1 y STa actuaría como una estructura débilmente entrecruzada propensa a las reacciones de escisión de cadena ocasionadas por las descargas parciales, lo cual se manifestó como la reducción observada de los valores de  $m$  durante la primera parte del envejecimiento. Conforme avanzó el postcurado y el entrecruzamiento la resina se tornó menos vulnerable a las reacciones de escisión de cadena y los valores de  $m$  crecieron.

**Dinámica del envejecimiento.** Es interesante notar que aunque en todas las barras (excepto la barra LU2) se presentó en general una disminución conjunta de la capacitancia y del factor de disipación atribuible a las reacciones de postcurado, la tendencia de los valores observados de  $m$  estaría discerniendo cambios específicos en la estructura de la resina simultáneos con las reacciones de postcurado. Los casos de estudio SGa y SU2 a 1kV mostraron valores de  $m$  crecientes aproximadamente hasta el tercer ciclo de envejecimiento, después la tendencia fue decreciente e incluso al final del envejecimiento estuvieron por debajo de sus valores iniciales. Los resultados apuntaron a que inicialmente en el aislamiento predominaron las reacciones de postcurado con lo que se redujo el incremento de la capacitancia compleja hacia las bajas frecuencias (incremento de los valores de  $m$ ). Posteriormente las reacciones de degradación se hicieron más predominantes incrementando la polarización del aislamiento conforme avanzó el envejecimiento (disminución de los valores de  $m$ ). Esta tendencia hacia un rápido incremento inicial en el valor de  $m$  solo se dio en estas barras que no estuvieron sometidas a esfuerzos eléctricos.

**Sensibilidad de la respuesta dieléctrica al incremento del voltaje de prueba.** Por encima del voltaje de inyección de descarga, la respuesta dieléctrica es afectada por las pérdidas dieléctricas generadas por las descargas parciales. Los valores de  $m$  para los casos de estudio SGa, SU2, SU1 y LU1 a partir de 7kV fueron mayores que sus valores iniciales. Para el caso de estudio STa, conforme incrementó el voltaje de prueba, los valores de  $m$  se acercaron cada vez más hacia sus valores iniciales pero sin superarlo. Tomando los resultados de  $m$  como un indicativo de la evolución de la actividad de descargas parciales se diría que la barra STa presentó el menor nivel (menor valor de  $m$  a 10kV) mientras que las barras LU1 y SU1 el mayor nivel de descargas parciales (mayores valores de  $m$  a 10kV).

**Envejecimiento y el parámetro  $m$ .** La principal característica de los resultados de respuesta dieléctrica obtenidos en esta investigación fue que ninguno de ellos mostró en el rango de frecuencias trabajado un pico de relajación. Esto ya es un primer indicativo de que de hecho la degradación del aislamiento se mantuvo controlada dando espacio para reacciones de postcurado tomadas como benéficas para el aislamiento. Los cambios que se dieron en la respuesta dieléctrica no fueron pronunciados como los que se obtendrían en las cercanías de un pico de relación dieléctrica. En este caso definir el parámetro  $m$  permitió observar diferencias en la capacitancia compleja en el orden de magnitud provocado por el programa de envejecimiento y por la condición inicial de las barras.

Si conforme avanza el envejecimiento en el rango de frecuencias aparece un pico de relajación, este implicaría cambios significativos en la degradación del aislamiento. En razón a que no se observó un pico de relajación en los experimentos no fue posible determinar la aplicabilidad del parámetro  $m$  en estas condiciones. Por lo tanto el valor de diagnóstico de  $m$  tiene más potencial en casos de degradación dentro de límites aceptables.

Con el propósito de obtener mediciones complementarias del comportamiento de los parámetros dieléctricos con el incremento del voltaje de prueba se realizaron mediciones típicas de  $C-\tan\delta$  y descargas parciales a frecuencia industrial en cada una de las barras de estudio. Los resultados se muestran en el siguiente apartado.

### 7.3 CAMBIOS EN LOS PARÁMETROS DIELECTRICOS A 60HZ CON EL VOLTAJE DE PRUEBA

Adicionalmente a las mediciones de respuesta dieléctrica, se midieron los parámetros de capacitancia, factor de disipación, corriente y descargas parciales a frecuencia industrial, 60Hz, en un rango que permitiera establecer la dependencia de los parámetros con el voltaje de prueba. La actividad de descargas parciales fue medida directamente e indirectamente por medio de los valores “tip-up” de la capacitancia y del factor de disipación definidos en la sección 4.3.

$$\Delta C = 100 \times \frac{(C - C_0)}{C_0} \quad [\%] \quad (7.6)$$

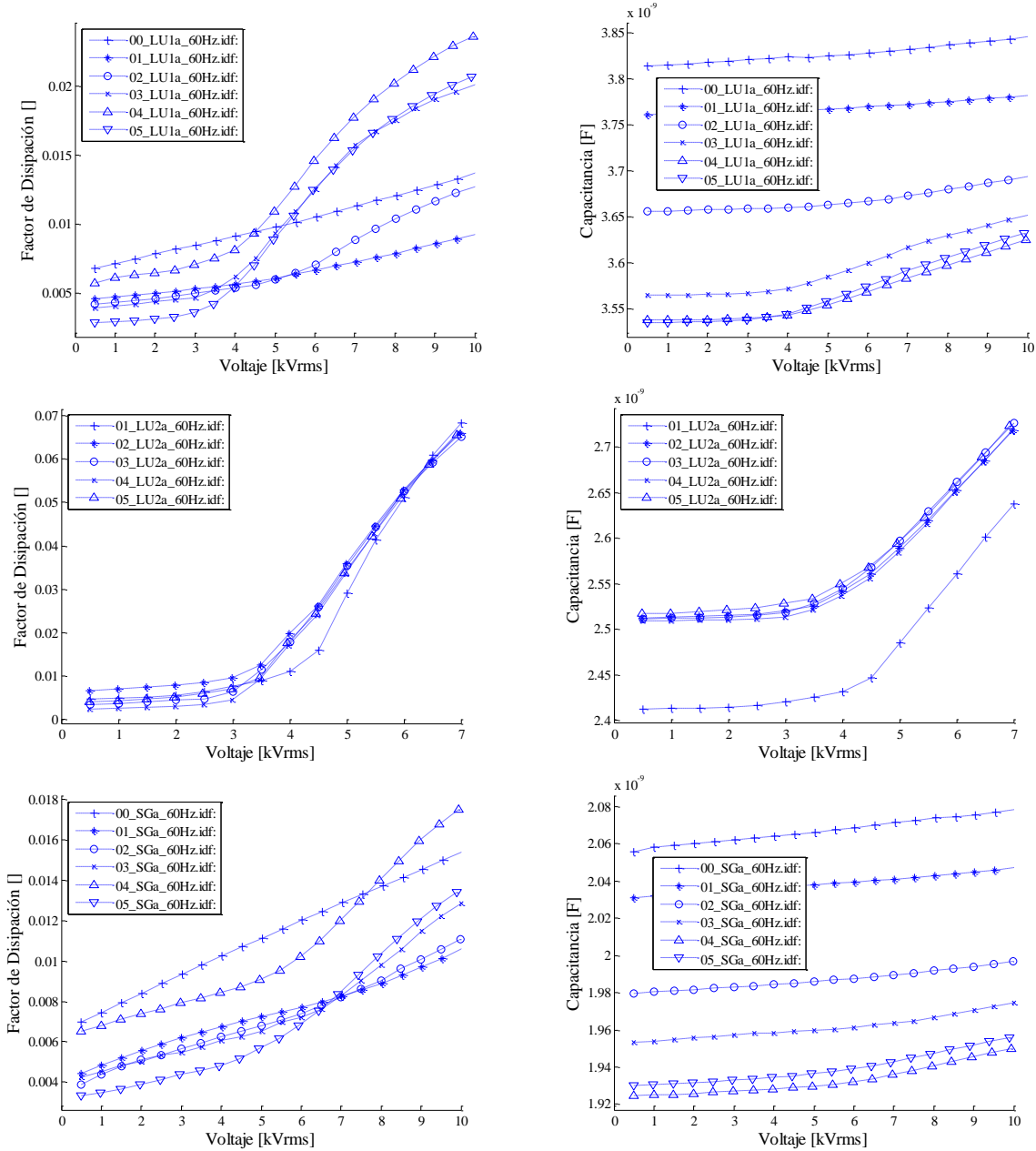
$$\Delta \tan \delta = \tan \delta - \tan \delta_0 \quad [\%] \quad (7.7)$$

De las mediciones de descargas parciales fueron de interés sus magnitud de carga  $q_m^\pm$ ,  $q_{\max}^\pm$  y la repetición  $n^\pm$ , así como también los valores de los parámetros estadísticos derivados de las distribuciones posibles cuando las descargas parciales son analizadas en fase resuelta.



### 7.3.1 MEDICIONES DE CAPACITANCIA, FACTOR DE DISIPACIÓN Y TIP-UP

Previo al inicio del programa de envejecimiento las características de capacitancia y del factor de disipación a 60Hz con el voltaje de prueba mostraron un crecimiento constante. Con el avance del programa de envejecimiento los valores de capacitancia a bajos voltajes de prueba disminuyeron y su dependencia del voltaje creció apenas visiblemente. Por otra parte, las características del factor de disipación presentaron una fuerte dependencia del voltaje de prueba por encima de un cierto valor entre 4kV y 6kV. Por encima de este rango de voltaje el factor de disipación creció apreciablemente con cada incremento del voltaje. Las características de voltaje de ambos parámetros pueden apreciarse en la Figura 80.



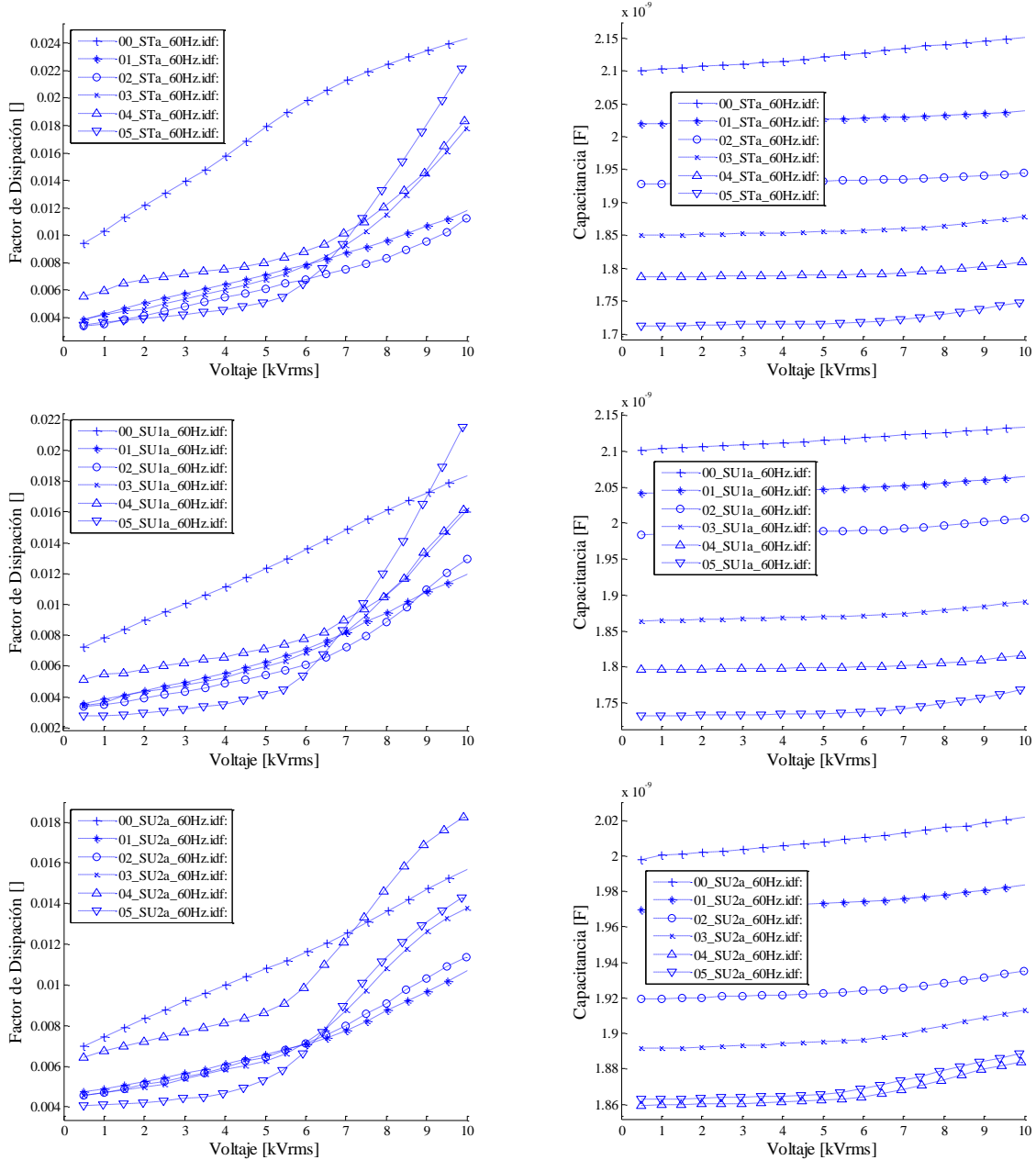


Figura 80. Característica de la capacitancia y del factor de disipación con el voltaje de prueba durante el programa de envejecimiento para todas las barras de prueba del primer grupo.

El crecimiento del factor de disipación con el voltaje de prueba en los casos de estudio LU1, LU2, SGa y SU2 presentó una concavidad hacia los mayores voltajes de prueba que se hizo más evidente cerca del final del programa de envejecimiento. En los casos de estudio STa y SU1 por su parte el crecimiento del factor de disipación no presentó esta concavidad.

Otros resultados experimentales como por ejemplo los obtenidos en [172] también reportaron este crecimiento cóncavo del factor de disipación aunque mucho más notable. En la Figura 81 puede observarse que en el caso citado la curva del factor de disipación creció rápidamente hasta estabilizarse sin pasar por un rango de voltajes de prueba en el que el crecimiento tuviera una baja razón de cambio tal como se obtuvo para los casos de estudio de esta investigación.

La naturaleza de las pérdidas dieléctricas permitiría concluir que en la curva del factor de disipación de la Figura 81 se alcanzó un punto máximo, luego del cual se espera una reducción con el incremento del voltaje de prueba.

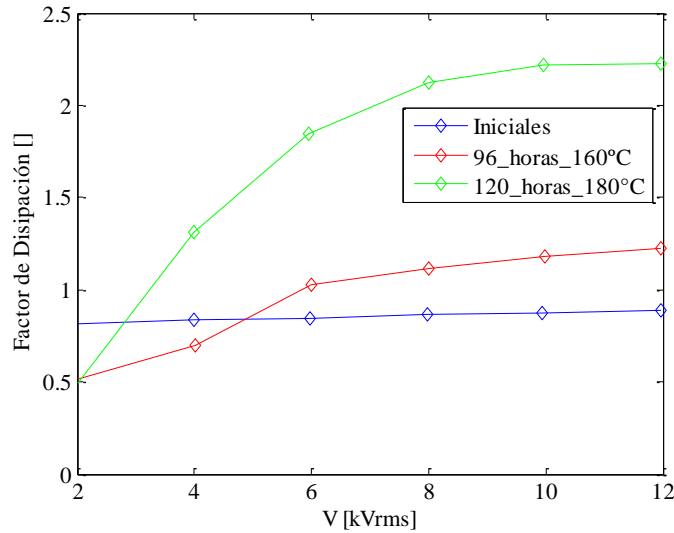


Figura 81. Característica del factor de disipación con el voltaje de prueba reportada en [172].

Recurriendo a la expresión para las pérdidas dieléctricas presentada en [173] y despreciando la contribución de las pérdidas por conducción y por descargas parciales diferentes a las tipo “spark” se tiene que las pérdidas dieléctricas totales en términos del factor de disipación toma la forma de la ecuación (7.9)

$$P = \underbrace{P_{pol}}_{\text{polarización}} + C_0 \underbrace{\sum_1^j n_j \Delta V_{c_j} V(t)}_{\text{descargas parciales}} \quad (7.8)$$

$$\tan \delta = \frac{C_{pol}}{C} \tan_0 \delta + \frac{C_0}{\omega C V^2} \sum_1^j n_j \Delta V_{c_j} V(t)$$

donde de acuerdo a [125] y [174] el segundo término a la derecha de la igualdad da cuenta del máximo observado en la Figura 81.

Idealmente si el aislamiento solo contuviera una sola inclusión gaseosa, en la curva del factor de disipación versus voltaje se observaría un incremento abrupto una vez se alcance el voltaje de inyección de descarga y posteriormente una disminución monótona de la curva. Por encima del voltaje de inyección el denominador en (7.8) crece más rápidamente que lo que crece la contribución de las descargas parciales a las pérdidas, es decir el término  $\sum n_j \Delta V_{c_j} V(t)$ , y en consecuencia el factor de disipación se reduce pues el aumento del voltaje de prueba no resulta en descargas parciales adicionales.

En la práctica ya que múltiples inclusiones gaseosas y defectos están presentes en el aislamiento con diferentes voltajes de inyección entonces el factor de disipación crece de la forma vista en la Figura 80, esto es crece paulatinamente con un ritmo determinado hasta alcanzar el primer voltaje de inyección de descarga  $U_{i1}$ . Por encima de este voltaje una gran cantidad de inclusiones gaseosas comienzan a experimentar descargas parciales y el ritmo de crecimiento del factor de disipación aumenta. Hasta 10kV como máximo voltaje de prueba no

se alcanzó el pico en el factor de disipación, aunque en todos los casos de estudio si se observó una reducción del valor de  $U_{i1}$  con el tiempo de envejecimiento.

El crecimiento cóncavo del factor de disipación en los casos de estudio LU1, SGa y SU2 estuvo acompañado de un leve incremento de la curva de capacitancia al final del programa de envejecimiento especialmente a altos voltajes de prueba, mientras que en los casos de estudio SU1 y STa la curva de capacitancia continuó decreciendo incluso hasta el final del programa de envejecimiento.

Utilizando la forma de la curva del factor de disipación como un primer indicativo del proceso de degradación del aislamiento se podría pensar que el crecimiento sostenido (crecimiento sin mostrar concavidad) del factor de disipación presentado en las barras SU1 y STa es un indicativo de que el punto máximo se alcanzará con un voltaje de prueba mucho mayor a 10kV, lo que se asocia con presencia de inclusiones gaseosas de dimensiones reducidas. Por su parte, el hecho de que en las barras LU1, LU2, SGa y SU2 haya sido posible visualizar una tendencia creciente y cóncava del factor de disipación supone que el voltaje de inyección de descarga de la mayoría de defectos en el aislamiento de estas barras fue lo suficientemente bajo como para alcanzarse en el rango del voltaje de prueba utilizado.

Este último resultado también implica que los defectos del aislamiento de las barras LU1, LU2, SGa y SU2 tienen dimensiones más grandes y de ahí su menor voltaje de inyección de descarga. Así mismo, el desplazamiento de la curva de capacitancia hacia menores valores al final del envejecimiento visto en las barras SU1 y STa soportaría la conclusión de que su nivel de degradación es incluso menor que para el resto de los casos de estudio.

En la Figura 82 puede verse claramente como la capacitancia tanto a 500V como a 10kV para las barras SU1 y STa decrece durante todo el programa de envejecimiento. El crecimiento dado al final del envejecimiento en los demás casos de estudio es pequeño apenas perceptible en la gráfica.

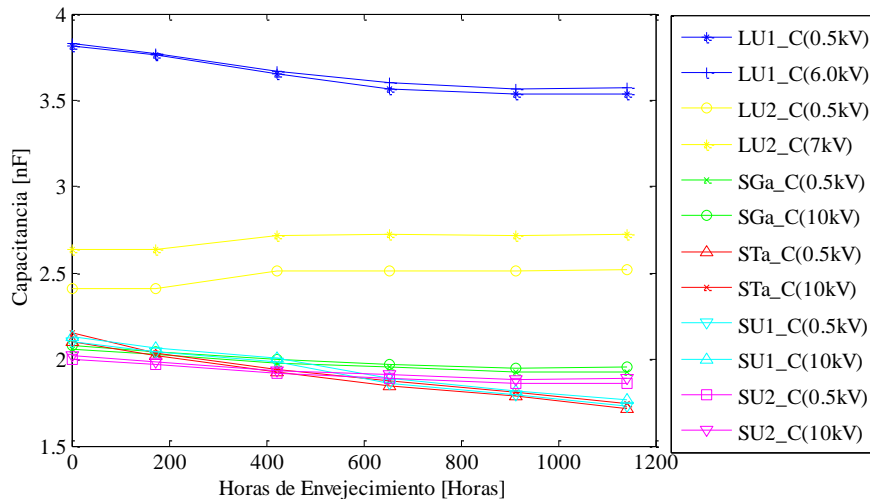


Figura 82. Evolución de la capacitancia medida a 500V y 10kV con el tiempo de envejecimiento.

El incremento de las pérdidas a 500V y a 10kV se muestra en la Figura 83. Es importante mencionar que en el caso de estudio LU2 el factor de disipación a 10kV estuvo siempre por encima del 6%. Su comportamiento estable en el tiempo sugiere que cualquier incremento causado por la actividad de descargar parciales resulta pequeño comparado con la magnitud de las descargas parciales que ya ocurren en el aislamiento desde el inicio del programa de

envejecimiento. El gran volumen y dimensiones de las inclusiones gaseosas y de las delaminaciones en el aislamiento de la barra LU2 harían crecer aún más el valor de las pérdidas y de la capacitancia con un aumento del voltaje de prueba por encima del máximo actual de 7kV.

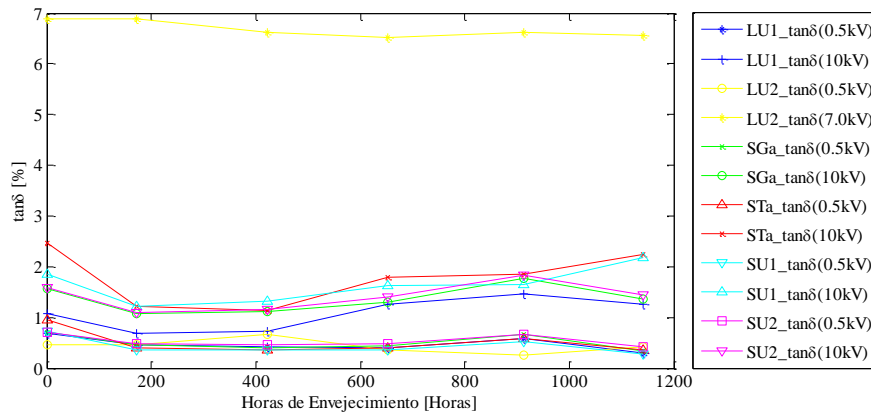


Figura 83. Evolución del factor de disipación medido a 500V y 10kV con el tiempo de envejecimiento.

Los cambios en  $\Delta C$  y  $\Delta \tan \delta$  con el tiempo de envejecimiento se muestran en la Figura 84. Excluyendo los resultados de la barra LU2, las barras STa y SU1 sometidas a esfuerzos termoelectricos terminaron con los mayores valores tip-up. Los menores valores correspondieron a las barras LU1 y SGa sometidas a esfuerzo térmico.

Como es de esperarse, el nivel de descargas parciales internas en el aislamiento cuantificado indirectamente por lo valores tip-up está influenciado por el efecto de la cinta gradiente. Los criterios para los valores máximos de  $\Delta C$  y  $\Delta \tan \delta$  que frecuentemente se aplican en la industria han sido establecidos considerando este efecto ya que no es posible en la práctica ejecutar mediciones con electrodos guarda en un devanado completo.

Los valores máximos de  $\Delta \tan \delta$  comúnmente están entre 1% y 1.5% variando entre fabricantes y usuarios. En esta investigación, los valores de  $\Delta C$  y  $\Delta \tan \delta$  al final del programa de envejecimiento superaron estos criterios, aunque en una magnitud moderada.

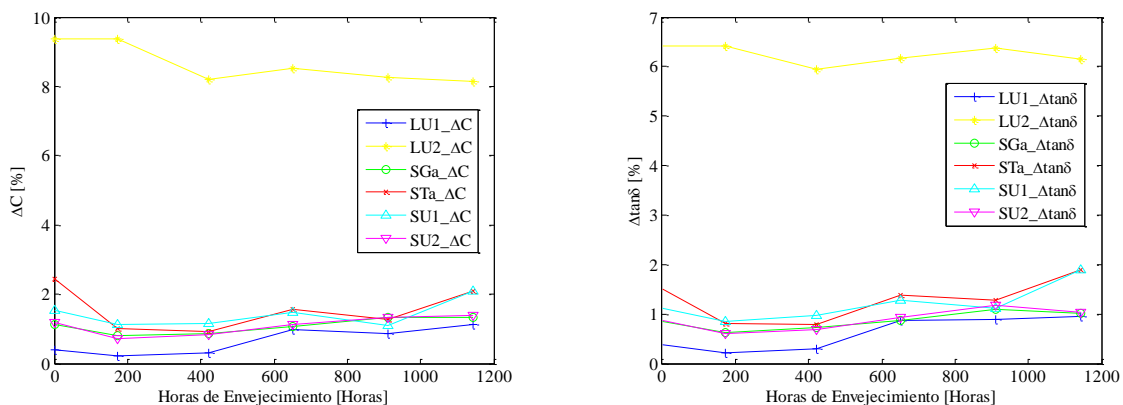


Figura 84. Evolución de los valores  $\Delta \tan \delta$  y  $\Delta C$  con el tiempo de envejecimiento para el primer grupo de barras.

Aplicado en campo, estos criterios están orientados a procurar la detección temprana de un incremento acelerado en la degradación del aislamiento con lo cual idealmente garantizar una operación optima y eficiente. En esta tesis, sin embargo, la proximidad de los valores

obtenidos con los criterios en campo dice sobre la buena condición de la cinta gradiente lo cual mantendría controlado su efecto sobre los resultados.

### 7.3.2 CÁLCULO DEL INCREMENTO DE CORRIENTE $\Delta I$

A continuación se evaluará el parámetro  $\Delta I$  descrito en la sección 4.2 como método alternativo para cuantificar la dependencia de la capacitancia y del factor de disipación del voltaje de prueba. El valor de  $\Delta I$  dado por la ecuación (7.10) podría ser considerado como el valor tip-up de la corriente

$$\Delta I = 100 \times \frac{I - I_0}{I_0} \quad (7.9)$$

En este sentido  $I$  representa la corriente total a un cierto alto voltaje  $V_{\Delta I}$ , es decir la corriente tanto a través del aislamiento en la zona de ranura como la aportada por las cabezas de bobina y por las descargas parciales.  $I_0$  es la corriente calculada a  $V_{\Delta I}$  que circularía sin la contribución de las cabezas de bobina y de las descargas parciales.

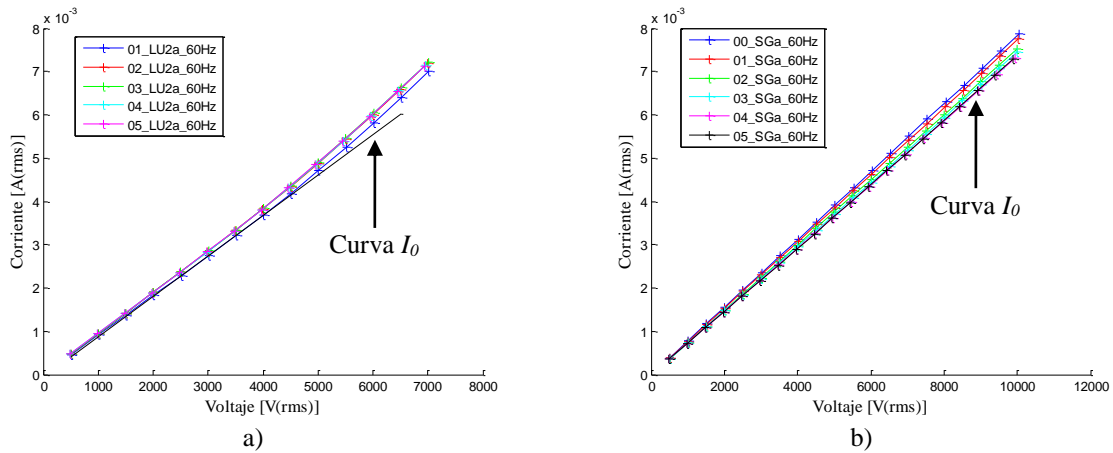


Figura 85. Característica de corriente versus voltaje para los casos de estudio a) LU2 y b) SGa.

La Figura 85 muestra la característica de corriente de los casos de estudio LU2 y SGa. En el primero de los casos puede observarse como la curva  $I_0$  (línea recta sin marcador) se separa a partir de un voltaje determinado de las características de corriente para cada uno de los ciclos de envejecimiento. La diferencia entre el valor a 6kV de la corriente  $I_0$  e  $I$  corresponde gráficamente al valor de la corriente tip-up  $\Delta I$ . En el segundo caso no puede siquiera distinguirse la curva  $I_0$  de las demás características de corriente. El primer paso para la aplicación de este parámetro es calcular la curva  $I_0$ . En [175] se utilizó el método de múltiples regresiones lineales para ajustar la curva  $I_0$  y calcular el voltaje  $U_{i1}$ . En este método el número de parejas (kV,  $I$ ) utilizadas en el ajuste se incrementó hasta que el coeficiente de correlación entre los valores medidos y ajustados superó cierta variación máxima. El voltaje de la última pareja (kV,  $I$ ) correspondió al primer voltaje de inyección de descarga  $U_{i1}$ . Una vez calculada la ecuación de la recta, se evaluó la misma en  $V_{\Delta I}$  para calcular el valor de  $I_0$ . Particularmente este método es adecuado cuando la característica medida de corriente arroja valores tip-up en el rango de unidades de porcentaje. Luego de la implementación del método se encontró que este no es adecuado para valores pequeños de tip-up como los obtenidos en esta investigación puesto que la correlación entre la curva ajustada y la real es muy cercana a la unidad casi,

independiente del número de parejas (kV,  $I$ ). Por tal motivo alternativamente el número de puntos considerados para ajustar la curva  $I_0$  se determinó a partir de la curva correspondiente a la primera derivada de la característica de corriente. Como se muestra en la Figura 86, la curva ajustada  $I_0$  se aparta notoriamente de la derivada de la corriente justo en el voltaje  $U_{i1}$ .

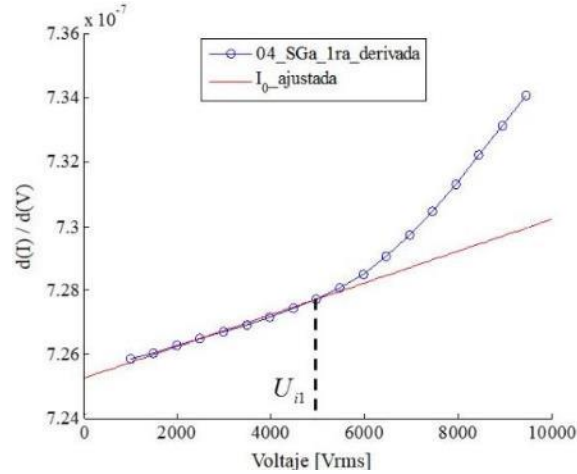


Figura 86. Método de la primera derivada de la característica  $I$  versus voltaje de prueba para el cálculo de la curva  $I_0$  y determinación del voltaje  $U_{i1}$ .

En la Tabla 9 se muestran los valores calculados de la corriente tip-up a 6kV y a 10kV, así como también los valores calculados de  $U_{i1}$ . Solo en el caso de la barra LU2 los valores tip-up fueron medidos únicamente a 6kV ya que el voltaje máximo de prueba en este caso fue de 7kV.

Barra	$U_{i1}$ [kV]	$\Delta I _{6kV}$ [%]	$\Delta I _{10kV}$ [%]	Barra	$U_{i1}$ [kV]	$\Delta I _{6kV}$ [%]	$\Delta I _{10kV}$ [%]
00_LU1	--	indefinido	indefinido	00_STa	5.5	0.35	1.36
01_LU1	5.0	0.09	0.41	01_STa	5.5	0.10	0.61
02_LU1	4.5	0.17	0.91	02_STa	5.5	0.09	0.63
03_LU1	3.5	0.91	2.36	03_STa	5.5	0.11	1.23
04_LU1	3.5	0.79	2.39	04_STa	5.0	0.10	1.12
05_LU1	3.0	1.03	2.66	05_STa	5.5	0.11	1.88
00_LU2	--	--	--	00_SU1	5.5	0.19	0.84
01_LU2	4.0	5.61	--	01_SU1	5.5	0.11	0.86
02_LU2	2.5	5.48	--	02_SU1	5.5	0.08	0.92
03_LU2	2.5	5.92	--	03_SU1	5.5	0.09	1.14
04_LU2	2.5	5.59	--	04_SU1	5.0	0.08	0.98
05_LU2	2.5	5.31	--	05_SU1	5.0	0.15	1.96
00_SGa	--	indefinido	indefinido	00_SU2	--	indefinido	indefinido
01_SGa	--	indefinido	indefinido	01_SU2	5.5	0.07	0.52
02_SGa	5.5	0.09	0.54	02_SU2	4.5	0.11	0.70
03_SGa	5.5	0.09	0.73	03_SU2	5.5	0.09	0.93
04_SGa	5.0	0.16	1.08	04_SU2	5.5	0.10	1.17
05_SGa	4.5	0.23	1.09	05_SU2	4.5	0.21	1.27

Tabla 9. Evolución de los valores de  $\Delta I$  con el tiempo de envejecimiento.

El incremento de la corriente debido a la intensa actividad de descargas parciales en la barra LU2 tuvo un valor máximo de 5.92% mientras que para los demás casos de estudio el



máximo incremento se mantuvo por debajo de 2.7%. El parámetro  $U_{i1}$  arrojado por el método es una ventaja adicional sobre el cálculo de los valores  $\Delta C$  y  $\Delta \tan \delta$ . Para las barras SGa, STa y SU el voltaje  $U_{i1}$  estuvo cercano a su voltaje de fase de 5.77kV disminuyendo con el tiempo de envejecimiento. En el caso de la barra LU1 el voltaje  $U_{i1}$  inició por encima de su voltaje de fase nominal de 3.46kV y terminó ligeramente por debajo de él. Como es de esperarse el voltaje  $U_{i1}$  de la barra LU2 rápidamente cayó a 2.5kV y se mantuvo así hasta el final de programa de envejecimiento. En general un menor volumen de inclusiones gaseosas (degradación) conlleva mayores voltajes  $U_{i1}$  y menores valores de  $\Delta I$ . Comparando los resultados de las barras STa y SU1 con los de las barras SGa y SU2 se evidenció que la menor reducción de  $U_{i1}$  y los menores valores de  $\Delta I$  a 6kV se obtuvieron para las barras STa y SU1. Sin embargo ellas también presentaron los mayores valores de  $\Delta I$  a 10kV. Los altos valores de  $U_{i1}$  y la continua tendencia decreciente de la capacitancia y del factor de disipación (Figura 82 y Figura 83) llevan a pensar que para el final del programa de envejecimiento la contribución de la cinta gradiente fue mayor que la de las descargas parciales en la corriente total  $I$ . Esta conclusión también explicaría porqué en la Figura 84 los valores de  $\Delta C$  y  $\Delta \tan \delta$  también fueron los mayores al final del programa de envejecimiento.

Mediciones en las configuraciones SG[nf] mostraron que las cabezas de bobina aunque pueden presentar una marcada dependencia del voltaje de prueba, ésta podría ser relativamente estable con el tiempo de envejecimiento. Si este fuera el caso para todas las barras estudiadas, los cambios con el tiempo de envejecimiento en los valores de  $\Delta C$  y  $\Delta \tan \delta$  medidos en barras completas (configuración SGa por ejemplo) serían principalmente consecuencia de la actividad de descargas parciales en el aislamiento principal de la parte recta de las barras. Como se aprecia en la Figura 87 las curvas de  $\Delta C$  y  $\Delta \tan \delta$  para la barra completa siguen prácticamente la tendencia de las curvas medidas en la parte recta de la barra siendo desplazadas hacia arriba por un valor bastante estable correspondiente a las cabezas de bobina.

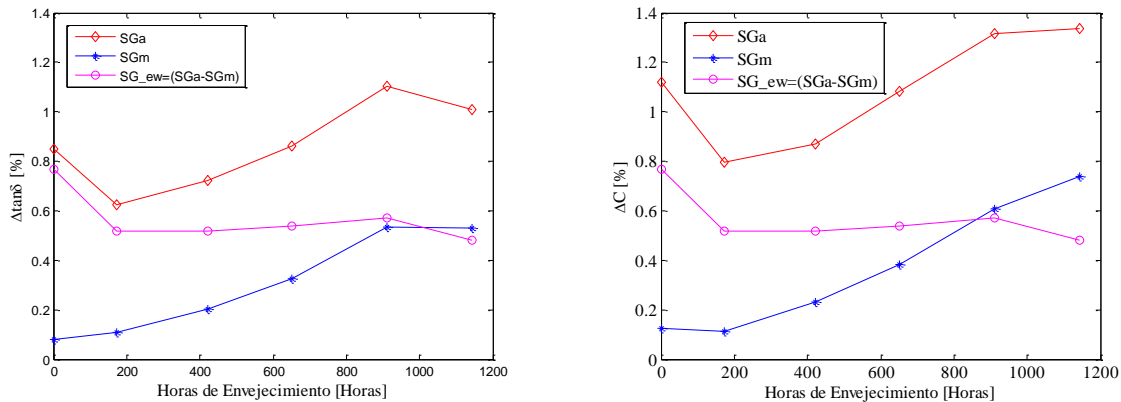


Figura 87. Contribución de las cabezas de bobina a los valores de  $\Delta C$  y  $\Delta \tan \delta$ .

Sin embargo este no parece ser el caso de las barras STa y SU1. Como se mencionó anteriormente en estas dos barras se observó una continua disminución de los valores de capacitancia y del factor de disipación desestimando un incremento pronunciado de los defectos internos y dejando la contribución de la cinta gradiente como factor más influyente en el crecimiento visto de los valores de  $\Delta C$ ,  $\Delta \tan \delta$  y  $\Delta I(10kV)$ , especialmente al final del programa de envejecimiento.



Experimentalmente se han establecido criterios para los valores de  $\Delta I$  con el propósito de estimar la condición del aislamiento. En la Tabla 10 se puede encontrar la forma en la que algunas referencias han aplicado estos criterios.

Tipo de prueba	Voltaje nominal	Voltaje de prueba	$\Delta I$	Referencia
Barras individuales provistas de cinta gradiente	22kV	$V_{LN} = 12.7\text{kV}$ $1.25V_{LN} = 15.8\text{kV}$	<5.0 %	[121]
Devanados completos montados en el estator	6kV	6.6kV 13.8kV	<10 %	[120]
Devanados completos montados en el estator	6.6kV	6.6kV	<8.5 %	[119]
Devanados completos montados en el estator	13.2kV	$1.25V_{LN} = 10\text{kV}$	<5.0%	[114]

Tabla 10. Criterios para los valores de  $\Delta I$ .

En el marco de referencia de la Tabla 10 únicamente la barra LU2 no cumple con el criterio, lo cual está acorde con su severa condición de degradación. Los demás casos de estudio mostraron valores muy por debajo de 5% sugiriendo una condición de degradación normal.

Nótese que en la Tabla 10 cuando el voltaje de prueba es cercano o superior al voltaje nominal de la máquina el criterio sube hasta 8.5 y 10%, probablemente debido a que por encima del voltaje nominal podrían circular mayores corrientes provenientes de la cinta gradiente.

Particularmente, la condición conocida de la barra LU2 permite afirmar que la degradación concentrada en el aislamiento de la zona de ranura fue responsable del alto valor obtenido de 5.9% aunque la medición se haya realizado cerca al voltaje nominal (se asume que en este resultado el efecto de la degradación del aislamiento en la zona de ranura es más significativo que el efecto de la cinta gradiente). Este resultado daría oportunidad para pensar que el criterio del 5% aplicable cuando las mediciones se realizan por debajo del voltaje de línea nominal resulta ser adecuado aunque posiblemente elevado como criterio de diagnóstico. Por su parte, el criterio del 8.5% y 10% al ser medido al voltaje de línea nominal o superior resulta más sensible a la contribución de las cabezas de bobina y por lo tanto podría usarse como un indicador de su condición.

Los valores medidos de  $\Delta I$  para un grupo de once motores de 6kV en operación real con diferentes niveles de degradación reportados en [120] permiten tener una idea de que tan grande puede llegar a ser el incremento de la corriente con el aumento del voltaje de prueba. En la Tabla 11 se observan casos para los que  $\Delta I$  está en el orden de 40% con voltajes de prueba superiores al voltaje de fase nominal, apuntando a que estos elevados valores de  $\Delta I$  son originados por mecanismos de degradación afectando las cabezas de bobina. En el otro extremo son posibles valores tan bajos como 0.9% e incluso el voltaje  $U_{il}$  puede estar por encima del voltaje de fase nominal. En dicho caso puede afirmarse que el aislamiento se encuentra en muy buenas condiciones.

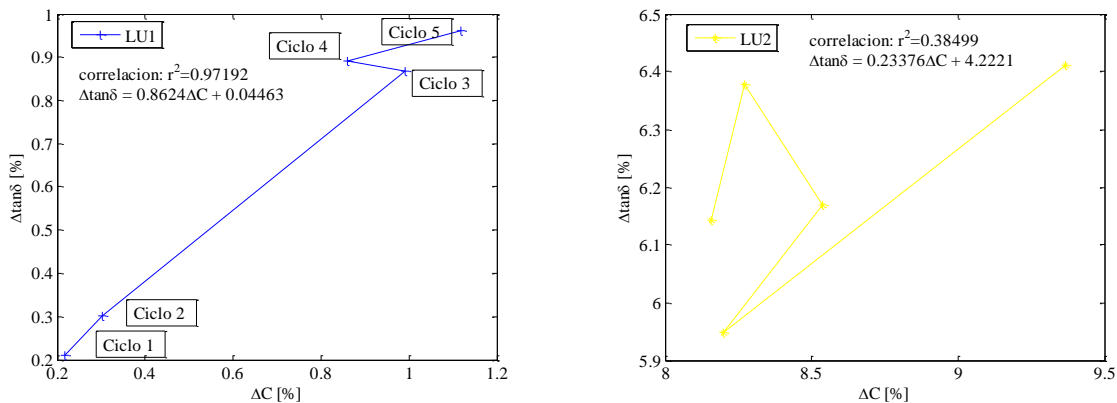
Motor	Potencia [kW]	Año	Condición	$\Delta I _{6kV}$	$\Delta I _{13kV}$	$U_{il}$
1	4900	1975	Original	5.48	40.43	3.6
3	4900	1975	Original	7.41	39.3	3.5
8	2700	1989	Rebobinado	9.29	46.65	3.8
7	400	1991	Rebobinado	1.78	4.93	5.0
9	2700	1993	Rebobinado	5.44	7.03	5.0
4	4900	1994	Rebobinado	4.46	6.82	4.3
10	3000	1997	Rebobinado	1.41	9.58	5.4
11	1200	1998	Rebobinado	0.9	2.95	4.2
6	1050	2001	Rebobinado	6.38	29.6	4.8
2	4900	2001	Rebobinado	3.68	9.64	5.5
5	4900	2003	Rebobinado	7.28	13.72	5.0

Tabla 11. Parámetro  $\Delta I$  para motores de 6kV en operación real y con diferentes condiciones de degradación.

### 7.3.3 CÁLCULO DEL ÍNDICE K

Tanto a nivel industrial como en laboratorio, los valores tip-up de la capacitancia y del factor de disipación han sido ampliamente utilizados como indicativos de la actividad de descargas parciales, aunque muy poca o casi ninguna atención se ha puesto en la magnitud del incremento (tip-up) respecto el uno del otro. De acuerdo al trabajo desarrollado por T. Dakin mostrado en la sección 4.3, desde el punto de vista teórico las descargas parciales contribuyen tanto más a los valores de  $\Delta C$  o a los valores de  $\Delta \tan \delta$  dependiendo del ángulo de fase en el que ellas ocurran. Partiendo de esta dependencia se evaluó la correlación entre los cambios en los valores de  $\Delta C$  y  $\Delta \tan \delta$  producidos por diferentes programas de envejecimiento buscando posibles relaciones con la actividad de descargas parciales y el nivel de degradación del aislamiento.

La Figura 88 muestra las gráficas donde se confrontaron los valores de  $\Delta \tan \delta$  con los valores de  $\Delta C$  para cada una de las barras de prueba analizadas en las secciones anteriores y para cada uno de los ciclos de envejecimiento. En todos los casos el punto más próximo al origen correspondió a los valores iniciales medidos, seguido sucesivamente por los resultados obtenidos para los siguientes ciclos de envejecimiento. La gráfica de la barra LU1 muestra al lado de cada punto el ciclo de envejecimiento correspondiente. Lo mismo aplica para los demás barras de estudio. Los valores previos al inicio del programa de envejecimiento fueron omitidos puesto que resultaron valores fuera de la tendencia. Con cada gráfica se muestra el coeficiente de correlación así como también la ecuación que ajusta los datos.



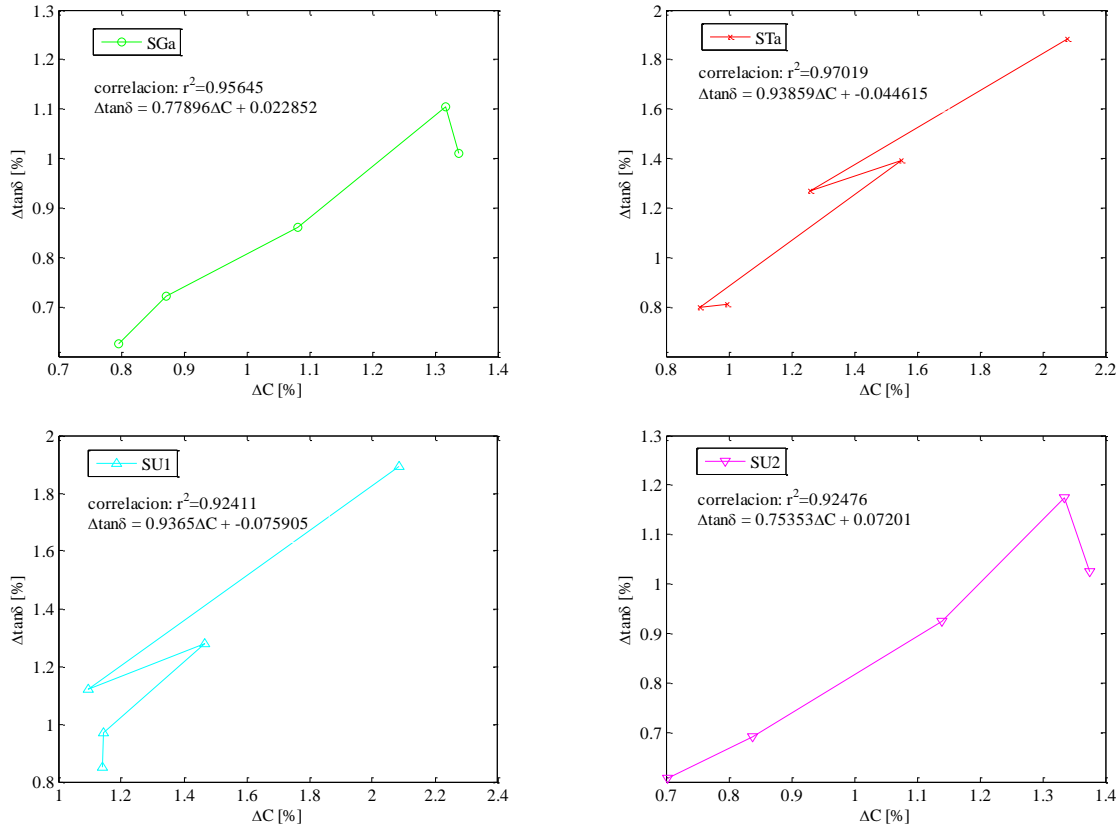


Figura 88. Características  $\Delta C$  versus  $\Delta \tan \delta$  obtenidas para las barras de prueba en el programa de envejecimiento termoeléctrico.

Con excepción de la barra LU2, todos los casos de estudio presentaron factores de correlación por encima de 0.92 cuyas implicaciones podrían resumirse como:

- Los datos experimentales pudieron ser ajustados por medio de una curva que describiría su comportamiento con relativa buena exactitud. Los mejores ajustes de los datos experimentales se obtendrían para los casos de estudio LU1 y STa puesto que para ellos se obtuvo los coeficientes de correlación más altos. Visualmente se aprecia como los datos siguen aproximadamente una tendencia lineal. La barra LU2 por su parte no mostró ninguna correlación.
- Desde un punto de vista físico los altos factores de correlación obtenidos sugieren que la dinámica de los mecanismos de degradación que afectaron el aislamiento de las barras se mantuvo estable dentro de cierto límite durante todo el programa de envejecimiento y en consecuencia ocasionaron cambios en la capacitancia y en el factor de disipación en la proporción indicada por la constante de proporcionalidad de la ecuación que ajusta los datos.
- En contraste, para la barra LU2, en la cual el factor de correlación fue significativamente bajo (0.38), cada ciclo de envejecimiento afectó la dinámica de la degradación de una forma diferente. Así la actividad de las descargas parciales contribuyó más al crecimiento de la capacitancia o del factor de disipación en distintas proporciones con cada ciclo de envejecimiento.

- Para los casos donde se obtuvo un alto factor de correlación, el valor constante de la curva de ajuste o corte con el eje de las ordenadas fue cercano a cero, mientras que la constante de proporcionalidad o primer coeficiente se mantuvo por debajo de 1. El primer resultado es obvio puesto que ante la ausencia de descargas parciales se espera que ambos valores tip-up resulten iguales a cero. El segundo resultado significa que durante todo el programa de envejecimiento las descargas parciales tendieron a contribuir más al incremento de la capacitancia que al incremento del factor de disipación. El anterior resultado es sobresaliente ya que permitiría incluso concluir acerca de las características de las inclusiones gaseosas donde se están desarrollando las descargas parciales como se verá a continuación.

La definición analítica del factor de disipación en función de la carga transferida por las descargas parciales mostrada en la ecuación (4.21) de la sección 4.3 explica la dependencia de la capacitancia y del factor de disipación del ángulo de fase en el que ocurren las descargas parciales.

$$\tan \delta = \frac{\frac{1}{\pi V_m C_0} \sum_0^{V/f} (\Delta Q_i \sin \omega t_i) + \tan \delta_0}{1 + \frac{1}{\pi V_m C_0} \sum_0^{V/f} (\Delta Q_i \cos \omega t_i)} \quad (7.10)$$

$$\Delta C = \frac{1}{\pi V_m} \sum_0^{V/f} (\Delta Q_i \cos \omega t_i)$$

En (7.11) el término coseno en el denominador corresponde al incremento en la capacitancia debido a las descargas parciales mientras que el numerador está asociado con el factor de disipación y su incremento con el voltaje de prueba.  $V_m$  es el valor pico del voltaje aplicado y el término  $\Delta Q_i$  es la carga transferida debido a la  $i$ -ésima descarga parcial.

De esta relación se puede inferir que las descargas parciales que ocurren en fase con el voltaje de prueba cerca de su valor pico maximizan el término  $\sin \omega t_i$  contribuyendo más al incremento del factor de disipación. Aquellas que ocurren cerca al cruce por cero del voltaje de prueba, es decir, fuera de fase maximizan el término  $\cos \omega t_i$  contribuyendo más al incremento de la capacitancia. Este último escenario pareciera ser el caso de los resultados de la Figura 88 donde los valores de  $\Delta C$  se mantuvieron por encima de los valores de  $\Delta \tan \delta$  durante todo el programa de envejecimiento con una constante de proporcionalidad entre 0.75-0.93.

Esta relación entre los valores tip-up de la capacitancia y del factor de disipación con el ángulo de fase de las descargas parciales también es reportada en [176], donde adicionalmente se analizó la corriente equivalente de las descargas parciales para determinar la contribución de las descargas parciales a la capacitancia y el factor de disipación. La magnitud de los armónicos de la corriente de las descargas parciales conserva la misma interpretación en cuanto a su contribución a  $\Delta C$  como a  $\Delta \tan \delta$ . Mediciones de laboratorio mostraron que las descargas parciales en una cavidad dentro de una estructura aislante ocurrieron cerca del cruce por cero del voltaje de prueba y en correspondencia los términos coseno del espectro armónico de la corriente fueron mayores que los términos seno conllevando a un mayor incremento de la capacitancia. El caso contrario fue obtenido para los armónicos de la corriente de las descargas parciales producidas en un sistema de electrodos punta-plano. Las descargas tipo corona ocurrieron cerca del pico del voltaje de prueba por lo que los términos seno tuvieron mayor

magnitud que los términos coseno del espectro armónico de la corriente dando lugar a una mayor contribución al factor de disipación.

El hecho de que las descargas parciales ocurran hacia el pico o hacia el cruce por cero del voltaje de prueba se relaciona con la geometría (dimensiones), la ubicación y la conductividad de las paredes de las inclusiones gaseosas. La ley de Paschen para el voltaje de ruptura de gases en un sistema de electrodos proporcionaría una primera aproximación a la relación entre el tamaño de las inclusiones gaseosas en el aislamiento y el ángulo de las descargas parciales al menos desde un punto de vista cualitativo. Según esta ley, el voltaje de ruptura de un gas es función del producto  $pd$  de la presión del gas  $p$  y de la longitud de los electrodos  $d$  a lo largo del campo eléctrico como se representa en la Figura 89 para el caso de gases como el aire, hidrogeno y gases dieléctricos como el hexafluoruro de azufre  $SF_6$ .

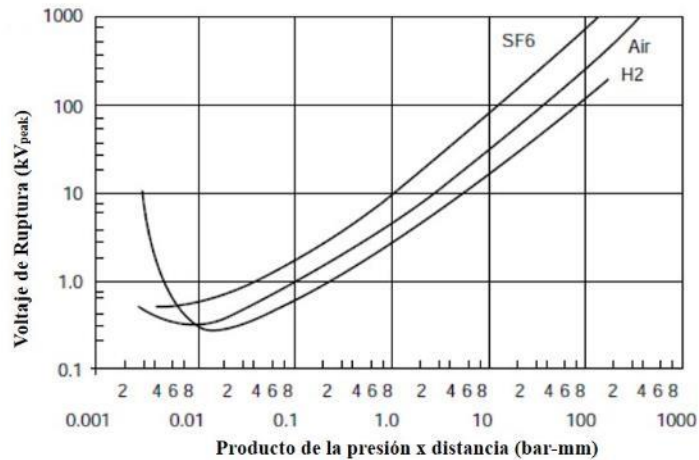


Figura 89. Aproximación al voltaje de ruptura de gases en un campo uniforme de acuerdo a la ley de Paschen.

Asumiendo que el voltaje de ruptura de las inclusiones gaseosas en el aislamiento se comporta de igual forma y que las variaciones en la longitud  $d$  de las inclusiones se sobrepone a las variaciones de la presión, se esperaría que:

- Inclusiones gaseosas de tamaño muy reducido, típicas a las presentes en aislamientos en óptimas condiciones, tuvieran un voltaje de ruptura alto en el mejor de los casos mayor que el voltaje nominal de las barras o bobinas a causa de que el producto  $pd$  es muy pequeño por cuenta de una distancia  $d$  muy reducida. Así, si el voltaje de prueba se incrementa gradualmente hasta el voltaje de inyección  $U_{il}$ , la descarga tendría lugar cerca del pico de la forma de onda.
- Conforme el tamaño de las inclusiones gaseosas crece por efecto del envejecimiento, se incrementa el producto  $pd$  y por consiguiente el voltaje de ruptura disminuye. Manteniendo el voltaje de prueba igual que en el caso anterior ( $U_{il}$ ) esta vez la descarga ocurriría hacia el cruce por cero de la forma de onda.

La magnitud del voltaje de descarga en inclusiones gaseosas al interior de sistemas de aislamiento reales no puede ser calculada mediante la ley de Paschen principalmente por el efecto de las paredes de las inclusiones. Es conocido que las descargas parciales depositan cargas superficiales en las paredes de las inclusiones modificando su conductividad lo que a su vez afecta las condiciones para las descargas subsiguientes. Una alta conductividad de las

paredes podría incluso inhibir cualquier descarga parcial [177]. Aun así, todavía es válido el comportamiento del voltaje de descarga con el incremento del producto  $pd$  descrito arriba.

Luego de definir las anteriores relaciones resulta útil ajustar la curva  $\Delta \tan \delta$  versus  $\Delta C$  mediante un polinomio y de primer grado y a partir de éste definir el índice  $K$  como se muestra en (7.12).

$$y = \beta_1 x + \beta_2 \tag{7.11}$$

$$K = \frac{\partial(y)}{\partial(x)} = \beta_1$$

Tal como se evidenció en la Figura 88 siempre es posible obtener un valor para  $K$ . Sin embargo su significado e interpretación está directamente ligada al factor de correlación del polinomio  $y$ . Cuando los valores de  $\Delta \tan \delta$  y  $\Delta C$  están altamente correlacionados, el valor del índice  $K$  puede tomarse como un indicativo de la proporción en que las descargas parciales incrementan los valores de capacitancia y del factor de disipación. Al mismo tiempo una alta correlación fuertemente sugiere que el proceso de envejecimiento tuvo una dinámica estable.

Cuando los valores de  $\Delta \tan \delta$  y  $\Delta C$  no están correlacionados, el valor del índice  $K$  pierde significado puesto que no puede afirmarse que la actividad de descargas parciales afectó los valores de capacitancia y del factor de disipación en la misma proporción en cada ciclo de envejecimiento. Este es el caso para la barra LU2. Aunque los esfuerzos de degradación se mantuvieron controlados la degradación del aislamiento fue diferente para cada ciclo de envejecimiento.

Con el propósito de investigar los posibles factores que afectan la correlación entre los datos se realizaron pruebas adicionales en las barras de prueba del segundo grupo descritas en la sección 6.1. Las mediciones se realizaron con electrodos guarda para así limitar el estudio a los defectos en el interior del aislamiento.

Los resultados de las barras rotuladas como Bar2 y Bar4 en la Figura 90 muestran una alta correlación entre los datos pese a que el programa de envejecimiento produjo valores de  $\Delta C$  de 4.43% en la barra Bar4 y casi del doble, 8.19%, en la barra Bar2, significativamente mayores a los obtenidos en las barras del primer grupo (Figura 88). Los valores de  $\Delta \tan \delta$  crecieron en menor proporción que los valores de  $\Delta C$  así resultando en índices  $K$  menores a la unidad de 0.62 y 0.42.

En el caso particular de la barra Bar4 los resultados mostraron que los primeros ciclos de envejecimiento eléctrico tuvieron poco efecto en la degradación del aislamiento y por lo tanto los valores de  $\Delta \tan \delta$  y  $\Delta C$  terminaron por debajo de 1% aun después de 1492 horas de envejecimiento. Luego con la adición del esfuerzo térmico estos valores crecieron significativamente. Aunque la barra Bar2 estuvo sometida a esfuerzo termoeléctrico durante todo el programa de envejecimiento la degradación de su aislamiento pareció ocurrir lentamente hasta el quinto ciclo. Para el final del envejecimiento, la degradación ocurrió a un ritmo mucho mayor y por lo tanto el valor de  $\Delta C$  se triplicó pasando de 2.77% a 8.2% entre el quinto ciclo y el final del programa de envejecimiento.

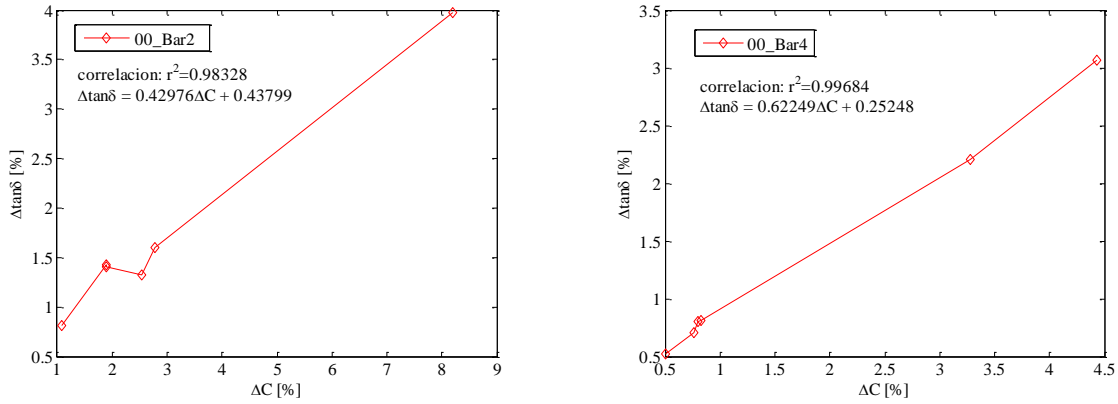


Figura 90. Característica  $\Delta C$  versus  $\Delta \tan \delta$  para las barras de prueba Bar2 y Bar4.

Cabe mencionar que los coeficientes de correlación para los dos casos anteriores de estudio estuvieron por encima de 0.98 incluso cuando el aislamiento alcanzó un nivel de degradación severo. Considerando que para las barras de prueba del primer grupo también se obtuvo una alta correlación pero particularmente con bajos valores de  $\Delta \tan \delta$  y  $\Delta C$  entonces podría pensarse que la correlación entre los datos no depende del nivel de degradación del aislamiento. El segundo grupo de mediciones también incluyó los casos de estudio de las barras Bar1 y Bar6 las cuales fueron sometidas a ciclado térmico y posteriormente a envejecimiento termoeléctrico. En la Figura 91 pueden observarse los resultados correspondientes a estas dos barras de prueba.

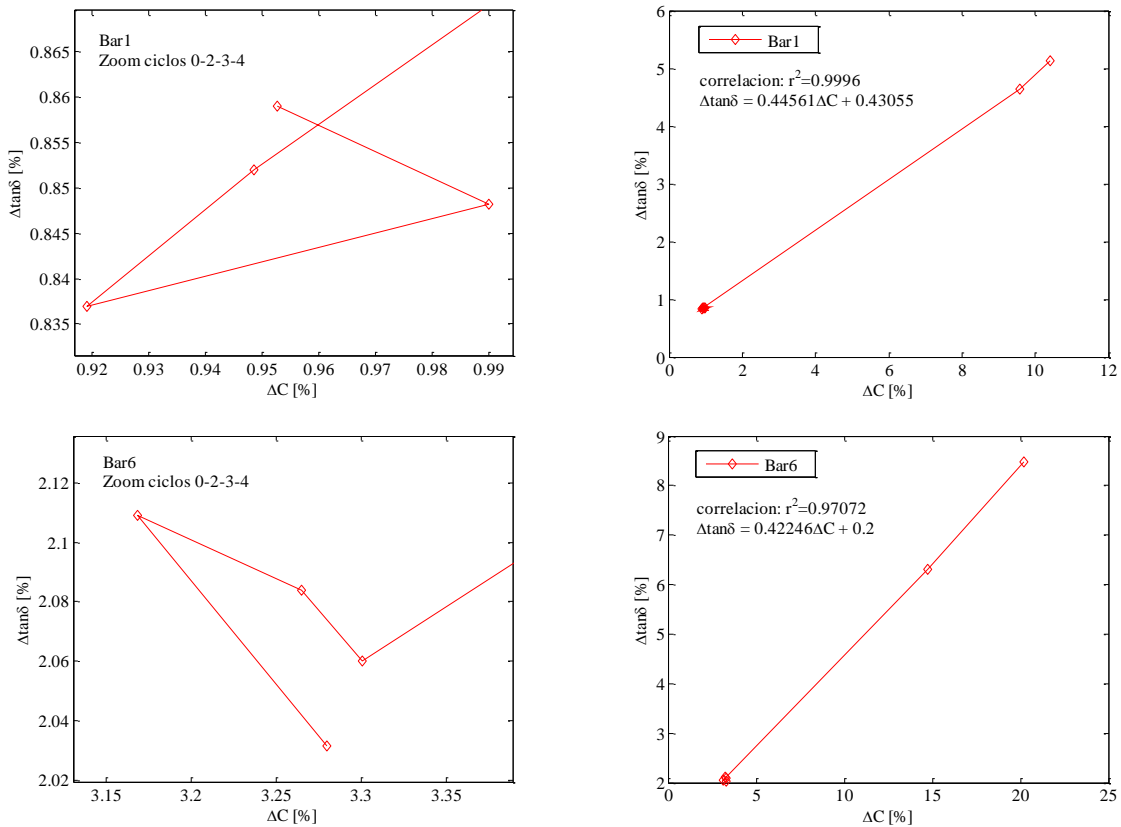
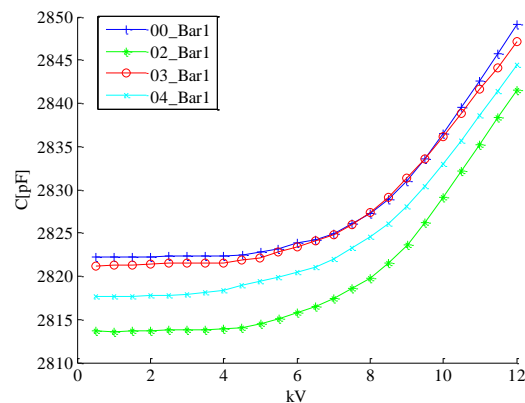
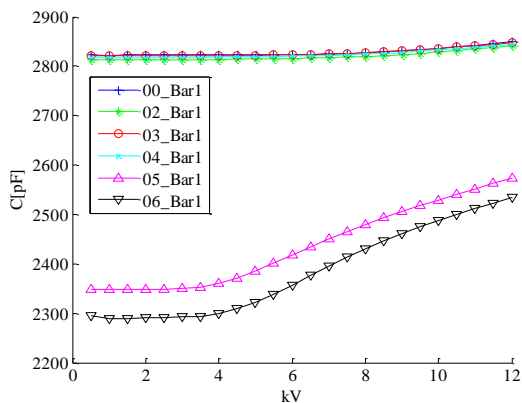


Figura 91. Característica  $\Delta C$  versus  $\Delta \tan \delta$  para las barras de prueba Bar1 y Bar6.

A partir de los datos en la Figura 91 se puede concluir que ambas barras resistieron sobresalientemente el ciclado térmico en tanto que los esfuerzos termoeléctricos produjeron una degradación severa del aislamiento sugerido por los altos valores de 10.41 y 20.18% de la capacitancia tip-up calculada al final del programa de envejecimiento. El cambio relativo entre los valores obtenidos durante el ciclado térmico fue pequeño resultando casi imperceptible en la escala de la magnitud de los valores que produjo el esfuerzo termoeléctrico tal como se aprecia en las gráficas a la izquierda en la Figura 92 y en la Figura 93. Por esta razón todos los datos para el ciclado térmico aparecen en la Figura 91 como un solo punto en línea con los valores obtenidos durante el envejecimiento termoeléctrico. El polinomio que ajusta la totalidad de los datos tiene un alto factor de correlación superior a 0.98 con valores del índice  $K$  alrededor de 0.42 y 0.44. Una ampliación sobre los puntos correspondientes únicamente al ciclado térmico tal como se muestra en la gráfica izquierda de la Figura 91 revela como estos datos no muestran una tendencia claramente definida.

Como se mencionó previo a esta discusión las barras de prueba estuvieron en servicio durante varios años antes de ser desmontadas y sometidas al programa de envejecimiento. De ahí que las mediciones iniciales arrojaran valores tip-up cercanos a 1% para la barra Bar1 y de 3.25% para la barra Bar6. Después de hacer una ampliación de las curvas de capacitancia y del factor de disipación medidas durante el ciclado térmico como la que se muestra en las gráficas a la derecha en la Figura 92 y en la Figura 93, se observa una dependencia del voltaje de prueba con lo que se confirma que al inicio del ciclado térmico el aislamiento ya contenía cierto volumen de inclusiones gaseosas. Pese a esta condición inicial de las barras la variación de las curvas entre ciclos fue tan solo de 0.3% como máximo para la capacitancia y la diferencia máxima entre las curvas del factor de disipación fue de 0.13%. Tampoco fue posible determinar una tendencia en el tiempo en ninguno de los dos parámetros medidos durante el ciclado térmico. En el caso de la capacitancia, el fabricante del equipo Doble M4100 utilizado en las mediciones garantiza una exactitud de  $\pm 0.5\%$  de la lectura. Este porcentaje está por encima del porcentaje de variación de la capacitancia medida imposibilitando definir cualquier tendencia. Entonces se podría concluir que de hecho el ciclado térmico no resultó en cambios de capacitancia que pudieran medirse con precisión. Los cambios en los valores medidos del factor de disipación aunque están dentro de la precisión del equipo del 1% de la lectura, son despreciables luego del primer ciclado térmico así como también son significativamente bajos comparados con los cambios provocados por los esfuerzos termoeléctricos.





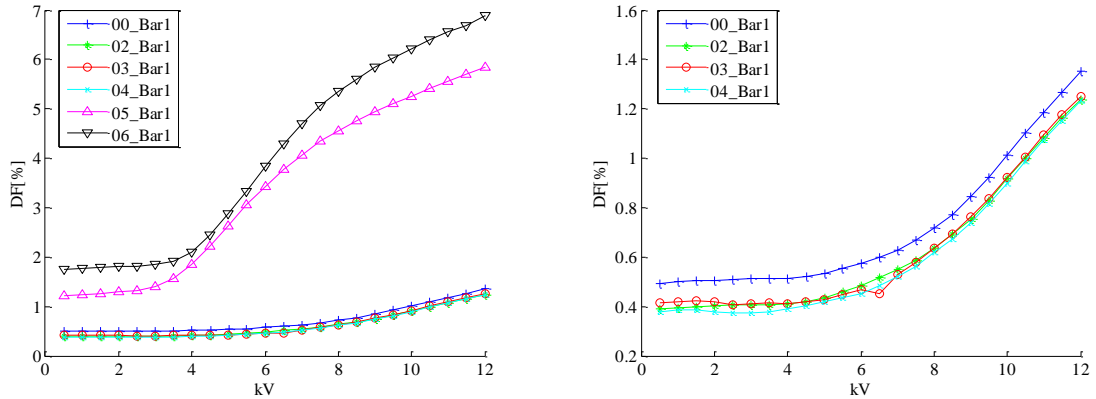


Figura 92. Característica de la capacitancia y del factor de disipación con el voltaje de prueba para la barra Bar1.

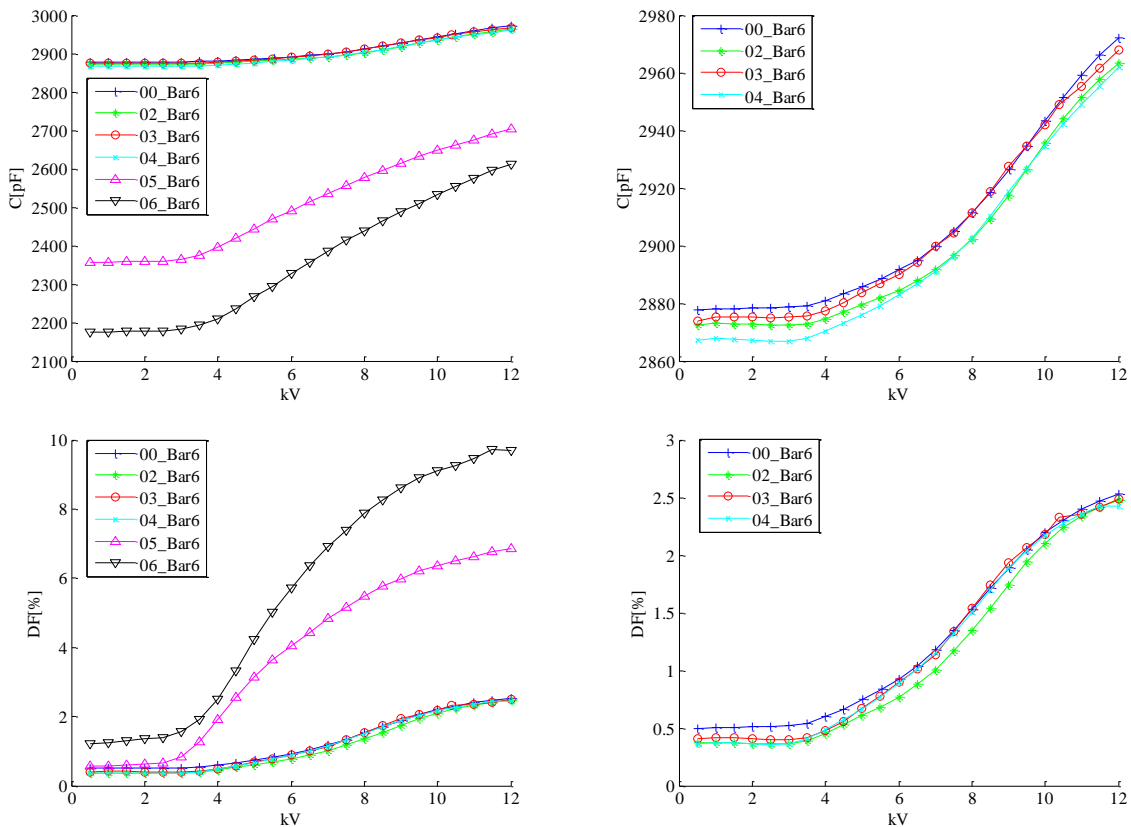


Figura 93. Característica de la capacitancia y del factor de disipación con el voltaje de prueba para la barra Bar6.

Adicionalmente llama la atención que las curvas del factor de disipación a partir del segundo ciclado térmico son inferiores a la curva inicial, lo cual resulta inesperado puesto que este comportamiento es usualmente asociado a reacciones de postcurado, reacciones que no son posibles dadas las condiciones iniciales de las barras de prueba. En cambio, es muy probable que este comportamiento se deba a diferencias en la precisión de los equipos de medición; las pruebas iniciales se realizaron con el equipo CP-TD1 de la compañía Omicron y las subsiguientes con el equipo M4100 de la compañía Doble.

Por lo anterior, puede afirmarse que la no correlación de los datos durante el ciclado térmico no es un resultado asociado a la degradación misma del aislamiento sino una

consecuencia de la incertidumbre en la medición de la capacitancia y del poco cambio medido en el factor de disipación. La aplicación de los esfuerzos termoeléctricos luego del ciclado térmico por su parte desencadenó cambios notorios en la capacitancia y en el factor de disipación en la proporción indicada por el valor del índice  $K$ . Nótese que en la Figura 91 los valores de  $\Delta \tan \delta$  y  $\Delta C$  cambiaron en magnitudes visiblemente diferentes entre el quinto y sexto ciclo de envejecimiento y aun así los datos se mantuvieron correlacionados, confirmando la conclusión dada arriba respecto a que la correlación de los datos no depende completamente del nivel de degradación del aislamiento.

Comparativamente las barras del segundo grupo resultaron con un nivel de degradación mucho mayor que las barras de prueba del primer grupo. Así mismo el índice  $K$  calculado para ellas resultó menor. En ambos casos los datos presentaron una alta correlación.

Para relacionar los valores del índice  $K$  obtenidos con la actividad de descargas parciales y con lo cual llegar a conclusiones respecto al nivel de degradación del aislamiento es preciso evaluar los cambios en el ángulo de fase de las descargas parciales. Los resultados de dicha evaluación son presentados en la siguiente sección.

#### 7.4 MEDICIÓN DE DESCARGAS PARCIALES

En la siguiente sección se discutirán los resultados de la medición directa de descargas parciales buscando principalmente su relación con los cambios en los valores de capacitancia y del factor de disipación.

La actividad de descargas parciales en el aislamiento de las barras de prueba se midió al voltaje nominal. Cada medición arrojó un patrón en fase resuelta a partir del cual se cuantificó la carga promedio  $q_m$ , la carga máxima  $q_{max}$  y la repetición  $n$  de las descargas parciales.

Las mediciones de descargas parciales sobre las barras del primer grupo, es decir, aquellas rotuladas como LU1, LU2, SU1 y SU2, fueron realizadas con el equipo ICMSysSystem de PowerDiagnostix y el procesamiento de los datos con ayuda del programa SysStd.3.77 y con scripts de código propio. Este equipo de medición, entre otras funciones, permite al usuario configurar un límite (threshold) para la magnitud en pC de las descargas parciales por debajo del cual no se procesa ninguna señal. Más allá de esta función el sistema con la configuración utilizada no dispone de otras herramientas para filtrado de las señales adquiridas. Por este motivo los parámetros de configuración de la prueba fueron ajustados cada vez hasta obtener patrones en fase resuelta con el menor nivel posible de pulsos de reflexión y ruido.

Para el segundo grupo de barras, Bar1, Bar2, etc, se empleó el sistema PDCheck MK-IV del fabricante TechImp. Además del análisis en fase resuelta, el equipo PDCheck resuelve los pulsos en el tiempo lo cual le permite implementar funciones para el reconocimiento y separación de las fuentes de descargas parciales.

Pese a que se utilizaron diferentes equipos de medición, en ambos casos las mediciones de descargas parciales se ejecutaron implementando un método eléctrico directo según el circuito de medición mostrado en la Figura 94, con capacitor de acople de 1nF.

Para cuando la magnitud de las descargas se dio en unidades de pC, como con el equipo de PowerDiagnostix, fue necesario llevar a cabo un procedimiento de calibración de acuerdo con el documento técnico IEC60270-2000. Este procedimiento se realizó con cada barra de prueba por medio del calibrador de pulsos de referencia CAL1D. En el segundo caso, es decir cuando se utilizó el equipo PDCheck, no se realizó procedimiento de calibración y las descargas parciales se midieron en unidades de mV, lo cual correspondió a la amplitud del pico de voltaje medido en la impedancia de detección.

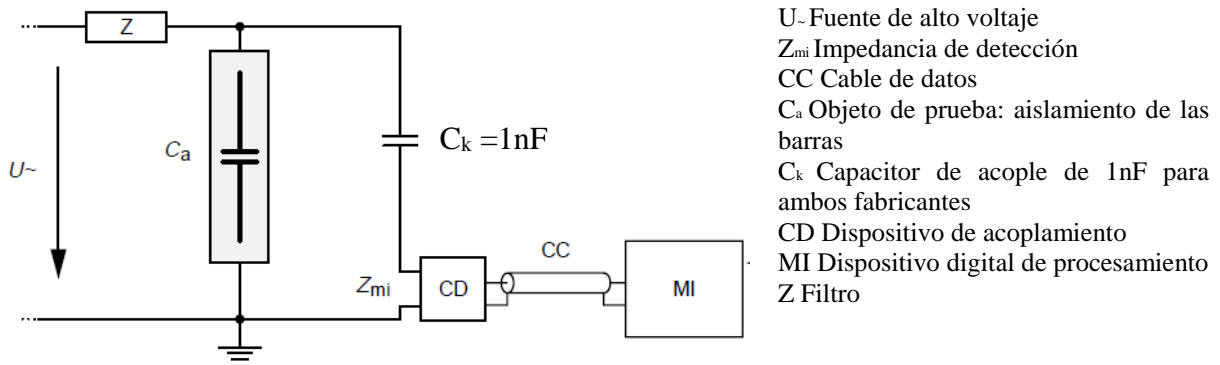


Figura 94. Circuito de medición de descargas parciales de acuerdo con IEC60270-2000.

Las condiciones en las que se realizaron las mediciones favorecieron la adquisición de patrones en fase resuelta con prácticamente cero influencia de ruido electromagnético. Por lo tanto, en ambos sistemas se estableció un nivel de “threshold”, lo cual fue suficiente para eliminar las señales de ruido y obtener patrones correspondientes únicamente a señales de descargas parciales.

#### 7.4.1 RECONOCIMIENTO DE PATRONES

El diagnóstico de la condición de un sistema de aislamiento de un equipo de alto voltaje por medio de cualquiera de las técnicas de descargas parciales involucra un proceso de reconocimiento y separación de fuentes para posteriormente realizar el procesamiento de la información.

La medición en equipos en operación real resulta en patrones con múltiples fuentes de descarga superpuestas. De ahí la importancia de una técnica adecuada de reconocimiento y separación. En el caso específico de esta investigación las condiciones controladas y específicas del programa de envejecimiento limitaron las fuentes de descarga a aquellas en el interior del aislamiento principal. La capacidad y funciones de los equipos de medición disponibles fueron determinantes para seleccionar las barras de prueba, los voltajes y otros parámetros de la medición.

No se realizaron mediciones en las barras ST y SG ya que la capa superficial semiconductor de ambas barras resultó alterada luego de la remoción de las muestras del material y luego del corte de los anillos guarda respectivamente, originando descargas parciales superficiales no relacionadas con el envejecimiento mismo. En el primer grupo de barras, las mediciones en LU1 y LU2 se realizaron a 7kV y en SU1 y SU2 a 10kV. Todas las mediciones en las barras del segundo grupo se realizaron a 10kV.

A pesar de que durante las mediciones se registraron descargas parciales superficiales, la función de separación y filtrado del instrumento utilizado permitió eliminar/reducir estas fuentes de descargas.

Los patrones en fase resuelta de las descargas parciales internas presentan características definidas ya sea que se trate de pequeñas inclusiones gaseosas dispersas en el volumen del aislamiento, o de inclusiones que fueron evolucionando hasta formar delaminaciones, o de defectos en la cercanía de los conductores de cobre o en la cercanía del electrodo a tierra. A partir de los patrones en fase resuelta se calcularon las cantidades directas o básicas de la actividad de descargas parciales como lo son  $q_m(\pm)$ ,  $q_{max}(\pm)$  y  $n(\pm)$  y los parámetros “skewness” o asimetría  $S_k(\pm)$  y curtosis  $Ku(\pm)$  de las distribuciones estadísticas  $Hqn^+(\varphi)$  y  $Hn^+(\varphi)$  con el

objetivo de reconocer y estimar las características de las fuentes de descarga. Sin embargo el principal interés en las distribuciones estadísticas fue el cálculo del ángulo de fase y su posible correlación con los incrementos a alto voltaje de la capacitancia y del factor de disipación. En la Tabla 12 están consignados los resultados para los parámetros de skewness y curtosis para las barras del primer grupo.

Barra	$Hqn^{\pm}(\varphi)$				$Hn^{\pm}(\varphi)$			
	$S_k(+)$	$S_k(-)$	$Ku(+)$	$Ku(-)$	$S_k(+)$	$S_k(-)$	$Ku(+)$	$Ku(-)$
01_LU1	-0.04	-0.09	-1.11	-0.81	1.15	1.06	1.96	1.45
02_LU1	0.03	0.04	-1.16	-1.23	0.93	1.02	1.14	1.92
03_LU1	0.17	0.78	-1.25	-0.53	1.07	0.54	0.37	-1.54
04_LU1	0.14	0.88	-1.15	-0.23	0.39	1.33	-0.64	0.67
01_LU2	0.60	0.62	-0.53	-0.37	1.09	1.38	2.34	4.69
02_LU2	0.00	0.44	-1.07	-0.78	0.32	1.51	-0.52	2.57
03_LU2	-0.03	0.43	-1.03	-0.83	0.32	1.48	-0.53	2.49
04_LU2								
00_SU1	0.53	0.52	-0.47	-0.23	0.05	0.12	-1.19	1.30
01_SU1	0.12	0.17	-1.29	-1.13	0.74	0.82	-0.75	0.73
02_SU1	0.04	0.03	-1.14	-1.23	0.65	1.22	0.55	1.14
03_SU1	0.05	0.06	-1.07	-1.12	0.60	1.12	0.18	1.55
04_SU1	0.03	0.06	-1.16	-1.21	0.73	1.25	0.49	2.84
01_SU2	0.05	0.07	-1.18	-1.07	1.37	0.94	3.79	2.17
02_SU2	0.03	0.10	-1.13	-1.10	1.32	2.27	3.84	6.91
03_SU2	-0.01	-0.03	-1.11	-1.23	1.39	1.83	2.95	5.82
04_SU2	0.11	0.78	-1.12	-0.30	0.37	1.78	-0.57	3.08

Tabla 12. Factores de forma  $S_k(\pm)$  y  $Ku(\pm)$  de las distribuciones estadísticas  $Hqn^{\pm}(\varphi)$  y  $Hn^{\pm}(\varphi)$  para los casos de estudio de las barras LU1, LU2, SU1 y SU2.

Los parámetros skewness y curtosis calculados para la distribución  $Hqn^{\pm}(\varphi)$  asocian un valor numérico a la forma en la que los pulsos de descargas parciales se distribuyen como función del ángulo de fase del voltaje aplicado. Debido a que en cada ventana de fase pueden ocurrir descargas de diferente magnitud, entonces se calcula como valor representativo la carga promedio o carga máxima. En este caso siempre se trabajó con el valor de la carga promedio. Al graficar la carga promedio en función del ángulo, se obtiene la distribución  $Hqn^{\pm}(\varphi)$ . El valor calculado de  $S_k(\pm)$  determina la simetría de la distribución alrededor de su valor central y el valor de  $Ku(\pm)$  puede entenderse como una medida de que tan “puntiaguda” se torna la distribución respecto a su valor central. Los resultados muestran que en general los valores de  $S_k(+)$  y  $S_k(-)$  son bastante próximos sugiriendo simetría entre la forma del patrón para el semiciclo positivo y negativo, lo cual confirma la presencia de descargas parciales internas. Observando un poco más de cerca los resultados se destacan varios comportamientos. La barra SU1 presenta la mayor similitud entre los valores para ambos semiciclo. En las barras LU1 y SU2 los valores de cada semiciclo empiezan a alejarse conforme avanza el envejecimiento siendo más evidente en la barra LU1. Llamó la atención la simetría entre los valores  $S_k(\pm)$  para el primer ciclo de envejecimiento de la barra LU2. Posteriormente los valores de  $S_k(-)$  fueron mayores que los valores de  $S_k(+)$  siendo consecuente con las grandes delaminaciones presentes en el aislamiento. Los valores de  $Ku(\pm)$  fueron negativos para todos los casos de estudio indicando que los pulsos se distribuyeron alrededor del valor medio de  $q_m^{\pm}$  abarcando una amplia región del semiciclo. Característica también típica de descargas

internas. Similitudes entre el semiciclo positivo y negativo no aparecen tan evidentes como para los valores de  $s_k(\pm)$ . En condiciones de laboratorio y para una sola inclusión gaseosa es de esperarse una alta similitud entre los valores para ambos semiciclos tanto para  $s_k(\pm)$  como para  $Ku(\pm)$  [178]. En mediciones sobre barras estáticas con múltiples inclusiones gaseosas los valores de  $s_k(\pm)$  así como también la diferencia entre ambos semiciclos tienden a ser mayores que para una sola inclusión gaseosa. La referencia [106] es un buen ejemplo de la diferencia que puede llegar a existir entre los valores de  $s_k(\pm)$ . En barras de prueba previamente al envejecimiento y donde se supone que el aislamiento solo contiene pequeñas inclusiones gaseosas se obtuvo que  $s_k(+)=0.4$  mientras que  $s_k(-)=0.76$ . La mayor magnitud de  $s_k(-)$  sobre  $s_k(+)$  para las barras LU1, LU2 y SU2 conforme avanzó el programa de envejecimiento sugiere la aparición de inclusiones gaseosas más cercanas a los conductores de cobre de las barras [179].

Para la distribución  $Hn^+(\varphi)$  los resultados de  $s_k(\pm)$  fueron positivos y de mayor magnitud que para la distribución  $Hqn^+(\varphi)$ . Los valores de  $Ku(\pm)$  pudieron ser tanto positivos como negativos y variaron en un amplio rango. Pese a que no se obtuvo una tendencia clara, en ningún caso se obtuvo valores de curtosis negativos para ambos semiciclos, lo cual es una característica de múltiples pequeñas inclusiones gaseosas como las formadas en el proceso de fabricación de las barras. Los valores predominantemente positivos confirman que en el aislamiento bajo prueba se produjeron defectos cercanos a los conductores de cobre [101].

### 7.4.2 ANÁLISIS DE PARÁMETROS

Las cantidades básicas de las descargas parciales se graficaron en función del tiempo de envejecimiento como se muestra en la Figura 95 a la Figura 97. Para el semiciclo negativo se tomaron los valores absolutos de carga para compararlos fácilmente con la carga del semiciclo positivo.

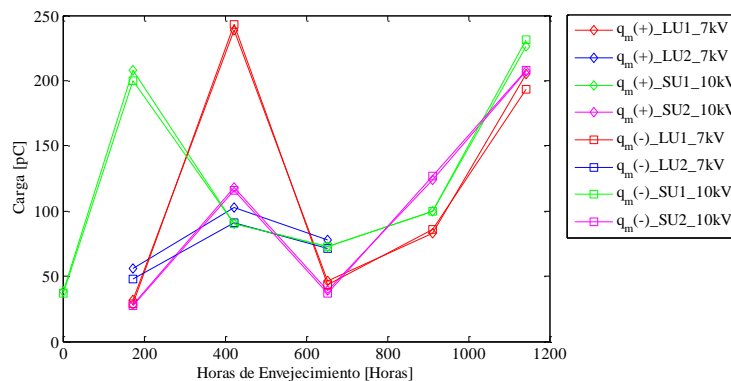


Figura 95. Evolución de la carga promedio  $q_m(\pm)$  con el tiempo de envejecimiento para las barras de prueba del primer grupo.

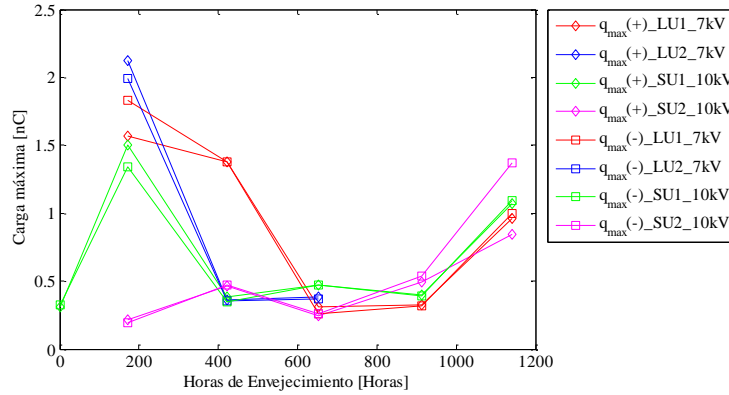


Figura 96. Evolución de la carga máxima  $q_{max}(\pm)$  con el tiempo de envejecimiento para las barras de prueba del primer grupo.

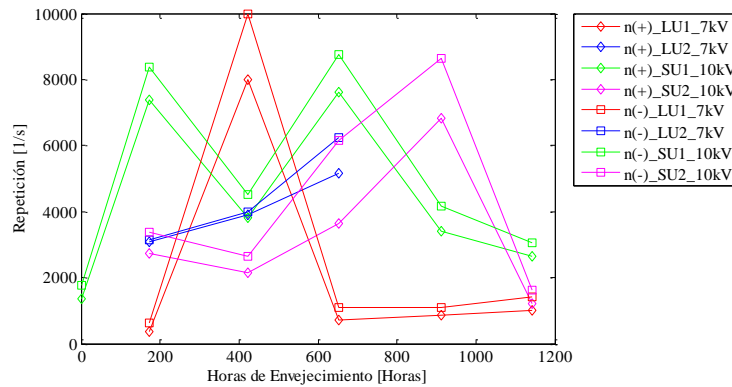


Figura 97. Evolución de la repetición  $n(\pm)$  con el tiempo de envejecimiento para las barras de prueba del primer grupo.

Previo a la discusión de los resultados, es pertinente mencionar que únicamente en el caso de la barra SU1 se detectaron descargas parciales, previo al inicio del programa de envejecimiento. En todas las demás barras, se detectaron descargas parciales luego del primer ciclo de envejecimiento. En consecuencia, cuando se haga referencia a los valores iniciales de los parámetros se entenderá que se refiere al tiempo en el cual se registraron descargas parciales por primera vez.

La primera característica que sobresale de los resultados de las mediciones es que la magnitud de la carga promedio es igual para ambos semiciclos. Lo mismo aplica para la evolución de la carga máxima, excepto para la barra SU2 donde la carga máxima del semiciclo negativo fue mayor. En todos los casos de estudio la magnitud de la repetición fue mayor para el semiciclo negativo. Los valores de  $n(+)$  y  $n(-)$  estuvieron más próximos en los inicios del programa de envejecimiento. En adelante las diferencias se hicieron más evidentes.

La similitud entre los valores de  $q_m(\pm)$  y entre los de  $q_{max}(\pm)$  es un primer indicativo de la presencia de pequeñas inclusiones gaseosas en el aislamiento. En la medida que estas inclusiones gaseosas crecen en cantidad y tamaño el patrón en fase resuelta comienza a ser menos simétrico especialmente si los defectos en el interior del aislamiento se ubican hacia las interfaces cobre/aislamiento o núcleo/aislamiento. Pese a las similitudes de  $q_m(\pm)$  y  $q_{max}(\pm)$ , las

diferencias obtenidas entre  $n(+)$  y  $n(-)$  con el tiempo de envejecimiento podría tomarse como indicativo de la asimetría en los patrones. En la Figura 97, la repetición para el semiciclo negativo de las barras LU2 y SU2 fue notoriamente mayor que para el semiciclo positivo conforme avanzó el tiempo de envejecimiento. En el caso de la barra LU2 este resultado es esperado debido a que en su aislamiento existen defectos del tipo delaminación. Típicamente este tipo de defectos resultan en patrones asimétricos con predominancia del semiciclo negativo y desplazados hacia el cruce por cero del voltaje de prueba aplicado. Si bien la barra SU2 no resultó degradada en la misma magnitud que la barra LU2, la diferencia entre  $n(+)$  y  $n(-)$  hasta el cuarto ciclo de envejecimiento apunta a que los defectos en el interior de su aislamiento paulatinamente adquirieron forma de delaminación o empezaron a ocurrir más cerca a la interface del cobre/aislamiento.

Al observar la tendencia de los parámetros se aprecia un crecimiento en el tiempo de  $q_m(\pm)$  para cada barra de estudio, que estaría claramente definido a no ser porque se registró un dato cuya magnitud fue varias veces mayor que el valor que se ajusta a la tendencia. Inmediatamente después del siguiente ciclo de envejecimiento, el valor medido de  $q_m(\pm)$  disminuyó hacia la tendencia. La barra SU1 fue sometida a esfuerzo termoeléctrico y por lo tanto el fuerte incremento inicial de  $q_m(\pm)$  bien podría estar asociado a la degradación del aislamiento y la subsecuente caída sería producto de los depósitos y distribución de carga en las paredes de las inclusiones que previenen que se establezca el suficiente potencial eléctrico para producir descargas parciales de gran magnitud [99]. Sin embargo, este mismo comportamiento también ocurrió en las barras LU1 y SU2 que solo fueron sometidas a esfuerzos térmicos. Por lo tanto este elevado valor se consideró como inusual atribuible a la medición más que al proceso de degradación.

En cuanto al valor de la carga máxima  $q_{max}(\pm)$  se evidencian varios comportamientos. En el caso de la barra LU1 y LU2 el valor inicial fue elevado, luego cayó y en adelante mostró una tendencia creciente. Solo en el caso de la barra LU2 resulta probable que la disminución inicial en la carga máxima sea producto del incremento de la conductividad de las paredes de los defectos internos. Antes de la primera medición, las delaminaciones en la barra LU2 estuvieron sometidas a esfuerzos eléctricos solo por un corto periodo de tiempo y en consecuencia podría pensarse que las delaminaciones estaban relativamente libres de depósitos carga que permitieron descargas parciales con una alta carga máxima. Iniciado el programa de envejecimiento termoeléctrico, rápidamente se modificaron las propiedades de las paredes de las delaminaciones. Estas modificaciones parecieron tener mayor efecto sobre la carga máxima que sobre la carga promedio o incluso la repetición, que en cambio mostraron tendencias crecientes. Las barras SU1 y SU2 presentaron un valor relativamente estable de carga máxima para luego crecer al final del programa de envejecimiento.

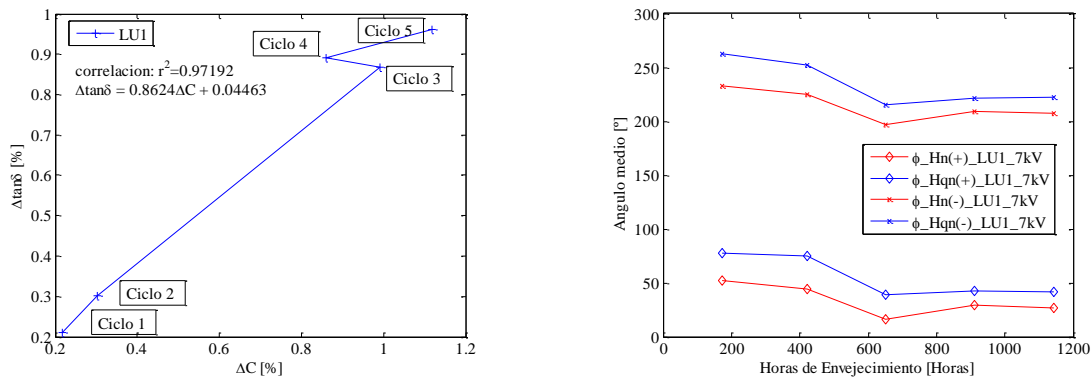
El valor de la repetición solo tuvo una tendencia claramente creciente para la barra LU2, en los demás casos de estudio hubo grandes variaciones de  $n(\pm)$  entre ciclos de envejecimiento. Luego de revisados los parámetros básicos de la actividad de descargas parciales, llama la atención que los valores de  $q_m(\pm)$ ,  $q_{max}(\pm)$  y  $n(\pm)$  para la barra LU2 fueron comparables con los valores obtenidos para los demás casos de estudio a pesar del gran volumen de aire en el interior de las delaminaciones (en la barra LU2), incluso perceptible al tacto. El hecho de que los valores de  $q_m(\pm)$ ,  $q_{max}(\pm)$  no resultaran mucho mayores a los demás casos de estudio comprueba que al voltaje de prueba de 7kV solo una porción del volumen de las

delaminaciones está siendo cortocircuitada por las descargas parciales. Para lograr cortocircuitar completamente todo el volumen de las delaminaciones se requeriría un voltaje de prueba mucho mayor de acuerdo con la ley de Paschen. El incremento en los valores medidos de  $q_m(\pm)$  y  $n(\pm)$  con el tiempo de envejecimiento son indicativo de los cambios producidos en la estructura fuertemente delaminada de la barra LU2 por los esfuerzos termoeléctricos.

El análisis de los valores de  $q_m(\pm)$ ,  $q_{max}(\pm)$  y  $n(\pm)$  así como de los cambios de ellos en el tiempo permitieron estimar los efectos de los esfuerzos térmicos y eléctricos en el aislamiento de las barras de estudio con la desventaja que estos parámetros son sensibles no solo a los diversos factores que afectan el proceso mismo de la descarga sino también a la magnitud y forma de onda del voltaje de prueba aplicado, entre otros. De ahí que los datos puedan presentar una alta dispersión y poca correlación con los valores tip-up de la capacitancia y del factor de disipación. Por su parte, pese a los posibles cambios que pueden presentarse en la forma de los patrones en fase resuelta, la zona de fase del voltaje de prueba o ángulo de fase promedio en la que se centran los patrones no presenta cambios pronunciados, razón por la cual podría estar estrechamente correlacionado con los valores de  $\Delta C$  y  $\Delta \tan \delta$ . El incremento con el voltaje de prueba de la capacitancia y del factor de disipación se debe entre otros a la actividad global de descargas parciales y por lo tanto no son sensibles a la totalidad de pulsos que se puedan presentar.

El ángulo medio de las descargas parciales fue obtenido como el primer momento estadístico de las distribuciones  $Hn^{\pm}(\varphi)$  y  $Hqn^{\pm}(\varphi)$  aplicando la ecuación (4.4). El resultado de aplicar la ecuación (4.4) a la distribución  $Hn^{\pm}(\varphi)$  es el ángulo medio  $\varphi_{Hn(\pm)}$  ponderado por la repetición  $n$ , mientras que aplicada a la distribución  $Hqn^{\pm}(\varphi)$  arroja el ángulo medio  $\varphi_{Hqn(\pm)}$  ponderado por la carga promedio.

En la Figura 98 se muestran los valores calculados del ángulo medio de las descargas parciales junto con el cambio en los valores de  $\Delta C$  y  $\Delta \tan \delta$  previamente reportados en la Figura 88.





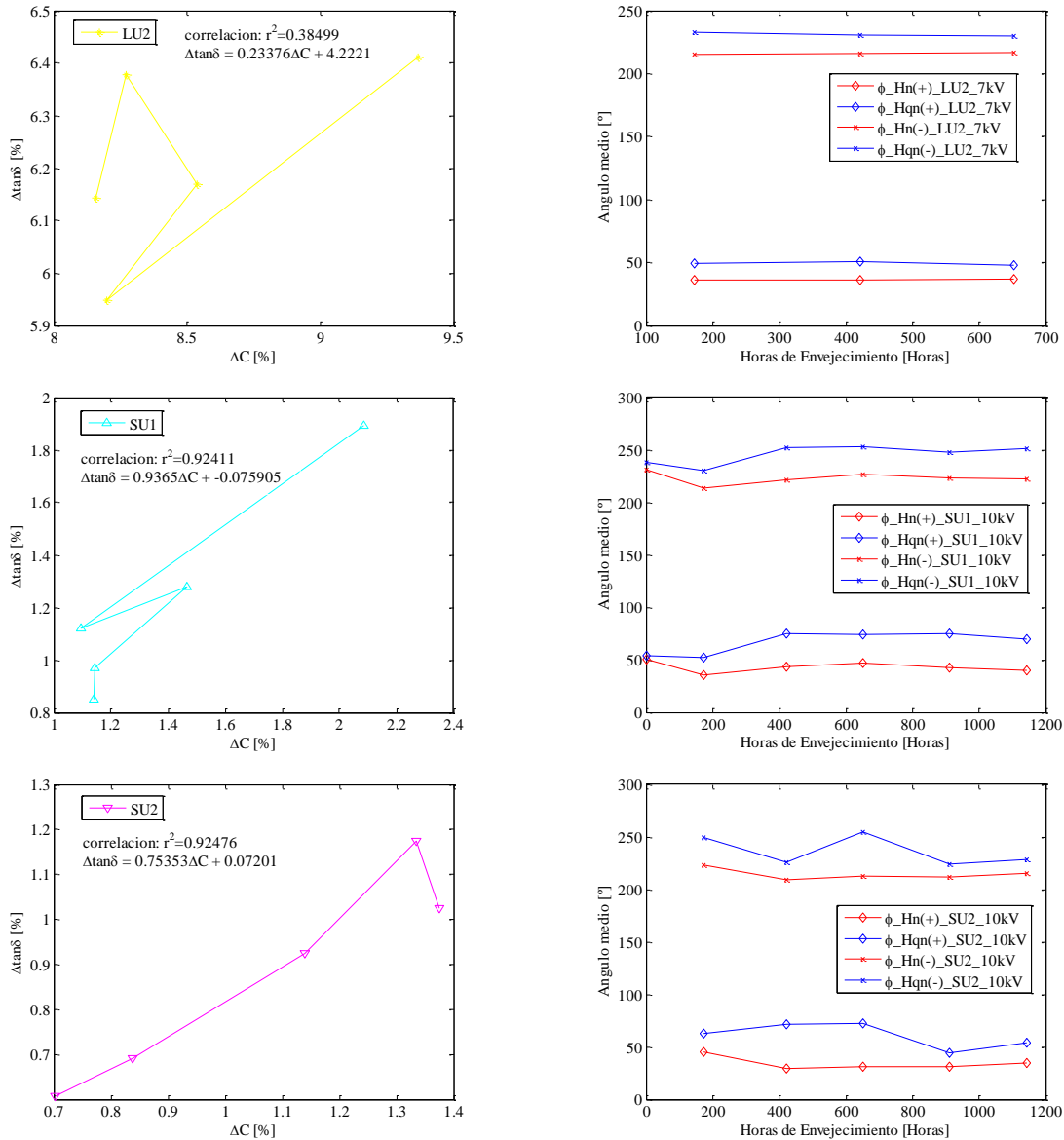


Figura 98. Evolución del ángulo medio de las descargas parciales con el tiempo de envejecimiento para las barras de estudio LU1, LU2, SU1 y SU2.

La evolución en el tiempo del ángulo medio de fase de las descargas parciales para cada una de las barras de estudio tuvo un comportamiento particular.

En la barra LU2, tanto el ángulo medio  $\phi_{Hn(\pm)}$  como los valores de  $\Delta C$  y  $\Delta \tan \delta$  (Figura 84) se mantuvieron prácticamente constantes. El ángulo medio  $\phi_{Hn(\pm)}$  se situó alrededor de  $36^\circ$  a diferencia de los valores de repetición y carga promedio que crecieron con el tiempo de envejecimiento. Este resultado apunta a que las dimensiones de las grandes delaminaciones existentes en el aislamiento de la barra LU2 crecieron muy poco con los esfuerzos termoeléctricos y por lo tanto el crecimiento en los parámetros  $q_m(\pm)$  y  $n(\pm)$  posiblemente fue causado por cambios en las condiciones necesarias para el proceso de descarga: mayor

disponibilidad de electrones de inicio de descarga provenientes de subproductos de degradación, y/o por formación de nuevas fuentes de descarga.

Para los demás casos de estudio, el ángulo  $\varphi_{Hn(\pm)}$  al final del programa de envejecimiento disminuyó en relación a su valor inicial confirmando un corrimiento de los patrones en fase resuelta hacia el cruce por cero del voltaje aplicado. La magnitud de este corrimiento fue relativamente pequeña siendo más pronunciada para el caso de la barra LU1.

Buscando las relaciones con el índice  $K$ , se resumieron en la Tabla 13 los valores obtenidos del ángulo de fase promedio al inicio y al final del programa de envejecimiento y el valor calculado del índice  $K$  para los casos de estudio del primer grupo de barras.

Los resultados mostraron una relación directa entre el índice  $K$  y el ángulo inicial  $\varphi_{Hn(\pm)}$  cuando los valores de ambos parámetros fueron los más bajos. Esto se puede observar en el caso de la barra SU2 donde se obtuvo el menor índice  $K$  y también el menor ángulo de fase inicial (45.5°).

En línea con los resultados para el menor valor obtenido del índice  $K$ , se esperaría que la barra LU1 hubiera mostrado el mayor índice  $K$  en razón a que ésta presentó el mayor ángulo de fase inicial. Sin embargo esta relación no fue observada exactamente. En cambio, el mayor valor del índice  $K$  se obtuvo para la barra SU1, donde aunque el ángulo inicial fue 50.1°, el desplazamiento del ángulo de fase fue de pequeña magnitud; 10.3° terminando en 39.8°.

A la barra LU1 le correspondió un valor del índice  $K$  de 0.862 (menor que para la barra SU1). En este caso, el alto valor inicial del ángulo de fase estuvo acompañado de un amplio desplazamiento del ángulo de fase de 25.4°.

El comportamiento del ángulo de fase promedio para el semiciclo negativo fue de forma similar al semiciclo positivo.

Caso de estudio	$\varphi_{Hn(+)}$ Inicial [°]	$\varphi_{Hn(+)}$ Final [°]	$\varphi_{Hn(-)}$ Inicial [°]	$\varphi_{Hn(-)}$ Final [°]	Índice $K$
SU1	50.1	39.8	230.8	222.0	0.936
LU1	52.4	27.0	233.3	207.4	0.862
SU2	45.5	34.5	223.1	215.2	0.753

Tabla 13. Relación entre el índice  $K$  y el ángulo de fase promedio  $\varphi_{Hn(\pm)}$  de las descargas parciales.

Los resultados consignados en la Tabla 13 confirmaron que tanto el valor inicial como la variación del ángulo de fase, o en otras palabras qué tanto se desplazó el patrón en el tiempo, influyen en el valor del índice  $K$ .

En la barra LU1 la gran variación del ángulo de fase fue sopesada por el alto valor inicial del ángulo de fase (corrimiento hacia el pico de la forma de onda) lo cual explicaría porqué el índice  $K$  no resultó ser el más bajo.

En el caso de la barra SU2, el valor inicial del ángulo de fase fue el más bajo resultando también en el menor índice  $K$ .

Para la barra SU1, el ángulo de fase inicial fue menor que para la barra LU1 pero su variación no fue tan amplia como para ésta última y por lo tanto su índice  $K$  resultó ser el mayor.

El comportamiento del ángulo de fase promedio  $\varphi_{Hqn(\pm)}$  presenta también una tendencia similar que la obtenida para  $\varphi_{Hn(\pm)}$ . Como puede apreciarse en la Figura 98, el ángulo  $\varphi_{Hqn(\pm)}$  estuvo por encima del ángulo  $\varphi_{Hn(\pm)}$  para todos los casos de estudio e incluso para la barra SU1 este ángulo de fase creció al final del programa de envejecimiento.

Con el objetivo de obtener más evidencias experimentales que respalden los resultados anteriores también se realizaron mediciones de descargas parciales también en las barras de prueba del segundo grupo cuyos patrones en fase resuelta se recopilan en el Anexo I.

En la Figura 99 a la Figura 101 se muestra la variación de los parámetros  $q_m(\pm)$ ,  $q_{max}(\pm)$  y  $n(\pm)$  con el tiempo de envejecimiento.

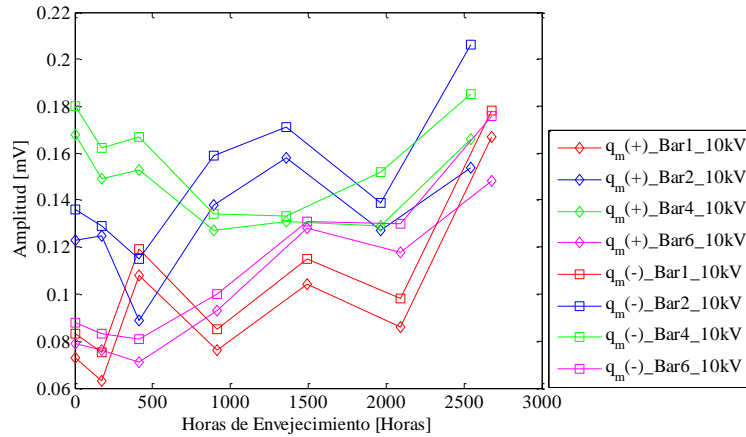


Figura 99. Evolución de la amplitud promedio  $q_m(\pm)$  con el tiempo de envejecimiento para las barras de prueba del segundo grupo.

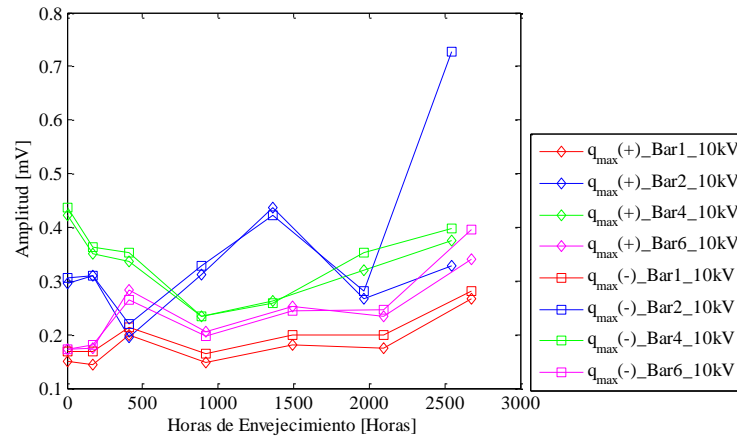


Figura 100. Evolución de la amplitud máxima  $q_{max}(\pm)$  con el tiempo de envejecimiento para las barras de prueba del segundo grupo.

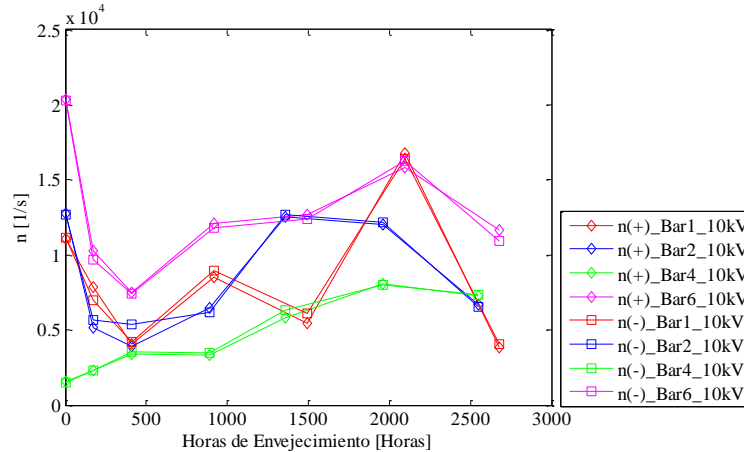


Figura 101. Evolución de la repetición  $n(\pm)$  con el tiempo de envejecimiento para las barras de prueba del segundo grupo.

A diferencia de las barras del primer grupo, las del segundo grupo, esto es las que se identifican con las etiquetas Bar1, Bar2, Bar4 y Bar6, iniciaron el programa de envejecimiento con un número de horas de servicio que ciertamente llevaron a condiciones iniciales diferentes para cada una de las barras a pesar de que todas ellas pertenecieron a la misma máquina.

Para estas barras, las descargas parciales fueron medidas en unidades de mV. Ya que no se buscaba comparar los resultados de las mediciones realizadas en ambos grupos de barras, no se realizó un procedimiento de calibración para convertir los valores en mV a valores en pC.

Guardando analogía entre la carga promedio y la carga máxima medida en pC en las barras del primer grupo, se conservó la nomenclatura  $q_m(\pm)$  y  $q_{\max}(\pm)$  para referirse a la amplitud promedio y a la amplitud máxima en mV respectivamente.

Los diferentes esfuerzos de envejecimiento aplicados a cada una de las barras así como su condición inicial repercutieron de forma particular en las magnitudes de las descargas parciales. El primer resultado que llama la atención es que en comparación con las otras barras la barra Bar4 presentó en promedio los mayores valores de  $q_m(\pm)$  y  $q_{\max}(\pm)$  los cuales decrecieron durante los cuatro ciclos en los que solo se aplicó esfuerzo eléctrico y después mostraron un incremento tras la aplicación de esfuerzos termoeléctricos. No obstante, los valores finales no difieren significativamente con los valores iniciales. Este comportamiento ante los esfuerzos eléctricos y termoeléctricos es de hecho esperado y está en línea con otros resultados en los que se afirma que el esfuerzo eléctrico es menos severo que los esfuerzos térmicos y que incluso afecta relativamente poco al aislamiento [180][171]. Sus mayores valores de  $q_m(\pm)$  y  $q_{\max}(\pm)$  bien podrían estar asociados a la condición inicial del aislamiento y al hecho de que esta barra fue producida por un fabricante distinto al de las otras barras. La marcada tendencia decreciente inicial de  $q_m(\pm)$  y  $q_{\max}(\pm)$ , no observada en ninguna de las otras barras de prueba lleva a pensar que la actividad misma de descargas parciales producida tendió a inhibir la ocurrencia de descargas parciales de mayor magnitud aunque no la formación de nuevas fuentes como lo indica el crecimiento consistente de  $n(\pm)$ .

La discusión en la sección 7.5 arrojó que las barras Bar1 y Bar6 resistieron los esfuerzos mecánicos impuestos por el ciclado térmico aplicado, manteniendo la adherencia entre las capas del aislamiento y por lo tanto los cambios en los valores de  $\Delta C$  y  $\Delta \tan \delta$  fueron de menor magnitud. En correspondencia se obtuvo que los valores de carga para estas dos barras fueron

los menores entre los casos de estudio. Particularmente, la carga medida para la barra Bar6 comenzó a crecer rápidamente luego del segundo ciclo de envejecimiento mientras que este crecimiento se dio a partir del quinto ciclo para la barra Bar1.

La barra Bar2 sometida a esfuerzo termoeléctrico durante la totalidad del programa de envejecimiento presentó una tendencia claramente creciente para los valores de  $q_m(\pm)$  y  $q_{max}(\pm)$  desde el segundo ciclo de envejecimiento. A pesar de que esta barra estuvo bajo esfuerzos termoeléctricos durante la mayor cantidad de tiempo, los valores de carga medidos no fueron significativamente mayores que aquellos medidos para las otras barras de estudio. Sobresale el hecho de que los valores de carga para la barra Bar2 estuvieron en general por encima de los valores obtenidos para las barras Bar1 y Bar6. En comparación con la barra Bar4 los valores de carga de la barra Bar2 fueron mayores solo a partir del tercer ciclo de envejecimiento e incluso fueron comparables al final del programa de envejecimiento. Entre las barras del mismo fabricante, Bar1, Bar2 y Bar6 el esfuerzo termoeléctrico llevó, como es de esperarse, a los mayores valores de descargas parciales. Sin embargo esto no es necesariamente cierto cuando se comparan barras de diferente fabricación. Prueba de ello es que durante los primeros ciclos de envejecimiento los valores de carga para la barra Bar4 sometida únicamente a esfuerzo eléctrico fueron mayores que los valores de carga para la barra Bar2 sometida a esfuerzos termoeléctricos.

Respecto a los valores de repetición  $n(\pm)$ , solo la barra Bar4 mostró un comportamiento consistentemente creciente, los demás casos de estudio mostraron una tendencia decreciente al inicio del programa de envejecimiento y creciente en adelante. El valor final de la repetición cayó pronunciadamente en relación con la tendencia.

Una vez evaluada la actividad de descargas parciales por medio de las cantidades básicas se obtuvieron los valores del ángulo de fase promedio de los patrones de fase resuelta. Este parámetro fue arrojado directamente por el software de control del equipo de medición utilizado.

En la Figura 102 se muestra la evolución con el tiempo de envejecimiento del ángulo de fase promedio  $\phi_{PD}(\pm)$  para cada semiciclo separadamente con lo cual las tendencias son apreciadas más claramente.

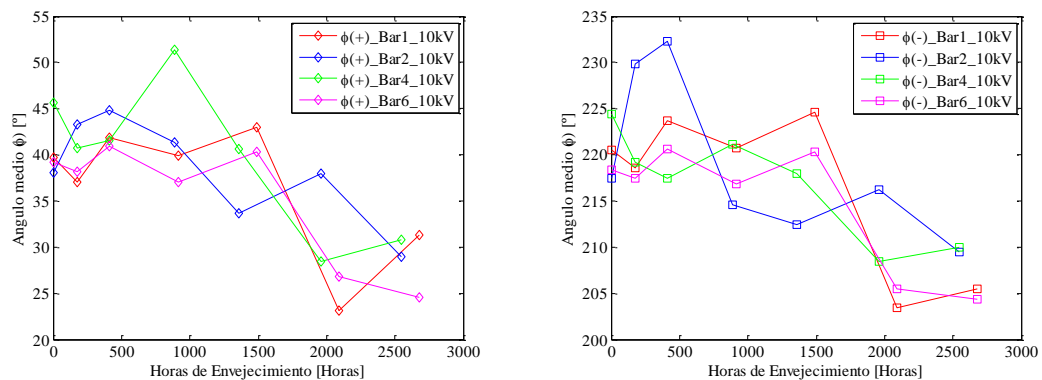


Figura 102. Evolución del ángulo medio de las descargas parciales  $\phi_{PD}(\pm)$  con el tiempo de envejecimiento para las barras de estudio Bar1, Bar2, Bar4 y Bar6.

Los valores del ángulo de fase promedio en la Figura 102 mostraron una tendencia decreciente con el tiempo de envejecimiento para ambos semiciclos del voltaje de prueba. El tipo de esfuerzos de envejecimiento aplicados a cada barra así como también la condición inicial de su aislamiento influyeron en la forma en la que se dio dicho decrecimiento.

En los casos de las barras Bar1 y Bar6 el ciclado térmico aplicado no logró producir grandes delaminaciones en el aislamiento y en consecuencia el ángulo de fase se mantuvo relativamente invariante durante el ciclado térmico. Luego de la aplicación de los esfuerzos termoeléctricos la degradación del aislamiento condujo a una fuerte reducción del ángulo de fase.

La barra Bar2 sometida a esfuerzo termoeléctrico mostró una disminución del ángulo de fase desde el segundo ciclo de envejecimiento.

Durante la aplicación de esfuerzo eléctrico a la barra Bar4 el ángulo de fase no presentó una tendencia claramente definida manteniéndose relativamente estable. Luego de aplicar el esfuerzo termoeléctrico si se dio una pronunciada reducción del ángulo de fase.

La comparación entre los resultados para ambos grupos de barras de prueba se resume en la Tabla 14.

Caso de estudio	$\varphi_{Hn(+)}$ Inicial [°]	$\varphi_{Hn(+)}$ Final [°]	$\varphi_{Hn(-)}$ Inicial [°]	$\varphi_{Hn(-)}$ Final [°]	Índice $K$
SU1	50.1	39.8	230.8	222.0	0.936
LU1	52.4	27.0	233.3	207.4	0.862
SU2	45.5	34.5	223.1	215.2	0.753
Bar4	45.6	30.8	224.4	210.0	0.622
Bar1	39.7	31.3	220.5	205.5	0.445
Bar2	38.1	29.0	217.5	209.5	0.429
Bar6	39.2	24.6	218.4	204.4	0.422

Tabla 14. Comparación entre el índice  $K$  y el ángulo de fase promedio  $\varphi_{Hn(\pm)}$  de las descargas parciales para ambos grupos de barras de prueba.

En general para ambos grupos de barras de prueba el ángulo de fase promedio disminuyó con el tiempo de envejecimiento y cuanto mayor fue esta reducción menor fue el valor del índice  $K$  calculado. Como resultado, el índice  $K$  puede interpretarse en términos del nivel de degradación y de la resistencia del sistema de aislamiento a la degradación como se discute en la siguiente sección.

## 7.5 ÍNDICE $K$ COMO INDICATIVO DE LA RESISTENCIA DEL AISLAMIENTO A LA DEGRADACIÓN

El avance de la degradación del aislamiento en términos de las descargas parciales significa incremento de la carga aparente transferida, de la repetición o intensidad o reducción del voltaje de inyección. En términos físicos implica cambios estructurales; crecimiento de las dimensiones de los defectos, pérdida de adherencia de las capas del aislamiento, etc. Algunos de estos parámetros pueden cambiar significativamente, otros en menor proporción o incluso otros podrían no cambiar en absoluto, sin que esto implique que el aislamiento no ha sufrido degradación.

En una condición de severa degradación, previo a la ruptura dieléctrica, la actividad de descargas parciales puede presentar un incremento pronunciado seguido de una caída abrupta. Esta caída se ha explicado como relacionada al incremento en la conductividad de la superficie de los defectos que evita que se establezca el voltaje necesario para ocasionar una descarga parcial [99][74]. Otros estudios por el contrario reportaron que los resultados de las mediciones de descargas parciales no mostraron un cambio evidente que alertara sobre la ruptura dieléctrica inminente [108][181].

Todas las variables involucradas en los mecanismos de descarga hacen que los valores de carga,  $q_m(\pm)$  y  $q_{\max}(\pm)$ , y repetición  $n(\pm)$  puedan presentar una gran dispersión. Por ende, no resulta sorprendente que ellas no se hayan correlacionado con el ángulo de fase de las descargas parciales.

Al observar el comportamiento del ángulo de fase promedio de las descargas parciales se encontró que su variación fue claramente decreciente cuanto mayor fue el progreso de degradación del aislamiento. La menor variabilidad del ángulo de fase promedio se correlacionó con los cambios en los valores de  $\Delta C$  y  $\Delta \tan \delta$ , hecho que fue aprovechado para la definición del índice  $K$ .

Frecuentemente los parámetros  $\Delta C$  y  $\Delta \tan \delta$  han sido utilizados individualmente para la evaluación de la degradación del aislamiento y se han propuesto criterios para sus valores límite de extensa aplicación en la industria. Al calcular el índice  $K$  se relacionaron ambos parámetros y esto suministró información adicional en relación a la actividad de descargas parciales y a su vez respecto a los mecanismos de degradación.

Para todos los casos de estudio, el valor del índice  $K$  fue menor a la unidad indicando que la actividad de descargas parciales siempre contribuyó más al valor de  $\Delta C$  que al de  $\Delta \tan \delta$ . En general, cuanto mayor es el valor de  $\Delta C$  respecto al valor de  $\Delta \tan \delta$  se puede inferir que los patrones en fase resuelta tienden fuertemente al cruce por cero del voltaje de prueba.

Los altos valores de capacitancia y del factor de disipación de las barras del segundo grupo determinaron que sus sistemas de aislamiento terminaron severamente degradados alcanzando el final de su vida útil. En correspondencia, los patrones en fase resuelta se desplazaron hasta la región de los 20-30°.

Las barras Bar1 y Bar6 a pesar de soportar relativamente bien los esfuerzos mecánicos y térmicos del ciclado térmico aplicado se degradaron fuertemente tras la aplicación de esfuerzos termoeléctricos y por ende el índice  $K$  calculado para ellas fue tan bajo como 0.445 y 0.422 respectivamente.

La barra Bar2, de la misma fabricación de las barras Bar1 y Bar6 y sometida a esfuerzos termoeléctricos tuvo una degradación similar a las dos barras anteriores si se considera que el desplazamiento de los patrones se dio aproximadamente en el mismo rango y que los valores del índice  $K$  estuvieron cercanos, 0.429.

La barra Bar4 de otro fabricante terminó con un índice  $K$  mayor (0.62), a pesar de que también fue sometida a los mismos esfuerzos termoeléctricos que las otras barras. Estos resultados estarían a favor de que si las barras son construidas con el mismo proceso en las mismas condiciones, entonces su resistencia a la degradación resultaría similar. Lo mismo no aplica completamente en ausencia de un curado total como el presentado en las barras del primer grupo donde se observó en algunos casos efectos benéficos hasta cierto límite de los esfuerzos aplicados.

El sistema de aislamiento de las barras del primer grupo terminó con valores de capacitancia y de factor de disipación posibles en máquinas en operación con una condición de degradación normal sin riesgo inminente de fallo. Para ellas el índice  $K$  fue mayor a 0.7 acercándose a la unidad y el ángulo de fase solo cayó hasta la región de los 30-40°.

También es interesante notar que cuando el índice  $K$  es cercano a la unidad el ángulo de fase promedio no necesariamente está fuertemente sesgado hacia la región de los 90° o pico del voltaje de prueba, en cambio puede situarse en un valores relativamente bajos como 50° como se aprecia en la Tabla 14 para la barra SU1.

Valores del índice  $K$  mayores a la unidad no fueron conseguidos en esta investigación. En principio ellos podrían lograrse en los casos donde los patrones en fase resuelta estén centrados con gran predominancia cerca del valor máximo del voltaje de prueba. Inclusiones gaseosas de tamaño muy reducido y por lo tanto con elevados voltajes de inyección de descarga y descargas superficiales, especialmente aquellas del tipo barra-barra tienen esta característica.

Cada par de datos de  $\Delta C$  y  $\Delta \tan \delta$  y el origen de coordenadas definen una línea recta a partir de la cual se puede calcular un índice  $K$ . En este caso las conclusiones anteriormente descritas aún son válidas.

Cuando no se dispone de datos tomados en tiempos diferentes, el índice  $K$  calculado a partir de una única medición puntual proporciona una primera aproximación respecto a las características de la actividad de descargas parciales.

Cuando se dispone de un conjunto de datos en el tiempo de  $\Delta C$  y  $\Delta \tan \delta$ , el índice  $K$  calculado a partir de la línea recta que ajusta la totalidad de los datos permite estimar el avance o evolución de la degradación del sistema de aislamiento estudiado.

No resulta difícil advertir que si los datos están altamente correlacionados entonces el índice  $K$  calculado individualmente para cada par de datos es aproximadamente igual. En este escenario, se interpreta que la degradación ha avanzado a un ritmo constante. Si no es posible ajustar una línea recta entonces el proceso de degradación podría estar siendo influenciado por múltiples factores.

La tendencia de los datos en el tiempo podría ajustarse por un polinomio de orden superior o no presentar correlación alguna. En el primer caso aún es posible estimar y/o evaluar la evolución de la degradación siguiendo la forma de la curva que ajusta los datos. Los resultados de la barra LU2 y de las barras sometidas a ciclado térmico sugieren que si no existe un desplazamiento de los patrones en fase resuelta, el comportamiento de los valores de  $\Delta C$  y  $\Delta \tan \delta$  no presenta una tendencia definida, es decir los datos no se correlacionan, no pudiéndose definir un índice  $K$  a partir de la tendencia. Éste solo podría ser calculado particularmente para cada valor punto. Con todo, la no correlación de los datos es en sí mismo un indicativo de que el proceso de degradación ha variado de forma independiente entre medición y medición.



## 8 EVALUACIÓN DEL AISLAMIENTO POR PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS

Este capítulo presentará los resultados de las mediciones de espectrometría FTIR y de análisis térmico DSC y TGA. Como se describió en la sección 6.2 no todas las barras de prueba fueron incluidas en el análisis fisicoquímico. De esta forma, el análisis de los resultados obtenidos de estas técnicas se enfocará en corroborar o complementar las conclusiones extraídas a partir de las mediciones dieléctricas. Adicionalmente, se incluirán comentarios respecto a lo apropiado de aplicar estas técnicas siguiendo la metodología de toma de muestras aplicada en esta investigación.

Todo el capítulo 5 estuvo dedicado a establecer los parámetros de la estructura molecular del aislamiento más propensos a experimentar cambios con el avance del envejecimiento. En este sentido fue inmediata la identificación de la resina como el elemento más débil y propenso a la degradación. En ella ocurren múltiples reacciones de degradación que actúan tanto individualmente como de forma sinérgica. La reticulación o entrecruzamiento de la estructura de la resina es una de las propiedades que más resulta afectada por dichas reacciones y por lo tanto la temperatura de transición vítrea  $T_g$  fue el parámetro observado como indicador de los cambios en el entrecruzamiento de la resina. Así mismo la alteración en la estructura molecular crea y destruye sitios reactivos y produce subproductos de degradación, cambios que fueron observados mediante termogramas de TGA y de los espectros de FTIR.

### 8.1 CAMBIOS EN LA TEMPERATURA DE TRANSICIÓN VÍTREA

Del primer grupo de barras se tomaron muestras del aislamiento de tres de ellas: barras STa, LU2 y LTA. De los termogramas de DSC obtenidos se determinaron los valores de  $T_g$  los cuales son mostrados en la Figura 103.

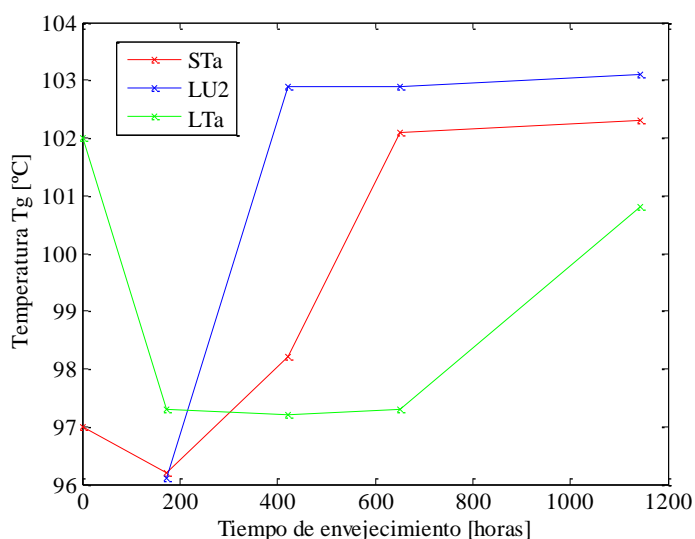


Figura 103. Evolución de la temperatura de transición vítrea para las barras de prueba STa, LU2 y LTA.

Con el fin de obtener una muestra representativa, cada muestra se cortó en trozos lo más pequeño posible formando varios grupos. Luego, trozos de cada grupo se combinaron formando nuevos grupos. Este proceso se repitió varias veces como medida para procurar

homogenizar la muestra. Teniendo en cuenta las restricciones en la cantidad de muestra disponible, se realizaron entre dos y tres mediciones por cada muestra. El promedio del total de las mediciones se tomó como el valor reportado en la Figura 103. Esta misma metodología fue aplicada en las barras del segundo grupo.

El comportamiento de los valores de  $T_g$  en la Figura 103 muestra una tendencia creciente para las barras LU2 y STa, mientras que la tendencia creciente en barra LTA fue destruida por un elevado valor inicial de  $102^{\circ}\text{C}$ . Tanto el valor esperado de la  $T_g$  como el comportamiento de las otras dos barras argumentan que este valor es inusualmente alto. Al ser el valor previo al envejecimiento, la resina está en una condición en la que todavía son posibles reacciones de postcurado. De ahí que se espere un valor de  $T_g$  menor al obtenido. El fabricante de las barras manifiesta que la  $T_g$  del sistema de aislamiento está entre  $93\text{-}98^{\circ}\text{C}$ . Así existe mayor probabilidad de que el alto valor de  $102^{\circ}\text{C}$  corresponda a un artificio de la medición y no necesariamente al nivel de entrecruzamiento de la resina. Omitiendo este valor entonces podría atribuirse una tendencia creciente para la barra LTA.

Validar la metodología de toma de muestras fue una de las cuestiones de mayor interés. Aparte de la homogeneidad de la muestra, el porcentaje de resina en la muestra total fue un factor altamente influyente en las mediciones. Aun en un escenario óptimo el contenido de resina en la muestra debería oscilar entre  $20\text{-}30\%$ , así cuanto mayor sea el tamaño de la muestra mayor será el contenido de resina disponible en el crisol del instrumento de DSC. Los termogramas para la barra STa antes y después del envejecimiento en la Figura 104 muestran que en el rango de prueba de  $0\text{-}200^{\circ}\text{C}$  solo tiene lugar predominantemente el proceso de transición vítrea de la resina, el cual se aprecia como un cambio en el flujo de calor apenas perceptible. La debilidad en la señal registrada por el equipo debería en principio corresponder a la poca cantidad de resina en la muestra. Sin embargo, el termograma correspondiente al final del envejecimiento muestra un cambio tipo escalón notoriamente más intenso que para antes del envejecimiento incluso cuando la cantidad de muestra fue significativamente menor: los pesos de las muestras fueron de  $10.2\text{mg}$  y  $2.1\text{mg}$  antes y después del envejecimiento.

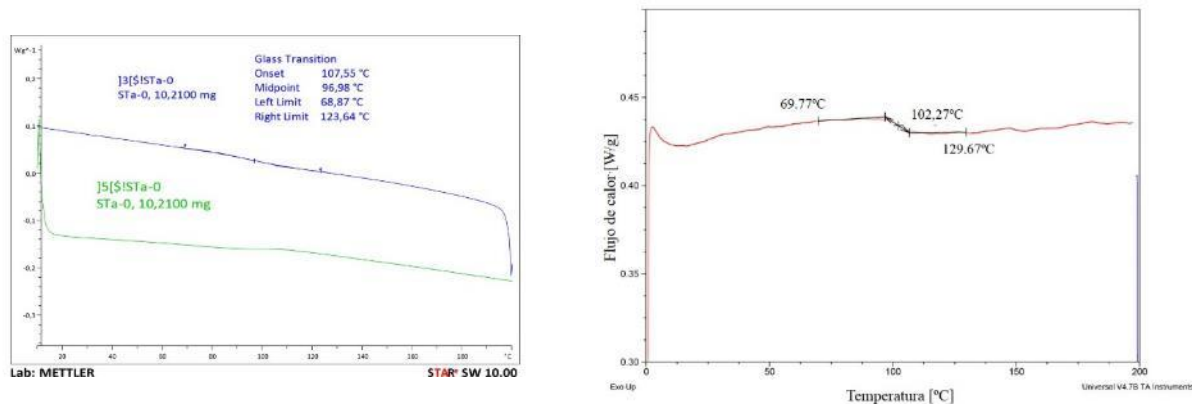


Figura 104. Termogramas antes y después del envejecimiento para la barra STa.

La intensidad de la señal registrada por el instrumento de DSC es directamente proporcional a la masa de la muestra y al adecuado contacto térmico entre ella y el fondo del crisol. Juzgando por los resultados, entre los parámetros el correcto contacto entre la masa y el crisol pareciera tener mayor impacto. Todas las mediciones se hicieron conservando todos los parámetros de configuración y en muestras obtenidas bajo el mismo procedimiento. La única diferencia radicó en el volumen de los crisoles, siendo mucho menor para el instrumento utilizado en la medición luego del envejecimiento. El menor volumen garantizó que la muestra

fuera presionada por la tapa contra el fondo del crisol posiblemente logrando un mejor contacto térmico. Esto no puede asegurarse con el otro instrumento. Pese a la diferencia en la intensidad de las señales, la transición vítrea se detectó marcando una tendencia razonable para el fenómeno estudiado.

Continuando con el análisis de los resultados, el incremento de la  $T_g$  podría darse ante dos escenarios: debido a reacciones de postcurado o por reacciones de degradación que terminaron en un incremento de la reticulación de la resina. Ambos escenarios son completamente posibles en las barras de estudio. Recurriendo a los resultados de respuesta dieléctrica para esta barra, la Figura 78 indica que las pérdidas disminuyen a lo largo del programa de envejecimiento hasta que al final la tendencia se invierte pero sin llegar a superar el valor inicial. Al observar el comportamiento del parámetro  $m$ , éste incluso no supera el valor inicial para ningún voltaje de prueba. Complementando este comportamiento con la tendencia creciente de la  $T_g$  se podría concluir que reacciones de postcurado tuvieron lugar en la resina durante una gran parte del envejecimiento hasta que los grupos reactivos epóxidos se agotaron. A partir de este punto, luego del cuarto ciclo, las reacciones de degradación comienzan a predominar sobre las de postcurado. El valor de  $T_g$  se mantuvo estable desde el tercer ciclo de envejecimiento lo cual podría interpretarse como que si bien cesaron las reacciones de postcurado la degradación del aislamiento aun no alcanzó niveles que modificaran drásticamente el entrecruzamiento de la resina. El hecho de que el valor final del parámetro  $m$  medido a 10kV no superara su valor inicial demuestra un nivel moderado de inclusiones gaseosas en el interior del aislamiento, aportando argumentos a favor de un moderado nivel de degradación del aislamiento al termino del programa de envejecimiento.

En la barra LU2, el valor de la  $T_g$  creció inmediatamente después del primer ciclo de envejecimiento y se mantuvo casi invariante hasta el final del programa de envejecimiento. El elevado esfuerzo termoeléctrico al que fue sometida esta barra a las pocas horas del inicio del programa de envejecimiento agotó las reacciones de postcurado rápidamente. Después del crecimiento inicial llama la atención el poco cambio en el valor de la  $T_g$  lo que hace complejo discernir la causa de la delaminación total de su aislamiento. La pérdida de adherencia entre las capas del aislamiento la mayoría de veces es atribuida en la literatura a la degradación de la resina. Sin embargo este no pareciera ser el caso pues en lugar de una marcada reducción en la  $T_g$ , ésta se mantuvo relativamente constante. Entonces basados únicamente en el cambio en la temperatura de transición vítrea no puede atribuirse la formación de estas grandes delaminaciones a la degradación por escisión de cadena de la resina. Una inspección visual de la barra justo después de la falla (cuando se produce la delaminación sin ruptura dieléctrica) mostró un aumento significativo del volumen manifestado como “hinchamientos” en la sección rectangular de la zona de ranura. El incremento en el volumen conllevó a la separación de las capas del aislamiento (delaminación) pero ciertamente no afectó la habilidad de la resina para continuar su entrecruzamiento. La volatilización de subproductos de degradación podría ser responsable del aumento en el volumen, pero la existencia de ellos implica reacciones de escisión de cadena y por lo tanto una reducción de la  $T_g$ , la cual no fue observada. Teniendo en cuenta la susceptibilidad de la resina de experimentar postcurado entonces podría pensarse en especies de bajo peso molecular disponibles que pudieron volatilizarse. La permanencia casi constante en el tiempo de la capacitancia, del factor de disipación y del ángulo promedio de los patrones en fase resuelta de las descargas parciales argumenta que el programa de envejecimiento no provocó mucha más degradación más allá de la ya presente en el aislamiento. Incluso hasta el final del programa de envejecimiento los valores de repetición y carga de las descargas parciales para la barra LU2 no fueron mayores

que los valores registrados para las demás barras de prueba evidentemente en mejores condiciones. Por lo tanto solo una fracción del volumen de las delaminaciones está siendo efectivamente cortocircuitada por las descargas parciales. Finalmente, el aumento de la  $T_g$  debería acarrear una disminución en la constante dieléctrica del aislamiento lo cual está en contravía del aumento observado en la capacitancia inmediatamente después del primer ciclo de envejecimiento.

En cuanto a la barra LTA sometida solo a esfuerzo térmico, la tendencia creciente de la  $T_g$  tuvo lugar solo hasta después del tercer ciclo de envejecimiento, es decir en un tiempo mayor que las otras dos barras sometidas a esfuerzo termoeléctrico.

En las barras de segundo grupos, es decir en las barras Bar1, Bar2, Bar4 y Bar6 también se realizaron ensayos de DSC periódicamente durante el programa de envejecimiento. Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 15.

Horas de envejecimiento	Bar1	Bar2	Bar4	Bar6
0	106.7	108.9	--	111.7
410	101.5	--	105.2	112.0
916	96.9	--	--	115.0
1491	102.0	109.5	--	111.7
2093	--	108.5	96.9	108.6
2678	94.3	108.3	97.0	108.3

Tabla 15. Valores de  $T_g$  medidos en las barras Bar1, Bar2, Bar4 y Bar6.

Lo primero que se puede concluir sobre los datos anteriores es que a diferencia de los resultados de la Figura 103, los valores de  $T_g$  para las barras del segundo grupo no presentaron una tendencia consistente para ninguna de ellas.

En la mayoría de los casos la señal evolucionó presentando cambios muy pequeños y en otros no presentó ningún cambio en absoluto.

A forma de ejemplo, la Figura 105 muestra los termogramas iniciales para la barra Bar1 y para la barra Bar4.

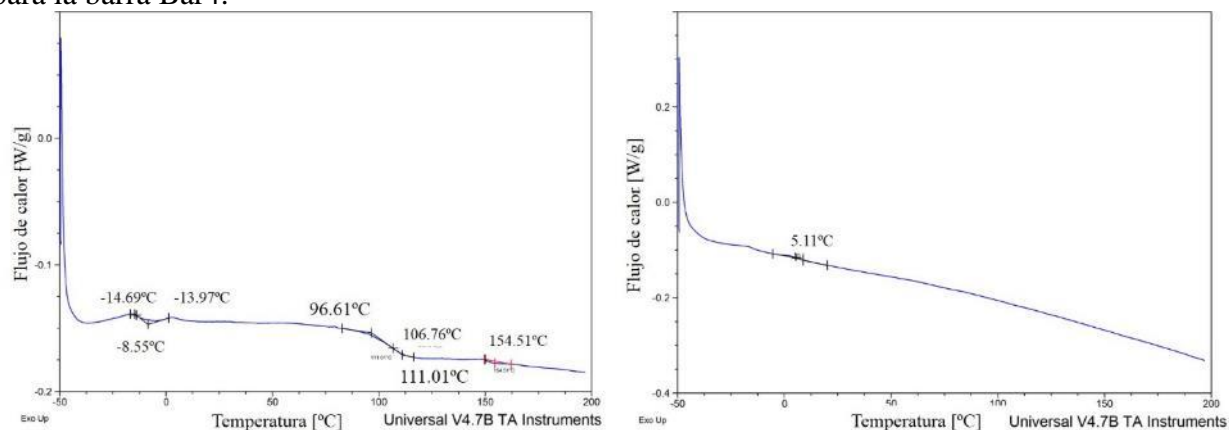


Figura 105. Termogramas iniciales para las parras Bar1 y Bar4.

En el termograma de la barra Bar1 el cambio escalón se distingue bastante bien alrededor de 106°C, lo cual está en línea con lo esperado. En la barra Bar4, la señal de flujo de calor en la región de los 100°C no presentó ninguna variación perceptible.

La alta dispersión de los datos fue atribuida a la señal del termograma siendo muy débil. Por su parte, se descartó la metodología para la toma de muestras como causante de la dispersión de los datos ya que ésta fue la misma para ambos grupos de barras de prueba, solo diferenciándose en el instrumento de medición utilizado.

Un hecho interesante es que el peso de la muestra para ambas barras fue comparable y aun así en uno de los casos la  $T_g$  fue fácilmente determinada pero en el otro caso no fue posible. Los parámetros de configuración en todas las mediciones se mantuvieron uniformes y se ajustaron a lo reportado en la literatura. De este modo el error debido al proceso de medición se considera reducido al máximo. Con todo, los resultados de la Tabla 15 todavía proporcionan indicios de una disminución de la temperatura de transición vítrea en el segundo grupo de barras acorde con lo esperado. También se observó un comportamiento casi constante para la barra Bar2 y en ningún caso valores extraños o muy por fuera de una tendencia razonable. El aislamiento de estas barras a parte del envejecimiento acelerado al que fue sometido estuvo en servicio por años por lo que no hay lugar para un aumento de la  $T_g$  como se obtuvo en las barras del primer grupo. Dadas las condiciones, es muy probable que la reducción de la temperatura de transición vítrea observada se presente como consecuencia de la degradación de la resina por reacciones de escisión de cadena. Una conclusión adicional a partir de las observaciones es que el envejecimiento por medio de horno como en las barras del primer grupo podría contribuir a obtener mejores resultados con la metodología de remoción de muestras aplicada en esta investigación ya que la superficie de las barras nunca está expuesta directamente a la fuente de temperatura donde pudieran localizarse sitios de elevada temperatura.

## 8.2 CAMBIOS EN LOS PERFILES DE PÉRDIDA DE MASA

Para complementar las mediciones de DSC presentadas en la sección anterior, se corrieron ensayos de termogravimetría TGA en cada una de las barras del segundo grupo. De hecho el instrumento de medición utilizado TA SDT Q600 permitió realizar ambos análisis de forma simultánea, por lo tanto el segundo ciclo de calentamiento en el programa de temperatura aplicado se llevó por encima de los 800°C para garantizar la descomposición de la resina. La utilización de esta técnica tuvo dos propósitos. El primero de ellos consistió en la aplicación de la técnica para validar la metodología de toma de muestras en términos de su contenido de resina. El segundo objetivo fue buscar indicaciones de cambios en la estructura de la resina reflejados en los perfiles de pérdida de masa.

A partir de los termogramas obtenidos la primera característica que sobresale es que existe una pérdida de masa que se da en cada muestra cerca de los 400°C. Esto confirma que las muestras de la forma obtenida efectivamente contienen resina. Previo a este resultado, se consideró como la causa más probable para la dificultad de obtener mediciones consistentes de  $T_g$  la posibilidad de que las muestras removidas según la metodología implementada no contuvieran resina. La pérdida de masa medida en el rango entre 200-600°C en la Figura 106 confirmó que el contenido de resina en las muestras estuvo en promedio en 35%.

Los resultados hasta este punto llevan a la conclusión que el hecho de que la muestra analizada sea un material compuesto y no resina 100% afecta en mayor proporción la capacidad de detectar la temperatura  $T_g$  que la cantidad misma de resina en la muestra.

La pérdida de masa  $\Delta M$  a lo largo del programa de envejecimiento en el caso particular de la barra Bar4 se mantuvo sobresalientemente estable alrededor de 12.8%. Para la barra Bar1 en cambio se registró una tendencia creciente. Considerando que cada valor registrado

corresponde como mínimo al promedio de dos mediciones y que la extracción de las muestra a lo largo de todo el programa de envejecimiento abarcó entre 40 y 60 cm a lo largo de la zona recta de la barra, entonces existen razones para pensar que la metodología de remoción de muestras implementada produjo muestras relativamente homogéneas respecto al contenido de resina. El comportamiento creciente registrado en la barra Bar1 estaría a favor de la imposibilidad de controlar completamente el contenido de resina en las muestras.

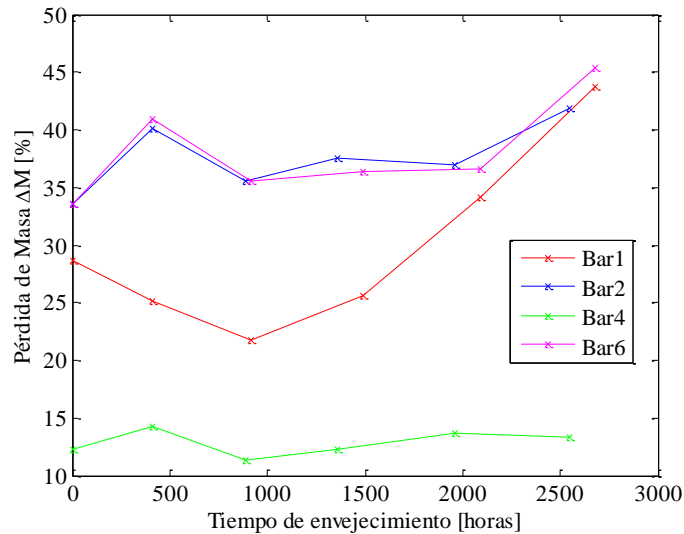


Figura 106. Evolución de la pérdida de masa con el tiempo de envejecimiento.

Si un análisis de tendencia de los valores de pérdida de masa ha de ser llevado a cabo es preciso contar con suficientes datos como para implementar un análisis estadístico. Caso contrario, solo podrán ser observados cambios de gran magnitud. Adicionalmente los resultados de la Figura 106 todavía permiten extraer información tal como algunas diferencias entre los sistemas de aislamiento de las barras de prueba. Por ejemplo, nótese que el contenido de resina para las muestras de la barra Bar4 fue siempre menor que para las demás barras de estudio. La barra Bar2 la cual fue sometida a esfuerzos termoeléctricos durante todo el programa de envejecimiento no presentó una marcada disminución en el contenido de resina, entonces no existen evidencias para atribuir el menor contenido de resina en la barra Bar4 al efecto de la degradación sobre su aislamiento. El hecho de que la barra Bar4 sea de diferente fabricante se convierte en la explicación más razonable pues resulta altamente improbable que los valores de pérdida de masa se hayan mantenido así de constantes producto de la casualidad.

En la Figura 107 se comparan los perfiles de pérdida de masa para las barras Bar2 y Bar4.

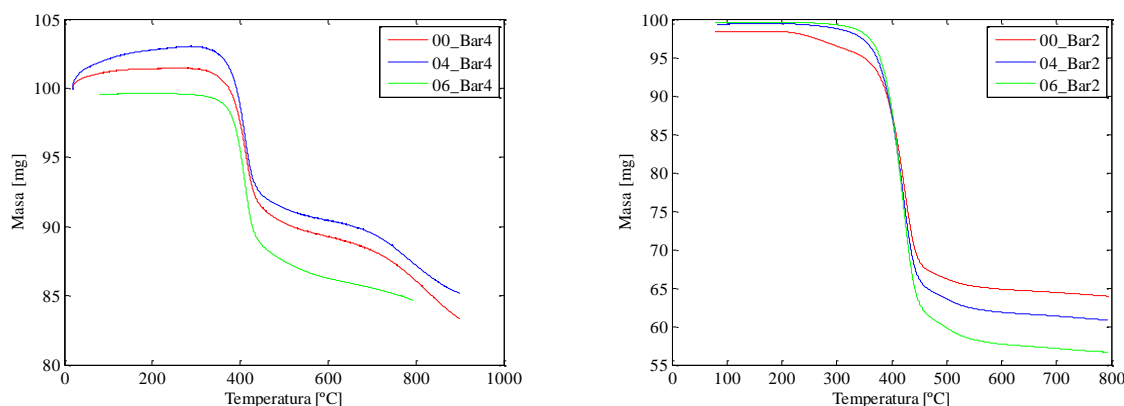
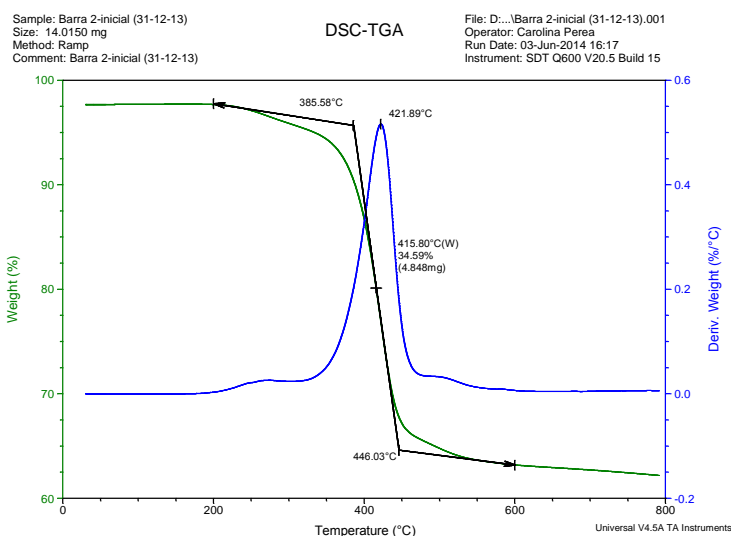


Figura 107. Perfiles de pérdida de masa para las barras Bar2 y Bar4.

Todas las muestras se caracterizaron porque desde el inicio hasta el final del programa de envejecimiento se detectó un único proceso de descomposición. El programa de temperatura de calentamiento/enfriamiento/calentamiento aplicado como acondicionamiento de las muestras también tuvo efecto en la medición de los perfiles de pérdida de masa. En el primer ciclo de calentamiento (desde 30°C hasta 250°C) la masa de la muestra tendió a crecer pero en el segundo ciclo ya no se observó dicho crecimiento. Este comportamiento se ilustra en la Figura 107 para la barra Bar4 donde a propósito se aplicó un único ciclo de calentamiento (desde 30°C hasta 800°C) a las muestras en las mediciones iniciales y en el cuarto ciclo de envejecimiento. Nótese que los termogramas muestran un incremento de la masa hasta antes de 400°C, pero ninguno para el termograma al final de programa de envejecimiento en el cual la muestra si fue sometida a acondicionamiento.

Las temperaturas que marcan el proceso de pérdida de masa también fueron observadas como posibles indicadores de la degradación en la resina. Como se muestra en la Figura 108 el proceso de pérdida de masa se ajustó mediante líneas rectas cuyas intercepciones definieron la temperatura inicial  $T_i$  y la temperatura final  $T_f$ . El punto medio del rango entre  $T_i$  y  $T_f$  definió la temperatura  $T_{avg}$  y el punto máximo de la curva de DTA se tomó como la temperatura  $T_{max}$ .


 Figura 108. Definición de las temperaturas  $T_i$ ,  $T_f$ ,  $T_{avg}$  y  $T_{max}$  que marcan el proceso de pérdida de masa en las muestras.

Estas temperaturas se graficaron en la Figura 109 como función del tiempo de envejecimiento.

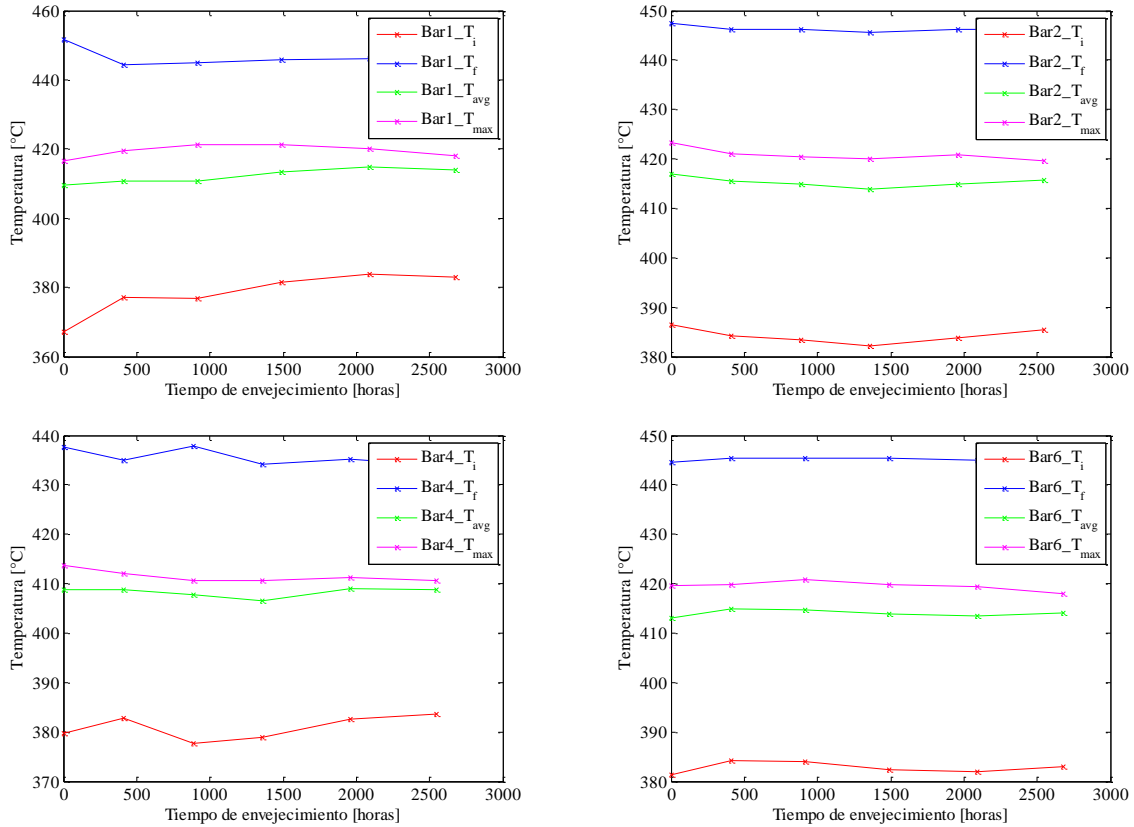


Figura 109. Cambios en las temperaturas  $T_i$ ,  $T_f$ ,  $T_{avg}$  y  $T_{max}$  con el tiempo de envejecimiento.

Mientras que el valor medido de pérdida de masa dependió hasta cierto límite del tamaño de cada muestra, los valores de las temperaturas que enmarcan esta pérdida dependen de la estructura de la resina más que de su tamaño. El comportamiento de las temperaturas se concluyó como constante. Considerando que los dos últimos ciclos de envejecimiento termoeléctrico fueron lo suficientemente severos como para incrementar los parámetros de pérdidas dieléctricas muy por encima de cualquier valor posible en la práctica, entonces así mismo es de esperar una reducción en las temperaturas a las cuales tiene lugar la pérdida de masa. En los casos de las barras Bar1 y Bar6 los valores de capacitancia tip-up alcanzaron valores tan altos como 10% y 20% respectivamente al final del programa de envejecimiento y aun así sus temperaturas características no fueron significativamente diferentes respecto a las barras Bar2 y Bar4 que obtuvieron menores valores de capacitancia tip-up. Permitiendo un promedio de las temperaturas características medidas en el tiempo como se muestra en la Figura 110, es evidente que no existe diferencia significativa en el proceso de pérdida de masa entre las barras del segundo grupo pese a sus distintos niveles de degradación.



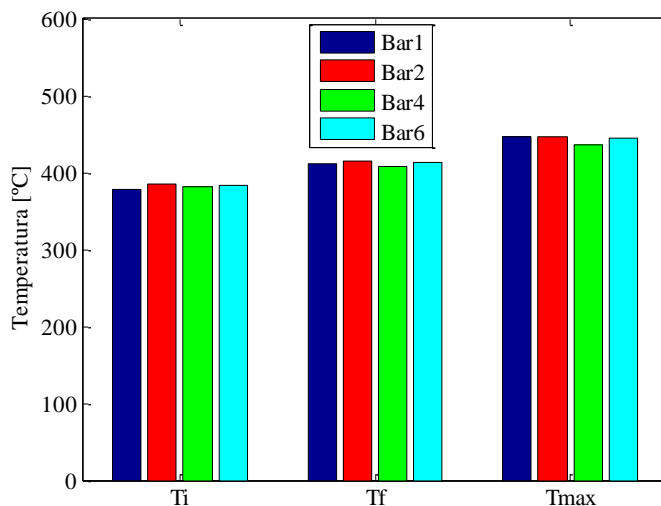


Figura 110. Promedio de las temperaturas características del proceso de pérdida de masa para las barras de prueba del segundo grupo.

Como se mencionó más arriba los termogramas se caracterizaron por un único proceso de pérdida de masa. Se tiene evidencia experimental [147][153][154] que en los termogramas pueden aparecer entre dos y tres procesos de descomposición ante dos condiciones diferentes de la resina. La primera es cuando la resina está nueva y la segunda cuando existe un nivel de degradación. En el primer caso es viable pensar que los monómeros aun sin reaccionar en la resina y otros compuestos volátiles son responsables de los procesos de descomposición observados. En el segundo caso es necesario reacciones de escisión de cadena y/o oxidación que lleven a la formación de productos con diferente peso molecular. La extensión (intensidad) de estas reacciones parecen ser un factor altamente influyente puesto que como se deriva de [154] y de los resultados aquí la degradación del aislamiento no necesariamente implica la detección de más de un proceso de degradación. Si se quiere, la aparición de más de un proceso de descomposición en muestras que hayan experimentado esfuerzos de envejecimiento podría tomarse como un indicativo de que la degradación en la resina se ha intensificado. Así mismo comparar los resultados de [154] con los de esta investigación soportaría la conclusión de que la estructura global de la resina en el sistema de aislamiento se ha mantenido hasta cierto punto controlada ya que la temperatura  $T_{max}$  no cambió pronunciadamente entre el inicio y el final del programa de envejecimiento.

### 8.3 CAMBIOS ESTRUCTURALES EN LA RESINA

Se realizaron ensayos de espectroscopia infrarroja FTIR como tercera herramienta para la detección de cambios en la resina provocados por el programa de envejecimiento. La técnica ATR fue utilizada para la adquisición de los espectros infrarrojos, aunque también se realizaron ensayos mediante la técnica KBr. La similitud entre los resultados y la necesidad de menor preparación de las muestras determinaron la técnica ATR como el método implementado para todas las mediciones.

Al igual que con el análisis térmico, la técnica de espectrometría también estuvo influenciada por el hecho de que la muestra se tratara de un material compuesto y no de un único material. Llevar las muestras al instrumento de FTIR en la forma de compuestos

significó que los espectros obtenidos combinarían las contribuciones tanto de la resina como de la mica y el vidrio. Sin embargo se puede obtener ventaja de que en el rango del infrarrojo medio,  $400\text{-}4000\text{cm}^{-1}$ , los espectros de la mica y el vidrio presentan solo dos picos significativos en los números de onda  $3500\text{cm}^{-1}$  y  $900\text{cm}^{-1}$ . Así los picos observados en el resto del rango pueden ser atribuidos a la resina.

Previo a la realización de las mediciones se prepararon especialmente dos muestras en forma de polvo con las cuales se hicieron pastillas de KBr. Para estas muestras en lugar de remover secciones rectangulares de la primera capa del aislamiento, se obtuvo un polvo fino. La primera muestra fue extraída de la superficie mientras que la otra fue obtenida de varias capas por debajo de la superficie. La barra utilizada no perteneció a las barras de prueba, por lo tanto fue posible destruir el aislamiento para extraer la muestra más profunda. La preparación de la muestra en forma de polvo fue un intento por extraer la resina del compuesto y así simplificar el análisis. Al frotar la punta del escarpelo sobre la superficie del aislamiento se desprendió un fino polvo del cual se sospechó correspondía a la resina.

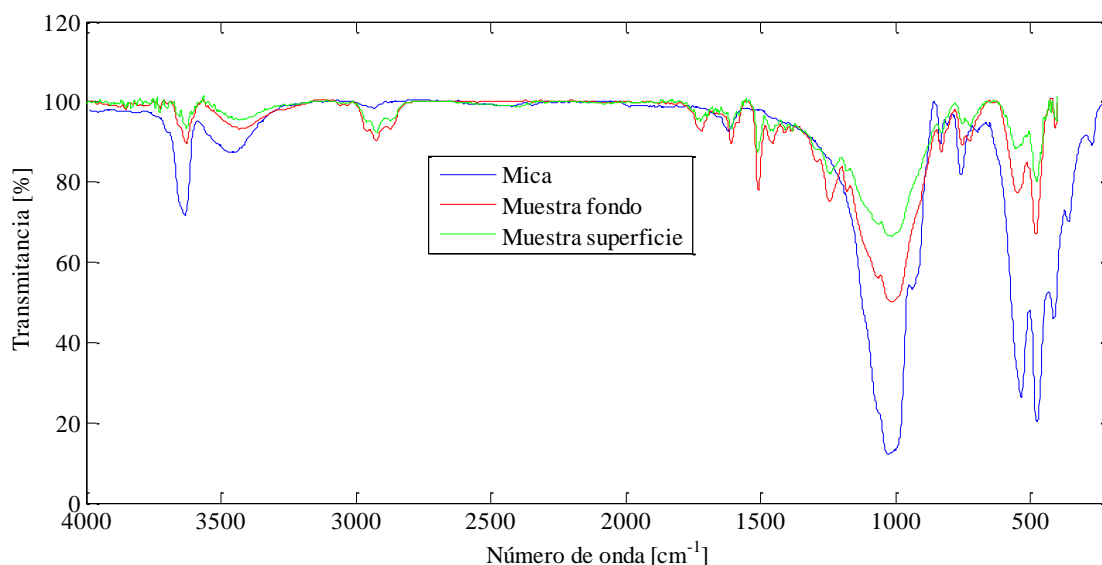


Figura 111. Espectro infrarrojo FTIR KBr de muestras del aislamiento preparadas en forma de polvo.

Los espectros obtenidos para ambas muestras en polvo se muestran en la Figura 111 donde además se ha superpuesto el espectro correspondiente a la mica. Las fuertes bandas de absorción en la región entre  $1000$  y  $900\text{cm}^{-1}$  fueron prueba suficiente de que la preparación de la muestra en polvo no logró separar la resina completamente del compuesto. En virtud de que los espectros para las muestras así preparadas no representó ventajas significativas entonces se descartó preparar en adelante las muestras en polvo y en cambio se decidió utilizar la técnica ATR la cual prácticamente no requirió preparación de la muestra.

Llevar las muestras directamente al instrumento de FTIR ATR supone analizar un compuesto del que se requiere conocer la concentración de cada componente si se ha de llevar a cabo un estudio cuantitativo. Nótese que en los espectros de las muestras del aislamiento en la Figura 111 aparecen las mismas bandas de absorción con magnitudes ciertamente diferentes. Debido a que no se puede garantizar que la concentración de resina en la pastilla de KBr haya sido la misma para ambas muestras entonces no es posible establecer comparaciones basados en la intensidad absoluta de las bandas de absorción. Aunque se considere completamente impregnadas las capas del aislamiento, tampoco se pueden considerarse como

cubiertas por una capa uniforme de resina, lo que constituye para la técnica ATR el mismo problema de concentración experimentado con la técnica KBr.

Pese a que no es posible conocer previamente la concentración de cada componente en la muestra se aplicó el método del *estándar interno* para lograr la comparación en el tiempo entre los espectros de cada muestra. Este método consistió en cuantificar la intensidad de las bandas de absorción de interés relativamente a otra banda que se tomó como referencia eliminando el problema de la concentración. Así entonces, no se analiza la intensidad de la absorbancia o de la transmitancia para cada muestra para cada ciclo de envejecimiento, sino en cambio la relación  $T_{IR}/T_{IR_{ref}}$  que define el cociente entre la transmitancia de la banda de absorción detectada  $T_{IR}$  y la transmitancia de una cierta banda de absorción de referencia  $T_{IR_{ref}}$ .

Cuanta más resina exista en las muestras más intensas serán las bandas de absorción detectadas. Si se corren varias mediciones en la misma muestra la intensidad de las bandas de absorción cambiará en función de la concentración puntual del sitio de donde se midió el espectro infrarrojo, pero como la condición de la resina es la misma entonces el cambio relativo entre las bandas guardará la misma proporción en cada medición. De esta forma se compensa la variación en la concentración de la resina y es posible detectar modificaciones en la estructura de la resina con el tiempo de envejecimiento.

### 8.3.1 MÉTODO DEL ESTÁNDAR INTERNO

Para aplicar el método del estándar interno todos los espectros debieron estar previamente corregidos por línea base, corrección que se realizó por medio del software Essential eFTIR. Los espectros iniciales (previo al envejecimiento) de la barra STa, cuatro en total dos por cada cara de la muestra, se muestran en la Figura 112.

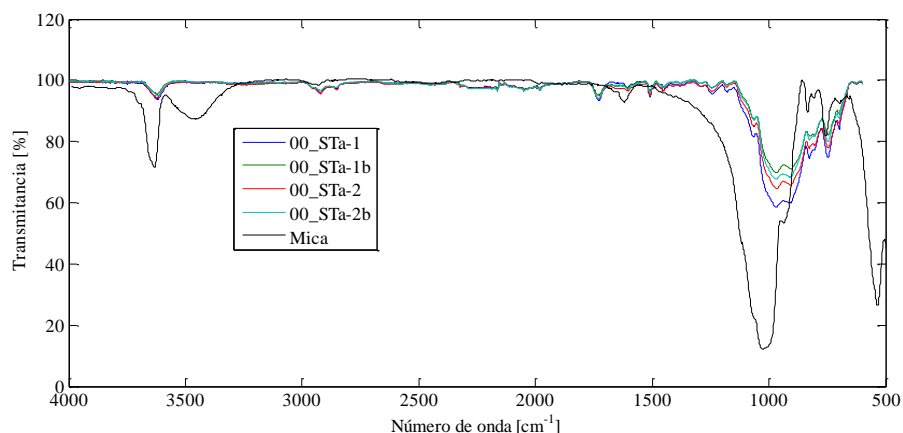


Figura 112. Espectros FTIR iniciales para la barra STa.

Particularmente todos los espectros se superponen entre sí coincidiendo mejor en la región entre  $4000\text{-}1500\text{cm}^{-1}$ . En la región de los menores números de onda existen marcadas diferencias en la intensidad de las bandas de absorción.

La banda de absorción de referencia se tomó como la correspondiente a la banda  $1509\text{cm}^{-1}$  ya que ésta no aparece en el espectro de la mica. Seguidamente, la intensidad de la transmitancia de las demás bandas de absorción (entre  $1509\text{-}4000\text{cm}^{-1}$ ) se dividió por la intensidad de la banda de referencia.

Las absorciones de los grupos epóxido en la región de los  $911\text{cm}^{-1}$  también fueron de gran interés por su relación con las reacciones de postcurado posibles en las barras de prueba del primer grupo. En razón a que esta banda está solapada con la gran absorción de la mica en esta región, entonces se utilizó la banda  $746\text{cm}^{-1}$  como una nueva banda de referencia para analizar el comportamiento de la banda  $911\text{cm}^{-1}$ .

La relación entre las bandas de absorción respecto a las bandas de referencia para las muestras iniciales de la barra STa se muestra en el diagrama de barras de la Figura 113. Contrario a las variaciones observadas en los espectros mostrados en la Figura 112, las relaciones entre las bandas de absorción se mantuvieron prácticamente constantes para cada una de las muestras iniciales de la barra STa. Se tomó 5% como máxima variación permitida y como valor representativo el valor promedio para cada una de las bandas de absorción. Los resultados del método del estándar interno reportados en [161] para muestras de solo resina cuidadosamente preparadas arrojaron variaciones promedio de 2.5% con máximos de 6.3% por lo tanto el límite de 5% resulta razonable.

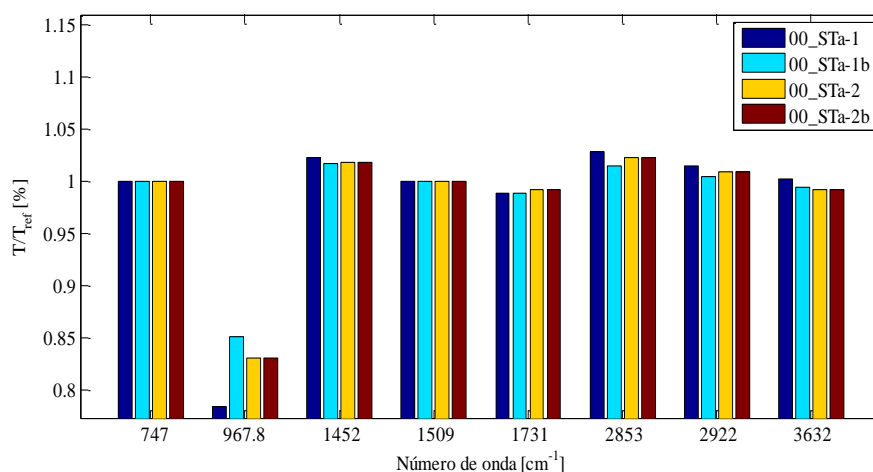


Figura 113. Método del estándar interno aplicado a los espectros iniciales de la barra STa.

**Reacciones de Postcurado de la resina de impregnación.** Hasta este punto los resultados experimentales han apuntado a que las barras de prueba del primer grupo fueron susceptibles a reacciones de postcurado activadas por los esfuerzos térmicos a los que fueron sometidas. El fenómeno de polimerización en las resinas termoformadas y la necesidad de un proceso de fabricación técnica y económicamente eficiente son responsables de que la resina epóxica del sistema de aislamiento no esté completamente curada previo a la entrada en funcionamiento de la máquina. Esto tiene mucho que ver con la forma en la que se obtienen las resinas termoendurecidas. Contrario a lo que sucede en las resinas termoplásticas que se obtienen por reacciones de condensación en la que un monómero se une a otro de a uno por vez, en las resinas epoxi la polimerización se da por medio de reacciones en etapas. De esta forma hasta llegar a la vitrificación el peso molecular se incrementa rápidamente de forma no gradual hasta que se obtiene una estructura de red principal desordenada con otras moléculas (monómeros) de menor peso molecular por todas partes. Entonces la resina se endurece y las reacciones de polimerización cesan abruptamente. Uno podría pensar que la velocidad de las reacciones cae a causa de la red misma que se opone al libre movimiento y desplazamiento de los monómeros reactivos. En la práctica alcanzar ciento por ciento de la conversión de la resina involucraría mayores tiempos de procesamiento elevando el costo de producción. Por tal motivo, los tiempos y temperaturas de curado se eligen tal que se optimice el tiempo y los recursos. La

terminación del curado se consigue en las horas posteriores a la puesta en marcha de la máquina por medio de la temperatura de operación.

Como se describió en el capítulo 5, el agotamiento de los grupos epóxidos en la región de los  $911\text{cm}^{-1}$  en la resina es la primera indicación del avance de las reacciones de postcurado. La dificultad para establecer los cambios en la banda de los epóxidos es que ella se solapa con las absorciones de la mica en esta misma región. Para superar esta limitación entonces se partió de la tesis de que la estructura cristalina de la mica es estable en el rango de la temperatura de envejecimiento aplicado. La relación entre las bandas  $911/746\text{cm}^{-1}$  en la mica debería permanecer constante a lo largo de todo el programa de envejecimiento y por lo tanto cualquier variación es atribuible a cambios en la resina. La Figura 115 muestra como ejemplo los espectros infrarrojos correspondientes a la barra STa donde destaca la intensidad y tendencia de las bandas de absorción por debajo de los  $1000\text{cm}^{-1}$ .

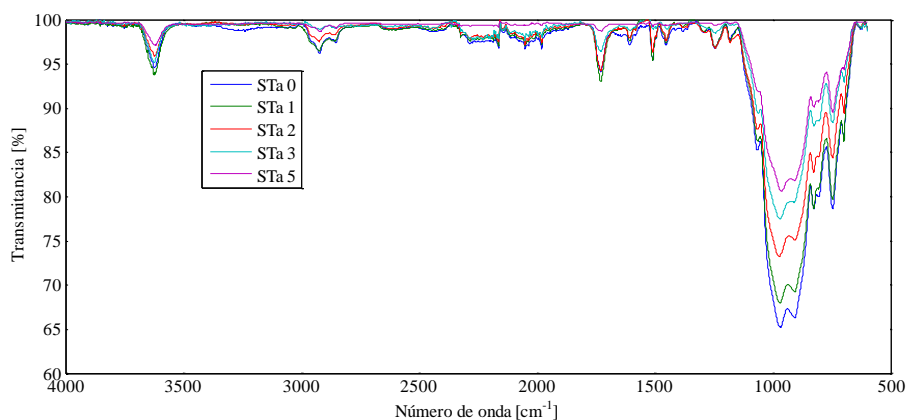


Figura 114. Espectros FTIR para la barra STa.

En adelante no se trabajará con los espectros FTIR de las demás barras de estudio sino con los resultados correspondientes al método del estándar interno como sigue a continuación iniciado con los resultados de la barra STa.

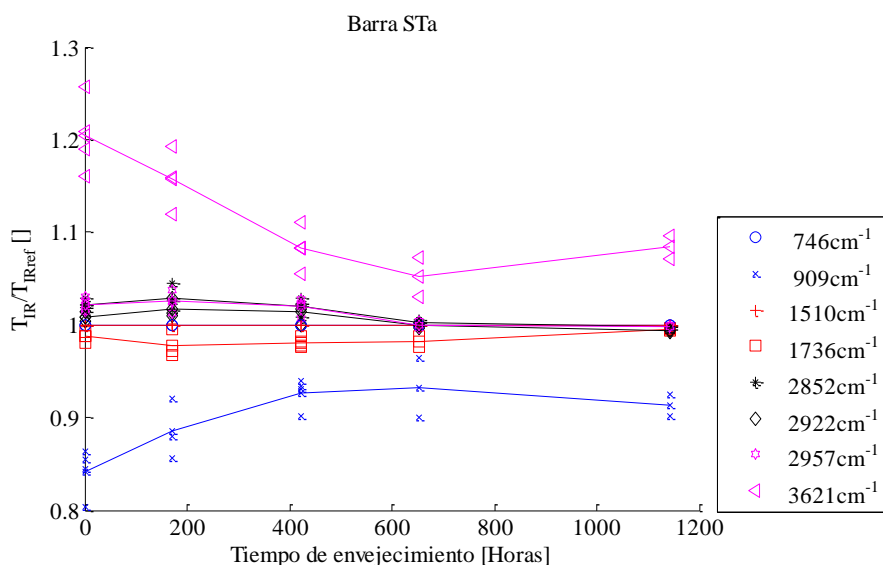


Figura 115. Cambio en las bandas de absorción con el tiempo de envejecimiento para la barra STa.

A partir de la Figura 115 se reconoce una tendencia creciente en la magnitud relativa de la banda de absorción  $909\text{cm}^{-1}$  asociada al agotamiento de los grupos epóxidos aun presentes en la resina. Este incremento a su vez es acompañado por una reducción en la amplitud relativa de la banda de los hidroxilos  $3621\text{cm}^{-1}$  presente en la mica y la resina que indica incremento de los grupos OH.

La identificación de las bandas de absorción detectadas se realizó comparándolas con los resultados reportados en la bibliografía. Específicamente para ello se implementó una interfaz gráfica en JAVA por medio de la cual el usuario selecciona un rango de números de onda de interés y la aplicación arroja las bandas de absorción en dicho rango junto con su identificación y comentarios extraídos de los artículos fuente. La aplicación consulta las referencias bibliográficas que se citaron en el capítulo 5 y que definieron el estado del arte de la evaluación de sistemas de aislamiento de máquinas rotativas por medio de espectrometría infrarroja. En el anexo II pueden consultarse las bandas de absorción reportadas por cada una de las fuentes bibliográficas. Una captura de la interfaz se muestra en la Figura 116.

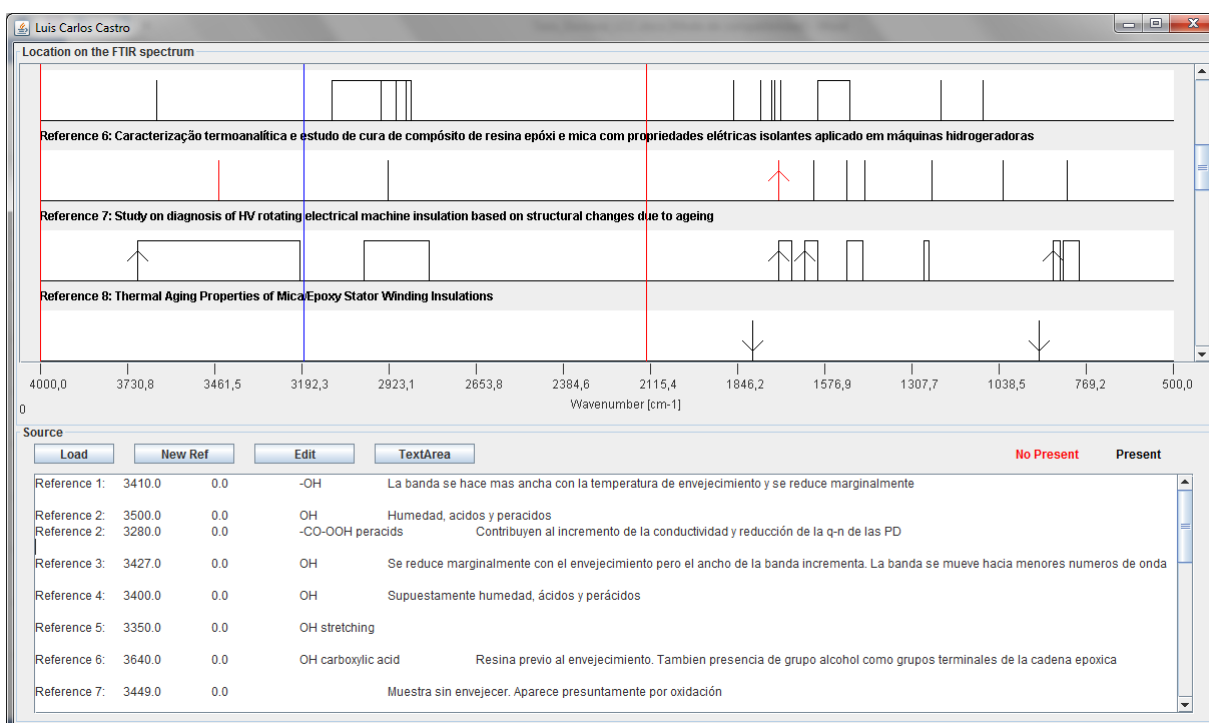


Figura 116. Interfaz gráfica para la identificación de las bandas de absorción.

Las referencias consultadas coinciden en que la reducción de la absorbancia (incremento de la transmitancia) de los grupos epóxidos a  $911\text{cm}^{-1}$  observada es un indicativo de las reacciones de postcurado en la resina. El menor número de onda reportado en la literatura para la banda de los grupos epóxidos fue  $913\text{cm}^{-1}$  mientras que el más alto fue  $970\text{cm}^{-1}$ . El incremento de los grupos OH es un indicador adicional de la apertura de los anillos epóxidos tal como se afirma en [182]. En [139] se muestran las reacciones que dan lugar a la formación de grupos OH durante el curado ya sea que el agente endurecedor sea un anhídrido como comúnmente es para resinas epóxicas VPI o de una amina. Contrario a la ubicación de la banda de absorción de los grupos epóxidos, las absorciones de los grupos OH se reportan en un rango mucho amplio que puede ir desde  $3200\text{cm}^{-1}$  hasta  $3700\text{cm}^{-1}$  como es reportado en [147], siendo el rango entre  $3400\text{--}3500\text{cm}^{-1}$  el valor más frecuente. Antes de discutir el

comportamiento de las otras bandas de absorción se presentarán los resultados del método del estándar interno para los casos de estudio LTA y LU2;

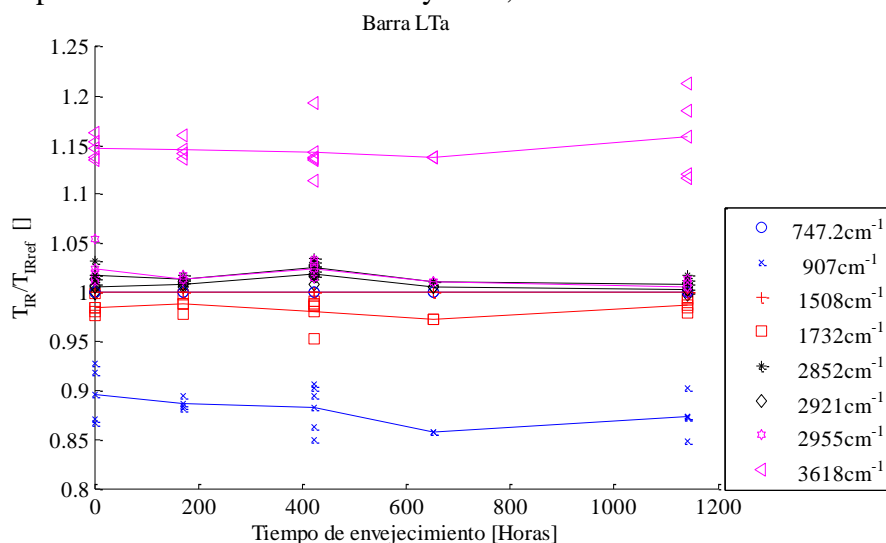


Figura 117. Cambio en las bandas de absorción con el tiempo de envejecimiento para la barra LTA.

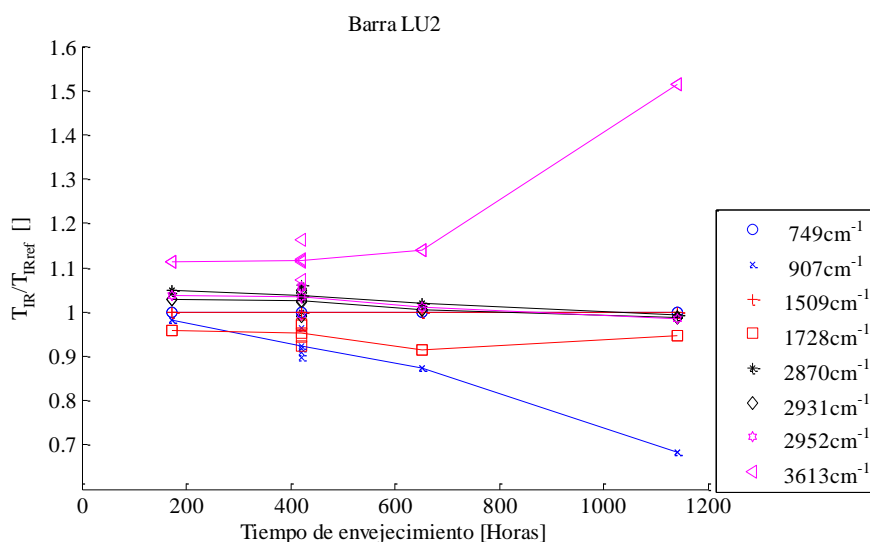


Figura 118. Cambio en las bandas de absorción con el tiempo de envejecimiento para la barra LU2.

Los resultados para la barra LTA muestran que las bandas de absorción de los grupos epóxidos e hidroxilos se mantuvieron constantes comparadas con lo obtenido para la barra STA. Este resultado es posible si se considera que la barra LTA fue sometida a un esfuerzo térmico elevado justo al inicio del programa de envejecimiento que incluso provocó falla dieléctrica. Los grupos epóxidos, si alguno, en la resina fueron agotados en el corto tiempo en el que la barra estuvo sometida a elevada temperatura y por tal motivo no hubo lugar a reacciones de postcurado en lo sucesivo del programa de envejecimiento.

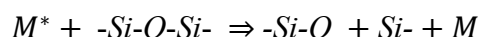
En el caso de la barra LU2 los resultados contrastan con los anteriores porque la banda alrededor de  $910\text{cm}^{-1}$  aumentó en absorbancia en tanto que la absorbancia asociada a los grupos OH disminuyó. De igual forma que la barra LTA, la barra LU2 experimentó un elevado esfuerzo térmico que no produjo falla dieléctrica y que con certeza agotó las reacciones de

postcurado en la resina. Al ya no existir anillos epóxidos en la muestra entonces los cambios en la banda  $910\text{cm}^{-1}$  necesariamente corresponden a modificaciones que tuvieron lugar en la estructura de la mica.

El crecimiento en la banda  $910\text{cm}^{-1}$  debería en principio corresponder a una mayor concentración de enlaces Si-O producto de la degradación de la estructura cristalina de la mica. Sugerir el esfuerzo térmico como causa de dicha degradación no parece inmediatamente posible ya que tal como se reporta en [82] la mica solo sufre degradación térmica por encima de los  $700^\circ\text{C}$ . Si este hubiera sido el caso, la temperatura hubiera descompuesto la totalidad de la resina en la barra. Por el contrario un ensayo adicional de TGA en muestras tomadas de las barras LU2 y LTA al final del programa de envejecimiento revelaron un contenido de resina de 18.44% y 26.6% respectivamente en las muestras.

La hipótesis más probable para explicar el crecimiento en la absorbancia de la banda  $910\text{cm}^{-1}$  es la remoción o dislocación de los cationes metálicos de la superficie de la mica que resulta en un reacomodo de las longitudes de los enlaces y del ángulo de los átomos causando significativos cambios en la química de su superficie.

Dos factores pueden ser causantes de la dislocación de los átomos de potasio en el plano de exfoliación de la mica: el bombardeo de partículas energéticas a causa de las descargas parciales y el ataque químico del ácido nítrico formado también a causa de las descargas parciales [70], ambos factores actuando de forma sinérgica. Si solo se considerara el efecto de las descargas parciales, el bombardeo de las partículas energéticas  $M^*$  produciría escisión de enlaces en la mica:



Si la actividad de descargas parciales se mantiene la mica se exfoliará exponiendo más superficie de mica al bombardeo iónico e incrementándose la formación de subproductos de degradación como el ácido nítrico.

En [71] se reporta que el colapso final de la estructura cristalina de la mica lleva a formaciones nodulares (dendritas) de silica. El efecto de ambos mecanismos de degradación posiblemente explicaría el incremento de enlaces Si-O. La degradación de la estructura de la mica en el rango de las temperaturas típicas utilizadas para envejecimiento es apoyada por los trabajos en [84]. Muestras compuestas de mica-resina luego de ser sometidas a envejecimiento multiesfuerzo fueron analizadas por medio de espectrometría de rayos X encontrando que las relaciones de Si/Al y de K/Al se redujeron con el tiempo de envejecimiento indicando degradación de la estructura de la mica. En otras palabras se dice que los átomos de K y Si se removieron de la estructura de la mica como resultado del ataque combinado de las descargas parciales y de los subproductos ácidos.

La separación de los átomos de Si bien podría responder por el incremento detectado de la banda  $910\text{cm}^{-1}$ . El efecto de las descargas parciales en el incremento de la banda  $910\text{cm}^{-1}$  se ratifica con el hecho de que esta banda se mantuvo constante en la barra LTA no sometida a esfuerzo eléctrico y por lo tanto sin actividad de descargas parciales. En [89] también se menciona la degradación de la estructura de la mica por el efecto de los ácidos formados como subproductos pero al mismo tiempo se discute el volumen de ácido producido y su probabilidad de difundirse a través de la mica y causar degradación.

Las descargas parciales no ocurren completamente en todo el volumen del aislamiento. Por el contrario las mediciones realizadas junto con la inspección visual de la barra llevaron a la conclusión de que la actividad de descarga se concentró en grandes delaminaciones esparcidas en el volumen del aislamiento. El hecho de que se haya detectado un incremento de la banda



910cm<sup>-1</sup> en todas las muestras de la barra LU2 tomadas en diferentes zonas de la superficie del aislamiento requiere que los ácidos atacantes de la estructura de la mica de alguna forma hayan experimentado un mecanismo de difusión a través la estructura del aislamiento. Caso contrario el incremento de la banda solo hubiera sido observado para muestras tomadas en un mismo punto y no para todas las muestras que abarcaron una amplia sección de la barra. El oxígeno requerido para la formación de los ácidos fue fácilmente proporcionado por el aire que ingresó en las delaminaciones. El envejecimiento por medio de horno donde la atmósfera no fue ventilada también pudo contribuir de igual modo a la disponibilidad de oxígeno reactivo.

Finalmente cabe destacar que la dispersión de los datos al final del programa de envejecimiento fue mayor en la barra LU2. Se observó que la coloración de las muestras fue más oscura y no uniforme en relación a las muestras tomadas previamente. En algunos casos se presentaron trazas o pequeños puntos de un color mucho más oscuro que pudieron influir en los espectros obtenidos. Por este motivo probablemente la banda 3613cm<sup>-1</sup> tuvo un crecimiento mayor a la tendencia.

**Reacciones de degradación de la estructura de la resina.** Después de identificar el avance de las reacciones de postcurado en la resina se observó el comportamiento de las bandas de absorción de los grupos CH<sub>2</sub>, CH<sub>3</sub> en la región de los 2800-3000cm<sup>-1</sup> y de los dobles enlaces C=O en la banda 1730cm<sup>-1</sup>. En la literatura estos grupos son extensamente relacionados con las reacciones de degradación de la resina.

La banda 1730cm<sup>-1</sup> en cada uno de los tres casos de estudio mostró una discreta variación con el tiempo de envejecimiento. Los endurecedores a base de anhídridos se caracterizan por dobles enlaces C=O que hacen parte de grupos ácidos formados luego de la apertura del anillo de la molécula de anhídrido. De esta forma la presencia de la banda de absorción 1730cm<sup>-1</sup> en todos los espectros es resultado de la utilización de un anhídrido como agente entrecruzador de la resina epóxica. Aunque exactamente el tipo de endurecedor utilizado en la fabricación de las bobinas fue reservado por el fabricante, éste sí confirmó que se trató de un anhídrido. Cuando la resina es curada por ejemplo por medio de aminas, los enlaces C=O aparecen como resultado de reacciones de oxidación, es decir como producto de la degradación [159]. En la Figura 119 puede apreciarse fácilmente grupos C=O en la molécula del anhídrido y ninguno cuando el entrecruzamiento se lleva a cabo mediante aminas [139]. Adicionalmente se muestran los grupos OH formados como resultado de la apertura del anillo epóxido y que se detectaron como incrementos en la banda 3621cm<sup>-1</sup> en la barra STa.

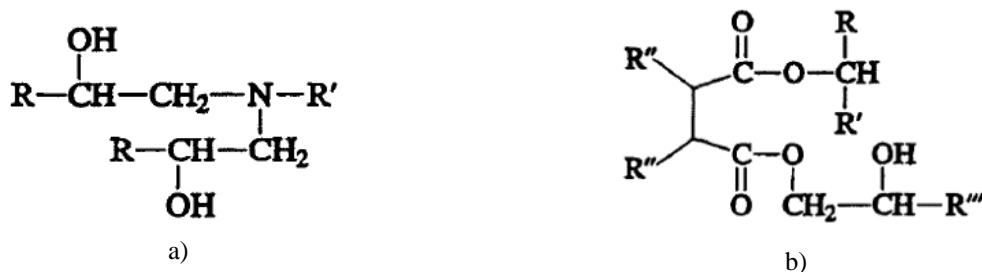
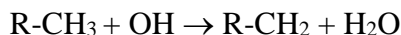
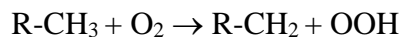


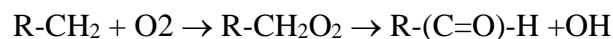
Figura 119. Entrecruzamiento de la resina epóxica, a) por medio de amina y b) por medio de anhídrido el cual contiene grupos C=O.

Las reacciones de oxidación descritas por el autor de [161] se perfilan como la explicación más probable y en contexto para la formación de los dobles enlaces C=O en la estructura de resinas sometida a envejecimiento. De acuerdo a esta referencia el ataque del oxígeno reactivo

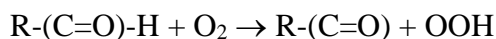
o de radicales hidroxilo a la estructura de la resina se da con facilidad en los grupos metilo CH<sub>3</sub> [161] debido a la energía de disociación de sus enlaces.



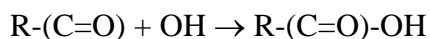
Ambas reacciones producen un radical metileno CH<sub>2</sub> que continúa reaccionando con el oxígeno



La estructura formada que contiene el doble enlace C=O es un aldehído. Este aldehído también reacciona con el oxígeno formando radicales peróxido.



Reacciones entre los grupos hidroxilo y carbonilo también son posibles.



Permitiendo una generalización viene a la mente que la abstracción de un hidrógeno de la cadena polimérica por un radical, cualquier que sea su origen, por ejemplo agitación térmica, descargas parciales, etc., produce la escisión de la cadena y el carbono que perdió el hidrógeno forma enlaces dobles C=O.

La poca o ninguna variación de la banda 1730cm<sup>-1</sup> en los tres casos de estudio anteriores entonces llevarían a concluir que si bien los esfuerzos de envejecimiento necesariamente provocaron reacciones de degradación como las mencionadas arriba, la magnitud de dichas reacciones se mantuvo controlada. Esto es que las reacciones de degradación luego del programa de envejecimiento no modificaron significativamente la estructura de la resina.

En [145] el autor puntualiza que la formación de nuevos grupos OH como subproducto de reacción de grupos epoxi con agua no pudo ser detectado en los espectros infrarrojos porque de hecho la estructura misma de la resina ya contenía una gran cantidad de estos grupos. Aplicando este mismo análisis, parece lógico pensar que si la resina de estudio ya contiene grupos C=O (en la molécula de anhídrido) entonces se necesitaría la formación de un porcentaje significativo de nuevos enlaces C=O por la degradación para poder ser detectados en los espectros.

En el caso de la barra STa, tal como indicó la reducción del factor de disipación y el alto índice *K*, prevalecieron las reacciones de postcurado. En las barras LTa y LU2 llama la atención que a pesar de que fueron sometidas a un sobre esfuerzo térmico los resultados de espectrometría discutidos no revelaron una extensión de gran proporción de la degradación como se esperaba.

Las barras del segundo grupo por su parte se diferenciaron de las barras del primer grupo en que ellas iniciaron y terminaron el programa de envejecimiento con un nivel de degradación notoriamente mayor comprobado por los altos valores de capacitancia tip-up y por los bajos valores del índice *K*. De ahí que si la técnica ATR aplicada a este tipo particular de muestras es lo suficientemente sensible entonces la condición de las barras del segundo grupo debería

permitir detectar cambios asociados a la degradación. Los espectros para la barra Bar6 fueron los primeros en ser analizados por tratarse de la barra con el mayor nivel de degradación detectado por las pruebas dieléctricas, Figura 120.

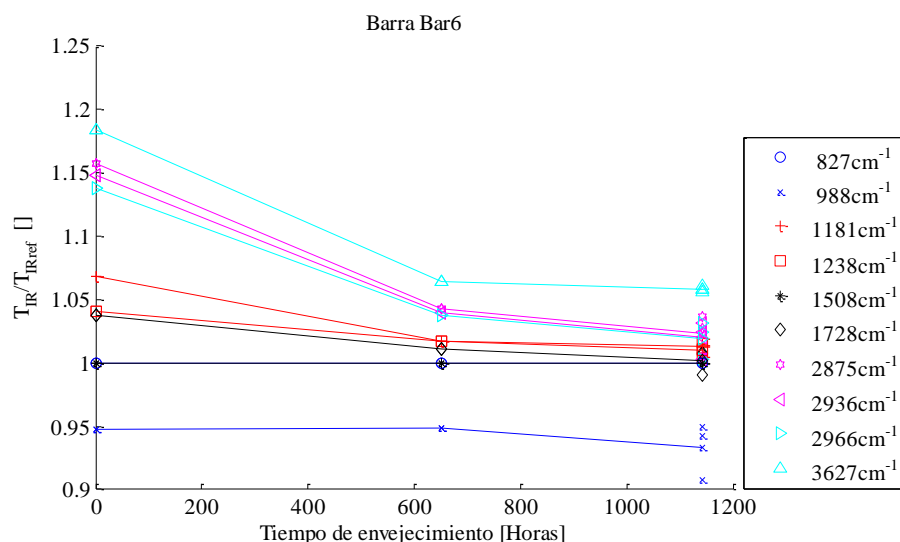


Figura 120. Cambio en las bandas de absorción con el tiempo de envejecimiento para la barra Bar6.

El primer resultado que salta a la vista es el incremento de las bandas 3627cm<sup>-1</sup> de los grupos OH, 2875cm<sup>-1</sup>, 2936cm<sup>-1</sup> y 2966cm<sup>-1</sup> de los grupos CH<sub>2</sub> y CH<sub>3</sub> y en menor medida de la banda 1728cm<sup>-1</sup> asociada a los grupos C=O. Esto comprueba que efectivamente la degradación de la resina lleva a la formación de grupos C=O y OH como es de esperarse. Sin embargo el incremento en la banda 3627cm<sup>-1</sup> fue de mayor magnitud que el incremento de la banda 1728cm<sup>-1</sup>. Este resultado perfilaría la banda 3627cm<sup>-1</sup> posiblemente como más sensible a la degradación al presentar un mayor crecimiento. Referencias como [147][153] y [159] entre otras concluyen degradación del aislamiento basados en la aparición de la banda de absorción 1728cm<sup>-1</sup>. Los resultados aquí obtenidos muestran que la aparición de grupos carbonilo efectivamente corresponde a reacciones de degradación en la resina pero el incremento moderado registrado de esta banda de absorción no contrasta con el alto nivel supuesto de degradación de la barra Bar6. Otras bandas con números de onda por debajo de los 1730cm<sup>-1</sup> también son utilizadas para identificar cambios en la estructura de la resina pero en virtud de que ellas podrían estar fuertemente solapadas con las absorciones de la mica/vidrio su observación en esta investigación fue desestimada y en cambio se enfocó en las bandas de absorción de los grupos CH<sub>2</sub> y CH<sub>3</sub>. Al no solaparse con ninguna otra banda de absorción en la mica/vidrio, es recomendable seguir la tendencia de los grupos metil y metileno en relación con el avance del envejecimiento. Los resultados de la Figura 120 indicaron que estos grupos crecieron conforme crecieron los grupos OH. Los niveles de absorbancia de los grupos OH y CH<sub>2</sub> y CH<sub>3</sub> crecieron significativamente desde el inicio hasta el cuarto ciclo del programa de envejecimiento. De ahí hasta el final el incremento en las bandas se hizo menos pronunciado.

Es tentador atribuir el incremento de la absorción de los grupos CH<sub>2</sub> a las reacciones de oxidación descritas más arriba donde se mostró que el ataque de radicales RO y OH a los grupos CH<sub>3</sub> ubicados entre los grupos fenol en la cadena principal epóxica produjeron radicales metileno CH<sub>2</sub>. La explicación de este crecimiento se dificulta aún más cuando se

encuentran en la literatura resultados opuestos entre sí. Por ejemplo, en [154] se reporta un agotamiento de ambos grupos en tanto que [84] reporta un crecimiento. Los estudios trabajaron propiamente sistemas de aislamiento de mica-epoxi para máquinas rotativas por lo que ambos resultados podrían ser aplicables en esta investigación. La referencia donde se observó la reducción en los grupos  $\text{CH}_2$  y  $\text{CH}_3$  comparó muestras nuevas con muestras extraídas de una máquina que estuvo en servicio durante 23 años. Algunas de las muestras envejecidas incluso no mostraron indicaciones de degradación. La otra referencia sometió las barras a un programa de envejecimiento multiesfuerzo secuencial comparable de alguna manera con el método experimental aquí empleado. A partir de las diferencias se puede extraer que las muestras que experimentaron mayor degradación también mostraron un crecimiento de las bandas de absorción de los grupos metil y metileno. Por otro lado, existe un relativo acuerdo entre diferentes referencias bibliográficas en cuanto a una tendencia creciente de los grupos OH y C=O con la degradación.

Finalmente en la Figura 121 a la Figura 123 se presentan los resultados del método del estándar interno para las barras Bar1, Bar2 y Bar4 los cuales muestran que las bandas C=O y OH se mantuvieron prácticamente constantes pese a su nivel de degradación. El incremento en la absorción del anillo epóxido en el caso de la barra STa y en la absorción de los grupos OH en la barra Bar6 estuvo alrededor del 10% lo que permitió concluir sobre las reacciones de postcurado y de degradación en estas barras respectivamente. Sin embargo en las demás barras del segundo grupo la variación fue menor al 5%, mismo margen de la dispersión de los datos. Así entonces se pueden postular dos hipótesis. La primera apunta a que tal como lo indicaron las mediciones de TGA, la degradación global de la estructura de la resina del aislamiento debe ser lo suficientemente severa como para que puedan detectarse cambios significativos en la banda de absorción de los grupos C=O. Otras bandas como la de los grupos OH podrían indicar cambios más sutiles en la resina. La segunda hipótesis apunta a que la dispersión de los resultados de la técnica FTIR ATR dificulta la detección de cambios sutiles como los de la banda  $1728\text{cm}^{-1}$ .

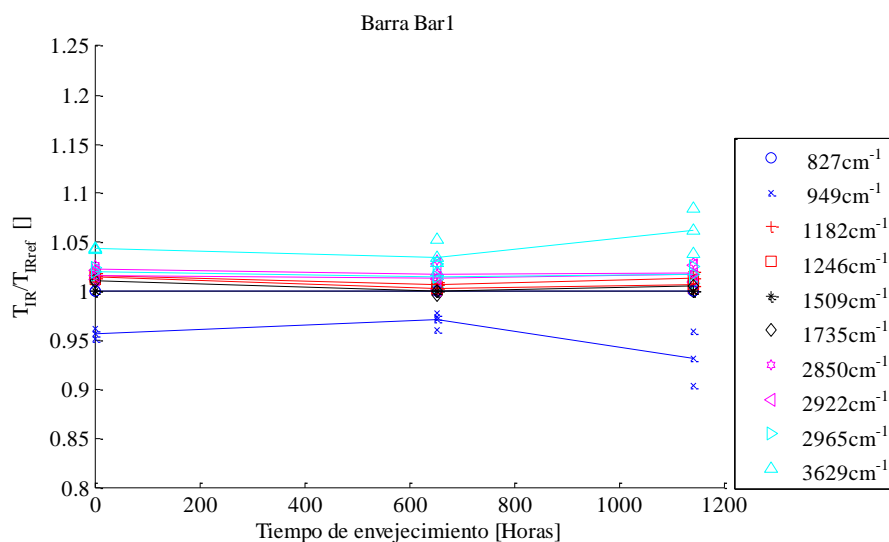


Figura 121. Cambio en las bandas de absorción con el tiempo de envejecimiento para la barra Bar1.

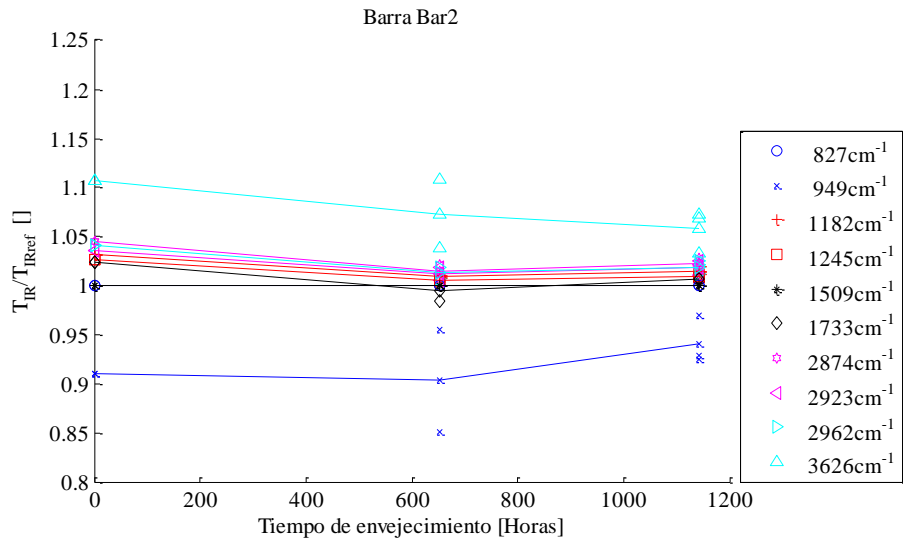


Figura 122. Cambio en las bandas de absorción con el tiempo de envejecimiento para la barra Bar2.

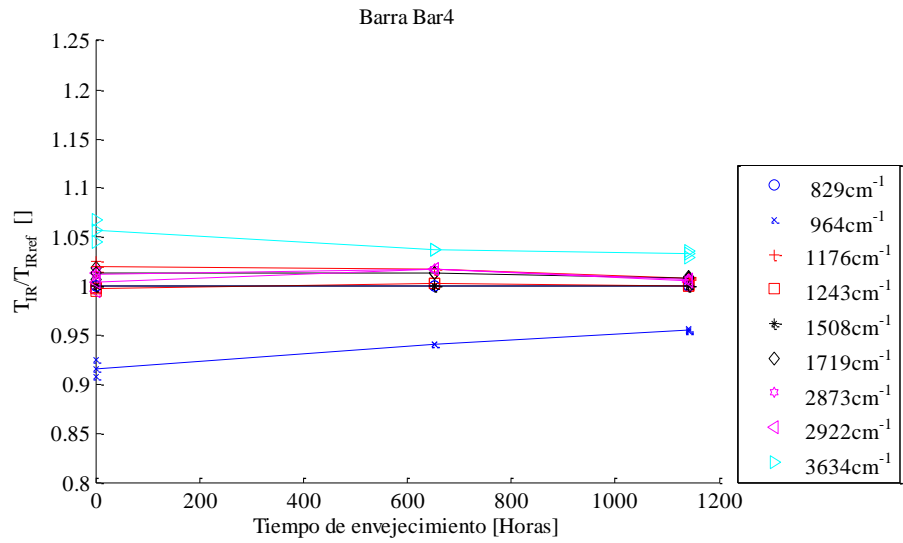


Figura 123. Cambio en las bandas de absorción con el tiempo de envejecimiento para la barra Bar4.

## 9 CONCLUSIONES

### Mediciones de Respuesta Dieléctrica

En condiciones de degradación dentro de límites aceptables como con los que terminaron las barras del primer grupo la respuesta dieléctrica del aislamiento presentó cambios moderados que pudieron ser cuantificados y comparados por medio del parámetro  $m$  del modelo de potencia fraccionaria. A bajo voltaje donde no ocurren descargas parciales el valor de  $m$  es básicamente un indicativo de que tan cerca se encuentra el pico de relajación dieléctrica al bajar en la frecuencia. Cuanto menor es el valor de  $m$  indica que la dependencia de la capacitancia compleja de la frecuencia es mayor. Tomando como ejemplo el valor de la capacitancia, valores menores de  $m$  se interpretan como que la capacitancia crece en mayor proporción hacia las bajas frecuencias.

Cuando los valores de  $m$  se analizaron junto con el valor de la capacitancia y del factor de disipación en el plano  $m$ -C y  $m$ -C se pudo estimar la predominancia de las reacciones que ocurrieron en la resina conforme avanzó el programa de envejecimiento. Basado en los resultados, se atribuyó la reducción del valor de  $m$  respecto al valor inicial como indicador de que reacciones escisión de cadena (degradación) en tanto que su incremento fue asociado a reacciones de entrecruzamiento de la resina (postcurado). Las trayectorias en los planos mostraron que cada reacción puede ser predominante en un tiempo específico determinando la condición del aislamiento.

Por encima del voltaje de inyección de descarga el valor de  $m$  es sensible a las descargas parciales. Las mediciones con y sin electrodos guarda sugirieron que este parámetro es más sensible a las descargas parciales que a la contribución de la cinta gradiente. Así a altos voltajes de prueba los valores de  $m$  son indicativos de la actividad de descargas parciales tal como los son los valores  $\Delta C$  y  $\Delta \tan \delta$ . Con el aumento del voltaje de prueba se observó que los valores de  $m$  tendieron a mayores valores. Dicha reducción en la dependencia de la frecuencia se originó porque la actividad de descargas parciales se redujo con la disminución de la frecuencia.

### Mediciones de la Corriente $\Delta I$

Evaluar el incremento de la corriente de fuga como función del voltaje de prueba mostró ser un buen indicador para el estudio de los mecanismos de degradación del aislamiento. En la actualidad, la literatura ha reportado que este parámetro está siendo aplicado en campo con buenas perspectivas de que su uso se generalice.

El parámetro complementa las mediciones de  $\Delta C$  y  $\Delta \tan \delta$  al cuantificar indirectamente la actividad de descargas parciales y suministrar información adicional como el voltaje de inyección  $U_{il}$ .

Desde el punto de vista circuital no hay diferencia entre medir capacitancia, factor de disipación y corriente de fuga puesto que todas tres variables se relacionan por medio de las leyes de Kirchoff. Por lo tanto su implementación fácilmente se puede llevar a cabo con el uso de cualquiera de los equipos comercialmente disponibles para la medición de tangente delta puesto que todos ellos arrojan el valor de la corriente de fuga como resultado, abriendo posibilidades para su uso más generalizado.

Cuando el incremento  $\Delta I$  se calcula al menos para dos voltajes de prueba se obtiene mayor información con respecto a la práctica industrial frecuente de calcular los valores de  $\Delta C$  y  $\Delta \tan \delta$  a partir de mediciones a  $0.2U_n$  y  $0.8U_n$  como típicamente se hace en máquina de

13.8kV. Midiendo únicamente por debajo del voltaje de inyección ( $0.2U_n$ ) y a alto voltaje ( $\Rightarrow 0.8U_n$ ) se perdería de vista la información proporcionada por el voltaje  $U_{il}$  y por la proporción del incremento a diferentes voltajes. Por ejemplo, considérense dos casos ambos con iguales valores de  $\Delta \tan \delta$  pero con valores diferentes de  $U_{il}$ . Basados únicamente en el valor tip-up se diría que en ambos casos el aislamiento evaluado se encuentra en condiciones similares. En contraste, si se tiene en cuenta el voltaje  $U_{il}$  arrojado por el método de cálculo de  $\Delta I$ , se estimaría que la degradación del aislamiento con un menor voltaje  $U_{il}$  es mayor.

Si bien el voltaje  $U_{il}$  también puede calcularse a partir de las características de  $C$  y  $\tan \delta$  esto implica realizar rutinas de cálculo adicionales. En el método de  $\Delta I$  este cálculo ya está incluido.

Finalmente se puede decir que calcular el parámetro  $\Delta I$  para el voltaje de fase y para el voltaje de línea o mayores a éste permite, hasta cierto punto, cuantificar separadamente la condición del aislamiento principal y la condición del aislamiento incluyendo la contribución de la cinta gradiente.

### **Cálculo del Índice $K$**

Los patrones de fase resuelta medidos para defectos internos como inclusiones gaseosas y delaminaciones se desplazan en fase en dirección al cruce por cero del voltaje de prueba. Cuanto mayor es la degradación por este tipo de defectos, mayor es el desplazamiento de los patrones en fase resuelta.

Las mediciones realizadas indicaron que cuando en el sistema de aislamiento existe un reducido volumen de pequeños defectos internos (aislamiento en buenas condiciones) los patrones en fase resuelta tienden a centrarse alrededor de ángulos de fase entre  $45-50^\circ$  o superiores. Caso contrario cuando los defectos crecen en volumen y en dimensiones producto del avance de la degradación los patrones en fase resuelta se desplazan centrándose en ángulos de fase entre  $20-30^\circ$ .

La zona de fase en la que se ubican los patrones en fase resuelta tiene efecto en la magnitud de los valores de  $\Delta \tan \delta$  y  $\Delta C$ , tal que la magnitud de  $\Delta C$  es mayor en relación a  $\Delta \tan \delta$  conforme los patrones en fase resuelta se desplazan más hacia el cruce por cero del voltaje de prueba. Aprovechando esta relación directa e interdependiente entre los parámetros de capacitancia, factor de disipación y descargas parciales se definió el índice  $K$  como el cociente entre los valores  $\Delta \tan \delta$  y  $\Delta C$ .

El valor del índice  $K$  así calculado tiene la ventaja de permitir estimar características como la posición de los patrones de fase resuelta sin realizar una medición directa de descargas parciales.

Como herramienta para el estudio de los mecanismos de degradación en inclusiones gaseosas y delaminaciones, el índice  $K$  tiende a menores valores cuanto mayor es el corrimiento de los patrones de fase resuelta hacia el cruce por cero o en otras palabras cuanto mayor es el nivel de degradación en el aislamiento. Otros mecanismos de degradación, tales como erosión de la cinta semiconductor o tracking en la superficie de las cabezas de bobina, no estuvieron dentro del alcance de esta investigación, por lo tanto la interpretación arriba del índice  $K$  debe tratarse con precaución y limitarse a inclusiones gaseosas y delaminaciones.

De lo anterior se desprende que los patrones en fase resuelta deben corresponder solo a descargas internas, por lo cual hay que aplicar algún método de reconocimiento y separación para eliminar otras fuentes de descarga de los patrones. En el caso de las barras del primer grupo, no se detectaron descargas superficiales y por lo tanto el patrón de fase resuelta se

procesó prácticamente tal como se obtuvo. En las barras del segundo grupo si fue necesario separar las descargas parciales superficiales. En consecuencia, las mediciones de capacitancia y factor de disipación fueron realizadas con anillos guarda para también eliminar la contribución de las descargas superficiales y mantener la consistencia del análisis.

Si se dispone de un conjunto de datos en el tiempo, ellos pueden ajustarse a una línea de tendencia. En los casos de estudio de esta investigación los datos se ajustaron a una línea recta cuya pendiente matemáticamente correspondió al valor del índice  $K$ . En este caso, cuando se consideran grupos de datos en el tiempo, adicionalmente el índice  $K$  permitió concluir respecto al ritmo de la degradación.

El índice  $K$  calculado para las barras del primer grupo fue mayor que para aquellas del segundo grupo, correspondiendo con el nivel de degradación de ambos grupos. Cuanto mayor fue el nivel de degradación de la barra, menor fue el valor calculado de  $K$ . El hecho de que los valores calculados en el tiempo del índice  $K$  se ajustaran a una línea recta pudo interpretarse como que el proceso de envejecimiento evolucionó a un ritmo relativamente constante y controlado. Si el proceso de envejecimiento tiene una dinámica cambiante en el tiempo es posible que los valores medidos de  $\Delta \tan \delta$  y  $\Delta C$  lleven a valores del índice  $K$  distintos cada vez que no definen una tendencia.

Este índice permitió comprender que los incrementos en la capacitancia y en el factor de disipación con el voltaje de prueba son interdependientes, así el cambio de uno de ellos se ve reflejado en el cambio del otro. En campo frecuentemente los valores tip-up son utilizados e interpretados casi independientemente por lo que la introducción del índice  $K$  es un aporte con grandes perspectivas en el diagnóstico.

### **Parámetros Físicoquímicos del sistema de aislamiento**

Los ensayos físicoquímicos como técnica de evaluación del sistema de aislamiento y de la forma en que aquí se realizaron mostraron tener un alto potencial siendo su principal limitación el número de muestras disponibles y en algunos casos su estructura y geometría. Se exploró la aplicabilidad de los distintos ensayos con muestras trabajadas en su forma compuesta, es decir como un material de mica/vidrio/resina, en contraste a una gran cantidad de estudios que analizaron muestras de cada componente. En general la dispersión de los datos producto de la heterogeneidad de las muestras dificultó la detección de cambios sutiles en los parámetros físicoquímicos, limitación que fue contrarrestada con la facilidad de preparación de las muestras. No obstante, cambios significativos como aquellos que se dan producto de reacciones de postcurado y de un alto nivel de degradación todavía pudieron ser detectados.

Los resultados de los ensayos de DSC fueron uno de los más sensibles a la naturaleza y al pequeño contenido de resina en las muestras. Todo apuntó a que ante estas condiciones las especificaciones del instrumento de medida jugaron un papel fundamental en la capacidad de detectar la temperatura de transición vítrea de la resina. Solo para el primer grupo de barras se pudo detectar un incremento consistente de la  $T_g$  con el tiempo de envejecimiento, lo que permitió corroborar los resultados de las mediciones dieléctricas que apuntaron hacia reacciones de postcurado en la resina. En el segundo grupo de barras sin embargo no fue posible detectar una tendencia definida en el comportamiento de la  $T_g$ , haciéndose notable la necesidad de un gran control de todos los parámetros del ensayo. Por esta razón y como se mencionó más arriba los ensayos de DSC en muestras compuestas tienen más probabilidad de éxito para detectar cambios relativamente significativos. Si en cambio se están analizando cambios en una escala mucho más fina es preferible utilizar muestras de resina, es decir muestras no compuestas.



Ante la dispersión de los datos en los ensayos de DSC para el segundo grupo de barras las mediciones de TGA tomaron importancia al permitir determinar que la metodología de toma de muestras aplicada sí produjo muestras con contenido de resina. Los resultados de TGA fueron consistentes aun con muestras compuestas. El contenido de resina medido presentó variación naturalmente debido a la heterogeneidad de las muestras pero al mismo tiempo la variación se dio en un margen relativamente angosto. El crecimiento o reducción en el porcentaje de pérdida de masa en el tiempo no se interpretó como indicativo de cambios en la estructura de la resina como se ha mencionado en algunas referencias bibliográficas [154], en cambio se atribuyó al proceso mecánico de extracción de las muestras. Sorprendió particularmente que el contenido de resina en las muestras de la barra Bar4 se mantuvo prácticamente constante en el tiempo y resultó menor al contenido de resina presentado en las otras barras con distinto fabricante, demostrando que la técnica es útil para estimar diferencias globales en el contenido de resina entre diferentes tipos de aislamientos. Las temperaturas  $T_i$ ,  $T_{max}$  y  $T_f$  que caracterizaron los termogramas de pérdida de masa prácticamente se mantuvieron constantes con el tiempo de envejecimiento así como también se detectó un solo proceso de pérdida de masa (un único pico en la curva DTA), ambos indicadores de que la estructura global de la resina no presentó una degradación severa como lo que se esperó en virtud de los altos valores de capacitancia y de factor de disipación al final del programa de envejecimiento.

La técnica de espectrometría infrarroja permitió confirmar la ocurrencia de reacciones de postcurado mediante la reducción observada de la banda de absorción de los grupos epóxidos en la resina. Relacionar el incremento en la banda asociada a los grupos OH y en la banda alrededor de  $910\text{cm}^{-1}$ , con las condiciones de envejecimiento de la barra LU2, aportaron pruebas experimentales para sugerir el ataque de los subproductos de las descargas parciales a la estructura de la mica, constituyendo uno de los principales hallazgos con la técnica FTIR ATR. El papel de la banda de absorción de los grupos carbonilos C=O como indicador de degradación de la resina fue puesto en perspectiva. Un número de referencias bibliográficas concluyen degradación en la estructura de la resina con la aparición de la absorción de los grupos C=O. Sin embargo, no se detectó un incremento apreciable o significativo de esta banda en las barras del segundo grupo, a pesar de su deterioro.

La naturaleza compuesta de las muestras ocasionó que en los espectros se presentara un fuerte solapamiento de las bandas de absorción de la mica y de la resina en la región de los grupos OH, y para números de onda aproximadamente menores a  $1500\text{cm}^{-1}$ . La región no solapada presentó la ventaja de corresponder únicamente a las absorciones en la resina, entre las que se encuentran las bandas de los grupos C=O, CH<sub>2</sub> y CH<sub>3</sub>. A pesar de los solapamientos en la zona de  $910\text{cm}^{-1}$ , los posibles y más probables fenómenos que pueden presentarse llevan a cambios en direcciones opuestas de esta banda permitiendo su identificación. Las reacciones de postcurado en las muestras produjeron reducción en la banda  $910\text{cm}^{-1}$  y los mecanismos de degradación en la mica ocasionaron un incremento de dicha banda.

El método del estándar interno permitió resolver el problema de la concentración desconocida de la resina en la muestra. Como lo mostró la Figura 113 la variación de las bandas relativas para cada una de las mediciones estuvo alrededor del 5% lo que se consideró una variación aceptable si se tiene en cuenta que algunos autores han reportado variaciones de 2.6% para muestras de solo resina.

### **Correlación entre Parámetros Dieléctricos, Físicoquímicos y Degradación**

La aplicación de los esfuerzos de envejecimiento ocasionó distintos cambios en la estructura del aislamiento de cada una de las barras. Con certeza los parámetros dieléctricos variaron en función de la frecuencia y del voltaje de prueba y en función del tiempo de envejecimiento. Sin embargo en algunos casos dichos cambios significaron mejoramiento de las propiedades del aislamiento. Por lo tanto se podría asumir que en este contexto degradación es la variación relativa de los parámetros observados en función de una variable independiente, por ejemplo, el voltaje de prueba o la frecuencia, y no exclusivamente una condición específica de deterioro del aislamiento en el sentido literal de la palabra. El término degradación se mantuvo aun durante el periodo de tiempo en el que ocurrieron las reacciones benéficas para el aislamiento (reacciones de postcurado) ya que los esfuerzos que desencadenaron dichas reacciones eventualmente provocaron (o provocarán) detrimento de las propiedades dieléctricas del aislamiento.

La aplicación de temperatura y voltajes por encima de los valores nominales de diseño no repercutió en la misma proporción en los parámetros dieléctricos y físicoquímicos del aislamiento. Las observaciones mostraron que la posibilidad de detectar cambios significativos mediante ambas técnicas dependió de la extensión de la degradación. De esto se desprende que la degradación del aislamiento no siempre ocurre como reacciones o mecanismos generalizados en toda su estructura. Los casos de estudio de las barras LU2 y LTA aportaron que una atmósfera de aire favorece la formación de subproductos a partir de la actividad de descargas parciales y que estos pueden diseminarse en un mayor volumen del aislamiento en la medida que existan más defectos (delaminación, inclusiones gaseosas, etc.) en su interior, es decir cuanto más deteriorada este la estructura micro y macroscópica del aislamiento. Prueba de ello fue que en la barra LU2 las pruebas de espectrometría infrarroja detectaron degradación de la estructura de la mica que solo es posible si los subproductos de degradación se difunden por la estructura del aislamiento incluso hasta las capas más externas de donde se extrajeron las muestras. Las pruebas dieléctricas en la barra LU2 permitieron identificar el anterior como un mecanismo de degradación severo no observado en otras barras con un nivel de degradación menor. Las reacciones de postcurado son posibles en todo el volumen de resina y por lo tanto también fue posible identificarlas mediante ambas técnicas. En contraste los resultados físicoquímicos de las barras de prueba del segundo grupo no parecieron dar cuenta de las indicaciones de degradación obtenidas a partir de las mediciones dieléctricas. Para estas barras la degradación se manifestó como incremento en el volumen de inclusiones gaseosas. El análisis de descargas parciales detectó que tales inclusiones gaseosas no formaron grandes delaminaciones como en el caso de la barra LU2. Así, aunque las descargas parciales atacaron el aislamiento su estructura mucho más consistente e íntegra pudo haber limitado la difusión de subproductos y por lo tanto la degradación. Mientras que se calcularon valores de  $\Delta C$  tan altos como 20% las bandas de absorción típicamente asociadas con la degradación no mostraron un incremento de magnitud comparable o al menos no mayor a la dispersión de los datos ocasionados por la técnica de medición utilizada. Así mismo los perfiles de pérdida de masa no presentaron indicativos de formación extensiva de subproductos de mayor/menor peso molecular como se ha reportado en resinas con un alto nivel de degradación.

## 10 RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

Posterior a la culminación de esta investigación se consolidaron las limitaciones y el alcance de los resultados obtenidos, especialmente para los parámetros de evaluación que se desarrollaron como el índice  $K$  y  $m$ . Lo anterior permitió identificar posibles rutas de trabajo por medio de las cuales continuar con la investigación y extender los límites del actual desarrollo.

La más importante directriz que se mantiene para la investigación que se desarrolle a partir de este momento es que el objetivo final es la propuesta, validación y aplicación de criterios de diagnóstico aplicables en campo. Para el alcance de este objetivo resulta evidente que los futuros esfuerzos en investigación deben encaminarse hacia lo siguiente:

- Principalmente ampliar el número de objetos de prueba. Quizá esta será un limitación permanente, sin embargo es necesario iniciar una recolecta de mediciones para finalmente poder llevar el índice  $K$  y  $m$  a un estado de “probado en laboratorio” antes de pasar a su validación en campo.
- Aunque la degradación de los sistemas de aislamiento de barras estatóricas siempre será un fenómeno complejo de mecanismos actuando de forma sinérgica, se sugiere continuar investigando el índice  $K$  como parámetro de estudio enfocado a defectos internos como inclusiones gaseosas y delaminaciones. Su aplicación en aislamientos con múltiples mecanismos de degradación activos será necesariamente un paso posterior.
- La experimentación en adelante debería considerar diferentes escenarios de degradación de la cinta gradiente para cuantificar sus efectos en los diferentes parámetros de evaluación de la condición del aislamiento.

Dentro de la ruta de trabajo que proporciona los lineamientos anteriores, los trabajos futuros pueden seguir las siguientes recomendaciones complementarias.

- Continuar con la exploración de la técnica de espectroscopia dieléctrica a alto voltaje como posible indicador de la degradación de la cinta gradiente. Limitar la frecuencia inferior hasta aproximadamente 100mHz, mantendría la duración de las mediciones dentro de un rango razonable.
- Implementar las mediciones de respuesta dieléctrica en laboratorio con electrodos guarda siempre que sea posible para caracterizar el comportamiento dieléctrico tanto de las cabezas de bobina como de la zona de ranura independientemente.
- Ampliar el estudio realizado de la respuesta dieléctrica hacia la medición a frecuencias por encima de 100Hz alcanzado el rango de los kHz, aunque esto implique realizar las mediciones solo a bajo voltaje.

- Continuar con el cálculo del parámetro  $\Delta I$  en barras de prueba en laboratorio buscando validar los criterios para los valores máximos permitidos que se han reportado en la literatura. Los resultados de barras con un gran nivel de degradación, por ejemplo los de la barra LU2, sugieren que el criterio del 5% reportado en la literatura podría ser un poco alto en determinadas condiciones.

En relación a la aplicación de técnicas fisicoquímicas para la evaluación de la degradación del aislamiento, los trabajos futuros podrían considerar las siguientes recomendaciones.

- Evaluar los cambios en la temperatura de transición vítrea de la resina por métodos alternativos a la calorimetría DSC, aun cuando esto implique mayores tamaños de muestras.
- Aplicar la técnica de FTIR-ATR y TGA en muestras tomadas directamente del aislamiento de las cabezas de bobina buscando cambios más significativos que los obtenidos para el aislamiento de la zona de ranura.
- Implementar un arreglo experimental que propicie una alta actividad de descargas parciales en defectos internos y que al mismo tiempo que facilite mecanismos de difusión de los subproductos de degradación a través del volumen del aislamiento. Esto con el propósito de reproducir y validar mediante FTIR la degradación de la mica a relativamente bajas temperaturas.
- Aplicar la técnica de espectrofotometría de rayos X como técnica alternativa para el estudio de la degradación de la mica.
- Implementar un arreglo experimental para someter muestras del aislamiento a reacciones de oxidación de tal forma que se pueda validar la magnitud del cambio en las absorciones de los grupos C=O, CH<sub>2</sub> y CH<sub>3</sub>.

## 11 REFERENCIAS

- [1] H. J. Reyno González, “Envejecimiento Acumulado Acelerado de Aislamiento Sólido Sometido a Esfuerzos Eléctrico y Térmicos,” Universidad Nacional de Colombia, 2012.
- [2] A. Y. Caranton Muñoz, “Evaluación de Vida Útil Residual de Aislamiento Compuesto de Mica y Resina con Base en Pruebas de Envejecimiento Acelerado,” Universidad Nacional de Colombia, 2012.
- [3] C. Sumeder, “Statistical Lifetime of Hydro Generators and Failure Analysis,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 15, no. 3, pp. 678–685, Jun. 2008.
- [4] M. Chapman and R. Bruetsch, “Micaceous Mainwall Insulation for High-Voltage Rotating Machines,” in *2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 2010, pp. 1–7.
- [5] E. A. Boulter and G. C. Stone, “Historical Development of Rotor and Stator Winding Insulation Materials and Systems,” *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 20, no. 3, pp. 25–39, May 2004.
- [6] N. E. Frost, D. Hughes, D. Laurenty, G. H. Miller, and V. R. Isola, “A Review of Vacuum Pressure Impregnation Procedures for Form Wound Stators,” in *Proceedings: Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing and Coil Winding Technology Conference (Cat. No.03CH37480)*, 2003, pp. 641–644.
- [7] J. Kuzawinski and G. Wolff, “A New Look at Reliability of Asphalt-Mica Insulation in Large Conventionally Cooled Turbine Generators,” *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-89, no. 6, pp. 1022–1030, Jul. 1970.
- [8] G. Klempner and I. Kerszenbaum, *Handbook of Large Turbo-Generator Operation and Maintenance*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2009, p. 580.
- [9] C. V. Maughan, “Upgrading of Generators to Improve Reliability,” in *IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 2003. IEMDC'03.*, 2003, vol. 2, no. June, pp. 885–894.
- [10] G. S. I.M. Culbert, H. Dhirani, “EL-5036-V16 Handbook to assess the insulation condition of large rotating machines,” EPRI Report, 1989.
- [11] C. M. Laffoon, C. F. Hill, G. Lee Moses, and L. J. Berberich, “A New High-Voltage Insulation for Turbine-Generator Stator Windings,” *Trans. Am. Inst. Electr. Eng.*, vol. 70, no. 1, pp. 721–730, Jul. 1951.
- [12] J. S. Johnson and J. C. Botts, “Physical Effects of Thermal Cycling on Stator Coil Insulation of Turbine Generators [includes discussion],” *Trans. Am. Inst. Electr. Eng. Part III Power Appar. Syst.*, vol. 75, no. 3, pp. 249–253, Jan. 1956.
- [13] E. J. Flynn, C. E. Kilbourne, and C. D. Richardson, “An Advanced Concept for Turbine-Generator Stator-Winding Insulation,” *Trans. Am. Inst. Electr. Eng. Part III Power Appar. Syst.*, vol. 77, no. 3, pp. 358–365, Apr. 1958.
- [14] C. V. Maughan, N. V. Gajja, and W. R. Schultz, “A Second Generation Epoxy-Mica-Paper Insulation System for Large Turbine-Generator Stator-Windings,” *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-97, no. 1, pp. 125–133, Jan. 1978.
- [15] R. J. Jackson and A. Wilson, “Slot-Discharge Activity in Air-Cooled Motors and Generators,” *IEE Proc. B Electr. Power Appl.*, vol. 129, no. 3, p. 159, 1982.
- [16] C. F. Hill, “Improvements in Insulation for High-Voltage A-C. Generators,” *Trans. Am. Inst. Electr. Eng.*, vol. 47, no. 3, pp. 845–852, Jul. 1928.
- [17] J. S. Johnson, “Slot Discharge Detection Coil Surface and Core of High-Voltage Stator Windings,” *Trans. Am. Inst. Electr. Eng.*, vol. 70, no. 2, pp. 1993–1997, Jul. 1951.

- [18] H. Brandes, T. Hillmer, M. R. Levit, W. E. Corbett, and N. E. Frost, "New Generation of Conductive Tapes for High Voltage Applications," in *Conference Record of the 2006 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 2006, vol. 3, pp. 376–379.
- [19] F. T. Emery and R. F. Weddleton, "Latest Advances Associated with the Insulation Systems of High Voltage Stator Coils," in *Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, vol. 1, pp. 226–229.
- [20] C. M. Laffoon and J. F. Calvert, "Insulation for High Voltage Alternators," *Trans. Am. Inst. Electr. Eng.*, vol. 54, no. 6, pp. 624–631, Jun. 1935.
- [21] V. E. Manni and W. Schneider, "An Improved Method of Corona Suppression for High-Voltage Rotating Machines," *Trans. Am. Inst. Electr. Eng. Part III Power Appar. Syst.*, vol. 79, no. 3, pp. 49–52, Apr. 1960.
- [22] A. Roberts, "Stress Grading for High Voltage Motor and Generator Coils," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 11, no. 4, pp. 26–31, Jul. 1995.
- [23] F. T. Emery, "The Application of Conductive and Semi-Conductive Corona Protection Tapes to VPI'ed High Voltage Stator Coils," in *Proceedings: Electrical Electronics Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference*, 1995, pp. 399–403.
- [24] M. Tari, K. Yoshida, S. Sekito, J. Allison, R. Brutsch, A. Lutz, and N. Frost, "A High Voltage Insulating System with Increased Thermal Conductivity for Turbo Generators," in *Proceedings: Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing and Coil Winding Technology Conference (Cat. No.03CH37480)*, 2003, pp. 613–617.
- [25] A. Bock, R. Joho, T. Baumann, and C. E. Stephan, "Trends in Insulation Systems for Generator HV-Windings," in *CIGRÉ Session 2002 SC A1 Rotating Electrical Machines*, 2002, pp. 1–4.
- [26] J.-J. Park, "AC Electrical Breakdown Characteristics of an Epoxy/Mica Composite," *Trans. Electr. Electron. Mater.*, vol. 13, no. 4, pp. 200–203, Aug. 2012.
- [27] P. Gröppler, T. Hildinger, F. Pohlmann, and J. R. Weidner, "Nanotechnology in High Voltage Insulation Systems for Large Electrical Machinery - First Results," in *CIGRÉ Session 2012 SC A1 Rotating Electrical Machines*, 2012, pp. 1–15.
- [28] R. Brutsch, "Insulating Systems for High Voltage Motors," in *11th INSUCON International Electrical Insulation Conference*, 2009, no. May, pp. 26–28.
- [29] W. T. Shugg, "Overview of our Heritage [dielectric materials]," in *Proceedings of Electrical/Electronics Insulation Conference*, 1993, pp. 191–194.
- [30] D. R. Sassano, "Electrical Insulating Varnishes: an Overview," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 8, no. 6, pp. 25–32, Nov. 1992.
- [31] W. R. Harder, "Comparative Evaluations of Coil Insulation Systems in Hydrogenerator Uprates and Refurbishment," in *IEEE International Electric Machines and Drives Conference. IEMDC '99. Proceedings (Cat. No.99EX272)*, 1996, pp. 818–820.
- [32] R. Goetter and M. Winkeler, "New Developments in Unsaturated Polyester Resins Used for Electrical Insulation," in *Proceedings: Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing and Coil Winding Conference (Cat. No.01CH37264)*, 1993, pp. 51–56.
- [33] J. A. Brydson, "Polyesters," in *Plastic Materials*, Butterworth-Heinemann, Ed. Elsevier, 1999, p. 920.
- [34] W. T. Shugg, *Handbook of Electrical and Electronic Insulating Materials*. New York, NY: IEEE Press, 1995, p. 578.

- [35] J. Karl Fink, "Unsaturated Polyester Resins," in *Reactive Polymers Fundamentals and Applications*, William Andrew, 2005, p. 794.
- [36] T. P. Wacker, G. H. Miller, and D. L. Cousins, "Solventless Mica Tapes for Press Cure," in *Proceedings:Electrical Electronics Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference*, 1995, pp. 589–591.
- [37] Q. Wang and M. Rights, "The Effect of Nano Size Fillers on Electrical Performance of Epoxy Resin," University of Southampton, 2012.
- [38] V. Sihvo, "Insulation System in an Integrated Motor Compressor," Lappeenranta University of Technology, 2010.
- [39] D. Lenko, S. Schlögl, S. Bichler, G. Lemesch, F. Ramsauer, W. Ladstätter, J. Rosc, and W. Kern, "New Approaches Towards the Investigation on Defects and Failure Mechanisms of Insulating Composites Used in High Voltage Applications," *Compos. Part B Eng.*, vol. 58, pp. 83–90, Mar. 2014.
- [40] J. Oliver, "Guide for Electric Motor Stator Winding Insulation Design, Testing and VPI Treatment." Palo Alto, CA, 1009700, p. 102, 2004.
- [41] D. a. Bolon, "Epoxy Chemistry for Electrical Insulation," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 11, no. 4, pp. 10–18, Jul. 1995.
- [42] S. J.C. and R. B.L., "Epoxy Resins (Overview)," *The Polymeric Materials Encyclopedia*. CRC Press, p. 9600, 1996.
- [43] T. Dakin, "Application of Epoxy Resins in Electrical Apparatus," *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. EI-9, no. 4, pp. 121–128, Dec. 1974.
- [44] J. Phillips, "Application of Epoxy Impregnating Resins." Epoxylite, Division of Sterling Technology Ltd, Manchester, p. 9.
- [45] O. P. Chabra and M. C. Kumar, "Techno-Scientific Aspects of Epoxy Mica Vacuum Pressure Impregnation Insulation System for Rotating Electrical Machines and Generators," in *Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (Cat. No.00CH37075)*, 2000, pp. 24–27.
- [46] J. Neal and A. Whitman, "The Role of Backing Materials in Micapaper-Based Insulations for H. V. Rotating Machines," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 2, no. 4, pp. 30–34, Jul. 1986.
- [47] R. H. Rehder, R. E. Draper, and B. J. Moore, "How Good is your Motor Insulation Systems," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 12, no. 4, pp. 8–14, Jul. 1996.
- [48] G. C. Stone, "What About Film-Backed Mica Paper Insulation?" Diagnostic News, Ontario, pp. 2–5, 2012.
- [49] H. S. McNaughton, "Comparative Performance of Woven Glass and Polyester Film Backed Micaceous Tapes for the Insulation of High Voltage AC Stator Windings of Rotating Electrical Machines," in *Proceedings of Electrical/Electronics Insulation Conference*, 1993, pp. 545–551.
- [50] F. T. Emery and M. Williams, "Preliminary Evaluation of Flat Glass Backed Mica Paper Tape for High Voltage Coil Groundwall Insulation Using Vacuum-Pressure-Impregnation," in *2011 Electrical Insulation Conference (EIC).*, 2011, no. June, pp. 175–179.
- [51] P. Marek, F. Senn, W. Grubelnik, and W. Ladstätter, "Impact of New Motor and Generator Insulation Systems," *Energize*, vol. 10, no. November, pp. 51–55, 2007.
- [52] C. Sumereder, M. Muhr, and P. Marek, "Thermal and Lifetime Behavior of Innovative Insulation Systems for Rotating Machines," in *Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines*, 2008, pp. 1–4.

- [53] W. Ladstätter, P. Marek, W. Grubelnik, and F. Senn, “New Insulation Technology Impacts Generator Design,” in *Proceedings of Power-Gen Conference*, 2006, pp. 1–21.
- [54] W. Grubelnik, J. Roberts, B. Koerbler, and P. Marek, “A New Approach in Rotating Machines Insulation Systems for Rotating Machines,” in *Proceedings of Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo*, 2005, pp. 97–102.
- [55] R. L. L. Griffeth and E. R. R. Younglove, “Processing Mica Paper for Electrical Insulation,” *Electr. Eng.*, vol. 71, no. 5, pp. 463–465, May 1952.
- [56] G. E. Haefely, “Electrical Insulating Materials,” *J. Inst. Electr. Eng. - Part I Gen.*, vol. 88, no. 5, pp. 179–188, May 1941.
- [57] R. T. Fleming, “Properties and Characteristics of Insulating Materials,” *J. Inst. Electr. Eng.*, vol. 60, no. 304, pp. 58–64, Dec. 1921.
- [58] D. M. Hepburn, I. J. Kemp, and A. J. Shields, “Mica,” *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 16, no. 5, pp. 19–24, Sep. 2000.
- [59] G. Deutschmann and K. Krassnitzer, “Influence of Mica Paper Type and Construction on the Dielectric Properties of VPI and Resin Rich High Voltage Insulation,” in *Proceedings of the 20th Electrical Electronics Insulation Conference*, 1991, pp. 60–64.
- [60] S. Manjang, I. Kitta, and K. Ikhlas, “Electrical Degradation and Aging of New Materials Insulating Under Multistress Conditions,” in *Proceedings of The First International Workshop on Modern Research Methods in Electrical Engineering*, 2009, vol. 2009, pp. 1–8.
- [61] A. Merkhouf, B. F. Boueri, and H. Karmaker, “Generator End Windings Forces and Natural Frequency Analysis,” in *IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 2003. IEMDC'03.*, 2003, vol. 1, pp. 111–114.
- [62] J. E. Neal, “The Development of Micaceous Conductor/Turn Insulation for HV Rotating Machines,” in *Proceedings: Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing and Coil Winding Conference (Cat. No.99CH37035)*, 1999, no. 3, pp. 53–59.
- [63] C. Hudo, M. Chaaban, M. Belec, and D. N. Nguyen, “Effect of temperature and thermal expansion on slot partial discharge activity,” in *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo*, 2007, pp. 122–126.
- [64] T. Brügger, “A New Test Method for Assessing the Impact of Thermal Cycling on Hydrogenerator Stator Insulation,” in *2010 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 2010, pp. 1–4.
- [65] J. E. Timperley, “Identification and Classification of Spark Erosion with EMI Diagnostics.” pp. 1–12.
- [66] P. Paloniemi, “Theory of Equalization of Thermal Ageing Processes of Electrical Insulating Materials in Thermal Endurance Tests I: Review of Theoretical Basis of Test Methods and Chemical and Physical Aspects of Ageing,” *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. EI-16, no. 1, pp. 1–6, Feb. 1981.
- [67] P. Tavner, L. Ran, J. Penman, and H. Sedding, *Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines*. Stevenage, UK: IET, 2008.
- [68] R. Brutsch, M. Tari, K. Frohlich, T. Weiers, and R. Vogelsang, “Insulation Failure Mechanisms of Power Generators [Feature Article],” *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 24, no. 4, pp. 17–25, Jul. 2008.
- [69] I. J. Kemp, “Partial Discharges and Their Measurement,” in *Advances in High Voltage Engineering*, A. Haddad and D. Warne, Eds. Stevenage, UK: IET, 2004, pp. 139–142.



- [70] A. J. Shields and I. J. Kemp, "Degradation and Breakdown of Mica Under Partial Discharge Stressing: Transverse Discharges," *IEE Proc. - Sci. Meas. Technol.*, vol. 147, no. 5, p. 256, 2000.
- [71] D. M. Ryder, J. W. Wood, and W. K. Hogg, "The Deterioration of Mica Under the Action of Electrical Discharges," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. 94, no. 3, pp. 1013–1020, May 1975.
- [72] J. H. Dymond, N. Stranges, K. Younsi, and J. E. Hayward, "Stator Winding Failures: Contamination, Surface Discharge, Tracking," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 38, no. 2, pp. 577–583, 2002.
- [73] R. Vogelsang, R. Brutsch, T. Farr, and K. Frohlich, "Electrical Tree Propagation Along Barrier-Interfaces in Epoxy Resin," in *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 2002, vol. 1, pp. 946–950.
- [74] R. Vogelsang, B. Fruth, and K. Frohlich, "Detection of Electrical Tree Propagation in Generator Bar Insulations by Partial Discharge Measurements," in *Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials (Cat. No.03CH37417)*, 2003, vol. 1, pp. 281–285.
- [75] D. M. Hepburn, "The Chemical Degradation of Epoxy Resin by Partial Discharges," Glasgow Caledonian University, 1994.
- [76] D. O. Hummel, H.-J. Düssel, G. Czybulka, N. Wenzel, and G. Holl, "Analytical Pyrolysis of Copolymers," *Spectrochim. Acta Part A Mol. Spectrosc.*, vol. 41, no. 1–2, pp. 279–290, Jan. 1985.
- [77] L. A. Wall and J. H. Flynn, "Degradation of Polymers," *Rubber Chem. Technol.*, vol. 35, no. 5, pp. 1157–1221, Nov. 1962.
- [78] R. Bartnikas, "Partial Discharges. Their Mechanism, Detection and Measurement," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 9, no. 5, pp. 763–808, Oct. 2002.
- [79] K. Uchida and N. Shimizu, "The Effect of Temperature and Voltage on Polymer Chain Scission in High-Field Region," *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. 26, no. 2, pp. 271–277, Apr. 1991.
- [80] H. Kudo, A. Shimada, I. A. T. Ohshima, K. Tamura, and T. Seguchi, "Degradation Mechanisms of Cable Insulation Materials by Radiation and Thermal Ageing," in *International Symposium on the Ageing Management & Maintenance of Nuclear Power Plants*, 2010, pp. 84–91.
- [81] T. Tanaka, "Aging of Polymeric and Composite Insulating Materials. Aspects of Interfacial Performance in Aging," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 9, no. 5, pp. 704–716, Oct. 2002.
- [82] A. J. Shields, "Role of Thermal Effects in Discharge Degradation of Micas Used in High Power Rotating Machines," in *Eighth International Conference on Dielectric Materials, Measurements and Applications*, 2000, vol. 2000, pp. 397–402.
- [83] S. Swapan Dutta, "Water Absorption and Dielectric Properties of Epoxy Insulation," Norwegian University of Science and Technology, 2008.
- [84] J. Zhidong, H. Yanpeng, and X. Hengkun, "The Degradation Assessment of Epoxy/Mica Insulation Under Multi-Stresses Aging," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 13, no. 2, pp. 415–422, Apr. 2006.
- [85] C. Roggendorf, M. Kessler, S. Schulte, and A. Schnettler, "Accelerated Test Procedures for Hydrothermal Aging," in *2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 2010, pp. 1–5.

- [86] S. U. Ahmed, "Variation of Mechanical Properties Due to Hygrothermal Ageing and Permanent Changes upon Redrying in Clay/Epoxy Nanocomposites," Oklahoma State University, 2009.
- [87] P. Gonon, S. Bourdelais, O. Lesaint, T. P. Hong, P. Guuinic, and H. Debruyne, "Effects of Hydrothermal Aging on the Dielectric Properties of Epoxy Composites," in *Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials (Cat. No.03CH37417)*, 2003, vol. 3, no. 1, pp. 936–939.
- [88] T. Hong, O. Lesaint, and P. Gonon, "Water Absorption in a Glass-Mica-Epoxy Composite - [I: Influence on Electrical Properties]," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 16, no. 1, pp. 1–10, Feb. 2009.
- [89] I. J. Kemp and A. J. Shields, "Degradation and Breakdown of Mica Under Partial Discharge Stressing," *IEE Proc. - Sci. Meas. Technol.*, vol. 147, no. 3, pp. 105–109, May 2000.
- [90] W.-X. Li, J.-L. Li, and W.-F. Sheng, "Study of Rapid Thermal Evaluation for Form-Wound Winding Insulation Systems," in *Proceedings., Second International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, 1988, pp. 438–441.
- [91] K. Wolter, J. Johnson, and J. Tanaka, "Degradation Product Analysis for Polymeric Dielectric Materials Exposed to Partial Discharges," *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. EI-13, no. 5, pp. 327–336, Oct. 1978.
- [92] L. J. Berberich and T. W. Dakin, "Guiding Principles in the Thermal Evaluation of Electrical Insulation," *Trans. Am. Inst. Electr. Eng. Part III Power Appar. Syst.*, vol. 75, no. 3, pp. 752–761, Jan. 1956.
- [93] K. Liedermann, "Ageing Processes in Epoxy Based Relanex Insulation as Monitored by Time-Domain Dielectric Relaxation Spectroscopy," in *Proceedings of 1995 International Symposium on Electrical Insulating Materials*, pp. 367–370.
- [94] T. W. Dakin, "Electrical Insulation Deterioration Treated as a Chemical Rate Phenomenon," *Trans. Am. Inst. Electr. Eng.*, vol. 67, no. 1, pp. 113–122, Jan. 1948.
- [95] J. A. Nurse, "The Development of Modern High Voltage Insulation Systems for Large Motors and Generators," in *Eighth International Conference on Electrical Machines and Drives*, 1997, vol. 1997, pp. 304–308.
- [96] K. Kimura and Y. Kaneda, "The Role of Microscopic Defects in Multistress Aging of Micaceous Insulation," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 2, no. 3, pp. 426–432, Jun. 1995.
- [97] G. C. Stone and I. Culbert, "Prediction of Stator Winding Remaining Life from Diagnostic Measurements," in *2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 2010, pp. 1–4.
- [98] M. Istad, M. Runde, and A. Nysveen, "A Review of Results From Thermal Cycling Tests of Hydrogenerator Stator Windings," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 26, no. 3, pp. 890–903, Sep. 2011.
- [99] G. Paolitti and A. Golubev, "Partial Discharge Theory and Technologies Related to Traditional Testing Methods of Large Rotating Apparatus," in *Conference Record of the 1999 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Forth IAS Annual Meeting (Cat. No.99CH36370)*, 1999, vol. 2, no. March, pp. 967–981.
- [100] L. M. Rux, "The Physical Phenomena Associated with Stator Winding," Mississippi State University, 2004.
- [101] A. Krivda, "Recognition of Discharges : Discrimination and Classification," Delft University of Technology, 1995.

- [102] T. Okamoto and T. Tanaka, "Novel Partial Discharge Measurement Computer-Aided Measurement Systems," *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. EI-21, no. 6, pp. 1015–1019, Dec. 1986.
- [103] E. Gulski, J. P. Zondervan, A. Zielonka, and R. Brooks, "PD Data Base for Stator Insulation of Turbogenerators," in *IEEE 1997 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 1997, vol. 2, pp. 546–549.
- [104] E. Gulski and F. H. Kreuger, "Computer-Aided Recognition of Discharge Sources," *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. 27, no. 1, pp. 82–92, 1992.
- [105] X. Zhang and L. Zhang, "Study on Aging of Stator Bar Insulation of Generator Based on Moment Characteristics of Partial Discharge," in *Proceedings of 2001 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM 2001). 2001 Asian Conference on Electrical Insulating Diagnosis (ACEID 2001). 33rd Symposium on Electrical and Electronic Insulating Materials and Applications in System*, vol. 2, pp. 701–704.
- [106] Z. Jia, X. Peng, Z. Guan, L. Wang, and B. Yue, "Evaluation of the Degradation of Generator Stator Ground Wall Insulation Under Multistresses Aging," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 23, no. 2, pp. 474–483, Jun. 2008.
- [107] R. Li, L. Pan, C. Yan, H. Li, and B. Hu, "Condition Evaluation of Large Generator Stator Insulation Based on Partial Discharge Measurement," *Adv. Mech. Eng.*, vol. 2013, pp. 1–10, 2013.
- [108] T. Weiers, Y. Corrodi, R. Brutsch, and R. Vogelsang, "Partial discharges in VPI Winding Insulations in Dependence on the Impregnating Resin," in *2006 IEEE 8th International Conference on Properties and applications of Dielectric Materials*, 2006, pp. 183–186.
- [109] T. Tsukui, M. Takamura, and Y. Kako, "Correlations between Nondestructive and Destructive Tests on High-Voltage Coil Insulations for Rotating Machines," *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. EI-16, no. 2, pp. 118–127, Apr. 1981.
- [110] B. Yue, J. Li, Z. Xiaohong, Y. Cheng, and X. Hengkun, "Using AC Current Parameters to Evaluate Aging Condition of Stator Insulation," in *Proceedings of 2001 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM 2001). 2001 Asian Conference on Electrical Insulating Diagnosis (ACEID 2001). 33rd Symposium on Electrical and Electronic Insulating Materials and Applications in System*, pp. 725–728.
- [111] S. Jiancheng, Y. Bo, X. Hengkun, B. Yue, and J. Song, "New Estimating Techniques for Multi-Stress Aging Test of Large Generator Stator Winding Insulation," in *Proceedings of the 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials (Cat. No.00CH36347)*, 2000, vol. 2, pp. 951–956.
- [112] J. Song, Y. Cheng, X. Hengkun, J. Hao, H. Li, and H. Junfang, "Aging Diagnosis of Large Generator Stator Winding Insulation Based on AC Dielectric Characteristic Parameters," in *Proceedings of 2001 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM 2001). 2001 Asian Conference on Electrical Insulating Diagnosis (ACEID 2001). 33rd Symposium on Electrical and Electronic Insulating Materials and Applications in System*, 2001, pp. 709–712.
- [113] B. Yue, Z. Zhelei, C. Xiaolin, X. Hengkun, and Y. Bo, "Study on the Characteristic Parameters Used to Assess the Insulation Condition of Stator Winding," in *Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials (Cat. No.03CH37417)*, 2003, vol. 1, pp. 278–280.

- [114] T.-S. Kong, H.-D. Kim, S.-K. Lee, K.-Y. Kim, and Y.-H. Ju, "A Study on Insulation Property of White Powder Found on High Voltage Motor Stator Winding," *Trans. Korean Inst. Electr. Eng.*, vol. 60, no. 8, pp. 1627–1631, Aug. 2011.
- [115] H.-D. Kim, "Analysis of Insulation Condition in High Voltage Motor Stator Windings Following Cleaning and Insulation Reinforcement," *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, vol. 25, no. 6, pp. 474–480, Jun. 2012.
- [116] H.-D. Kim, G.-H. Yang, and Y.-H. Ju, "Assessment of Insulation Condition in Gas Turbine Generator Stator Windings," *Trans. Korean Inst. Electr. Eng.*, vol. 59, no. 8, pp. 1423–1428, 2010.
- [117] H.-D. Kim and T.-S. Kong, "Characteristics of Insulation Diagnosis and Failure in 6.6 kV Motor Stator Windings," *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, vol. 25, no. 4, pp. 309–314, Apr. 2012.
- [118] B.-R. Kim and H.-D. Kim, "Electrical Properties of Wet Bars in Water-cooled Generator Stator Windings," *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, vol. 25, no. 10, pp. 817–823, Oct. 2012.
- [119] H.-D. Kim and C.-H. Kim, "Stator Insulation Quality Assessment for High Voltage Motors Based on Probability Distributions," *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 3, no. 4, pp. 1–6, 2008.
- [120] H.-D. Kim and T.-S. Kong, "Assessment of Insulation Deterioration in Stator Windings of High Voltage Motor," *Trans. Korean Inst. Electr. Eng.*, vol. 61, no. 5, pp. 711–716, May 2012.
- [121] H.-D. Kim, T.-S. Kong, Y.-H. Ju, and B.-H. Kim, "Analysis of Insulation Quality in Large Generator Stator Windings," *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 6, no. 3, pp. 384–390, May 2011.
- [122] H.-D. Kim, Y.-J. Lee, and Y.-H. Ju, "Characteristics of Insulation Aging in Large Generator Stator Windings," *Trans. Korean Inst. Electr. Eng.*, vol. 58, no. 7, pp. 1375–1379, 2009.
- [123] T.-S. Kong, Y.-H. Ju, H.-D. Kim, and T.-S. Park, "Analysis of the Temperature Influence on Insulation Characteristics in High Voltage Motor Stator Windings," *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, vol. 25, no. 10, pp. 786–790, Oct. 2012.
- [124] S. Kornhuber, S. Markalous, M. Muhr, T. Strehl, and C. Sumereder, "Comparison of Methods for the Dissipation Factor Measurement at Practical Examples," *Proc. 16th Int. Symp. High Volt. Eng.*, pp. 1–5, 2009.
- [125] T. W. Dakin, "The Relation of Capacitance Increase with High Voltages to Internal Electric Discharges and Discharging Void Volume," *Trans. Am. Inst. Electr. Eng. Part III Power Appar. Syst.*, vol. 78, no. 3, pp. 790–794, Apr. 1959.
- [126] K. Kadotani, T. Miyashita, F. Aki, and K. Matsunobu, "An Approach for Insulation Diagnosis of Mica-Resin Coils," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-100, no. 9, pp. 4136–4141, Sep. 1981.
- [127] W. S. Zaengl, "Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain for HV Power Equipment. I. Theoretical Considerations," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 19, no. 5, pp. 5–19, Sep. 2003.
- [128] A. Helgeson, "Analysis of Dielectric Response Measurement Methods and Dielectric Properties of Resin-Rich Insulation During Processing," Kungl Tekniska Högskolan, 2000.
- [129] A. K. Jonscher, "The 'Universal' Dielectric Response. I," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 6, no. 2, pp. 16–22, Mar. 1990.

- [130] N. Taylor, "Diagnostics of Stator Insulation by Dielectric Response and Variable Frequency Partial Discharge Measurements," Kungl Tekniska Högskolan, 2006.
- [131] A. Hale, "Thermosets," in *Handbook of Thermal Analysis and Calorimetry Vol. 3*, S. Z. Cheng, Ed. Elsevier Science, 2002, pp. 295–354.
- [132] R. E. Draper, B. J. Moore, and R. H. Rehder, "Insulation System Evaluation for Rotating Machinery," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 11, no. 4, pp. 19–25, Jul. 1995.
- [133] J. E. Timperley and B. S. Nindra, "Evaluation of Epoxy V.P.I. Insulation for High Voltage Stator Windings," in *Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (Cat. No.00CH37075)*, 2000, pp. 528–531.
- [134] Y. Zheng, K. Chonung, G. Wang, P. Wei, and P. Jiang, "Epoxy/Nano-Silica Composites: Curing kinetics, Glass Transition Temperatures, Dielectric, and Thermal-Mechanical Performances," *J. Appl. Polym. Sci.*, p. NA–NA, 2008.
- [135] D. Ratna, "General Introduction to Thermoset Networks," in *Handbook of Thermoset Resins*, Shropshire: iSmithers Rapra Publishing, 2009, p. 410.
- [136] P. Trnka, J. Pihera, and V. Mentlik, "Optimalization of the Thermal Curing of Epoxy Based Insulations," *Acta Electrotech. Inform.*, vol. 8, no. 2, pp. 29–34, 2008.
- [137] V. Boucher, P. Rain, G. Teissedre, and P. Schlupp, "Mechanical and Dielectric Properties of Glass-Mica-Epoxy Composites along Accelerated Thermo-Oxidative Aging," in *2007 IEEE International Conference on Solid Dielectrics*, 2007, pp. 162–165.
- [138] G. M. Odegard and A. Bandyopadhyay, "Physical Aging of Epoxy Polymers and their Composites," *J. Polym. Sci. Part B Polym. Phys.*, vol. 49, no. 24, pp. 1695–1716, Dec. 2011.
- [139] M. J. Llena Morancho, "Estudio del Curado de Materiales Compuestos por un Sistema Epoxi y Partículas Elastoméricas," Universitat Politècnica de Catalunya, 1996.
- [140] D. Vaishampayan, "Dielectric Spectroscopy of Bisphenol A Epoxy Resin Aged in Wet and Dry Conditions," Norwegian University of Science and Technology, 2009.
- [141] T. Koreeda and J. Matos, "Thermal Characterization of Mica–Epoxy Composite Used as Insulation Material for High Voltage Machines," *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 106, no. 2, pp. 619–623, Mar. 2011.
- [142] L. Boukezzi, A. Boubakeur, C. Laurent, and M. Lallouani, "Observations on Structural Changes under Thermal Ageing of Cross-linked Polyethylene Used As Power Cables Insulation," *Iran. Polym. J.*, vol. 17, no. 8, pp. 611–624, 2008.
- [143] X. Ramis Juan, "Estudio de la Eficiencia de Sistemas Químicos de Iniciación del Curado de Resinas de Poliéster Insaturado," Universitat Politècnica de Catalunya, 2006.
- [144] J. Rocks, "Characterization of Novel Co- Anhydride cured Epoxy Resins," Queensland University of Technology, 2004.
- [145] V. Sihvo, A. Pihlajamaki, J. Nerg, S. Hvidsten, O. Kvien, and L. Brenne, "Effects of Raw Natural Gas on the Aging of High-Voltage Electrical Machine Mainwall Insulation," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 19, no. 3, pp. 893–902, Jun. 2012.
- [146] M. N. Ajour, "The Effect of High Voltage Fields on Epoxy Laminates," University of Leicester, 2003.
- [147] H. D. Kim, T. W. Kim, J. H. Kim, and D. Y. Kang, "Thermal Aging Properties of Mica/Epoxy Stator Winding Insulations," in *IEEE 1997 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 1997, vol. 2, pp. 419–422.
- [148] L. Vouyovitch, L. Flandin, J.-L. Bessede, and N. D. Alberola, "Evolutions of Microstructure and Dielectric Behavior of Epoxy Based Insulator-Insulator Composites

- over Long Periods of Time,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 100, no. 5, pp. 3454–3464, Jun. 2006.
- [149] J. Subocz, “Application of the FDS Method for Assessment of HV Epoxy–Mica–Glass Insulation,” *Mater. Sci.*, vol. 27, no. 4, p. 8, 2009.
- [150] V. Boucher, P. Rain, G. Teissedre, and P. Schlupp, “Evolution of Structural Properties of Glass-Mica-Epoxy Insulations Along Accelerated Thermo-Oxidative Aging,” in *2008 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 2008, pp. 83–86.
- [151] M. D. Chipara, P. V. Notingher, J. R. Reyes, and M. I. Chipara, “On the Thermooxidative Degradation of Polyethyleneterephthalate,” in *ICSD '98. Proceedings of the 1998 IEEE 6th International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics (Cat. No.98CH36132)*, 1998, no. 5, pp. 283–285.
- [152] Y. Li, B. Gao, and J. Unsworth, “Degradation of Epoxy Insulation Under Combined High Humidity and Elevated Temperature,” in *Proceedings of 1994 4th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)*, 1994, vol. 2, no. 01, pp. 752–755.
- [153] B. N. Rao, A. Sudhindra, S. P. Agarwal, S. a. Miraj, C. R. Saha, and B. Ramachandra, “Study on Diagnosis of HV Rotating Electrical Machine Insulation Based on Structural Changes Due to Ageing,” in *2009 IEEE 9th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials*, 2009, pp. 208–211.
- [154] Y. P. Hao, X. L. Wang, and H. K. Xie, “Degradation of Epoxy in Stator Insulation in Service 23 Years for A Large Generator,” in *2007 IEEE International Conference on Solid Dielectrics*, 2007, pp. 314–317.
- [155] J. Coates, “Interpretation of Infrared Spectra, A Practical Approach,” *Encyclopedia of Analytical Chemistry*. John Wiley & Sons Ltd, pp. 10815–10837, 2000.
- [156] E. B. Schrader, “General Survey of Vibrational Spectroscopy,” in *Infrared and Raman Spectroscopy*, vol. 9, no. 3, B. Schrader, Ed. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH, 1995, pp. 7–61.
- [157] S. Hsu, “Infrared Spectroscopy,” in *The Handbook of Instrumental Techniques for Analytical Chemistry*, F. Settle, Ed. Arlington: Prentice-Hall, 1997, pp. 247–283.
- [158] M. G. González, J. C. Cabanelas, J. Baselga, and M. González-González, “Applications of FTIR on Epoxy Resins - Identification, Monitoring the Curing Process, Phase Separation and Water Uptake,” in *Infrared Spectroscopy - Materials Science, Engineering and Technology*, vol. 2, P. T. Theophanides, Ed. InTech, 2012, pp. 261–284.
- [159] H. Smaoui, H. Guermazi, S. Agnel, Y. Mlik, A. Toureille, and F. Schué, “Structural Changes in Epoxy Resin Polymer after Heating and their Influence on Space Charges,” *Polym. Int.*, vol. 52, no. 8, pp. 1287–1293, Aug. 2003.
- [160] P. Preetha and M. Thomas, “Partial Discharge Resistant Characteristics of Epoxy Nanocomposites,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 18, no. 1, pp. 264–274, Feb. 2011.
- [161] D. M. Hepburn, I. J. Kemp, A. J. Shields, and J. Cooper, “Degradation of Epoxy Resin by Partial Discharges,” *IEE Proc. - Sci. Meas. Technol.*, vol. 147, no. 3, p. 97, 2000.
- [162] J. de Vreugd, a. S. Monforte, K. M. B. Jansen, L. J. Ernst, C. Bohm, A. Kessler, and H. Preu, “Effect of Postcure and Thermal Aging on Molding Compound Properties,” in *2009 11th Electronics Packaging Technology Conference*, 2009, pp. 342–347.

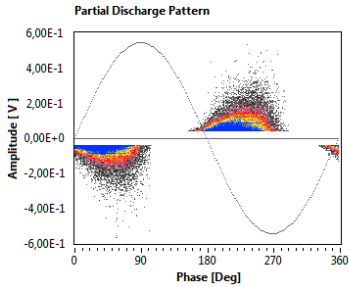
- [163] T. Koreeda, “Caracterização Termoanalítica e Estudo de Cura de Compósito de Resina Epóxi e Mica com Propriedades Elétricas Isolantes Aplicado em Máquinas Hidrogeradoras,” Universidade de Sao Paulo, 2011.
- [164] P. Cygan and J. R. Laghari, “Models for Insulation Aging under Electrical and Thermal Multistress,” *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. 25, no. 5, pp. 923–934, 1990.
- [165] H. Zhu, C. Morton, and S. Cherukupalli, “Quality Evaluation of Stator Coils and Bars under Thermal Cycling Stress,” in *Conference Record of the 2006 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 2006, pp. 384–387.
- [166] G. C. Stone, J. F. Lyles, J. M. Braun, and C. L. Kaul, “A Thermal Cycling Type Test for Generator Stator Winding Insulation,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 6, no. 4, pp. 707–713, 1991.
- [167] E. Gockenbach and M. Farahani, “Dielectric Response Measurements as Life Assessment Technique for Insulation Systems,” in *Cigre SC A1 & D1 Joint Colloquium*, 2007, pp. 1–8.
- [168] E. David, T. Godin, J. Bellemare, and L. Lamarre, “Modeling of the Dielectric Response of a Stator Winding Insulation from a DC Ramp Test,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 14, no. 6, pp. 1548–1558, Dec. 2007.
- [169] N. Taylor, “Dielectric Response and Partial Discharge Measurements on Stator Insulation at Varied Low Frequency,” Kungl Tekniska Högskolan, 2010.
- [170] B. Sonerud, T. Bengtsson, J. Blennow, and S. Gubanski, “Capacitance Measurements and Tree Length Estimation During Electrical Treeing in Sub-Picofarad Samples,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 16, no. 6, pp. 1707–1709, Dec. 2009.
- [171] M. Farahani, H. Borsi, and E. Gockenbach, “Study of Capacitance and Dissipation Factor Tip-Up to Evaluate the Condition of Insulating Systems for High Voltage Rotating Machines,” *Electr. Eng.*, vol. 89, no. 4, pp. 263–270, Mar. 2006.
- [172] M. Farahani, H. Borsi, E. Gockenbach, and M. Kaufhold, “Partial Discharge and Dissipation Factor Behavior of Model Insulating Systems for High Voltage Rotating Machines under Different Stresses,” *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 21, no. 5, pp. 5–19, Sep. 2005.
- [173] “IEEE Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation,” *IEEE Std 286-2000*, pp. i–29, 2001.
- [174] R. Bartnikas, “Corona Discharge Processes in Voids,” in *Engineering Dielectrics, VOL I*, American Society for Testing and Materials, 1979, pp. 22–67.
- [175] H. Yanpeng, W. Guoli, and X. Hengkun, “Epoxy/mica Insulation Condition Assessment Using AC Current Method,” in *Proceedings of 2001 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM 2001). 2001 Asian Conference on Electrical Insulating Diagnosis (ACEID 2001). 33rd Symposium on Electrical and Electronic Insulating Materials and Applications in System*, no. 59837260, pp. 705–708.
- [176] U. Gafvert, “Dielectric Response Analysis of Real Insulation Systems,” in *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Solid Dielectrics, 2004. ICSD 2004.*, 2004, vol. 1, pp. 1–10.
- [177] EPRI, “Partial Discharge Testing of Rotating Machine Stator Windings.” 1001266, Charlotte, NC, p. 58, 2000.
- [178] C. Ceretta, “Analisi Delle Scariche Parziali per la Diagnostica delle Macchine Elettriche,” Università’ Degli Studi di Padova, 2008.

- [179] E. Gulski, "Computer-aided Recognition of Partial Discharges Using Statistical Tools," Delft University, 1991.
- [180] M. Farahani, H. Borsi, and E. Gockenbach, "Dielectric Response Studies on Insulating System of High Voltage Rotating Machines," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 13, no. 2, pp. 383–393, Apr. 2006.
- [181] M. Farahani, H. Borsi, E. Gockenbach, and L. U. Hannover, "Partial Discharge Behavior of Insulating Systems for High Voltage Rotating Machines under Electrical Stress," pp. 165–168, 2007.
- [182] I. Jaramillo, C. Morales, A. Betancur, J. Cruz, and P. Gañán, "Estudio del Curado de Resinas Epóxicas Empleando Espectroscopía Infrarroja," *Dyna*, vol. 71, no. 143, pp. 67–80, 2004.
- [183] M. Danikas, X. Zhao, and Y. Cheng, "Experimental Data on Epoxy Resin Samples: Small Partial Discharges at Inception Voltage and Some Thoughts on the Possibility of the Existence of Charging Phenomena Below Inception Voltage," *J. Electr. Eng.*, vol. 62, no. 5, pp. 292–296, Jan. 2011.
- [184] G. Nikolic, S. Zlatkovic, M. Cakic, S. Cakic, C. Lacnjevac, and Z. Rajic, "Fast Fourier Transform IR Characterization of Epoxy GY Systems Crosslinked with Aliphatic and Cycloaliphatic EH Polyamine Adducts.," *Sensors (Basel)*, vol. 10, no. 1, pp. 684–96, Jan. 2010.
- [185] M. B. Montero Rodríguez, "Estudio de la Influencia del Contenido en Peso de un Silsesquioxano Oligomérico Poliédrico (poss®) en las Propiedades de un Sistema Epoxi/Diamina," Universidade da Coruña, 2010.

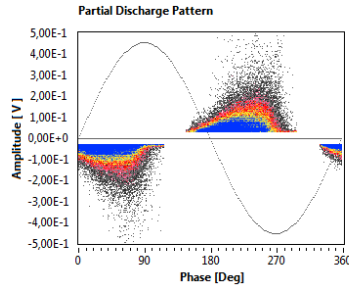


# ANEXO I

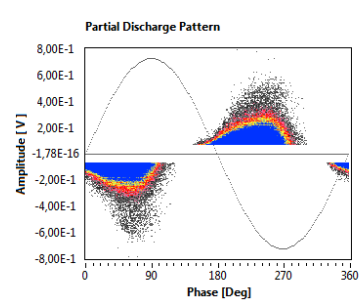
Patrones en fase resuelta para la barra Bar1 medidos a 10kV.



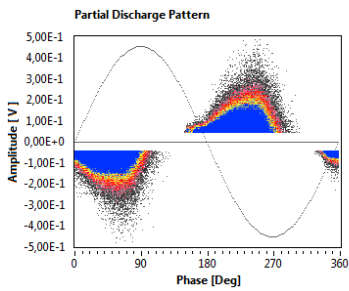
Ciclo de envejecimiento 0



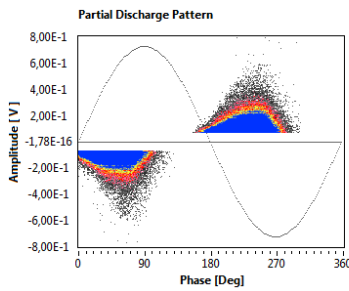
Ciclo de envejecimiento 1



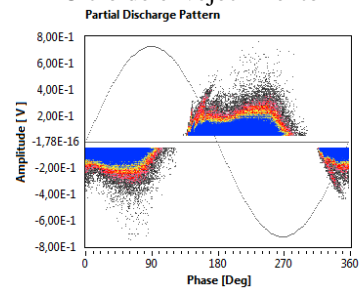
Ciclo de envejecimiento 2



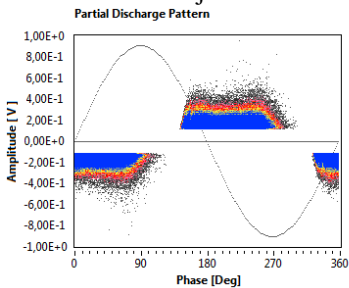
Ciclo de envejecimiento 3



Ciclo de envejecimiento 4

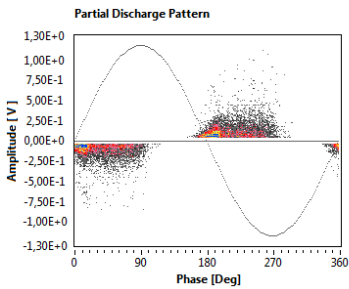


Ciclo de envejecimiento 5

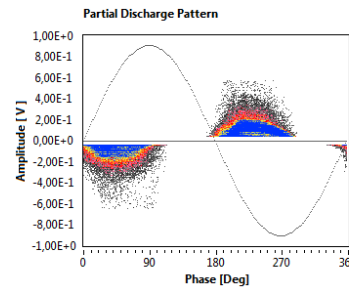


Ciclo de envejecimiento 6

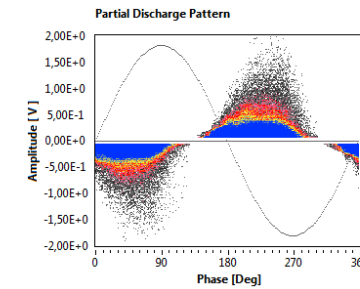
Patrones en fase resuelta para la barra Bar2 medidos a 10kV.



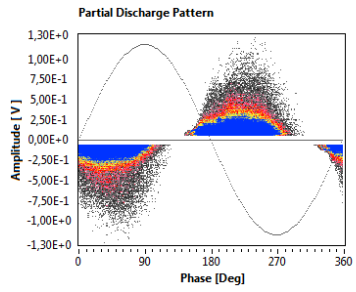
Ciclo de envejecimiento 0



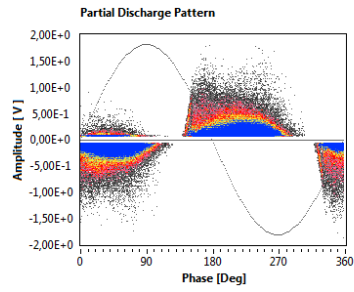
Ciclo de envejecimiento 1



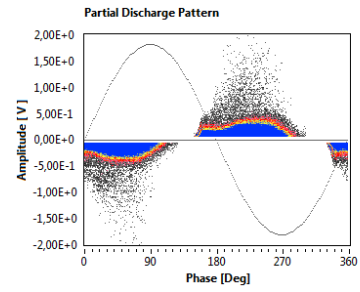
Ciclo de envejecimiento 2



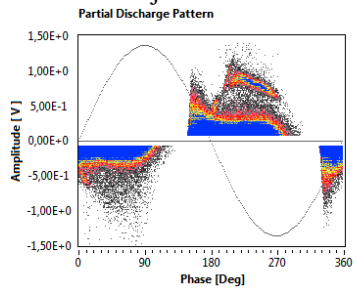
Ciclo de envejecimiento 3



Ciclo de envejecimiento 4

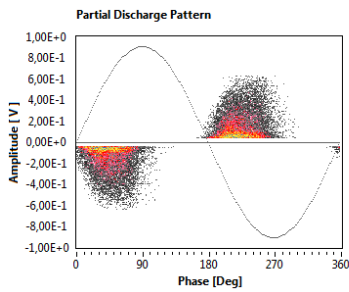


Ciclo de envejecimiento 5

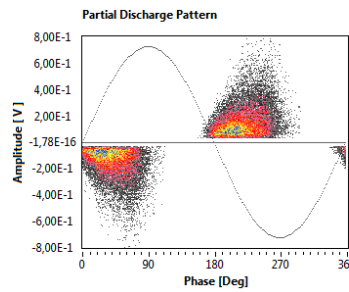


Ciclo de envejecimiento 6

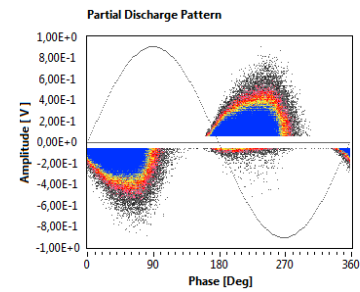
Patrones en fase resuelta para la barra Bar4 medidos a 10kV.



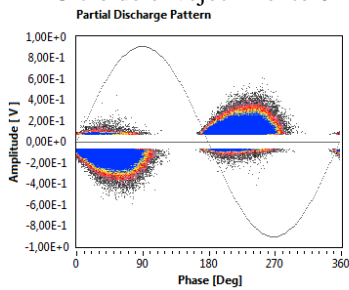
Ciclo de envejecimiento 0



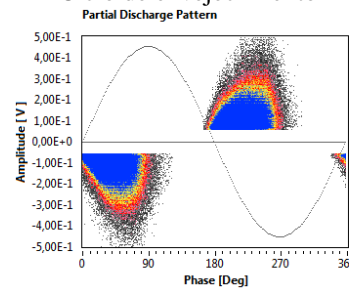
Ciclo de envejecimiento 1



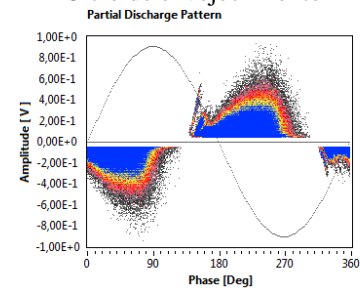
Ciclo de envejecimiento 2



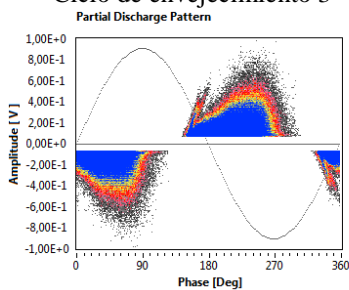
Ciclo de envejecimiento 3



Ciclo de envejecimiento 4

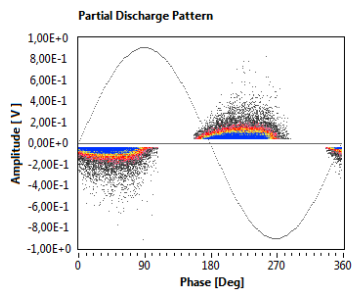


Ciclo de envejecimiento 5

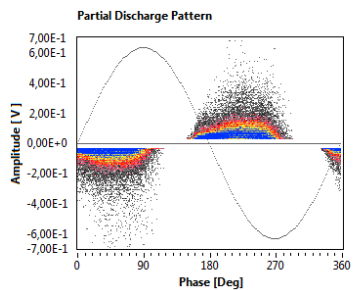


Ciclo de envejecimiento 6

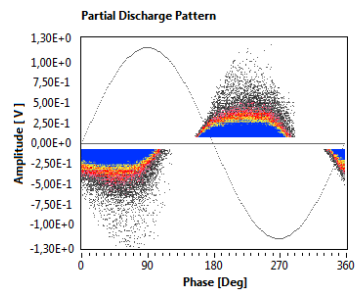
Patrones en fase resuelta para la barra Bar6 medidos a 10kV.



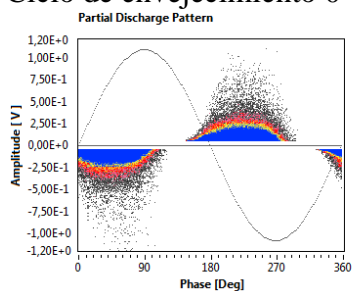
Ciclo de envejecimiento 0



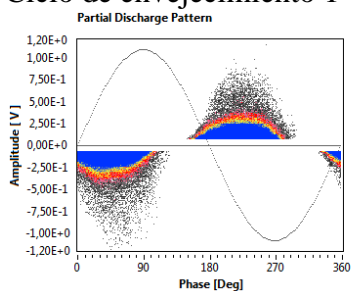
Ciclo de envejecimiento 1



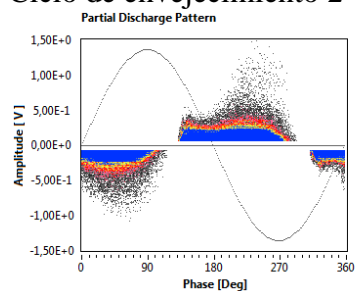
Ciclo de envejecimiento 2



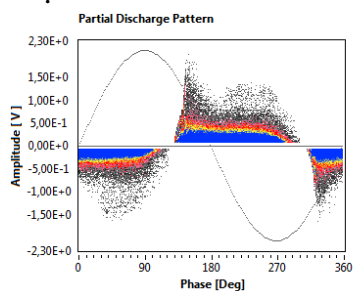
Ciclo de envejecimiento 3



Ciclo de envejecimiento 4



Ciclo de envejecimiento 5



Ciclo de envejecimiento 6

## ANEXO II

Longitud de Onda [cm <sup>-1</sup> ]		Identificación de la banda de absorción detectada	Referencia
447	0	Resina epoxi	[183]
563	0	Resina epoxi	[183]
574	0	Doblamiento C-H en resina DGEBF-A	[184]
638	0	Doblamiento -N-H en resina DGEBF-A	[184]
686	0	Resina epoxi	[183]
717	0	Resina epoxi	[183]
719	0	Vibraciones de la fibra de vidrio	[154]
749	0	Vibraciones de la fibra de vidrio	[154]
772	0	Balanceo del grupo CH <sub>2</sub>	[158]
773	0	Vibración del C-H en resina DGEBF-A	[184]
828	0	Deformación fuera del plano del enlace -CH en anillo aromático	[160]
829	0	Vibración C-H en anillo aromático	[153]
830	0	Vibración del Ar =C-H en resina DGEBF-A	[184]
831	835	Para-sustitución of benceno	[154]
831	0	Estiramiento del C-O-C del grupo oxirano	[158]
831	0	Deformación fuera del plano del aromático-H	[75]
831	0	1,4 substitución del anillo aromático/C-O-C (oxirano) en resina DGEBF-A	[184]
831	0	Vibraciones de los átomos de H en el anillo aromático de la resina DGEBF-A	[139]
833	0	Resina epoxi	[183]
840	790	Vibraciones del CH en resina epoxi	[147]
863	0	Anillo epóxido	[75]
863	0	Anillo epóxido en resina DBEBF-A	[182]
863	0	Anillo epóxido en resina DBEBF-A	[139]
865	0	Doblamiento fuera del plano del enlace N—H	[159]
868	0	Anillo del endurecedor anhídrido	[75]
870	850	Grupo epóxido	[147]
899	0	Anillo del endurecedor anhídrido	[75]
913	0	Grupo epóxido en resina DGEBF-A	[185]
915	0	Estiramiento asimétrico del anillo epóxido	[145]
915	0	Estiramiento del C-O del grupo epóxido	[158]
915	0	Doblamiento del CH <sub>2</sub> -O-CH en resina DGEBF-A	[184]
916	1016	Grupo epóxido	[159]
916	0	Anillo epóxido/anillo anhídrido	[75]
916	0	Anillo epoxi en DGEBF-A	[182]
916	0	Anillo epoxi en DGEBF-A	[139]

919	0	Grupo epóxido	[160]
920	0	Grupo epóxido	[154]
929	0	Anillo anhídrido	[75]
931	0	C-O-H	[162]
936	0	Deformación fuera del plano aromático-H	[75]
943	0	Anillo anhídrido	[75]
970	0	Anillo epóxido en resina DBEBF-A	[182]
1011	0	Vibraciones Si-O en la mica	[154]
1012	0	Deformación en el plano aromático-H	[75]
1026	0	Resina epoxi	[153]
1032	1100	Estiramiento simétrico C – O– C del anillo aromático	[160]
1035	0	C-O-C en éter alifático	[75]
1036	0	Stretching C-O-C of ethers	[158]
1036	0	Estiramiento simétrico del aromático-O-C	[75]
1036	0	Estiramiento -C-O-C en resina DGEBF-A	[184]
1036	0	Ph-O-C en éter en resina DGEBF-A	[139]
1040	0	Grupos éter	[154]
1041	0	Resina epoxi	[183]
1083	0	Anillo anhídrido	[75]
1086	0	Deformación en el plano aromático-H	[75]
1087	0	Vibraciones del C-O en éster/éter	[163]
1100	1000	C-O-C en éter	[161]
1120	0	Estiramiento C-C	[84]
1120	0	Estiramiento C-C	[161]
1120	0	C-C en cadena alifática	[75]
1132	0	Estiramiento -O-C-C en resina epoxi	[184]
1180	0	Resina epoxi	[183]
1181	0	C=O estiramiento del anillo aromático	[161]
1184	0	C-C en Ar-C( -C)-Ar	[75]
1184	0	Estiramiento -C-C-O-C- en resina DGEBF-A	[184]
1184	0	Vibraciones de los átomos de H en el anillo aromático de la resina DGEBF-A	[139]
1185	0	Deformación en el plano aromático-H	[75]
1186	0	Estiramiento asimétrico C–O en alifáticos	[160]
1192	0	Vibraciones C-C de la cadena principal de la resina	[154]
1219	0	C-O-C in anhídrido	[163]
1228	0	Estiramiento C-O	[75]
1230	0	Deformación en el plano aromático-H	[75]
1236	0	Estiramiento C-O en anillo aromático	[161]
1242	0	Resina epoxi	[183]
1244	0	Estiramiento C-O en anillo aromático	[84]
1245	0	Estiramiento C-H	[153]

1245	1240	Grupos éter arilos	[154]
1246	0	Estiramiento asimétrico C – O– C en anillo aromático	[160]
1247	0	Estiramiento -C-C-O-C- en resina DGEBF-A	[184]
1248	0	Estiramiento aromático-O	[75]
1248	0	Ph-O en éter	[139]
1248	0	C-O en éter en la estructura C(Ar)-O-C(alifático) de la resina DGEBF-A	[185]
1255	0	C-O-C en Ar - 0 - R	[75]
1267	0	C-O + C-C str	[75]
1270	0	Estiramiento C-O	[162]
1270	1255	C-O	[147]
1280	0	C-O en aromático	[75]
1288	0	Resina epoxi	[183]
1290	0	N-O en nitritos/nitratos	[161]
1297	0	CH2 deformación asimétrica	[160]
1298	0	Estiramiento C-O + estiramiento C-C (?)	[75]
1298	0	C-O en éter en resina DGEBF-A	[139]
1326	0	Deformación en el plano CH	[75]
1345	0	Deformación CH	[75]
1347	0	N–O en nitritos/nitratos	[160]
1347	0	Deformación CH	[75]
1350	0	N–O en nitritos/nitratos	[161]
1362	0	Doblamiento CH3 en resina DGEBF-A	[184]
1381	0	Resina epoxi	[183]
1382	0	Deformación simétrica metilo	[75]
1385	0	C-CH3 en resina DGEBF-A	[139]
1398	0	Wagging metileno	[75]
1412	0	Estiramiento 1, 4 Benceno (sustitución?)	[75]
1414	0	Deformación CH	[75]
1420	0	Estiramiento C-O en ácidos	[161]
1431	0	Deformación OCH2?	[75]
1445	0	CH3 deformación asimétrica	[75]
1450	0	C-O-H en grupos carboxilo	[162]
1454	0	Deformación metileno	[75]
1455	0	Doblamiento metileno en resina DGEBF-A	[184]
1457	0	aromático C=C + deformación asimétrica CH3	[75]
1458	0	Resina epoxi	[183]
1460	0	Estiramiento C–C en el anillo aromático	[160]
1465	0	Deformación CH2	[75]
1507	0	Estiramiento C=C en anillo aromático	[161]
1509	0	Estiramiento C-O en anillo aromático	[84]
1509	0	Anillo aromático	[153]

1509	0	Estiramiento C-C en anillo aromático	[158]
1510	1460	CH <sub>2</sub>	[147]
1510	0	Anillo benceno	[154]
1510	0	C=C en anillo benceno en resina DGEGBF-A	[182]
1510	0	Ar -C=C-H	[184]
1510	0	C=C en anillo benceno en resina DGEGBF-A	[185]
1511	0	Estiramiento C-C en el anillo aromático	[160]
1511	0	C=C en anillo aromático	[75]
1511	0	C=C en anillo aromático en resina DGEGBF-A	[139]
1512	0	Estiramiento C=C en anillo aromático	[159]
1512	0	Resina epoxi	[183]
1580	0	Estiramiento C-C en el anillo aromático	[160]
1580	0	Anillo benceno	[154]
1580	0	Ar -C=C-H en resina DGEGBF-A	[184]
1582	0	C=C en el anillo aromático de resina DGEGBF-A	[139]
1583	0	C=C en anillo aromático	[75]
1600	0	Estiramiento C=O en el anillo aromático	[162]
1600	1500	Anillo aromático	[163]
1604	0	Estiramiento C-O en el anillo aromático	[84]
1604	0	Resina epoxi	[183]
1604	0	Anillo benceno	[154]
1605	0	Estiramiento C-C en el anillo aromático	[160]
1607	0	Ar-C=C-H en resina DGEGBF-A	[184]
1608	0	Estiramiento C=C en el anillo aromático	[159]
1608	0	Estiramiento C=C en el anillo aromático	[158]
1608	0	Estiramiento C=C en el anillo aromático	[75]
1608	0	Estiramiento C=C en el anillo aromático de resina DGEGBF-A	[139]
1608	0	C=C en el anillo benceno de resina DGEGBF-A	[75]
1610	0	Estiramiento simétrico del anillo aromático Modo de respiración	[153]
1610	0	C=C en el anillo benceno de resina DGEGBF-A	[182]
1626	0	Estiramiento simétrico C=C	[75]
1640	1600	C=C	[147]
1651	0	Resina epoxi	[183]
1655	0	Estiramiento C=C y/o estiramiento de fragmentos de carbonilos de grupos amidas	[159]
1659	0	C=O en ácidos unidos intramolecularmente a hidrógenos	[160]
1660	0	Estiramiento C=O	[162]
1665	0	Fenoxi	[75]
1700	1600	C=O en cetonas, ácidos y N-O en nitritos/nitratos	[161]
1712	0	C=O	[163]
1715	0	C=O en R(CO)OH	[75]
1720	0	Estiramiento C=O en ácido carboxílico	[160]

1720	0	C=O	[161]
1720	0	C=O	[153]
1720	1680	C=O	[147]
1730	0	C=O	[162]
1732	0	C=O	[163]
1732	0	C=O en RCHO	[75]
1735	0	Estiramiento C=O en el anillo aromático	[159]
1735	0	Resina epoxi	[183]
1735	0	Resina epoxi	[183]
1740	0	C=O	[84]
1742	0	C=O en éster	[163]
1742	0	C=O	[154]
1745	0	C=O en R(C=O)OR	[75]
1765	0	C=O en R(CO)OOR	[75]
1765	0	Disustitución aromática en la resina DGEBF-A	[139]
1766	0	Disustitución aromática	[75]
1775	0	C=O en anhídridos cíclicos	[163]
1780	0	C=O en anhídridos lineales	[161]
1780	0	Estiramiento C=O asimétrico	[75]
1784	0	C=O en R(C=O)OOH	[75]
1801	0	Grupos anhídrido	[145]
1808	0	C=O en R(C=O)O(C=O)R	[75]
1820	0	C=O en anhídridos lineales	[161]
1858	0	Estiramiento C=O simétrico	[75]
1860	0	C=O en anhídridos cíclicos	[163]
1891	0	Disustitución aromática	[75]
1892	0	Disustitución aromática en resina DGEBF-A	[139]
2000	1600	Ar-C-H sobretono en resina DGEBF-A	[184]
2064	0	Disustitución aromática	[75]
2067	0	Disustitución aromática en resina DGEBF-A	[139]
2368	0	Resina epoxi	[183]
2836	0	Estiramiento simétrico OCH <sub>2</sub>	[75]
2854	3098	C-H en el anillo aromático	[163]
2855	0	Estiramiento simétrico CH <sub>2</sub>	[184]
2860	0	Grupo metilo	[154]
2869	2949	C-H en grupos alifáticos	[163]
2872	0	Estiramiento simétrico CH <sub>3</sub> en resina DGEBF-A	[184]
2874	0	Estiramiento simétrico CH <sub>3</sub>	[75]
2875	0	Estiramiento simétrico CH <sub>2</sub>	[160]
2876	0	Estiramiento simétrico CH <sub>2</sub>	[75]
2879	0	Estiramiento simétrico CH <sub>2</sub>	[75]



2900	0	CH2 & CH3	[84]
2900	0	CH2 & CH3	[161]
2917	0	Estiramiento simétrico CH3	[75]
2924	0	Resina epoxi	[183]
2925	0	CH2	[154]
2925	0	Estiramiento asimétrico CH2 en resina DGEBF-A	[184]
2929	2960	Estiramiento C-H	[159]
2930	0	Estiramiento asimétrico CH2	[160]
2935	0	CH2	[75]
2945	0	Estiramiento asimétrico CH2	[75]
2960	0	Estiramiento CH3	[162]
2960	0	Estiramiento CH3	[154]
2965	2837	Estiramiento CH2/estiramiento CH en anillo aromático y grupos alifáticos	[158]
2967	0	Estiramiento asimétrico CH3 en resina DGEBF-A	[184]
2968	0	Estiramiento asimétrico CH3 + estiramiento asimétrico OCH2 ?	[75]
2970	0	Estiramiento asimétrico CH3	[160]
2970	0	CH3	[75]
2981	0	Estiramiento asimétrico CH3	[75]
2998	0	Estiramiento simétrico CH2	[75]
3000	2800	CH3	[147]
3030	0	Ar=C-H en resina DGEBF-A	[184]
3034	0	C - H arileno	[75]
3043	0	Estiramiento C - H en el anillo aromático	[160]
3050	0	Estiramiento C - H en el anillo aromático	[160]
3050	3000	C-H en el anillo aromático de resina DGEBF-A	[182]
3050	2990	OH en resina DGEBF-A	[185]
3052	0	C - H arileno	[75]
3056	0	-CH-(O-CH2) en resina DGEBF-A	[184]
3057	0	Estiramiento C-H del anillo epóxido en resina DGEBF-A	[158]
3057	0	Estiramiento asimétrico CH2	[75]
3280	0	-CO-OOH en perácidos	[160]
3300	0	OH en ROOH	[75]
3300	0	OH en ROOH	[75]
3350	0	Estiramiento OH	[162]
3400	0	OH	[161]
3400	3500	OH	[154]
3410	0	OH	[159]
3427	0	OH	[84]
3500	0	OH	[160]
3500	0	Estiramiento OH en resina DGEBF-A	[158]
3500	0	Estiramiento OH	[75]

3503	0	OH en resina DGEBF-A	[139]
3510	0	Ph-OH	[184]
3525	0	OH en ArOH	[75]
3570	0	R-OH	[75]
3629	0	OH en mica	[154]
3640	0	OH en ácidos carboxílicos	[163]
3700	3200	OH	[147]