

**ANÁLISIS DE LA RECUPERACIÓN DE AISLAMIENTO UTILIZANDO LA
TÉCNICA DEL LAVADO EN CALIENTE EN UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA
DE 220 Kv EN LA CIUDAD DE CARTAGENA**

**CARLOS ANTONIO NIÑO MORALES
RAUL NICOLAS NIÑO MORALES**

MONOGRAFÍA

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLIVAR
FACULTAD DE INGENIERIA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y MECATRÓNICA
CARTAGENA DE INDIAS D. T. y C.
MAYO DE 2004**

**ANÁLISIS DE LA RECUPERACIÓN DE AISLAMIENTO UTILIZANDO LA
TÉCNICA DEL LAVADO EN CALIENTE EN UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA
DE 220 Kv EN LA CIUDAD DE CARTAGENA**

**CARLOS ANTONIO NIÑO MORALES
RAUL NICOLAS NIÑO MORALES**

**Monografía presentada como requisito para optar el título de Ingeniero
Electricista.**

**Director:
HEDIER HUMBERTO LASTRE GÓMEZ
Ingeniero Electricista
Magíster en Potencia Eléctrica**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLIVAR
FACULTAD DE INGENIERIA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y MECATRÓNICA
CARTAGENA DE INDIAS D. T. y C.
MAYO DE 2004**

Nota de aceptación

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

Cartagena 28 de Mayo de 2004

Al Eterno que nos da las fuerzas y nos mantiene con vida;

A nuestros padres por su esfuerzo y palabras de ánimo;

A nuestros familiares por todo el apoyo.

Cartagena de Indias D. T. y C., 28 de Mayo de 2004.

Señores:

COMITÉ CURRICULAR

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

PROGRAMA DE ING. ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y MECATRÓNICA

Ciudad

Respetados señores:

Por medio de la presente nos permitimos presentar a ustedes para que sea puesto a su consideración el estudio y aprobación de la Monografía que lleva por nombre: **“ANÁLISIS DE LA RECUPERACION DE AISLAMIENTO UTILIZANDO LA TÉCNICA DEL LAVADO EN CALIENTE EN UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA DE 220 Kv EN LA CIUDAD DE CARTAGENA ”**, presentado como requisito para obtener el título de Ingeniero Electricista.

Agradecemos de antemano la atención prestada.

Atentamente,

Carlos Antonio Niño Morales

Raúl Nicolás Niño Morales

Cartagena de Indias D. T. y C., 28 de Mayo de 2004.

Señores:

COMITÉ CURRICULAR

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

PROGRAMA DE ING. ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y MECATRÓNICA

Ciudad

Respetados señores:

Por medio de la presente me permito informar que la monografía que lleva por nombre: **“ANÁLISIS DE LA RECUPERACION DE AISLAMIENTO UTILIZANDO LA TÉCNICA DEL LAVADO EN CALIENTE EN UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA DE 220 Kv EN LA CIUDAD DE CARTAGENA”**, ha sido desarrollado de acuerdo a los objetivos establecidos. Como director de la misma, considero que el trabajo es satisfactorio y amerita ser presentado para su evaluación.

En espera de su positiva respuesta.

Cordialmente,

HEDIER HUMBERTO LASTRE GÓMEZ

Ingeniero Electricista
Magíster en Potencia Eléctrica

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	10
1. DIELECTRICOS	12
1.1 FENÓMENO DE POLARIZACIÓN	12
1.2 CONDENSADOR DE PLACAS PARALELAS	13
1.2.1 Condensador esférico	15
1.2.2 Condensador Cilíndrico	15
1.2.3 Polarización	15
1.2.4 Rigidez dieléctrica	17
1.3 PROPIEDADES IMPORTANTES DE UN AISLAMIENTO	17
1.3.1 La constante y la absorción dieléctrica	18
1.3.2 Rigidez dieléctrica	18
1.3.3 Pérdidas	18
1.3.3.1 Determinación del factor de potencia y $\tan \delta$	22
1.4 CLASES DE MATERIALES AISLANTES	24
1.4.1 Hules	24
1.4.2 Plásticos	25
2. AISLAMIENTO	28
2.1 QUÉ OCASIONA QUE EL AISLAMIENTO SE DEGRADE	29
2.1.1 Fatiga eléctrica	29
2.1.2 Fatiga mecánica	29
2.1.3 Ataque químico	29
2.1.4 Fatiga térmica	30
2.2 ESFUERZOS DIELECTRICOS APLICADOS SOBRE LOS MATERIALES AISLANTES	30
2.2.1 Sobretensiones de origen atmosférico o por rayo	30
2.2.2 Sobretensiones por maniobra	31

2.2.3	Sobretensiones temporales a la frecuencia del sistema	31
2.3	LA COORDINACIÓN DEL AISLAMIENTO	32
2.3.1	Definiciones	32
2.3.1.1	Aislamiento Externo	32
2.3.1.2	Aislamiento Interno	32
2.3.1.3	Aislamiento Externo Tipo Interior	32
2.3.1.4	Aislamiento Externo Tipo Exterior	32
2.3.1.5	Aislamiento Autorrecuperable	33
2.3.1.6	Aislamiento no Autorrecuperable	33
2.3.1.7	Sistema con neutro Aislado	33
2.3.1.8	Sistema con neutro Conectado a Tierra	33
2.3.1.9	Sistema Aterrizado Resonante	33
2.3.1.10	Sobretensión	34
2.3.1.11	Tensión critica de Flameo (VCF)	34
2.3.1.12	Sobretensión temporal	34
2.3.1.13	Nivel de Aislamiento Nominal	34
2.3.1.14	Nivel de protección de un dispositivo de protección	35
2.4	RESISTENCIA DEL AISLAMIENTO DE LOS EQUIPOS A LOS ESFUERZOS ELÉCTRICOS	35
2.5	DISEÑO DE AISLAMIENTO EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN	36
2.6	AISLADORES	38
2.6.1	Aisladores tipo poste o fijos	39
2.6.2	Cadenas de Aisladores	40
2.6.3	Cadenas de Aisladores Poliméricos	43
3.	ANÁLISIS DE LA RECUPERACION DEL AISLAMIENTO EN LA SUBESTACIÓN CARTAGENA 220 Kv	45
3.1	PARÁMETROS ELÉCTRICOS DEL SISTEMA	46
3.2	CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN LA SUBESTACIÓN CARTAGENA 220 Kv	50

3.3 PRINCIPIOS BÁSICOS DE COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO	52
3.4 PRINCIPIO DE LA COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO EN LA SUBESTACIÓN CARTAGENA DE 220 Kv	52
3.5 ANÁLISIS DE LOS CONTAMINANTE EN LA SUBESTACIÓN CARTAGENA 220 Kv	55
3.6 CONTAMINACIÓN EN LOS AISLADORES	58
3.7 EL MANTENIMIENTO PREVENTIVO LA SOLUCIÓN A LA PÉRDIDA DE AISLAMIENTO EN LA SUBESTACIÓN CARTAGENA 220 KV, DEBIDO A LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL	62
3.7.1 Mantenimiento Preventivo	62
3.8 REQUERIMIENTOS PARA LAVAR EN CALIENTE AISLADORES	65
3.9 CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DEL LAVADO	70
3.10 CONSIDERACIONES TÉCNICAS PARA EL LAVADO EN CALIENTE CON AGUA DE EQUIPOS ENERGIZADOS	74
3.10.1 Corriente de fuga	74
3.10.2 Distancia de trabajo	75
3.10.3 Resistividad del agua	76
3.10.4 Generalidades	76
3.10.5 Medición	76
3.10.6 Presión del agua	77
3.10.7 Orificio de la boquilla	78
3.10.8 Especificaciones típicas	78
4. LIMPIEZA DE AISLADORES	80
4.1 MÉTODOS DE LAVADO	80
4.1.1 Equipos Energizados	81
4.1.1.1 Agua a alta presión	81
4.1.1.1.2 Boquilla manual a chorro	81
4.1.1.1.3 Boquilla con chorro a control remoto	82
4.1.1.1.4 Boquilla de aspersion fija	82
4.1.1.1.5 Boquilla montada en un helicóptero	83

4.1.1.2 Agua a presión media	84
4.1.1.3 Agua a baja presión (lavado por riego)	84
4.1.1.4 Boquilla de aspersion fija para agua a presión baja	84
4.1.1.5 Frotación con paño (limpieza en equipos energizados)	85
4.1.2 Equipos no energizados	88
4.1.2.1 Limpieza manual	88
4.1.2.2 Almohadillas de lana de acero y/o nylon no abrasivo	89
4.1.2.3 Solventes	89
4.2 EQUIPOS PARA LA LIMPIEZA DE AISLADORES	89
4.2.1 Equipo para limpieza con agua a alta presión	89
4.2.1.1 Bomba	89
4.2.1.2 Fuente de potencia	90
4.2.1.3 Tanque	92
4.2.1.4 Tubería	95
4.2.1.5 Manguera	95
4.2.1.6 Boquilla	97
4.2.1.7 Portador	99
4.2.1.8 Agua	100
4.2.1.9 Agua a baja presión	102
4.2.1.10 Agua a presión media	102
4.2.1.11 Aspersión fija	103
4.3 TIPOS DE CONTAMINANTES	104
4.3.1 Sal	105
4.3.2 Cemento /cal	105
4.3.3 Polvo	105
4.3.4 Defecación	107
4.3.5 Sustancias químicas	107
4.3.6 Neblina por contaminación (emisión vehicular)	107
4.3.7 Humo	107
4.4 PROCEDIMIENTO	108

4.4.1 Frecuencia de lavado	108
4.4.2 Otro Procedimiento	108
4.5 TÉCNICAS	109
4.5.1 Energizada	109
4.5.1.1 Agua a presión alta	109
4.5.1.1.1 Boquilla manual	109
5. MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DE AISLAMIENTO	113
5.1 CÓMO SE MIDE LA RESISTENCIA DE AISLAMIENTO	115
5.1.1 Cómo opera un probador de resistencia de aislamiento	115
5.1.2 Componentes de la corriente de prueba	116
5.1.3 Corriente de carga capacitiva	116
5.1.4 Corriente de absorción o polarización	116
5.1.5 Corriente de fuga superficial	117
5.1.6 Corriente de conducción	117
5.2 CONEXIÓN DEL PROBADOR DE AISLAMIENTO	119
5.2.1 Conexiones típicas seleccionadas para los equipos	121
5.2.1.1 Cable de potencia blindado	121
5.2.1.2 Interruptor / Boquillas	121
5.2.1.3 Transformador de potencia	122
5.3 PRUEBAS DE AISLAMIENTO DE DIAGNÓSTICO DE ALTO VOLTAJE	123
5.3.1 Prueba de lectura puntual (spot)	123
5.3.2 Prueba de tiempo vs. Resistencia	127
5.3.3 Prueba de índice de polarización	128
5.3.4 Prueba de voltaje de paso	131
5.3.5 Prueba de descarga dieléctrica	133
5.4 Análisis de pruebas realizadas en la subestación Cartagena 220 Kv	136
CONCLUSIONES	140
BIBLIOGRAFÍA	142
ANEXOS	144

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Constantes dieléctricas	15
Tabla 2. Tipos de Aislamientos	26
Tabla 3. Características de Aislamientos comunes	27
Tabla 4. Pruebas dieléctricas a equipos en subestaciones	35
Tabla 5. Parámetros eléctricos del sistema	46
Tabla 6. Parámetros ambientales	52
Tabla 7. Niveles de aislamiento básicos y distancias entre fases y tierra	54
Tabla 8. Efectividad del lavado	64
Tabla 9. Resistividad del agua en función de la temperatura	67
Tabla 10. Resistividad del agua en función de la temperatura	68
Tabla 11. Agua conductiva	68
Tabla 12. Agua destilada	69
Tabla 13. Distancia mínima para lavado	70
Tabla 14. Parámetros para el lavado de equipo energizado	75
Tabla 15. Distancia de lavado para una boquilla de 5,95 mm (0,234375 pulgadas)	79
Tabla 16. Uso y equipo de lavado con boquilla fija.	83
Tabla 17. Datos para el diseño del equipo para el lavado con aspersión a presión baja	85
Tabla 18. Interpretación de pruebas periódicas	126
Tabla 19. Índice de polarización	129
Tabla 20. Valores prácticos para generadores HV	136
Tabla 21. Prueba de aislamiento descargador de sobretensión	137
Tabla 22. Prueba de aislamiento Interruptores Siemens tipo 3AS2	138

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Fenómeno de la Polarización	13
Figura 2. Condensador de placas paralelas	13
Figura 3. Dieléctricos en pequeños cilindros	16
Figura 4. Circuito de representación de las corrientes	19
Figura 5. Diagrama vectorial de las corrientes	19
Figura 6. Diagrama vectorial de pérdidas en dieléctricos simplificado	20
Figura 7. Puente de Schering	22
Figura 8. Aislador tipo soporte	39
Figura 9. Aisladores de suspensión empleados en líneas de transmisión	41
Figura 10. Aislador en cadena de suspensión y de amarre	41
Figura 11. Aislador en cadena de suspensión y retención	42
Figura 12. Cadena Aisladores afectada por la corrosión	43
Figura 13. Aisladores poliméricos	44
Figura 14. Bahías de la Subestación Cartagena configuración interruptor y medio	45
Figura 15. Subestación Cartagena configuración interruptor y medio	47
Figura 16. Diagrama unifilar de la Subestación Cartagena 220 Kv	48
Figura 17. Diagrama unifilar de la Subestación Cartagena 66 Kv	48
Figura 18. Vista superior de la ubicación de la subestación en la bahía de Cartagena	56
Figura 19. Aisladores contaminados por polvo de tierra	57
Figura 20. Toma de muestra de aislador soporte	58
Figura 21. Toma de muestra en un disco	59
Figura 22. Cálculo de área de un disco	60
Figura 23. Muestra del contaminante subestación Cartagena TP	68
Figura 24. Presiones de la boquilla en una instalación seleccionada	78

Figura 25. Lavado de Aislador a alta presión	81
Figura 26. Lavador de Aisladores de alta presión	82
Figura 27. Material para el frotamiento en vivo	87
Figura 28. Ensamble de material para el frotamiento en vivo	87
Figura 29. Equipo de limpieza manual	88
Figura 30. Fuente de potencia mas bomba de alta presión	91
Figura 31. Tanque de lavado con capacidad de 3000 Lts	95
Figura 32. Manguera de lavado	97
Figura 33. Boquillas de Lavado	98
Figura 34. Camión de Lavado con equipos	100
Figura 35. Equipo de monitoreo de Calidad del agua	102
Figura 36. Aislador contaminado debido a los diferentes contaminantes	108
Figura 37. Equipo de lavado de la Subestación	110
Figura 38. Líniere preparándose para lavado de torre	111
Figura 39. Lavado de aisladores de torres	112
Figura 40. Componentes de la corriente de prueba	118
Figura 41. Conexión simple a un cable	120
Figura 42. Medidor de aislamiento BM25	122
Figura 43. Conexión a un cable de potencia blindado	121
Figura 44. Conexión a un interruptor	121
Figura 45. Conexión a un transformador de potencia	122
Figura 46. Grupo de Mantenimiento realizando pruebas de aislamiento	122
Figura 47. Comparación de las tendencias de los resultados de las pruebas	125
Figura 48. Gráfica de prueba tiempo-resistencia	128
Figura 49. Gráfica de paso voltaje de paso	132
Figura 50. Descarga de la carga almacenada en el objeto en prueba	134
Figura 51. Descargador de sobretension	137
Figura 52. Interruptor Siemens tipo 3AS2	138

RESUMEN

En la investigación “análisis de la recuperación del aislamiento utilizando la técnica del lavado en caliente en una subestación eléctrica de 220 Kv en la ciudad de Cartagena” inicialmente se define el termino dieléctrico como el estudio del campo eléctrico en presencia de materia, las diferentes substancias y sus constantes dieléctricas. Se describe a su vez aislamiento de una instalación exterior (intemperie) o de un equipo eléctrico al elemento que tiene la capacidad de soportar la tensión, o más generalmente los esfuerzos dieléctricos a que se ven expuestos, además se presentan varias causas que hacen que el aislamiento se degrade y los principios básicos para la coordinación de aislamiento.

Se trata el análisis de la subestación Cartagena como son: parámetros eléctricos, como fue catalogada al momento del diseño con base a la contaminación “zona costera considerada como *pesada*”, con base a lo anterior determinar el Nivel de aislamiento, la solución a la contaminación a través de un programa de mantenimiento preventivo adecuado.

Se describen los métodos de Lavado de aisladores energizados, no energizados, los diferentes equipos utilizados y las características necesarias para obtener buenos resultados y seguridad para el grupo de trabajo que lleva a cabo tal labor.

Finalmente se muestran los equipos de pruebas y sus conexiones para determinar el incremento de envejecimiento, las causas que lo generan y los correctivos necesarios. A demás se describen las pruebas de diagnostico de alto voltaje, pruebas puntuales de tendencia, constante de tiempo y índice de polarización que se practican a los equipos para tener claro su estado de operación.

INTRODUCCIÓN

El documento que ponemos a disposición de nuestros lectores corresponde a la investigación titulada “*Análisis de la recuperación del aislamiento utilizando la técnica del Lavado en Caliente en una Subestación eléctrica de 220 Kv en la ciudad de Cartagena*”. Esta investigación es de gran interés y está destinada especialmente a estudiantes, técnicos, tecnólogos e ingenieros electricistas cuya función principal es la recuperación del aislamiento en equipos de alta tensión con base a la técnica del Lavado en Caliente.

Debido a la cercanía con un ambiente salino como es la costa atlántica, los equipos con características aislantes tipo intemperie se ven afectados gravemente; dando como consecuencias la salida de circuitos o alimentadores que son de importancia para el sistema eléctrico de potencia. Es por ello que se hace necesario tomar represarías para no permitir tales anomalías en el sistema eléctrico que acarreen a su vez penalizaciones a las empresas que incurran en estas fallas y ponen en peligro la vida de las personas que están en la vecindad de estos equipos contaminados como consecuencia de las pérdidas de aislamiento y por ende se disminuyan las distancias de seguridad entre estos equipos y tierra.

La contaminación es un problema que se pone peor cada año, aun con todos los sistemas anti-polución que los gobiernos obligan a las industrias a instalar. Como este problema de contaminación ha existido por muchos años, también desde hace muchos años ha existido la solución “no una solución económica” pero una solución. Esta solución era desenergizar la línea o subestación y limpiar los diferentes aisladores a mano. Esto, obviamente, no es económica por qué las empresas eléctricas no producen ganancias si sus líneas están desenergizadas.

Al referirnos a la palabra “limpiar” un aislador o porcelana queremos decir a que se puede limpiar con un sistema mojado *con agua* al cual llamaremos lavado, o con un sistema en el cual el agente limpiador es un material seco.

Para conseguir buenos resultados en el lavado de cadenas de aisladores y porcelanas de equipos de potencia hay que tener en cuenta varios aspectos que involucran tanto seguridad como eficiencia en dicho trabajo como son:

Densidad del agua

La dirección del viento y fuerza

En cuanto a seguridad para el personal de trabajo se tiene:

Elementos de protección personal

Presión del agua.

Distancia (entre equipos energizados y lavador)

Diámetro de la boquilla.

Resistencia del agua.

Los aspectos anteriores son condiciones que deben cumplirse a cabalidad para llevar a cabo la labor de lavado en caliente y con la mayor seguridad posible.

Está investigación inicia con el establecimiento de aspectos generales que son de carácter imprescindibles puesto que definen conceptos básicos para el establecimiento de la temática que le sucede, se plantean conceptos tales como: Dieléctricos, Aislamiento, Estado del Arte, Equipos de pruebas, Medición de la resistencia de aislamiento.

1. DIELECTRICOS

El estudio del campo eléctrico en presencia de materia es lo que se conoce como estudio de los *dieléctricos*.

Faraday experimento que cuando se llena el espacio entre las placas de un condensador con alguna materia aislante como mica o vidrio, la capacidad del condensador aumentaba con una constante de proporcionalidad ϵ_r (mayor que la unidad) conocida como constante dieléctrica relativa.

En general todas las sustancias que no son conductoras presentan este efecto y se les llama sustancias dieléctricas.

1.1 FENÓMENO DE POLARIZACIÓN

La materia es normalmente neutra eléctricamente, un ejemplo, pero hablando desde el punto de vista atómico está constituida por cargas positivas y negativas en igual número.

A diferencia de los conductores, en los dieléctricos, estas cargas no son libres de moverse cuando están bajo la influencia de un campo eléctrico externo, como sucede con los electrones en los metales conductores, no obstante las fuerzas producidas por el campo eléctrico origina desplazamientos relativos de las cargas de signo opuesto cuya extensión depende de la mayor o menor rigidez con que las cargas están unidas, este desplazamiento de cargas producido por el efecto de una campo exterior se conoce como *polarización de la sustancia*.

Desde el punto de vista *macroscópico* los desplazamientos de carga debidos a la polarización originan *la aparición de cargas en la superficie del dieléctrico*.

Desde el punto de vista atómico los desplazamientos los centros de carga pueden considerarse como una colección de dipolos eléctricos y se puede hablar de un momento dipolar por unidad de volumen (Me).

El campo eléctrico macroscópico debido a una substancia polarizada, es posible estudiarlo en función de las cargas superficiales de polarización y escribir una expresión que relacione el campo eléctrico con las cargas reales y las cargas de polarización.

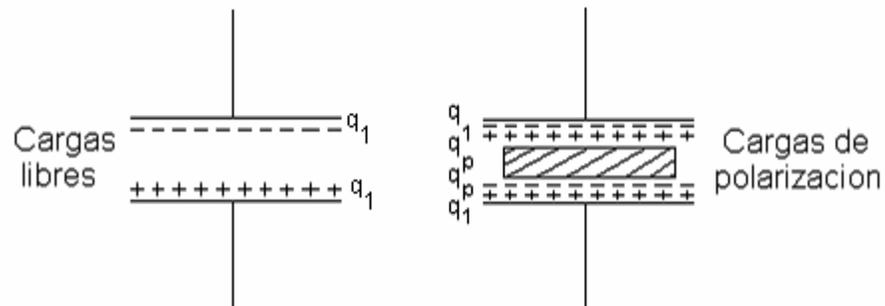


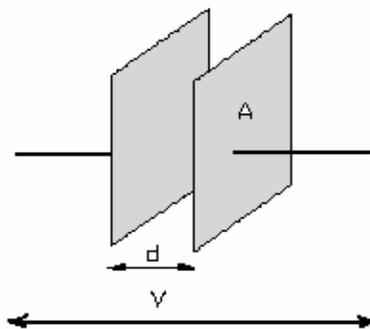
Figura 1. Fenómeno de la Polarización.

De acuerdo con la ley de Gauss:

$$\oint D * ds = q (total)$$

$$\oint E * ds = \frac{q (total)}{\epsilon_0} = \frac{l}{\epsilon_0} (ql + qp)$$

1.2 CONDENSADOR DE PLACAS PARALELAS



De la ley de Gauss:

$$\oint D * ds = Q$$

Figura 2. Condensador de placas paralelas.

Donde D es el vector desplazamiento eléctrico o densidad de carga.

$$|D| = \frac{Q}{A} \qquad E = \frac{Q}{\epsilon_0 A}$$

El potencial es:

$$V = \int E \cdot dr = \int_0^d \frac{Q}{\epsilon_0 A} dr$$

$$V = \frac{Q}{\epsilon_0 A} d$$

La capacidad:

$$C = \frac{Q}{V}$$

$$C = \frac{Q}{\frac{Qd}{\epsilon_0 A}} = \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

Al introducirse un dieléctrico entre las capas del condensador, su capacidad se ve aumentada en una cantidad ϵ_r mayor que la unidad y que se conoce como *constante dieléctrica relativa o índice dieléctrico* (ϵ_r), de manera que la nueva capacidad del condensador es:

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

Al producto $\epsilon_r \epsilon_0$ se le conoce como constante dieléctrica y se le asigna con la letra \mathcal{E} .

$$\mathcal{E} = \epsilon_r \epsilon_0$$

ϵ_0 Es la constante dieléctrica del vacío, y se puede observar que la constante dieléctrica *no tiene unidades*.

Las capacidades para los condensadores esférico y cilíndrico se modifican con una cantidad ϵ quedando como:

1.2.1 Condensador esférico

$$C = 2\pi\epsilon \frac{R_i R_e}{R_e - R_i}$$

1.2.2 Condensador Cilíndrico

$$C = 2\pi\epsilon \frac{\ell}{\ln \frac{R_e}{R_i}}$$

En la siguiente tabla se dan algunos valores de constantes dieléctricas relativas.

Tabla 1. Constantes dieléctricas.

SUBSTANCIA	ϵ_r	SUBSTANCIA	ϵ_r
Baquelita	4.5 – 7.5	Macanita	4.5 – 5.5
Ambar	2.2 – 2.9	Papel	1.8 – 2.6
Vidrio	3.5 – 16.0	Parafina	2.1 – 2.3
Mica	5.0 – 7.0	Porcelana	4.5 – 6.0
Madera	3.0 – 6.5	Presspan	2.5
Aislante de cable para corrientes industriales.	3.0 – 4.5	Aceite de transformador	2.2 – 2.5
Aislante para cable telefónico.	1.7	Agua destilada	81.0
Aire	1.0006	Goma Laca	3.0

1.2.3 Polarización

Se ha mencionado que el fenómeno de aparición de carga en la superficie límite del dieléctrico se le conoce como polarización.

Si p es el vector de polarización, D la inducción electrostática. D_0 la inducción electrostática en el vacío.

$$P = D - D_0$$

$$D = \varepsilon E$$

$$D = P + D_0 = \varepsilon_0 E + \varepsilon_0 E \xi$$

$$\varepsilon E = \varepsilon_0 E (1 + \xi)$$

$$1 + \xi = \frac{\varepsilon E}{\varepsilon_0 E}$$

$$\xi = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} - 1$$

$$\xi = \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon_0} = \varepsilon_r - 1$$

ξ = Susceptibilidad dieléctrica.

Si suponemos dividido el dieléctrico en pequeños cilindros dispuestos según el vector de polarización P , y d_h la altura de estos cilindros con una base d_s .

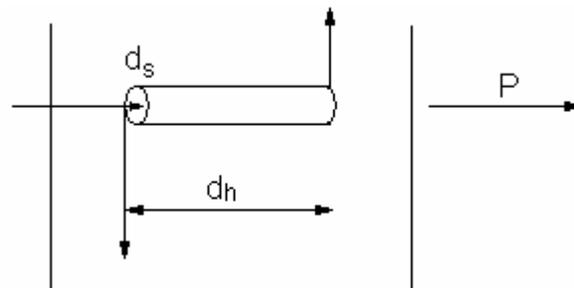


Figura 3. Dieléctricos en pequeños cilindros.

Las cargas que aparecen en las bases son:

$+P d_s$ y $-P d_s$ Considerando que forman dipolos.

El momento dieléctrico del dipolo es:

$$M_e = Pds * dh = PdV$$

Donde M_e es el momento bipolar por unidad de volumen.

$$P = \frac{M_e}{dV}$$

1.2.4 Rigidez dieléctrica

Entre las características más importantes de los materiales aislantes, está su rigidez dieléctrica.

La norma ASA define la rigidez dieléctrica como el *máximo gradiente de potencial* que un aislante es capaz de soportar sin que se produzca descarga disruptiva.

La descarga disruptiva no es más que una corriente eléctrica que se presenta en los dieléctricos que están sometidos a la acción de un campo eléctrico, debido a que las fuerzas coercitivas de los átomos del dieléctrico, son menores que las fuerzas que tratan de mover los electrones en dirección opuesta a la intensidad del campo.

1.3 PROPIEDADES IMPORTANTES DE UN AISLAMIENTO

Las propiedades más importantes de un aislamiento que se toman en consideración para su aplicación más adecuada son:

- Constante dieléctrica
- Absorción dieléctrica
- Rigidez dieléctrica
- Pérdidas

1.3.1 La constante y la absorción dieléctrica

Son manifestaciones de la polarización de un dieléctrico.

La constante dieléctrica da una medida de la acción de un aislante sobre el campo magnético que se le aplica y su importancia y aplicación se ha discutido anteriormente.

1.3.2 Rigidez dieléctrica

Como se ha mencionado antes, la rigidez dieléctrica es el máximo valor gradiente de potencial que puede soportar un aislante sin que se produzca la descarga disruptiva.

Conviene añadir en esta parte que la rigidez dieléctrica depende de algunos factores que afectan al aislamiento, tales factores son los siguientes:

- Temperatura
- Tiempo
- Frecuencia
- Humedad
- Constante dieléctrica
- Espesor

1.3.3 Pérdidas

Cuando un dieléctrico está sometido a una diferencia de potencial, circula una corriente que tiene tres componentes: una corriente capacitiva (I_C) una corriente de absorción (I_A) y una corriente de conducción cuyo valor está limitado por la resistencia ohmica del material (I_r).

Cuando el dieléctrico está sometido a una tensión continua, la corriente total disminuye con el tiempo, hasta alcanzar un valor constante correspondiente a la corriente de fuga.

Si el dieléctrico está sometido a una tensión alterna, las tres corrientes que determinan el valor total de corriente quedan establecidas durante todo el tiempo que el dieléctrico está bajo la acción de la tensión alterna.

$$I = I_C + I_A + I_r$$

De acuerdo con la anterior un dieléctrico se puede representar por medio del siguiente circuito.

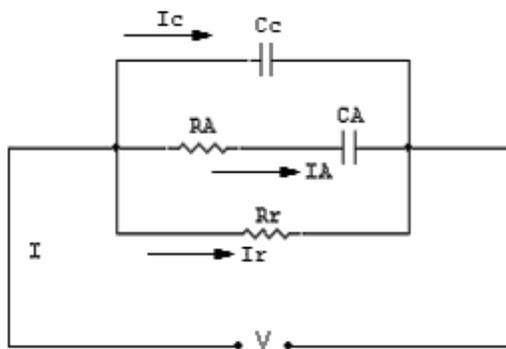


Figura 4. Circuito de representación de las corrientes.

La corriente de absorción I_A tiene dos componentes una activa (I''_A) y otra capacitiva (I''_A) el diagrama vectorial de corriente es:

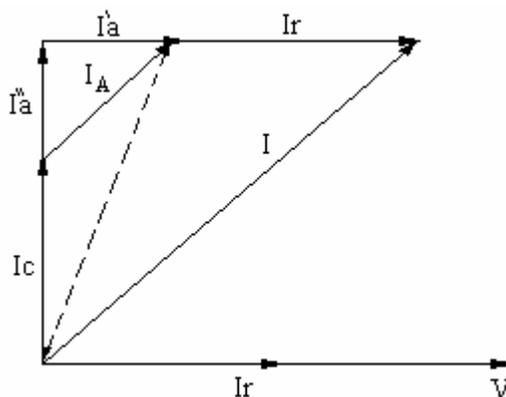


Figura 5. Diagrama vectorial de las corrientes.

Al diagrama vectorial anterior también se le conoce como diagrama vectorial de pérdidas en los dieléctricos bajo la acción de C.A.

El diagrama vectorial anterior es la representación más exacta, pero su aplicación resulta laboriosa, por lo que para fines prácticos.

Se emplea el diagrama vectorial de pérdidas en dieléctricos simplificados.

Que equivale al siguiente circuito:

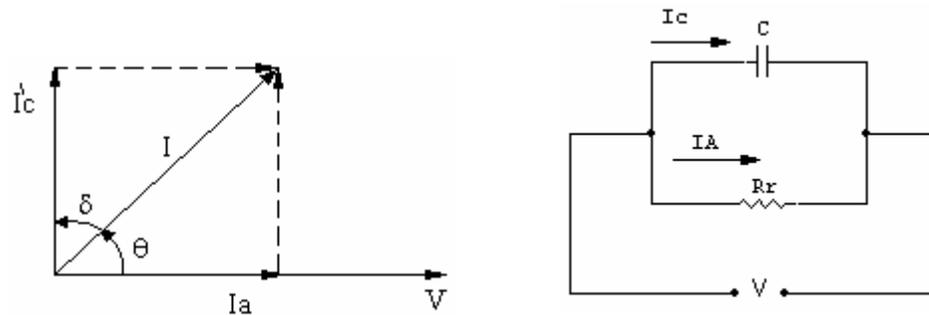


Figura 6. Diagrama vectorial de pérdidas en dieléctricos simplificado.

$$I_A = \text{Corriente total} = I'_A + I_r$$

$$I'_A = \text{Corriente capacitiva total} = I'_A + I_C$$

Al ángulo δ se le conoce como ángulo de pérdidas.

La tensión y la corriente activa que se disipa en forma de calor y que tiene la forma:

$$P_A = V * I_A = V * I * \cos \theta$$

La potencia reactiva está dada por:

$$P_C = V * I = V * I * \cos \theta = V * I * \text{sen}(90 + \theta)$$

Del diagrama vectorial se tiene:

$$\tan \delta = \frac{I_A}{I_C}; I_A = I_C * \tan \delta$$

La corriente capacitiva está dada por:

$$I'_C = \frac{V}{X_C}; X_C = \frac{1}{WC} = \frac{1}{2\pi fC}$$

$$I'_C = \frac{V}{\frac{1}{wc}} = Vwc$$

$$I_A = Vwc * \tan \delta$$

Sustituyendo en las ecuaciones anteriores tenemos, las pérdidas activas y reactivas:

$$P_A = V * I_A = V^2 WC * \tan \delta$$

$$P_C = V * I'_C = V^2 WC$$

Se acostumbra a llamar a la $\tan \delta$ tangente del ángulo de pérdidas dieléctricas, y determina las pérdidas en un dieléctrico que se encuentra bajo la acción de una corriente alterna; depende de la naturaleza del dieléctrico, de la frecuencia y de la temperatura.

Cuando se tienen corrientes de fuga muy pequeñas, el ángulo es muy pequeño y en estas condiciones el factor de potencia:

$$\cos \theta \approx \text{sen} \delta \approx \tan \delta$$

En ocasiones el factor de potencia se calcula en función del factor de disipación (D) que se obtiene mediante un puente de capacitancias y que se definen según las normas ASTM como la relación de la conductancia Gr a la susceptancia B del circuito del dieléctrico o bien como la reactancia Xc a la resistencia Rr.

$$\tan \delta = \frac{I_A}{I'_C}; I_A = I'_C * \tan \delta$$

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \frac{I_A}{I}; I = \sqrt{I_A^2 + (I'_C)^2} = \sqrt{(I'_C)^2 * \tan^2 \delta + (I'_C)^2} \\ &= I'_C * \sqrt{\tan^2 \delta + 1} \end{aligned}$$

Factor de disipación = D

$$\tan \delta = D$$

$$\text{Factor de Potencia} = \cos \theta = \frac{D}{\sqrt{D^2 + 1}}$$

1.3.3.1 Determinación del factor de potencia y $\tan \delta$

La determinación del factor de potencia y el factor de pérdidas o $\tan \delta$ se hace por medio de una fuente de C.A. que opera bajo el mismo principio que un puente de Wheatstone.

El puente empleado para la determinación de pérdidas y factor de potencia es básicamente un puente de Schering, ya que permite con suficiente exactitud la medición de pequeñas y grandes capacidades, para tensiones bajas y altas con frecuencias industriales de 50 y 60 Hz. En la siguiente figura se ilustra el diagrama de conexiones de un puente de Schering.

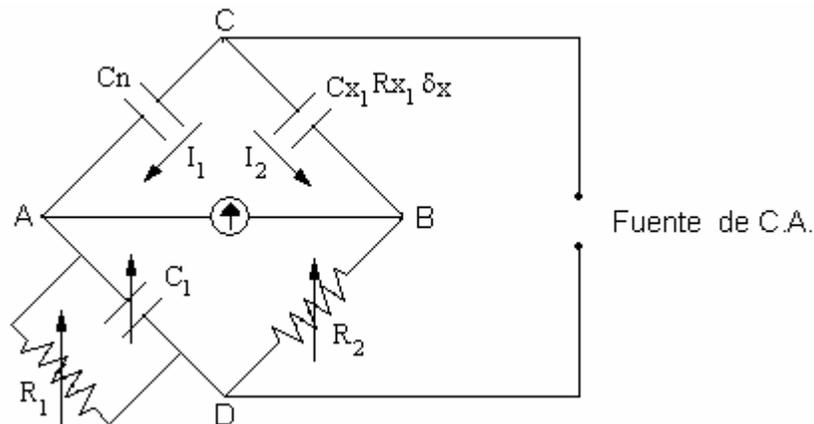


Figura 7. Puente de Schering.

La condición de equilibrio de un puente es:

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_n}{Z_x} \quad Z_1 Z_x = Z_2 Z_n \quad \text{en magnitud}$$

$$y: \quad \theta_1 + \theta_x = \theta_2 + \theta_n \quad \text{en fase}$$

Para el caso particular del puente de Schering:

$$R_1 X_{cx} = R_2 X_{cn}$$

$$X_{cx} = \frac{1}{\omega C_x} \quad X_{cn} = \frac{1}{\omega C_n}$$

$$\frac{R_1}{\omega C_x} = \frac{R_2}{\omega C_n} \quad ; \quad C_x = \frac{R_1}{R_2} C_n$$

C_1 es un condensador variable que se utiliza para el equilibrio de fases, en paralelo con una resistencia variable R_1 y un ángulo de fase θ_1 en esta rama.

C_n es un condensador patrón fijo, por lo general de aire comprimido sin pérdidas ($\delta_n = 0$) y de valor conocido.

R_1 y R_2 son resistencia variables que permiten equilibrar el puente en magnitud.

C_x es la capacidad del dieléctrico sujeto a prueba, con resistencia de pérdidas R_x y un ángulo de pérdidas δ_x .

Con el puente de Schering se puede efectuar pruebas a diferentes dieléctricos, por ejemplo con un probador modelo M4000 fabricado por la Doble Engineering Company, se efectúan mediciones directas de Volt amperes y Watts de pérdidas a una tensión de 10000 V, cuando se alimenta con una fuente de 110 V de 60 Hz, de estas mediciones se calcula el factor de potencia que se expresa un porcentaje de acuerdo con la expresión.

$$\%Factor - de - potencia = \frac{MiliWatts}{Mili-VoltAmperes} * 100$$

Este probador es para un rango máximo de 1000 VA, (100 Miliamperes) a 10 Kv. Y se pueden hacer con el, pruebas a aisladores, terminales de cables interruptores, descargadores de sobre tensión, aceite aislante, transformadores de instrumento, transformadores de potencia y algunos cables hasta de 100 m. de longitud dependiendo del calibre del conductor, espesor y grueso de aislamiento.

1.4 CLASES DE MATERIALES AISLANTES

Los principales materiales usados como aislamiento dieléctrico en los conductores de alta tensión se pueden dividir en dos grupos:

1.4.1 Hules

Los hules se pueden clasificar a su vez como:

Hule Natural, También se le conoce con los nombres comerciales como caucho, hule, Gutta percha, goma, como elemento base la mayoría de los hules naturales tienen al Polisopreno que tiene buena resistencia a la tracción, buena resistencia a la abrasión, es elástico y flexible, resistente a la compresión y a las temperaturas no muy altas ya que no tiene resistencia al calor o a la llama y muy baja resistencia al oxígeno, se ve atacado por el ozono, solventes, aceites y grasas.

EPR, Este es un trípolimero a base de etileno y propileno que tiene buenas propiedades mecánicas, es resistente al ozono, luz solar, intemperie, calor, con algunos solventes y el vapor no pierde sus propiedades, pero es atacado por aceite y grasas.

SBR, Este es un copolimero de base de estireno y butadieno, es un material resistente al aceite, en el que butadieno se obtiene de hidrocarburos derivados del petróleo como el butano a los butilenos a partir de destilaciones fraccionadas. El

estireno se obtiene produciendo etilbeuceno como un subproducto a partir del benceno y estileno a partir del cloruro mediante un proceso de destilación.

Butilo, Se obtiene de una polimerización del isobutileno, tiene una buena resistencia a los efectos de degradación del ozono, el oxígeno, la luz solar y el envejecimiento por calor, tiene excelentes propiedades mecánicas.

Silicón, Este es un polímero de Xolixano, su principal característica es su alta temperatura de servicio a la que puede trabajar, ya que está entre 60°C y 350°C; su principal desventaja es su poca resistencia mecánica, aún cuando es prácticamente inerte al oxígeno y ozono teniendo buena resistencia al ataque de aceites y solventes.

Neopreno. Existen varios tipos de polímeros de cloropreno a las que se les da el nombre genérico de neoprenos que tienen como base al cloropreno, aún cuando no tiene muy buenas propiedades químicas y mecánicas por lo que una de sus aplicaciones es en forma de cubierta protectora.

1.4.2 Plásticos

Entre los principales plásticos usados como aislamientos en la fabricación de cables de alta tensión se tiene:

Cloruro de polivinilo. Este es un material termoplástico que mezclado con otras sustancias da compuestos de excelentes propiedades dieléctricas y mecánicas que lo hacen útil como aislamiento y cubierta protectora en cables con voltajes no mayores de 600 V con temperatura hasta 60°C y 70°C.

Poliestileno. Es un termoplástico a base de oxidantes y pigmentos negros a base de carbón se aplica como polietileno natural en altos voltajes ya que los pigmentos reducen sus propiedades dieléctricas, recomendándose para ser usado en

transmisión de energía en alta y mediana tensión, instalaciones submarinas, circuitos de control, mediciones, protecciones y comunicaciones.

Existen otras variantes del polietileno como son: El Polietileno clorosulfonado que tiene existentes propiedades para la resistencia a la intemperie, ozono y ataque de agentes químicos, solventes y aceites, tiene propiedades dieléctricas buenas así como a la flexión y abrasión.

El Polietileno de cadena cruzada que sin perder las características del polietileno natural es más duro y rígido presentando mayor resistencia al calor.

Los aislamientos descritos anteriormente de acuerdo con las normas de la Insulated Power Engineers Association (IPCEA) se recomiendan aplicarlos de acuerdo al voltaje de operación según la siguiente tabla:

Tabla 2. Tipos de Aislamientos.

TIPO	AISLAMIENTO	VOLTAJE DE OPERACIÓN (v).
HULES	BUTILO	2000 – 15.000
	EPR	2000 – 46.000
TERMOPLASTICOS	PVC	2000 – 5.000
	POLIETILENO	5000 – 15.000
TERMOFIJOS	POLIETILENO DE CADENA CRUZADA(VULCANIZADO)	2000 – 69.000
PAPEL	IMPREGNADO EN ACEITE(NO MIGRANTE)	2000 – 69.000
	EN ACEITE	2000 – 138.000
	EN GAS	15.000 – 23.000

Las características de algunos aislamientos comúnmente encontrados en el mercado se dan en la tabla siguiente:

Tabla 3. Características de Aislamientos comunes.

TIPO DE AISLAMIENTO	CONSTANTE DIELECTRICA ϵ A 60Hz Y 75°C	FACTOR DE POTENCIA DIELÉCTRICO
PAPEL	3.5	0.01
POLIETEILENO NATURAL	2.3	0.0004
VULCANEL EP	2.7	0.0005
VULCANEL XLP	2.3	0.0004
SINETAX	9.0	0.1

2. AISLAMIENTO

Se denomina aislamiento de una instalación exterior (intemperie) o de un equipo eléctrico al elemento que tiene la capacidad de soportar la tensión, o más generalmente los esfuerzos dieléctricos que son aplicados.

Este elemento denominado aislamiento, es un material o arreglo de materiales que cumplen con esta función y que puede ser líquido (como aceite por ejemplo), gaseoso (SF6) o sólido (resinas sintéticas), algodón, hule, derivados del petróleo, polímeros, elásticos.

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

$V = I \times R$ donde

V = voltaje en volts

I = corriente en amperios

R = resistencia en ohms

Para una resistencia dada, a mayor voltaje, mayor corriente. Alternativamente, a menor resistencia del alambre, mayor es la corriente que fluye con el mismo voltaje. Ningún aislamiento es perfecto (no tiene resistencia infinita), por lo que algo de la corriente fluye por el aislamiento o a través de él a tierra. Tal corriente

puede ser muy pequeña para fines prácticos pero es la base del equipo de prueba de aislamiento.

Entonces, ¿qué es un “buen” aislamiento? “Bueno” significa una resistencia relativamente alta al flujo de la corriente. Cuando se usa para describir un material aislante, “bueno” también significa “la capacidad para mantener una resistencia alta”. La medición de la resistencia puede decir que tan “bueno” es el aislamiento.

2.1 QUÉ OCASIONA QUE EL AISLAMIENTO SE DEGRADE

Existen cuatro causas básicas para la degradación del aislamiento. Ellas interactúan una con otra y ocasionan una espiral gradual de declinación en la calidad del aislamiento.

2.1.1 Fatiga eléctrica

El aislamiento se diseña para una aplicación particular. Los sobrevoltajes y los bajos voltajes ocasionan fatiga anormal dentro del aislamiento que puede conducir agrietamiento y laminación del propio aislamiento.

2.1.2 Fatiga mecánica

Los daños mecánicos, tales como golpear un cable o la porcelana de los equipos de potencia cuando se instalan o transportan, son bastante obvios pero la fatiga mecánica también puede ocurrir por los efectos mecánicos que se producen cuando se presentan las sobrecorrientes de cortocircuito. Las vibraciones resultantes al operar los equipos pueden ocasionar defectos dentro del aislamiento.

2.1.3 Ataque químico

Aunque es de esperarse la afectación del aislamiento por vapores corrosivos, la suciedad y el aceite pueden reducir la efectividad del aislamiento.

2.1.4 Fatiga térmica

La operación de un equipo en condiciones excesivamente calientes o frías ocasionará sobre expansión o sobre contracción del aislamiento que darán lugar a grietas y fallas.

Sin embargo, también se incurre en fatigas térmicas cada vez que los equipos de la subestación se ven expuestos a sobrecorrientes de origen atmosféricas y corrientes de cortocircuito ayudando adversamente al proceso de envejecimiento del aislamiento.

2.2 ESFUERZOS DIELECTRICOS APLICADOS SOBRE LOS MATERIALES AISLANTES

Los esfuerzos dieléctricos aplicados sobre los materiales son de origen muy variado y es posible que tengan una duración del orden de microsegundos con amplitudes de tensión elevadas o tiempos del orden de minutos y hasta horas con valores de tensión no muy altas y formas de onda senoidales, por lo que es necesario analizar la amplitud y la duración de las sobretensiones productoras de los esfuerzos dieléctricos en los materiales aislantes.

Un análisis breve de la naturaleza y características más importantes de estas sobretensiones, se hace a continuación:

Las sobretensiones que se presentan en los sistemas eléctricos pueden ser:

- Sobretensiones de origen atmosféricos o por rayo.
- Sobretensiones por maniobra.
- Sobretensiones temporales a la frecuencia del sistema.

2.2.1 Sobretensiones de origen atmosférico o por rayo

Estas sobretensiones son debidas a las descargas atmosféricas y por lo general se manifiestan inicialmente sobre las líneas de transmisión pudiendo ocurrir:

- Por descargas o rayos directamente sobre la línea de transmisión.

- Por descargas o rayos sobre las estructuras (torres o postes) o sobre los hilos de guarda en las líneas de transmisión.
- Por descargas a tierra (suelo) en las proximidades de la línea de transmisión.

2.2.2 Sobretensiones por maniobra

Es una sobretension por maniobra aplicada a un equipo como resultado de un evento de tipo específico sobre el sistema como por ejemplo: energización de líneas, recierres, ocurrencias de fallas, descargas atmosféricas.

Tales sobretensiones tienen por lo general un alto amortiguamiento y corta duración.

2.2.3 Sobretensiones temporales a la frecuencia del sistema.

Tensión a la frecuencia del sistema en las condiciones normales de operación, es decir sin que excedan a las tensiones máximas de diseño del equipo, lo que equivale al régimen permanente de operación sin perturbaciones.

2.3 LA COORDINACIÓN DEL AISLAMIENTO

Por coordinación de aislamiento se puede entender en términos generales a las disposiciones y precauciones que se deben tomar en el diseño de las instalaciones eléctricas que está expuestas a sobretensiones para evitar que las máquinas y equipos eléctricos en general puedan sufrir daños por efectos de sobretensiones. Se trata de contener estas sobretensiones dentro de límites tolerables evitando por un lado fallas frecuentes y por otro un costo demasiado elevado de los equipos de protección.

Desde el punto de vista de proyectos, es necesario establecer una relación entre la tensión nominal de operación de una instalación, la tensión de ruptura dieléctrica de los equipos por proteger y las características de los dispositivos de protección contra las sobretensiones.

Resulta obvio que se debe tender a una normalización de las características de las redes eléctricas en función de estos términos correlativos y de aquí que resulte oportuno en esta parte dedicar un poco de espacio para aclarar algunas ideas al respecto por medio de las diferencias basadas en las normas de la Comisión Internacional de Electrotecnia IEC de publicación 1976.

2.3.1 Definiciones

2.3.1.1 Aislamiento Externo

Comprende las superficies aislantes externas de los equipos, el aire ambiente que lo rodea, y las distancias en aire. La rigidez dieléctrica del aislamiento externo depende de las condiciones atmosféricas tales como la contaminación, la humedad, etc.

2.3.1.2 Aislamiento Interno

Comprende aislamiento interno sólidos, líquidos o gaseosos que forman parte de los equipos que están protegidos de los efectos atmosféricos tales como contaminación, humedad, etc., y otras condiciones externas.

2.3.1.3 Aislamiento Externo Tipo Interior

Es el aislamiento exterior que está diseñado para operar dentro de los edificios y consecuentemente no está expuesto a las condiciones ambientales.

2.3.1.4 Aislamiento Externo Tipo Exterior

Es el aislamiento externo que está diseñado para operar fuera de los edificios y consecuentemente está expuesto a las condiciones ambientales.

2.3.1.5 Aislamiento Autorrecuperable

Es el aislamiento que recupera totalmente sus propiedades aislantes después de una descarga disruptiva causada por una aplicación de una tensión de prueba, un

aislamiento de este tipo es por lo general, aunque no necesariamente un aislamiento externo.

2.3.1.6 Aislamiento no Autorrecuperable

Es el aislamiento que pierde sus propiedades aislantes o que no las recupera completamente después de una descarga disruptiva causada por una aplicación de una tensión de prueba, un aislamiento de este tipo es por lo general, aunque no necesariamente un aislamiento interno.

2.3.1.7 Sistema con neutro Aislado

Es un aislamiento cuyo neutro no tiene ninguna conexión intencional con tierra, excepto a través de equipos de señalización, de medición o de protección, de muy alta impedancia.

2.3.1.8 Sistema con neutro Conectado a Tierra

Es un sistema cuyo neutro está conectado a tierra ya sea directamente o a través de una resistencia o una reactancia de un valor suficientemente bajo, con el propósito de reducir al máximo las oscilaciones de una protección selectiva de falla a tierra.

2.3.1.9 Sistema Aterrizado Resonante

(Sistema conectado a tierra a través de una bobina de supresión de arco).

Es un sistema conectado a tierra a través de una reactancia cuya reactancia es de un valor tal que durante una falla de fase a tierra, la corriente inductiva a la frecuencia del sistema que circula a través del reactor neutraliza sustancialmente a la componente capacitiva a la frecuencia del sistema de la corriente de falla a tierra.

Nota: en un sistema aterrizado resonante, la corriente residual en la falla se limita al grado, que una falla con arco en el aire por lo general se extingue.

2.3.1.10 Sobretensión

Cualquier valor de tensión (en función del tiempo) entre una fase y tierra o entre fases que tengan un valor cresta o valores que los excedan (obtenidos de la

tensión máxima de diseño del equipo $\frac{\sqrt{2}V.m}{\sqrt{3}}, \sqrt{2}V.m$).

2.3.1.11 Tensión crítica de Flameo (VCF)

Es el valor de tensión al cual se tiene una probabilidad de flameo de 50% y los valores usados corresponden a los niveles básicos de aislamiento (por impulso de rayo o por maniobra) que son cantidades inferiores al VCF ó a la tensión crítica de flameo por maniobra (VCS) que darían probabilidades de flameo del 10%, es decir se espera que no se produzca flameo por lo menos en un 90% de las veces.

2.3.1.12 Sobretensión temporal

Es una sobretensión oscilatoria de fase a tierra o de fase a fase en un punto dado de un sistema que tiene una duración relativamente grande, la cual no está amortiguada o tiene un débil amortiguamiento.

Las sobretensiones temporales, por lo general, están originadas por operaciones de maniobra o fallas (rechazo de carga, fallas de fase a tierra). y/o por efectos de no linealidades (como efectos de ferresonancia y armónicas). Estas sobretensiones se pueden caracterizar por su amplitud, su frecuencia de oscilación, por el tiempo total de duración o por su decremento.

2.3.1.13 Nivel de Aislamiento Nominal

- Para equipos con tensión máxima de diseño igual o mayor a 300 Kv es la tensión resistente por impulso nominal de maniobra y por rayo.
- Para equipos con tensión máxima de diseño menor de 300 Kv, es la tensión de impulso nominal por rayo y la tensión resistente de corta duración a la frecuencia del sistema.

2.3.1.14 Nivel de protección de un dispositivo de protección

Es el valor máximo de la tensión de cresta que no debe excederse en las terminales de un dispositivo de protección cuando se aplican impulsos de maniobra e impulsos de rayo de formas normalizadas y valores nominales bajo condiciones específicas.

2.4 RESISTENCIA DEL AISLAMIENTO DE LOS EQUIPOS A LOS ESFUERZOS ELÉCTRICOS

“La tensión resistente” del equipo según sea la clasificación de aislamiento se define por las pruebas para las curvas de aislamiento para sobretensiones por rayo o maniobra de interruptores en aislamiento autorecuperables.

En la adición a las pruebas para la determinación del nivel básico de aislamiento al impulso con ondas de 1.2/50 us(BIL) y el nivel básico de aislamiento por maniobra (NBS), se debe aplicar ondas de 1.2/50 cortadas en 2 y/o 3 microsegundos. En el caso de transformadores sumergidos en aceite se pueden aplicar también pruebas de frente de onda. En la tabla siguiente se da un resumen de las principales pruebas dieléctricas a los equipos más importantes en subestaciones de 44 Kv ó mayor.

Tabla 4. Pruebas dieléctricas a equipos en subestaciones.

EQUIPO	A BAJA FRECUENCIA A (60 Hz)	BIL	ONDA CORTA		FRENTE DE ONDA	NBS
			3 us	2 us		
TRANSFORMADOR	X	X	X			X
INTERRUPTOR	X	X	X	X		X
CUCHILLAS	X	X				X
DESCONECTADOR						
BOQUILLAS Y AISLADORES DE LOS APARTOS	X	X	X	X	X	X

2.5 DISEÑO DE AISLAMIENTO EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

En el diseño del aislamiento de líneas de transmisión de extra alta tensión, el método convencional consiste en establecer un margen entre la resistencia dieléctrica de la torre y los máximos sobrevoltajes por maniobra de interruptores en el sistema basados en peritajes y en la experiencia.

La información que se tiene, es que cada vez que ocurre un sobrevoltaje por maniobra con su máxima amplitud, la probabilidad de un flameo es baja, a medida que aumentan los voltajes del sistema es más importantes dar el margen de protección adecuado usando los métodos convencionales basados en las características de los dispositivos de protección de los conceptos estadísticos.

Los sobrevoltajes *por rayo no determinan* el esfuerzo del aislamiento en el sistema y las ondas de sobrevoltajes por maniobra de interruptores predominan para la determinación de las dimensiones eléctricas del aislamiento. Por lo que es económico reducir las ondas de maniobra de interruptores a valores tan bajos como sea posible prácticamente ya que esto conducirá al establecimiento de los espacios mínimos (aislador) y en consecuencia se obtendrá una reducción en el tamaño y costo de las torres.

Los sobrevoltajes que se presentan por el cierre o recierre de una línea se pueden reducir por medio de la inserción temporal de resistencias en el interruptor. Estas resistencias reducen el valor inicial del escalón inicial de voltaje aplicado a la línea en el momento que los contactos se cierran y por medio de una selección deseable resulta como una reducción de los voltajes de energización de la línea.

La duración de las ondas de maniobra de interruptores tiende a aumentar en la medida que los sobrevoltajes de maniobra se reducen y desde el punto de vista de aislamiento externo la diferencia entre sobrevoltaje temporal y por maniobra de interruptor tiende a desaparecer.

En base a lo anterior los niveles de aislamiento para líneas de extra alta tensión se pueden determinar a partir de los siguientes conceptos:

- A partir del voltaje para el equipo V_m se determina el valor cresta de V_m

como

$$V_m \text{ cresta} = \frac{V_m}{\sqrt{3}} * \sqrt{2}$$

$$V_m = V_{\max}$$

- Por medio de programas para el análisis de transitorios se determina el sobrevoltaje en p.u, estos factores se ha demostrado que pueden ser del orden de 1.8 para líneas de 756 Kv y 1.63 para líneas de 1000 Kv.

- El sobrevoltaje estadístico se calcula entonces como:

$$V_2 = V_m \text{ cresta} * V_{\text{estadística}} (p.u)$$

- El voltaje resistente al 90% en la torre se calcula como:
- La constante 1.15 representa el factor de seguridad estadístico que da el mínimo sobrevoltaje estadístico que corresponde a un riesgo de falla 10^{-5} o un flameo por cada 100.000 operaciones de maniobra.
- El voltaje crítico de flameo en la torre se calcula entonces como:

$$VCF = \frac{V_{90}}{(1.0 - 1.3 * \sigma)}$$

- La distancia en metros a la estructura se calcula a partir de la relación entre el voltaje crítico de flameo (VCF) y la longitud del gap en aire de acuerdo con la expresión:

$$VCF = 600 * d^{0.6}; \text{ donde } d \text{ está en metros y VCF en Kv.}$$

- La longitud de la cadena de aisladores en metros se determina basándose en un gradiente de voltaje de 150 Kv por metro como:

$$\text{Longitud de la cadena (mt)} = V_m / 150$$

- La relación de la longitud de la cadena de aisladores a la distancia a estructura debe ser del orden de 1.25 para permitir la instalación de los aisladores en la ventana de la torre para cada aislador en V.
- El número de aisladores en la cadena se determina basándose en una altura promedio por disco de 14.6 cm. o bien 7 aisladores en promedio por metro.

2.6 AISLADORES

Los conductores empleados en líneas aéreas, en la mayor parte de los casos, son desnudos; por lo tanto, se necesita aislarlos de los soportes por medio de aisladores, fabricados generalmente con porcelana, vidrio o poliméricos. La sujeción del aislador al poste se realiza por medio de herrajes. Pero además, un aislador debe tener las características mecánicas necesarias para soportar los esfuerzos a tracción a los que está sometido.

Teniendo en cuenta lo anterior, las cualidades específicas que deben cumplir los aisladores son:

- Rigidez dieléctrica suficiente para que la tensión de perforación sea lo más elevada posible. Esta rigidez depende de la calidad del vidrio o porcelana y del grueso del aislador. La tensión de perforación es la tensión a la cual se ceba el arco a través de la masa del aislador.
- Disposición adecuada, de forma que la tensión de contorneamiento presenta valores elevados y por consiguiente no se produzcan descargas de contorno entre los conductores y el apoyo a través de los aisladores. La tensión de contorneamiento es la tensión a la que se ceba un arco a través del aire siguiendo la mínima distancia entre fase y tierra, es decir, el contorno del aislador. Esta distancia se llama línea de fuga.
- Resistencia mecánica adecuada para soportar los esfuerzos demandados por el conductor, por lo que la carga de ruptura de un aislador debe ser cuanto menos igual a la del conductor que tenga que soportar.
- Resistencia a las variaciones de temperatura.
- Ausencia de envejecimiento.

Los aisladores son, de todos los elementos de la línea, aquellos en los que se pondrá el máximo cuidado, tanto en su selección, como en su control de recepción, colocación y vigilancia en explotación. En efecto, frágiles por

naturaleza, se ven sometidos a esfuerzos combinados, mecánicos, eléctricos y térmicos, colaborando todos ellos a su destrucción.

2.6.1 Aisladores tipo poste o fijos

La función de estos aisladores es de servir de soporte, su forma general es la de una campana que lleva en su parte superior una garganta sobre la que se fija el conductor por una conector fijo a este.

Constituyen elementos de una sola pieza y se fabrican de porcelana o de materiales sintéticos. Estos aisladores requieren menos mantenimiento que los del tipo disco, no obstante su costo es más elevado.

Se utilizan poco en líneas de transmisión y para tensiones sobre 230 Kv. Su principal aplicación está en equipos de subestaciones, donde son la parte aislante externa de los equipos de potencia. En la siguiente figura se tiene un aislador tipo poste.

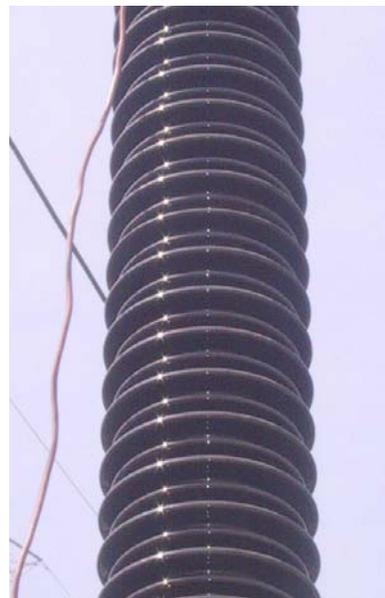


Figura 8. Aislador tipo soporte (Foto tomada por los autores).

2.6.2 Cadenas de Aisladores

Están constituidos por un número variable de elementos según la tensión de servicio; estas cadenas son móviles alrededor de su punto de unión al soporte, y además, las articulaciones entre elementos deben tener bastante libertad para que los esfuerzos de flexión queden amortiguados; estas articulaciones suelen ser de rótula.

Este tipo de aislador es el más empleado en media y en alta tensión, ya que presenta las siguientes ventajas:

- Permite elevar la tensión de funcionamiento con sólo aumentar la longitud de la cadena, es decir, colocando más elementos.
- No se interrumpe el servicio por ruptura de un aislador, ya que la cadena sigue sosteniendo al conductor.
- Presenta una gran economía en la reparación de las cadenas, pues solamente es necesario cambiar el elemento averiado.

Cadenas de Aisladores de porcelana y de Vidrio

La estructura de los aisladores de porcelana es homogénea y, para dificultar las adherencias de la humedad y el polvo, la superficie exterior está recubierta por una capa de esmalte. Están fabricados con caolín y cuarzo de primera calidad. La temperatura de cocción en el horno es de 1400° C.

En alta tensión, los aisladores son de dos, tres o más piezas unidas con yeso. Esto se debe a que solamente se consigue una cocción buena cuando su espesor no excede de 3 cm.

Los aisladores de vidrio están fabricados por unas mezclas de arena silíceo y de arena calcárea, fundidas con una sal de sodio a una temperatura de 1300 °C, obteniéndose por moldeo. Su color es verde oscuro. El material es más barato que

la porcelana, pero tienen un coeficiente de dilatación muy alto, que limita su aplicación en lugares con cambios grandes de temperatura; la resistencia al choque es menor que en la porcelana. Sin embargo, debido a que el costo es más reducido y su transparencia facilita el control visual, hacen que sustituyan en muchos casos a los de porcelana.

Los aisladores de suspensión o disco, son los más empleados en las líneas de transmisión, se fabrican de vidrio o porcelana uniéndose varios discos para conformar cadenas de aisladores de acuerdo al nivel de tensión de la línea y el grado de contaminación del entorno. En la siguiente figura se aprecian los principales tipos de aisladores de suspensión.

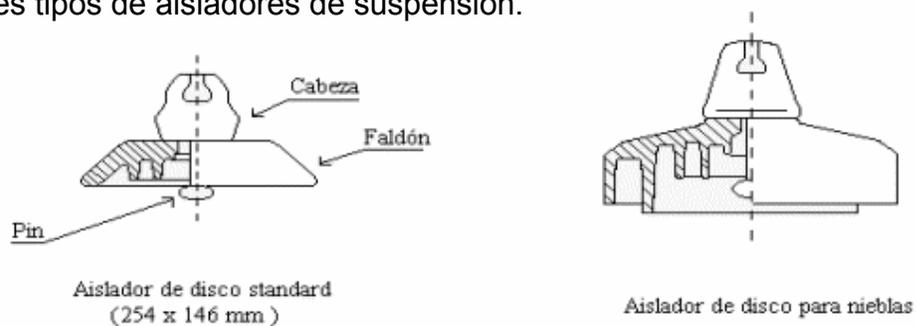


Figura 9. Aisladores de suspensión empleados en líneas de transmisión.

La siguiente figura nos muestra la disposición de los aisladores en una cadena de suspensión o en una cadena de amarre.

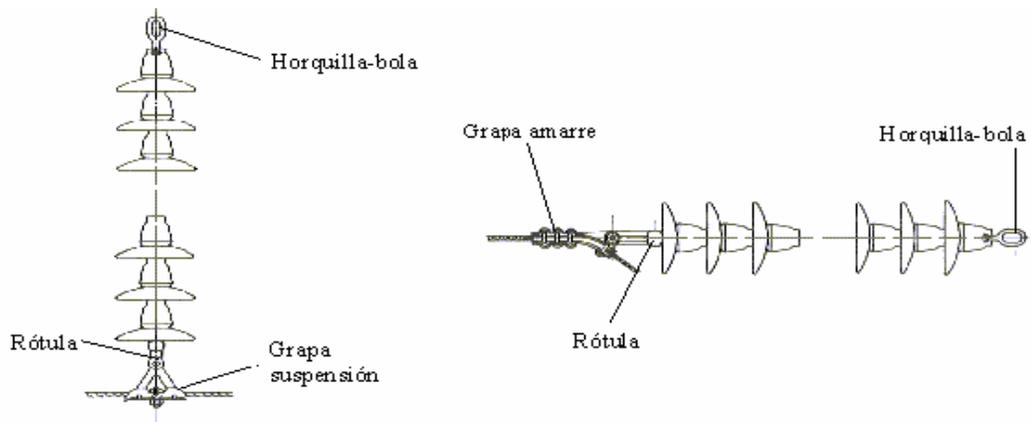


Figura 10. Aislador en cadena de suspensión y de amarre.

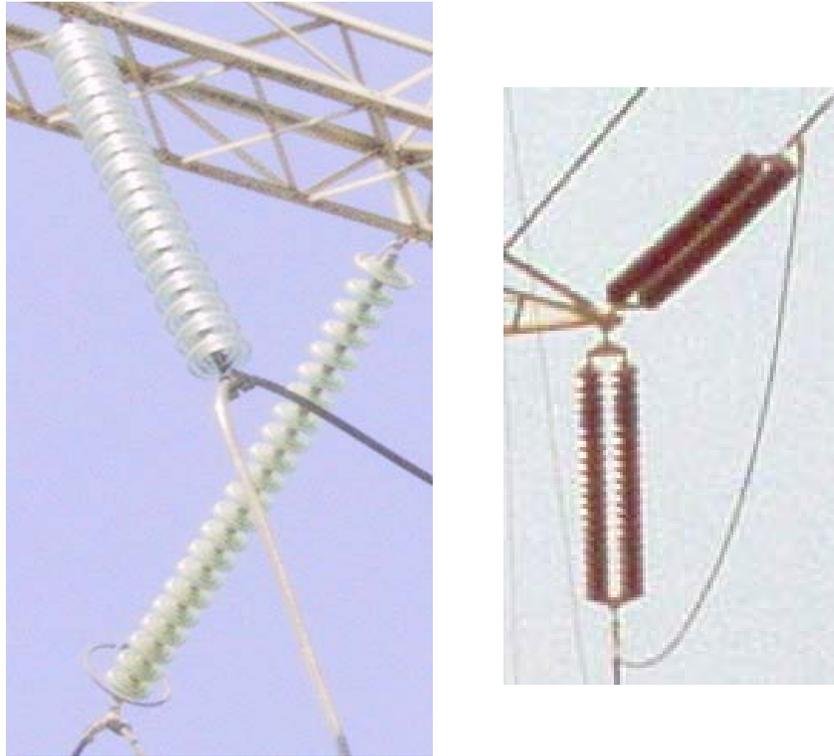


Figura 11. Aislador en cadena de suspensión y retención (Foto tomada por los autores).

La principal desventaja que afecta estos tipos de cadenas de aisladores es la contaminación ya que está produce una acelerada corrosión de las partes metálicas en las instalaciones que operan en zonas de alta contaminación. Las causas principales de dicha corrosión son:

- Efectos electrolíticos debidos a la corriente de fuga.
- Pérdida de la capa de zinc (galvanizado), quedando el metal expuesto a la acción corrosiva del medio.
- Generación de ácido nítrico a partir de ozono producido por el efecto corona y el calentamiento.

En la siguiente figura se muestra una cadena de aisladores afectada por los efectos de la corrosión debido a la contaminación ambiental.

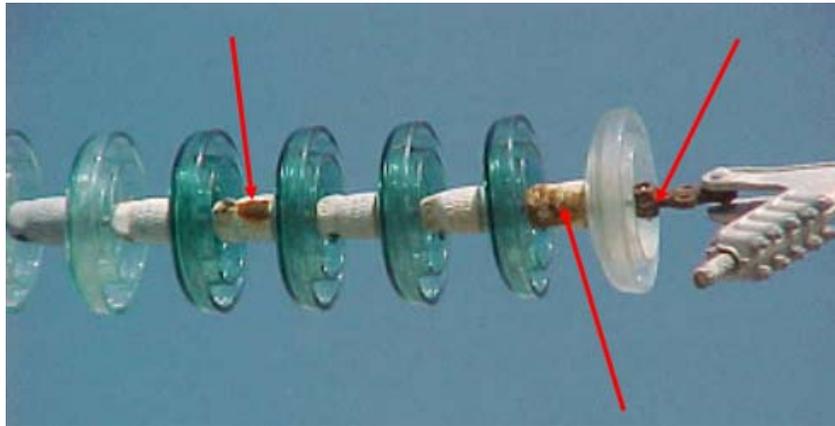


Figura 12. Cadena Aisladores afectada por la corrosión.

2.6.3 Cadenas de Aisladores Poliméricos

Los aisladores poliméricos poseen características especiales que los hacen atractivos para resolver problemas detectados en los aisladores de vidrio o porcelana, principalmente en zonas de alta contaminación.

Entre las principales características tenemos peso ligero y bajo mantenimiento. Para lograr estos requerimientos fue necesario encontrar y desarrollar materiales adecuados. A diferencia de los aisladores convencionales, los aisladores no cerámicos se componen de diferentes materiales aislantes con propiedades optimadas para cumplir con la función básica del aislador: resistencia mecánica y aislamiento eléctrico (incluso bajo condiciones severas de contaminación).

La experiencia operacional indica que los aisladores no cerámicos, particularmente con hule de silicón, se comportan mejor que los aisladores cerámicos en áreas de polución. Sin embargo, la contaminación genera descargas superficiales que pueden destruirlo. Este fenómeno se ha observado con más frecuencia en aisladores de EPDM (ethylene propylene diene monomer), los cuales pierden su propiedad hidrofóbica después de unos cuantos años de operación.

A continuación se muestran unas imágenes de unos aisladores poliméricos

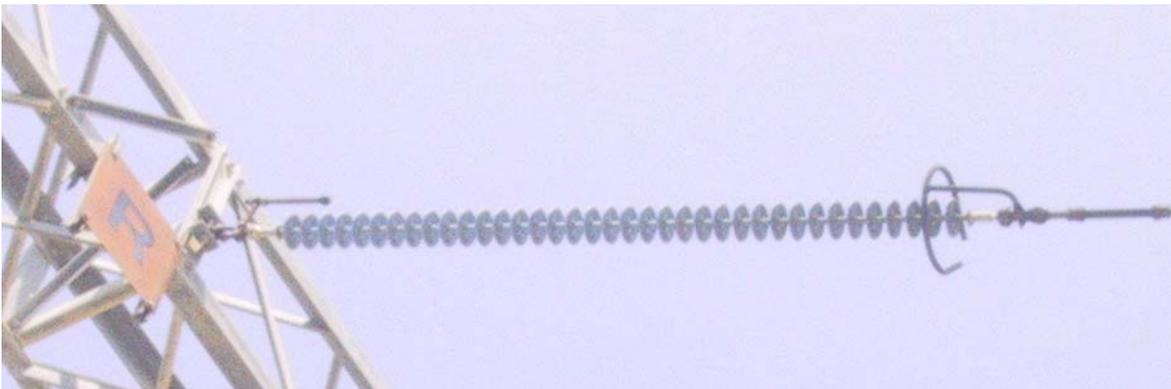


Figura 13. Aisladores poliméricos (Foto tomada por los autores).

3. ANALISIS DE LA RECUPERACION DEL AISLAMIENTO EN LA SUBESTACIÓN CARTAGENA 220 Kv

A continuación se presentan los aspectos más importantes y relevantes en cuanto a la coordinación de aislamiento de la Subestación Cartagena 220 Kv, en el cual se consideran los efectos de la contaminación ambiental en la subestación.

La Subestación Cartagena está conformada por dos patios, uno de 220 Kv y uno a 66 Kv energizado por los transformadores de potencia Cartagena04 220/66 Kv de 100 MVA y transformadores de potencia Cartagena05 con los niveles de tensión de 220/66/13.2 Kv.



**Figura 14. Bahías de la Subestación Cartagena configuración interruptor y medio
(Foto tomada por los autores).**

En este patio de la subestación están los diámetros 1, 2, 3 y 4.

Diámetro 1: Circuito, Línea 830 hacia la subestación Termocandelaria y bahía de generación termocartagena 01.

Diámetro 2: Circuito, Línea 829 hacia la subestación Termocandelaria y bahía de generación termocartagena 02.

Diámetro 3: Transformador Cartagena 04 220/66 Kv y bahía de generación termocartagena 03.

Diámetro 4: Bahía de transformador Cartagena 05 220/66/13,2 Kv y bahía de línea 831 hacia la subestación Sabanalarga.

3.1 PARÁMETROS ELÉCTRICOS DEL SISTEMA

A continuación se muestran los parámetros eléctricos de la subestación Cartagena 220 Kv.

Tabla 5. Parámetros eléctricos del sistema.

Voltaje nominal	220 Kv
Frecuencia nominal	60 Hz
Tensión asignada al equipo	245 Kv
Tensión asignada al impulso tipo rayo (BIL)	1050 Kv
Tensión asignada soportada a la frecuencia industrial	460 Kv
Distancia de fuga mínima nominal	25 mm/Kv
Distancia de fuga mínima entre fase y tierra	6125 mm
Máxima corriente de cortocircuito	31,5 kA
Sistema sólidamente puesto a tierra	En Y

El patio de 220 Kv está conformado por dos barras principales, identificadas en el diagrama unifilar (Ver figura 16) como Barra 1 y Barra 2, y por cuatro (4) bahías en configuración Interruptor y medio. Cada bahía posee tres (3) interruptores y seis (6) seccionadores de barra. Las bahías de transformación 04 y 05 a 220 Kv alimentan al patio de 66 Kv.

El patio de 66 Kv está conformado por una doble barra que posee 7 módulos encapsulados en SF6, cuatro de ellos son bahías de línea identificados como la bahía de línea Bocagrande, la bahía de línea Proeléctrica I, la bahía de línea Proeléctrica II y la bahía de línea Chambacú; otras dos bahías de transformación, cuyo transformador es de 220/66 Kv y 220/66/13.2 Kv, identificado como Cartagena 04 y 05 y finalmente el módulo de acople, el cual posee circuito de by-pass para el interruptor principal de acople alimentados con el transformador Cartagena 04. Ver figura 17.



**Figura 15. Subestación Cartagena configuración interruptor y medio
(Foto tomada por los autores).**

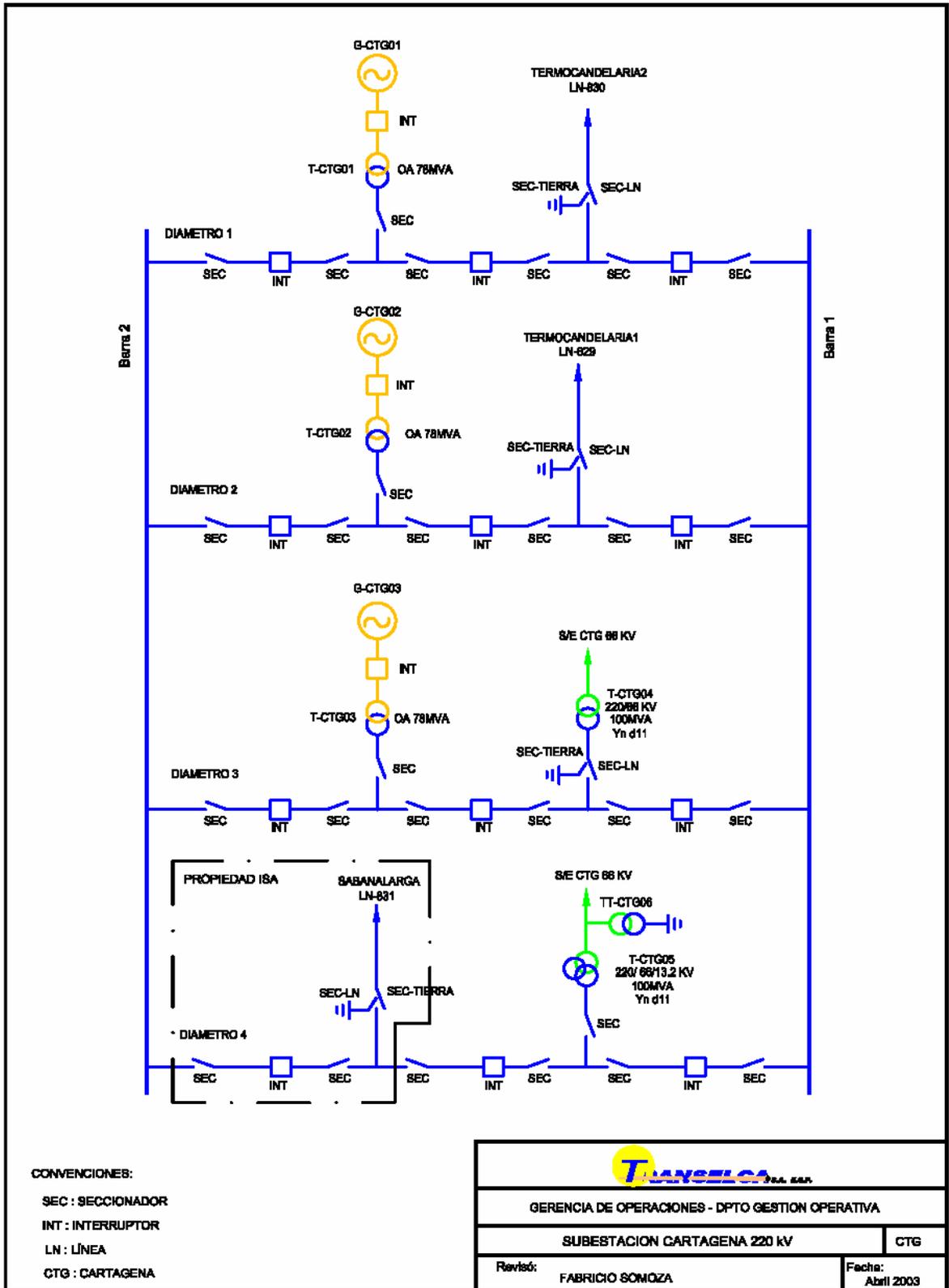


Figura 16. Diagrama unifilar de la Subestación Cartagena 220 Kv.

3.2 CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN LA SUBESTACIÓN CARTAGENA 220 Kv

La contaminación ambiental en la subestación Cartagena abarca una multitud de agentes que van desde la humedad por los procesos industriales hasta la humedad de un día húmedo y caluroso, y también los efectos debidos a la cercanía con el mar (la bahía de Cartagena), la cual se ve reflejada con contaminación salina.

La ciudad de Cartagena en la zona industrial de manomal es afectada por los contaminantes de óxidos de nitrógeno, carbón, carbonatos, polvos varios en suspensión, óxidos de azufre, óxidos de carbono, fertilizantes en suspensión, material de la industria de cemento en partículas y dióxido de carbono producto del tráfico automotor intensivo en la zona.¹

El aislamiento comienza a degradarse tan pronto como se pone en servicio. El aislamiento de cualquier aplicación dada se diseña para proporcionar un buen servicio durante muchos años en condiciones normales de operación. Sin embargo, las condiciones anormales pueden tener un efecto dañino que, si se deja sin atención, acelerará la rapidez de degradación y finalmente ocasionará una falla en el aislamiento. Se considera que el aislamiento ha fallado si no evita adecuadamente que la corriente eléctrica fluya por trayectorias indeseadas. Ello incluye el flujo de corriente a través de las superficies exterior o interior del aislamiento (corriente de fuga superficial), a través del cuerpo del aislamiento (corriente de conducción) o por otras razones distintas.

Por ejemplo, pueden aparecer en el aislamiento agujeros pequeños y grietas, o la humedad y materiales extraños pueden penetrar la superficie. Estos contaminantes se ionizan fácilmente bajo el efecto de un voltaje aplicado y proporcionan una trayectoria de baja resistencia para la corriente de fuga

1. El daño ambiental en la atmósfera Cartagenera (Pág. 93)
Cuaderno de trabajo ambiental de Cartagena.

superficial que aumenta en comparación con superficies sin contaminar secas. Limpiando y secando el aislamiento, sin embargo, se rectificará fácilmente esta situación. Otros enemigos del aislamiento pueden producir deterioro que no se cura fácilmente. Sin embargo, una vez que ha comenzado la degradación del aislamiento, los diferentes iniciadores tienden a asistirse entre ellos para aumentar la rapidez de degeneración.

En los sistemas eléctricos y para propósitos de diseño, se establece una diferencia entre aislamiento tipo externo y aislamiento tipo interno en los equipos y en las subestaciones, dentro de los aislamientos internos se puede mencionar como ejemplo los aceites, papel, cintas de lino, etc., de los transformadores, el hexafloruro de azufre (SF₆) de los interruptores, el aceite o aire comprimido usado en los interruptores y dentro de los aislamientos externos se tienen principalmente las distancias en aire a tierra (aisladores de porcelana, vidrio, resinas sintéticas y su relación con respecto a las puntas conectadas a tierra), así como las distancias en aire entre partes vivas (de fase a fase) en las instalaciones eléctricas y líneas de transmisión.

La contaminación ambiental en la subestación Cartagena 220 Kv, y debido a que está en una zona costera se considera como **pesada**, según la norma IEC 60815.

A continuación se presentan los resultados del estudio de coordinación de aislamiento para determinar el nivel de aislamiento de los equipos en la subestación Cartagena 220 Kv con base en la metodología propuesta en la norma IEC 60071-2. Los siguientes son los parámetros ambientales de la Subestación Cartagena 220 Kv.

Tabla 6. Parámetros ambientales (Tomada de memorias de la coordinación de aislamiento).

Altura sobre el nivel del mar	100 m
Nivel de contaminación ambiental (IEC 60815)	Pesado
Humedad relativa máxima promedio mensual	91 %
Humedad relativa promedio mensual	81 %
Humedad relativa mínima promedio mensual	63 %
Temperatura máxima promedio anual	42 °C
Temperatura promedio anual	30 °C
Temperatura mínima promedio anual	20 °C
Nivel cerámico	90 días/año
Presión atmosférica	760 mbar
Precipitación media anual	1360,5 mm

3.3 PRINCIPIOS BÁSICOS DE COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO

La coordinación de aislamiento comprende la selección de la resistencia dieléctrica del equipo y su aplicación, con relación a las tensiones que pueden aparecer sobre el sistema, para las cuales el equipo está diseñado y tomado en consideración de las características de los dispositivos de protección disponibles, así como reducir a un nivel económico y operacional aceptable la probabilidad de que los esfuerzos por tensión resultantes e impuestos al equipo, puedan causar daño al aislamiento del mismo o afectar la continuidad del servicio.

3.4 PRINCIPIO DE LA COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO EN LA SUBESTACIÓN CARTAGENA DE 220 Kv

En las subestaciones eléctricas, a diferencia de las líneas de transmisión se tienen aislamientos autorecuperables y aislamientos no recuperables como el que contienen los equipos con aislamientos internos como son los transformadores de potencia, transformadores de instrumentos, Bancos de capacitares, reactores y algunos otros elementos que deben ser protegidos cuidadosamente contra

rupturas dieléctricas internas con el objeto de mantener en la instalación un riesgo de falla mínimo.

Debido a lo anterior un aspecto importante en la coordinación de aislamiento es el establecimiento de los valores máximos de tensión permisibles en los equipos, el **nivel básico de aislamiento por impulso de rayo (BIL)**, el **nivel básico de aislamiento por impulso de maniobra de interruptores (NBS)** con los márgenes de protección recomendados por las normas para los equipos; al respecto se puede mencionar que los métodos de cálculos son probabilísticos y semiprobabilísticos, en esta parte sólo se hará referencia a estos últimos.

Teniendo en cuenta el **Nivel de aislamiento nominal**, analizamos que la subestación Cartagena de 220 Kv, corresponde a equipos con un diseño de tensiones máximas menores de 300 Kv, con base en lo anterior nuestra subestación en estudio se relaciona con el nivel básico de aislamiento (BIL) tipo rayo.

El cual está definido de la siguiente forma según las recomendaciones de la Comisión Internacional de Electrotecnia en su norma IEC-71 (1976)², según el método de **L. PARIS**.

$$BIL = VCF(1.0 - 1.3 * \sigma)$$

donde:

BIL = Nivel básico de aislamiento por rayo.

σ = Desviación estándar, para impulso por rayo corresponde al 3%.

Por lo que la relación entre los niveles de aislamiento y las tensiones críticas de flameo se puede establecer como:

$$BIL = VCF(1.0 - 1.3 * 0.03) = 0.961 * VCF$$

$$VCF = \frac{BIL}{0.961} \Rightarrow BIL = VCF * 0.961$$

Según la norma IEC-71 tenemos la siguiente tabla 7.

Tabla 7. Niveles de aislamiento básicos y distancias entre fases y tierra.

Tensión Nominal Kv	Tensión Máxima Kv	Nivel básico de aislamiento por rayo Kv	Distancia mínima de fase a tierra a 1000 MSNM ó menores. Cm	Distancia mínima a de fase a fase (entre a poyos). Cm
3.2	3.6	40	6.0	10.02
6.6	7.2	60	9.0	15.03
15.0	17.5	95	16.0	26.72
23.0	24.0	125	22.0	36.74
34.5	36.0	170	32.0	51.20
69.0	72.5	325	63.0	100.80
85.0	100.0	450	90.0	144.0
115.0	123.0	550	111.0	177.6
230.0	245.0	990	196.0	268.52
230.0	245.0	1050	230.0	315.1

La subestación Cartagena tiene un BIL de 1050 Kv, con base en la anterior tabla notamos que el Nivel básico de aislamiento tipo rayo, para una tensión nominal de 220 Kv efectivamente es de 1050 Kv según la norma IEC-71.

Por criterios de seguridad para los equipos de la subestación, teniendo en cuenta la cercanía con el mar y las distancias de seguridad se selecciono un BIL de 1050 Kv.

Para mayor información de los criterios de coordinación de aislamiento, consultar el anexo A (Memorias de coordinación de aislamiento subestación Cartagena 220 Kv).

3.5 ANÁLISIS DE LOS CONTAMINANTES EN LA SUBESTACIÓN CARTAGENA 220 KV.

En la subestación Cartagena los aisladores expuestos están sujetos a la deposición de suciedad en la superficie. Los contaminantes que se encuentran con más frecuencia tienen poco efecto en el desempeño del aislador, siempre y cuando la superficie esté seca. La neblina, el rocío o la lluvia liviana usualmente crean condiciones que producen una película conductora sobre la superficie del aislador sucio, sin lavar las impurezas de dicha superficie.

Según los tipos de contaminantes de finidos por la norma IEEE Std 957-1987, notamos que los contaminantes que afectan la subestación Cartagena son los siguientes, para mayor información de los contaminantes remítase a la sección 4.3

- Sal
- Polvo
- Sustancias químicas (Industriales)
- Neblina por contaminantes (emisiones vehiculares)
- Humo

La contaminación salina se presenta en esta subestación debido a que se encuentra ubicada en la bahía de Cartagena a unos pocos metros de está. Donde el viento desplaza el contaminante salino hacia los equipos de la subestación, como se puede apreciar en las siguientes imágenes de la subestación.



Figura 18. Vista superior de la ubicación de la subestación en la bahía de Cartagena.

Los tipos de polvo que se pueden depositar sobre los aisladores de la subestación Cartagena se originan en una amplia variedad de fuentes. Algunos de los tipos que afectan el desempeño del aislador son el polvo de tierra, fertilizantes, polvo metálico, polvo de carbón, polvo de los corrales de engorde y ceniza volcánica. Teniendo en cuenta los anteriores contaminantes notamos que para la subestación Cartagena, se presenta contaminación por polvo de tierra el cual

básicamente es debido a que este polvo es transportado por el aire de las cercanías de la vía de mamonal.

En las imágenes siguientes podemos notar el efecto del polvo de tierra sobre los aisladores de la subestación, el cual constantemente con el paso de los días aumenta.



**Figura 19. Aisladores contaminados por polvo de tierra
(Foto tomadas por los autores).**

Como se menciona anteriormente la cantidad de contaminante que se deposita en la superficie del aislador depende de los días que este sin limpiar. A medida que no se limpie más contaminante se adhiere a la superficie de este.

3.6 CONTAMINACIÓN EN LOS AISLADORES

En la Subestación Cartagena de 220 Kv, realizamos visitas de inspección durante varios días donde observamos los procedimientos de varias pruebas que se les realizan a los equipos entre las cuales tenemos la medición del aislamiento de los equipos de potencia y la prueba de factor de potencia. Las cuales analizaremos en posteriores capítulos. Además de esto tomamos muestras de contaminación en un aislador de soporte de un transformador de potencial tipo capacitivo.

El cual corresponde a la fase S del diámetro 3 de la salida del pórtico hacia el transformador de potencia 04 de 100 MVA 220/66 Kv. Como se muestra en la siguiente imagen.

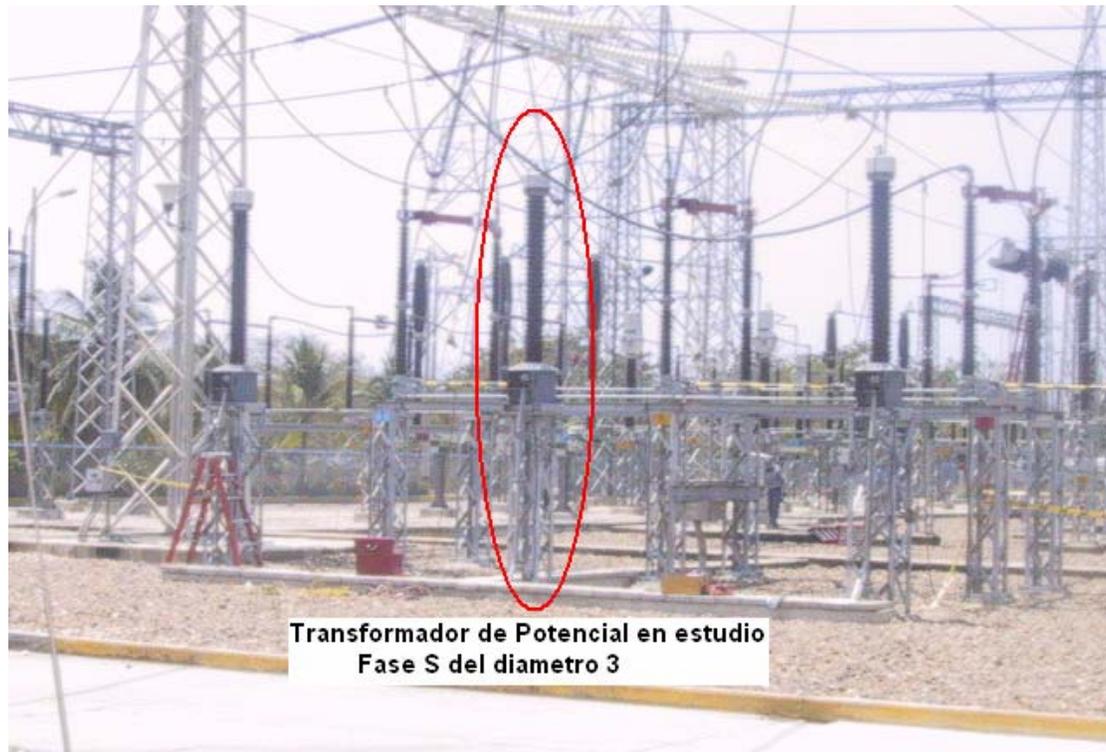


Figura 20. Toma de muestra de aislador soporte (Foto tomada por los autores).

La muestra para este aislador se tomo con base a la última limpieza del aislador la cual fue el 12 de febrero del 2004 y la muestra se tomo el 06 de marzo del 2004

entre estas fechas existe una diferencia de 23 días, por lo tanto decimos que este es el valor de contaminación de un aislador para un promedio de 23 días.

Es de anotar que esta muestra se tomo en un disco completo del aislamiento como se muestra a continuación, y a partir de las especificaciones del aislamiento de soporte del transformador de potencial tenemos.

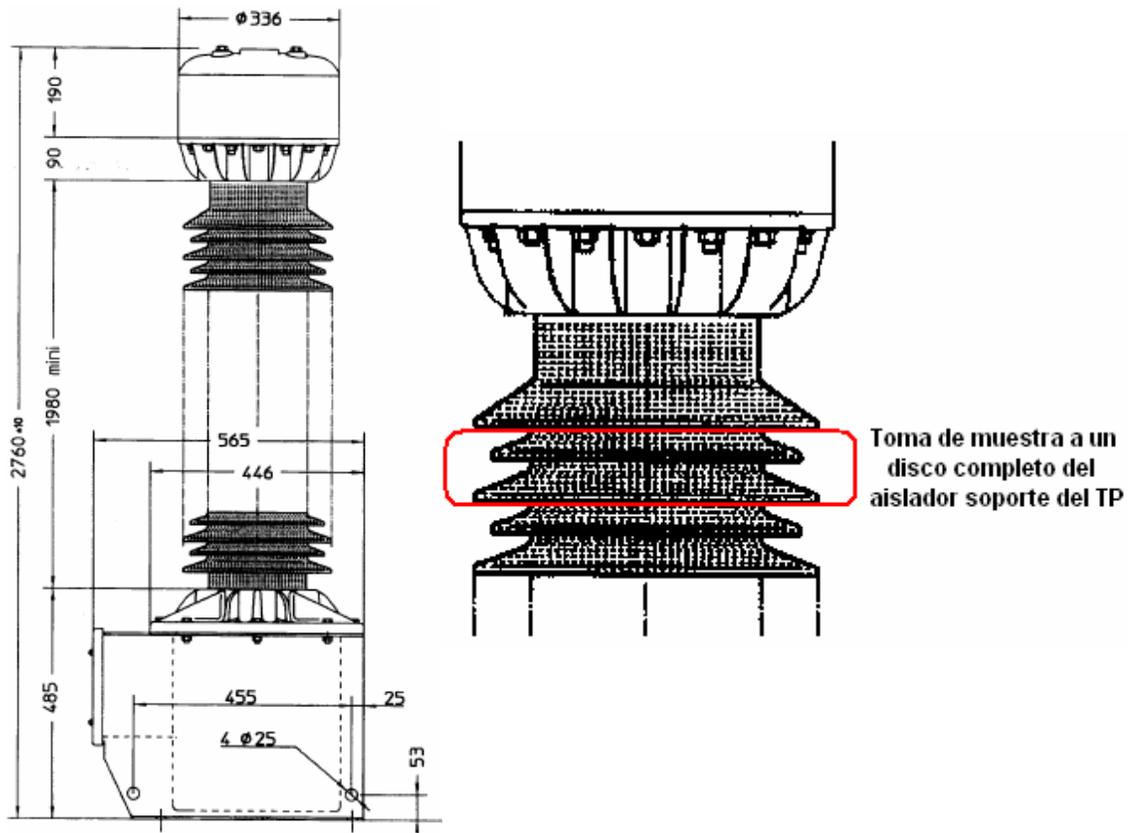


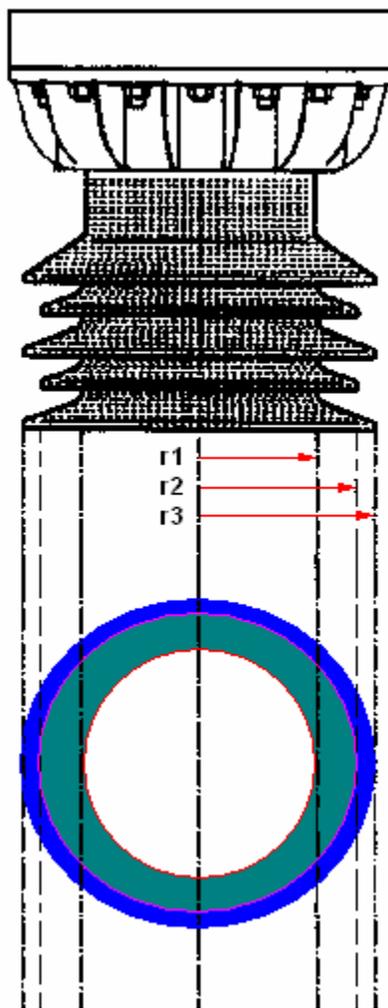
Figura 21. Toma de muestra en un disco.

Analizando la muestra tomada de contaminante del aislador se noto que está, corresponde a un disco del aislador de soporte del transformador de potencial que tiene un peso de 80 miligramos (contaminante) para un periodo de exposición de contaminación de 23 días sin que el aislador sea limpiado de alguna forma.

Con base a lo anterior se realizo un cálculo del área del disco teniendo como base una cantidad homogénea del contaminante distribuido en la superficie del disco en estudio y de todo el aislador.

Teniendo las especificaciones técnicas del fabricante del transformador de potencial realizamos los siguientes cálculos. (Ver anexo B catalogo de fabricante).

Área del disco.



Cálculos

$$r1 = 7.3cm$$

$$r2 = 11.3cm$$

$$r3 = 13.8cm$$

$$A1 = \pi((11.3)^2 - (7.3)^2)$$

$$A1 = 234cm^2$$

$$A2 = \pi((13.8)^2 - (7.3)^2)$$

$$A2 = 431cm^2$$

$$A_T = 665cm^2 = 0.0665mt^2$$

Área A1

Área A2

$$A1 = \pi(r2^2 - r1^2)$$

$$A2 = \pi(r3^2 - r1^2)$$

Figura 22. Cálculo de área de un disco.

Por lo anterior podemos decir que un disco de este modelo de aislador de soporte de un transformador de potencia tiene un contenido de contaminante de 80 miligramos para un área de 665 cm^2 . Por lo tanto para un el aislador completo que tiene 28.5 discos el contenido total de gramos en el aislador es el producto de aislador individual por el numero total de disco y esto es 2.28 gramos de contenido, para el área total del disco se calcula de forma similar 1.8952 m^2 .

De lo anterior vemos que para un aislador de soporte completo de un transformador de potencia tipo capacitivo se tiene un total de 2.28 gramos de contaminante en un área total de 1.8952 m^2 .

A continuación a preciamos la imagen de la muestra del contaminante.



**Figura 23. Muestra del contaminante subestación Cartagena TP
(Foto tomada por los autores).**

3.7 EL MANTENIMIENTO PREVENTIVO LA SOLUCIÓN A LA PÉRDIDA DE AISLAMIENTO EN LA SUBESTACIÓN CARTAGENA 220 Kv, DEBIDO A LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL.

Conocida la problemática que afecta la subestación Cartagena 220 Kv, se plantea a hora la necesidad de darle solución a este problema, ya que las consecuencias de niveles bajos en el aislamiento de los equipos y cadenas de aisladores es la producción de flameo de energía eléctrica, el cual puede producir daños a los equipos de potencia y como consecuencia poner en peligro vidas humanas y causar la suspensión de la energía eléctrica, conllevando a una irregular prestación del servicio, aunque en la subestación Cartagena 220 Kv, no se tienen registros estadísticos de falla internas por contaminación ambiental, si se avisto afectada por los efectos de la contaminación en otra subestaciones interconectadas con está, donde se presento la salida de servicio de una línea de transmisión de Termocandalaria a Cartagena.

3.7.1 Mantenimiento Preventivo

Definición: Son actividades ejecutadas para Prevenir y Detectar condiciones que lleven a la interrupción del servicio de energía, Averías y Deterioro acelerado del equipo, ejecutadas en un paro programado.

La insuficiencia o el exceso de Mantenimiento Preventivo aplicado a los equipos tendrá consecuencias negativas que afectaran tanto a la Disponibilidad de los mismos como a la Confiabilidad en la operación, por lo anterior es de vital importancia determinar la frecuencia optima de Mantenimiento a los equipos y evitar caer en un *sub-mantenimiento* o en un *sobre-mantenimiento* que en ambos casos reflejan altos costos y baja disponibilidad como se indica a continuación.

Sub-mantenimiento (bajo mantenimiento)

- Bajo costo de Mantenimiento Preventivo.

- Alto costo de Mantenimiento Correctivo.
- Pérdidas productivas por baja disponibilidad a causa de fallas en el equipo.
- Alto costo por consumo e inventario de refacciones.

Sobre-mantenimiento (exceso de mantenimiento)

- Alto costo de Mantenimiento Preventivo
- Bajo costo de Mantenimiento Correctivo
- Perdidas productivas por baja disponibilidad debido al exceso de paros programados de mantenimiento al equipo.
- Alto costo por consumo e inventario de refacciones.
- Formar los grupos de trabajo el cual estará constituido con personal de Mantenimiento.

Por lo tanto la solución a esta problemática es la planeación de un óptimo programa de mantenimiento preventivo, el cual deberá aplicarse según la cantidad de contaminante que se adhiere a los equipos y en que cantidad para tener una certeza de lavado en épocas de verano y se determinara según inspecciones nocturnas realizadas en esta. Para observar si se presenta flameo en la subestación, además de esto hay que tener en cuenta los tiempos promedios de días en los cuales la subestación se contamina.

Este problema de la contaminación de la subestación Cartagena 220 Kv ha existido por muchos años, pero también desde hace muchos años ha existido la solución no una solución económica viable pero una solución.

Esta solución es desenergizar la línea o la subestación y limpiar los aisladores a mano. Esto, obviamente, no es económico porque la empresa transportadora de energía eléctrica no produce ganancias si sus líneas están desenergizadas.

Pero hay que tener en cuenta que si desenergizamos las líneas de transmisión y los equipos, por donde llegara el suministro de energía eléctrica que nosotros consumimos y la industria, estas ultima serian seriamente afectadas por los cortes del servicio de energía. Por lo tanto hay que evaluar otra posible solución a esta problemática.

Por tal motivo se hace necesario el mantenimiento preventivo en caliente, el cual consiste en quitar el contaminante de la superficie de los aisladores, sin desenergizar la subestación o parte de esta, por medio de la técnica de lavado en caliente de aisladores.

A continuación se muestra una tabla comparativa de la efectividad del lavado en caliente.

Tabla 8. Efectividad del lavado.

EFFECTIVIDAD DEL LAVADO	
CONTAMINANTE	EFFECTIVIDAD
Industria Petrolera	80%
Agua Salina	85%
Industria Manufacturera	90%
Tierra	95%
Polvo	97%
Polvo de Cemento	0%

El lavado en caliente se puede hacer en un sistema energizado, es rápido, seguro y hasta cierto punto eficaz.

El lavado en seco también se puede hacer en un sistema energizado, es seguro y eficaz pero no tan rápido como el lavado con agua. Pero el sistema en seco tiene la ventaja que si quita varios contaminantes que el agua no puede, tales como: **polvo de cemento, calcio, carbono de magnesio y hollín**. También puede

limpiar la contaminación producida por la industria petrolera más eficazmente que el agua.

Analizando las ventajas y desventajas anteriores, los dos sistemas en lugar de competir entre sí, el uno es complemento del otro.

Un programa completo de mantenimiento preventivo debe incluir lo siguiente:

- Lavado de aisladores.
- lavado en seco de los aisladores no lavados con agua.
- Aplicación de silicón con el sistema energizado en los lugares de más alta contaminación.

La utilización del silicón es la aplicación de una capa especial de silicona al aislador la cual ayuda a que los arcos o flameos se retrasen. Este silicón generalmente se aplica después de haber limpiado el aislador.

3.8 REQUERIMIENTOS PARA LAVAR EN CALIENTE AISLADORES

Para asegurarse de que esta mezcla de agua y electricidad es segura, varias empresas eléctricas realizaron pruebas de lavar aisladores en líneas energizadas. Estas pruebas básicamente han buscado establecer los parámetros para lavar de un modo seguro; las variables que se deben tener en cuenta, tales como resistencias del agua, tamaño y diseño de la boquilla, presión del agua, distancia a la cual se puede lavar y procedimientos para lavar.

Las primeras pruebas documentadas fueron hechas en 1941 por "Pacific Gas and Electric de California". Estas pruebas solamente fueron de corriente de fuga. En 1947 esta misma empresa volvió a hacer pruebas pero esta vez buscaba mucho más. Quería establecer si el agua realmente lavaba eficazmente. Cuales eran las corrientes de fuga en diferentes tipos de chorro de agua; Quería probar diferentes

tipos y tamaños de boquillas, agua de diferentes resistencias, “nuevos” probadores de resistencia y comprobar si lavar en caliente era realmente más económico.

También agregaron un agente abrasivo (arena Monterrey triturada) para ver si esto mejoraba el efecto limpiador del agua. Sí mejoró el efecto limpiador pero sí el operario dejaba el chorro del agua demasiado tiempo en un mismo lugar, éste quitaba el vidriado del aislador. La arena Monterrey triturada también taponada la boquilla. El polvo de cemento y otros tipos de contaminantes industriales y petroleros sólo las quita el agua con un grado de efectividad bastante bajo.

Otra prueba consistía en tomar un aislador contaminado y elevar el voltaje hasta obtener un arqueo. Luego se lavaba el aislador y se repetía hasta el arqueo. De este modo se podía establecer la efectividad del lavado. Se observó que lavando los aisladores la mayoría volvieron a tener la misma capacidad de aislamiento que tenían antes de ser contaminados.

Se estableció que un miliamperio sería el máximo de corriente de fuga aceptable, así que usando diferentes boquillas, presiones y distancias llegaron a establecer una distancia mínima de acercamiento para lavar aisladores en líneas energizadas. También notaron como reaccionaba el chorro del agua a diferentes presiones, pudiendo establecer que después de 500 psi en la boquilla, cualquier aumento de presión ocasionaba un aumento muy pequeño en la corriente de fuga. De este modo establecieron que la “distancia” era uno de los factores más importantes para poder lavar aisladores en caliente.

Para estas pruebas, y hasta hace pocos años, las boquillas y demás equipos eran generalmente equipo para combatir incendios o para rociar árboles. Pero las boquillas no daban un resultado óptimo, así que se comenzaron a fabricar boquillas especiales para lavar aisladores. Una buena boquilla debe dar una buena distancia sin abrirse demasiado y tener baja corriente de fuga pero permitir

un buen impacto en el aislador. La apertura debe ser lo más pequeña posible, pero que permita lavar con un mínimo consumo de agua. A las pistolas de lavado modernas se las ha incorporado un “rectificador” del chorro.

Uno de los factores más importantes para poder lavar en caliente es la resistencia del agua, porque el agua con resistencia muy baja causaría un arco en el aislador. La siguiente tabla muestra la relación que existe entre temperatura y resistencia del agua:

Tabla 9. Resistividad del agua en función de la temperatura.

TEMPERATURA	RESISTENCIA
13° C	1000 ohmios Pulgada
20.5° C	900 ohmios Pulgada
23° C	820 ohmios Pulgada

Es importante tener esto presente porque al dejar el agua en el tanque durante varias horas y al rayo del sol, puede subir la temperatura de 13° C a 20° C y haría que esta agua ya no fuera utilizable para lavar en caliente. Es por esto que algún tipo de medidor de resistencia debe ser incorporado a todo proceso de lavado.

Para mostrar el efecto de un buen lavado, en una zona costera se lavaron una serie de aisladores y otros se dejaron sin lavar. Después de una neblina y llovizna, hubo 57 arcos con los poste incendiándose y 12 interrupciones de servicio en la sección sin lavar; en la sección lavada no hubo ningún problema.

Otra ventaja de tener aisladores limpios es una reducción en la pérdida de corriente debido a corrientes de fuga a lo largo de la cadena de aisladores.

Pruebas recientes han demostrado que las corrientes de fuga disminuyen bastante con un aumento de resistencia del agua. En años pasados la firma A.B. CHANCE realizó pruebas extensivas sobrecorrientes de fuga de diferentes tipos de chorros

de agua, diferentes voltajes y aguas con diferentes resistencias. Además de estas pruebas básicas, se realizaron por primera vez pruebas de impacto para obtener la combinación óptima de presión y boquilla, teniendo en cuenta el consumo del agua.

A continuación se muestran los resultados de las pruebas de impacto.

Tabla 10. Resistividad del agua en función de la temperatura.

PRUEBAS DE IMPACTO				
DISTANCIA	BOQUILLA	PRESION BOQUILLA	CONSUMO GAL/MIN	IMPACTO (PSI)
3.05 M	3/16	550	24.5	21
3.05 M	1/4	550	44	38
3.05 M	5/16	550	66	53
6.10 M	3/16	550	24.5	14
6.10 M	1/4	550	44	25
9.14 M	5/16	550	66	35
9.14 M	1/4	550	44	12

A continuación se presenta las corrientes de fuga para agua conductiva y agua destilada.

Agua conductiva 1.600 ohmios cm³

Tabla 11. Agua conductiva.

DISTANCIA	CORRIENTE DE FUGA (MICRO AMPERIOS)		
	80 Kv	180 Kv	250 Kv
1.52 M	41	130	---
2.13 M	19	85	112
3.05 M	3	15	25

Agua destilada 29,000 ohmios cm³

Tabla 12. Agua destilada.

DISTANCIA	CORRIENTE DE FUGA (MICRO AMPERIOS)		
	80 Kv	180 Kv	250 Kv
1.52 M	1.6	1.6	---
2.13 M	0.6	2.7	4.9
3.05 M	0.45	1.0	5.0

Después de un análisis detallado de todos los datos obtenidos en las pruebas anteriores, se deben tener en cuenta las siguientes recomendaciones para poder realizar el lavado de aisladores en la subestación Cartagena 220 Kv y en las líneas energizadas de está.

El agua debe tener una resistencia mínima de 1.000 ohmios por pulgada cúbica, 2540 ohmios por centímetro cúbico o 394 micro ohmios por centímetros.

Cabe recordar que la resistencia disminuye con el aumento temperatura del agua. Es por esto que consideramos que todo equipo para lavar aisladores debe estar dotado de un medidor de la resistencia del agua.

- Hay medidores transitorizados que pueden ser instalados en los equipos lavadores que dan una señal o apagan el motor de la bomba cuando se sobre pasan los limites de seguridad.
También hay probadores portátiles para medir la resistencia del agua antes de introducirla en el tanque.
Para protección de la bomba del agua, el equipo lavador debe tener, algún sistema para indicar el nivel del agua y así no operar la bomba sin agua lo cual la dañaría.
- La presión del agua en la boquilla no deberá ser menor de 500 Psi, la presión óptima es de 550 Psi.

- Solo una boquilla diseñada especialmente para lavar aisladores debe ser utilizada. El orificio de la boquilla podrá ser de 3/16” (0.48) o ¼ “ (0.63 cm) o 5/16 “ (0.78 cm) la pistola debe tener un rectificador de chorro.
- La distancia mínima de acercamiento para lavar un aislador Energizado es:

Tabla 13. Distancia mínima para lavado.

VOLTAJE EN KV	DISTANCIA MINIMA EN Mts
0-69	3
70-220	4
221-765	6

- Un procedimiento definido para lavar debe ser establecido para asegurar que la contaminación no vaya a caer a otro equipo que no haya sido lavado previamente. Para lograr esto, se debe tener en cuenta la localización de los aisladores y la dirección del viento. Debido a estos factores anteriormente enumerados, sugerimos que cualquier empresa que este considerando, este tipo de solución a su problema de contaminación, obtenga del fabricante de los equipos lavadores, un programa completo de entrenamiento para sus operarios, de este modo se asegurara que el fabricante tiene confianza y conocimiento de sus equipos.

3.9 CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DEL LAVADO

Para la selección del método de lavado hay que tener en cuenta el material del que están hechos los aisladores, de si el equipo a limpiar o la bahía está o no energizada y del tipo de contaminante que se debe eliminar de los equipos con el fin de alcanzar los resultados deseados de efectividad en el lavado con la menor inversión de capital, seguridad para los equipos, seguridad para el grupo de trabajo y recursos para realizar los trabajos de lavado.

A continuación se van a presentar unas ventajas y desventajas de los métodos con el propósito de llegar a concluir cual es el método más favorable para la Subestación en estudio y porque no decir las Subestaciones que se encuentran cerca de zonas costeras.

Ventajas del lavado a Alta presión

- Se puede realizar con los equipos energizados a cualquier tensión.
- Rapidez en su ejecución teniendo en cuenta los parámetros de seguridad.
- Mayor efectividad.
- No se desenergizan los circuitos para su ejecución.
- No penalización por salida de circuitos, ya que no hay que sacarlos.
- Disponibilidad de recursos lo que genera ingresos a la empresa.
- Acceso a torres muy altas gracias a la alta presión que se tiene del equipo.
- Con una boquilla manual y mano de obra calificada se puede obtener con este método altos grados de efectividad en el lavado.
- Se pueden tener las distancias de seguridad necesarias.

Desventajas del lavado a Alta presión

- No remueve los contaminantes químicos y del cemento.
- Riesgo de disparo y salida de circuitos aunque este reportado ante el Centro Nacional de Despacho como “posible riesgo de disparo”.
- Posible flameo a la hora del lavado.

Ventajas del lavado a Media presión

- Se puede realizar con los equipos energizados.
- Es efectivo.
- No se desenergizan los circuitos para su ejecución.
- Demandas reducidas de equipo
- Menos fatiga del trabajador que con el método de alta presión.

Desventajas del lavado a Media presión

- Se requiere mayor tiempo en el lavado incrementando la mano de obra del personal calificado.
- No remueve los contaminantes químicos, y del cemento.
- Se ve afectada por la brisa que es alta en la costa.

Ventajas del lavado a Baja presión

- Se puede realizar con los equipos energizados.
- Lavado a través de riego sobre los aisladores.
- No se desenergizan los circuitos para su ejecución.
- No remueve los contaminantes químicos, cemento y de defecación.
- Lavado frecuente para evitar la acumulación severa de contaminantes.
- Más utilizado en el lavado de bujes de transformadores por qué requiere sujeción fija.

Desventajas del lavado a Baja presión

- No recomendado, debido a que hay que lavar muy regularmente.
- Mayor tiempo de lavado y con más frecuencia incrementando los costos.
- Posibilidad de flameo en los aisladores.

Ventajas del lavado con helicóptero

- Rapidez en su ejecución.
- Se puede llegar a lugares de difícil acceso.
- Se puede realizar con los equipos energizados.
- No importa las distancias de seguridad eléctrica.
- No se desenergizan los circuitos.

Desventajas del lavado con helicóptero

- Valor de las horas del helicóptero muy altas.

- Mano de obra muy costosa.
- Recursos muy costosos para su ejecución.

Ventajas del Frotado con Paño

- Se puede realizar con los equipos energizados.
- Disminuye los riesgos de flameo.
- No se desenergizan los circuitos para su ejecución.
- Se pueden tener las distancias de seguridad.

Desventajas del Frotado con Paño

- No quita todos los contaminantes.
- Es un complemento del lavado a alta presión.
- Se requiere pértiga especial.
- Mucha destreza por parte del que maneja la pértiga.

Con base en las anteriores ventajas y desventajas de los métodos de lavado se puede concluir que el método más favorable es el que cumpla los siguientes requisitos, efectividad, obtención de los materiales para realizar cada lavado, el tiempo empleado en cada lavado, la mano de obra calificada menos costosa, ganancia para la empresa por tener disponibles sus activos, la inversión inicial más baja y que tenga menos costos de mantenimiento, distancias de seguridad, influencias climáticas del ambiente (viento), penalizaciones por parte de la CREG.

Teniendo en cuenta los anteriores criterios que son de mucha importancia en la consecución de un trabajo tan importante como es mantener el aislamiento de los equipos de potencia en buen estado sin poner en riesgo la confiabilidad, seguridad del sistema y del grupo de trabajo se puede decir que el *Método de Lavado en Caliente* es el apropiado para tal fin por que reúne las características anteriores, y algo que no habíamos mencionado anteriormente es que TRANSELCA S.A tiene

los facilidad para conseguir la materia prima más barata del mercado como es el agua desmineralizada con las características necesarias para tal propósito.

3.10. CONSIDERACIONES TÉCNICAS PARA EL LAVADO EN CALIENTE CON AGUA DE EQUIPOS ENERGIZADOS

3.10.1 Corriente de fuga

La corriente de fuga se define como la corriente que fluye a través de elementos normalmente no conductores, como por ejemplo las mangueras. Los valores seguros permisibles de la corriente para una persona promedio se suministran en la norma IEC 479-2 (no obstante, se considera seguro para un hombre promedio un valor entre 8 mA a 9 mA)

El valor de 1 mA es el umbral aproximado de corriente que una persona es capaz de detectar como sensación de hormigueo suave en sus manos o dedos debido al flujo de corriente. Cuando la boquilla está adecuadamente conectada a tierra, no debería fluir corriente de fuga apreciable a través del cuerpo de una persona, durante la operación de lavado. Sin embargo, uno debe anticipar la posibilidad de que la conexión a tierra de la boquilla se pueda desconectar o abrir accidentalmente. Por esta razón, la corriente de fuga en el flujo de lavado se debe limitar a 2 mA.

Si es posible, durante el lavado, las manos y los pies del lavador deberían estar al mismo potencial eléctrico. Cuando se realiza el lavado desde una torre, esto se logra a través de la estructura.

En las subestaciones, los lavadores con boquillas manuales deben usar botas de goma, ropa impermeable y guantes de goma para evitar mojarse. Además, la manguera húmeda esta en contacto directo con el suelo. El lavador tiene ambas manos en la boquilla mientras el flujo hace contacto con el equipo energizado.

Bajo estas circunstancias, no debería ser difícil limitar la corriente de fuga, ajustando la distancia de lavado, la presión, el orificio y la resistividad del agua.

Los parámetros que influyen en la corriente de fuga en el flujo de agua del lavado son la distancia entre el conductor y la boquilla, la resistividad del agua, la presión del agua y el diámetro del orificio de la boquilla (véase la Tabla 14).

Tabla 14. Parámetros para el lavado de equipo energizado.

Tensión de la línea	Distancia mínima entre la boquilla y el conductor		Resistividad mínima del agua		Presión mínima de la boquilla		Diámetro máximo del orificio	
	(Kv)	M	pies	Ω cm	Ω Pulgada	kPa	psi	mm
13	1.82	6	1300	512	2758	400	4.76	0.1875
13	2.74	9	1300	512	2758	400	6.35	0.25
16	2.13	7	1300	512	2758	400	4.76	0.1875
34.5	2.44	8	1300	512	2758	400	6.35	0.25
34.5	2.44	8	1300	512	2758	400	4.76	0.1875
69	2.74	9	1300	512	2758	400	4.76	0.1875
69	3.66	12	1300	512	2758	400	6.35	0.25
115	3.05	10	1300	512	2758	400	4.76	0.1875
115	3.96	13	1300	512	2758	400	6.35	0.25
230	3.66	12	1300	512	2758	400	4.76	0.1875
230	4.57	15	1300	512	2758	400	6.35	0.25
500	4.27	14 ¹	50000	19685	5516	800	4.76	0.25
500	6.10	20	3000	1181	3792	550	6.35	0.3125
400 dc	6.10	20 ¹	50000	19685	5516	800	6.35	0.25

¹ La distancia esta limitada por las dimensiones y configuración de la torre. Debido a la distancia imitada entre la boquilla y el conductor, se puede usar agua desmineralizada con resistividad de 50000 Ω cm (19 685 Ω pulgadas) o superior.

3.10.2 Distancia de trabajo

La distancia entre el conductor y la boquilla es el parámetro más importante que influye en la corriente de fuga y en la efectividad del lavado del flujo de agua. La efectividad del lavado y la magnitud de la corriente de fuga disminuyen con el aumento de la distancia entre el conductor y la boquilla. En los casos en que la distancia de lavado esta limitada por las dimensiones de la torre, se puede usar agua desmineralizada.

3.10.3 Resistividad del agua

La resistividad del agua es otro parámetro importante que influye en la corriente de fuga del flujo de agua. Un valor bajo puede hacer que se produzca flameo del aislador o lesión durante el lavado.

3.10.4 Generalidades

La unidad de resistividad es el ohmio centímetro o el ohmio pulgada y es igual a la resistencia entre superficies opuestas de un cubo de agua de un centímetro o una pulgada de lado.

$$R = \rho L / A$$

en donde

R es la resistencia del agua, W.

L es la separación de los electrodos.

A es el área de sección transversal del agua

ρ es la resistividad, una constante que es característica del agua sometida a ensayo.

El agua con resistividad superior a 1500 Ω cm (491 Ω pulgada) se usa comúnmente. También se usa agua desmineralizada con resistividad de 50000 Ω cm (19685 Ω pulgadas) o superior y se obtiene de plantas de generación o de un equipo móvil de desmineralización. La resistividad del agua varía inversamente con la temperatura, es decir, a medida que aumenta la temperatura del agua, disminuye la resistividad.

Debido a que la resistividad del agua cambia con la temperatura, es necesario medir periódicamente la resistividad, especialmente en clima caliente.

3.10.5 Medición

Se requiere un instrumento para medir la resistividad del agua porque es muy importante que el personal que realiza el lavado conozca la resistencia del agua

antes de usarla para limpiar aisladores energizados (para asegurar que la resistividad es suficientemente alta).

Medidores de resistividad

Los medidores comerciales de resistividad están disponibles en modelos portátiles, que se usan para el ensayo de cada tanque de agua después del llenado (antes del lavado en caliente), a menos que la máquina de lavado esté equipada con sistema de monitoreo constante. Un sistema de monitoreo constante de la resistividad suministra medición continua de la resistividad del agua mientras funciona el lavado. Consiste de una sonda a distancia con un conductor detector desde el fondo de la salida del tanque y brinda medición y control del lavado. Mientras la unidad está funcionando, se realiza una medición continua de la resistividad del agua, advirtiéndolo al operador y deteniendo completamente la unidad, si se alcanza el nivel mínimo de resistividad preestablecido.

Portátil manual: medidor manual y portátil de la resistividad, se puede usar para ensayar las calidades de la resistividad de fuentes de agua antes de llenar el tanque de lavado. De igual modo, las prácticas de lavado deberían exigir el ensayo de cada tanque de agua después del llenado y antes del lavado en vivo, a menos que la máquina de lavado esté equipada con un sistema de monitoreo constante.

Un probador típico tiene un pozo de muestra autocontenido, una caja irrompible amortiguada, con una batería de 9 V y un circuito de calibración y ensayo de la batería. El medidor tiene una pantalla en donde aparece, ya sea ohmios por centímetro cúbico u ohmios por pulgada cúbica, con límites mínimos resaltados en rojo y con una precisión de $\pm 2\%$ de la escala total.

3.10.6 Presión del agua

La presión del agua se relaciona con la distancia de trabajo y se puede ajustar de acuerdo a ello, es decir, se puede usar una presión inferior con el aumento en la distancia (siempre se deben mantener las distancias de trabajo de seguridad). El efecto de la limpieza se relaciona directamente con la fuerza del agua o el impacto del agua sobre el aislador.

3.10.7 Orificio de la boquilla

El tamaño y diseño del orificio de la boquilla afectan la compensación (tamaño y desempeño) del flujo de agua. El orificio de la boquilla es el que con más precisión se relaciona con la presión del agua, pero se interrelaciona con los otros tres parámetros.

3.10.8 Especificaciones típicas

Para las presiones de boquilla de una instalación seleccionada, véase la siguiente figura.

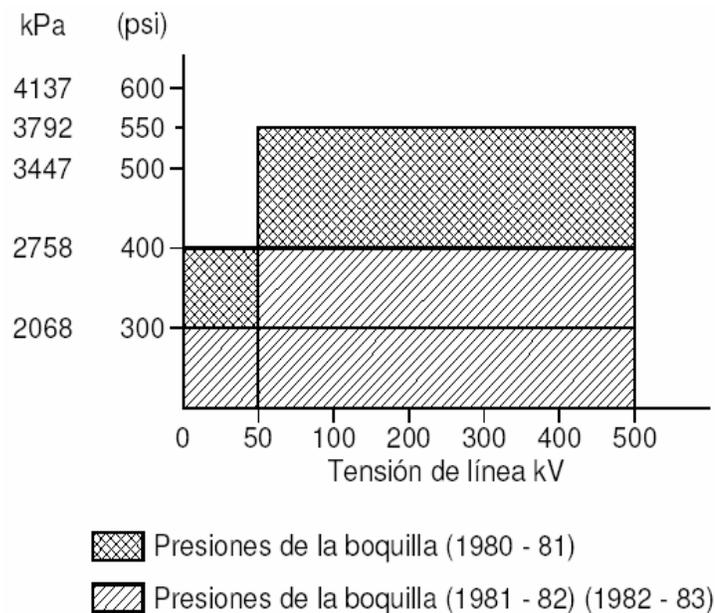


Figura 24. Presiones de la boquilla en una instalación seleccionada.

Para las distancias de lavado para la boquilla de 5,95 mm, véase la Tabla 15.

Tabla 15. Distancia de lavado para una boquilla de 5,95 mm (0,234375 pulgadas).

Tensión de la línea	M	Pies
4 Kv	2.13	7
13 Kv	3.05	10
24 Kv	3.66	12
71-115 Kv	4.57	15
230 Kv	4.57	15
500 Kv	6.10	20

4. LIMPIEZA DE AISLADORES

Este capítulo presenta información acerca del equipo necesario y de los métodos que se pueden usar en la limpieza de aisladores contaminados. Donde se muestra la experiencia exitosa de muchas empresas que han limpiado con seguridad los aisladores contaminados. El capítulo tiene como propósito mostrar el estado del arte en cuanto a la limpieza de aisladores y servir de fuente de referencia para las personas o empresas que buscan información acerca de los procedimientos de limpieza de aisladores de manera que ellos puedan considerar la experiencia de otros en la modificación o formulación de programas y prácticas en la limpieza de los aisladores.

En este documento se describen varios enfoques para la limpieza de los aisladores en los sistemas de potencia. Para determinar cuándo usar y cuándo no usar la información en esta monografía, así como la manera de usarla, se deben considerar todos los factores relacionados con las situaciones específicas del caso.

En este documento el término "aislador(es)" se usa en sentido general para describir aisladores (Cadena de aisladores) y también los componentes aislantes externos de otros equipos (por ejemplo, interruptores de potencia, bujes de transformadores y descargadores de sobretensión, etc.).

4.1 MÉTODOS DE LAVADO

El método usado para la limpieza de los aisladores depende del material, de su fabricación, de si el equipo a limpiar o la bahía esta o no energizada y del tipo de contaminante que se debe eliminar de los equipos.

4.1.1 Equipos Energizados

4.1.1.1 Agua a alta presión

El lavado con agua a alta presión utiliza un flujo estrecho de agua con presiones típicas entre 2 750 kPa y 6 900 kPa ((400 a 1 000) psi (libras por pulgada cuadrada)) en la boquilla. Las boquillas más comúnmente utilizadas con el agua a alta presión son de cuatro tipos: ***sujeción manual, sujeción a control remoto (pistola), sujeción fija y montada en helicóptero.***



Figura 25. Lavado de Aislador a alta presión (Foto tomada por los autores).

4.1.1.1.2 Boquilla manual a chorro

Es el tipo más común de boquilla usada para el lavado con alta presión. El trabajador de subestaciones o línea sube a la torre o usa elevadores para levantar la manguera y la boquilla hasta la posición de lavado. El trabajador de línea puede conectar una manguera desacoplable y una boquilla, a una toma de agua permanentemente instalada en la torre.

Los aisladores de la subestación también pueden ser lavados por trabajadores calificados, con boquilla manual, permaneciendo en el suelo o en una canasta aérea.



Figura 26. Lavador de Aisladores de alta presión (Foto tomada por los autores).

4.1.1.1.3 Boquilla con chorro a control remoto

Este sistema consiste en una boquilla montada en una pluma y esta a su vez sobre un camión.

Tanto la boquilla como la pluma se controlan desde una consola conectada a la torre de la pluma. Este sistema permite ubicar el flujo de agua cuando es difícil realizar el lavado desde una torre o estructura de la estación (como es el caso de las cadenas de aisladores en V de fase externa en líneas de alta tensión).

4.1.1.1.4 Boquilla de aspersión fija

Se usan dos sistemas básicos de lavado:

- a) Lavado con aspersión en condiciones de viento en calma
- b) Lavado con pantalla de agua en condiciones de viento fuerte.

Para el lavado con aspersión, el equipo eléctrico se divide en grupos y las boquillas se fijan firmemente en la tubería ubicada alrededor de los aisladores del equipo. El aparato se lava en secuencia desde un grupo a otro, según un orden de lavado. La Tabla 16 proporciona información general acerca de este sistema.

Para el lavado con pantalla de agua, las boquillas se instalan únicamente en la parte del equipo de donde viene el viento. El agua del lavado se descarga hacia arriba y es llevada hacia los aisladores por el viento fuerte.

Tabla 16. Uso y equipo de lavado con boquilla fija.

Tipo de boquilla	Aspersión
Número de boquillas	Múltiple
Presión del agua	350 kPa a 3 000 kPa (50 psi a 430 psi).
Instalación de la boquilla	Instalada permanentemente sobre la estructura de acero.
Control del lavado	Fijo.
Cubrimiento del lavado.	El agua envuelve e inunda el aislador en una oleada
Funcionamiento	Elimina tanto el ascenso como los requisitos de destreza especiales para el lavado
Aplicación	Adecuado en áreas donde el lavado es frecuente (al menos una vez al mes) y en donde la torre o las estructuras de la estación son muy altas.
Otras características	Para cada ensamble de aislador se requiere tubería hasta la boquilla. Usualmente, el uso del agua se controla automáticamente.
Desventaja	Se ve afectada por el viento.

4.1.1.1.5 Boquilla montada en un helicóptero

Este método de lavado implica el uso de un sistema de lavado auto contenido de alta presión portado por un helicóptero. El sistema es controlado por el operador de lavado o por el piloto. El helicóptero se mantiene suspendido sobre el lugar con la boquilla ubicada para dirigir el flujo de agua.

4.1.1.2 Agua a presión media

El concepto de lavado con presión media ha probado ser efectivo. Este sistema involucra muchos de los procedimientos usados para boquilla manual y de control remoto.

Manteniendo la efectividad del lavado, las ventajas son las demandas reducidas de equipo, menos fatiga del trabajador que con el método de alta presión y un incremento en la producción. La disminución de la corriente de fuga en todo el flujo de agua fue evidente a medida que se ensayó el método. Las presiones usadas en este método están entre 2 070 kPa y 2 760 kPa (300 psi a 400 psi).

4.1.1.3 Agua a baja presión (lavado por riego)

En algunas circunstancias, como es el caso de la limpieza de los bujes de los transformadores de potencia, se puede usar un sistema de boquilla fija. La boquilla esparce el agua en un patrón predirigido hacia el buje, de modo que rodee el buje completo. Se usa el lavado frecuente para evitar la acumulación severa de contaminantes.

Algunas torres de transmisión también usan tubería para dirigir un flujo de agua para regar los aisladores de suspensión. Generalmente, la tubería desciende desde la torre hasta el suelo en donde una unidad de bombeo y un tanque están conectados. La frecuencia de dicho lavado se asigna según el grado de contaminación existente. La presión de la bomba a nivel del suelo usualmente es de 1 380 kPa (200 psi) con una salida en la bomba de 2,524 l/s (40 gal/m) para la boquilla. El tamaño de la boquilla, el tamaño de la tubería y la altura de la torre se deberían considerar en la selección de la presión y capacidad de la bomba.

4.1.1.4 Boquilla de aspersion fija para agua a presión baja

El lavado a presión baja emplea un sistema de boquilla de aspersion fija que funciona a baja presión, usualmente entre 350 kPa y 1 030 kPa (50 psi a 150 psi). Estos sistemas se usan principalmente en áreas en donde se requiere lavado

frecuente. Debido a la presión baja y al sistema de boquilla de aspersión, se disminuye la efectividad para eliminar contaminantes diferentes a la sal marina. Por lo tanto, la mayoría de instalaciones de boquilla de aspersión fija se usan en áreas en o cerca de la costa, principalmente para eliminar la contaminación con sal marina. Este método se puede usar para contaminantes que se encuentran en tierra. Véase la Tabla 17.

Tabla 17. Datos para el diseño del equipo para el lavado con aspersión a presión baja.

Datos del diseño	Sistema de aspersión automática	
	275 KV	400 KV
Resistividad mínima permisible del agua (Ωcm)	10 000 Ωcm (3 937 $\Omega\text{pulgada}$)	20 000 Ωcm 7 874 $\Omega\text{pulgada}$)
Presión del agua en la boquilla	700 kPa (100 psi)	1 000 kPa (150 psi)
Tipo de boquilla	Aspersión	Aspersión
Distancia mínima desde la boquilla hasta el conductor vivo	3,1 m (122 pulgadas)	4,3 m (170 pulgadas)
Cantidad de boquillas por aislador	CB y CT: 6; otras: 4	CB: 8; otras: 6
Cantidad de agua	CB y CT: 4,7 l/s (1,24 gal/s). Otras: 3,5 l/s (0,92 gal/s)	CB: 7,4 l/s (1,96 gal/s) CT: 6,2 l/s (1,64 gal/s) Otras: 5,5 l/s (1,45 gal/s)
Duración del lavado (depende del tipo de aislador)	25 s	25 s
CB: cortacircuito (Interruptor) CT: transformador de corriente		

4.1.1.5 Frotación con paño (limpieza en equipos energizados)

Se usa un procedimiento que emplea pértigas y una lona especial para limpiar en caliente los aisladores usados en equipos que funcionan en tensiones entre 4 y 69 Kv.

La necesidad de la limpieza en caliente depende del grado de contaminación y del riesgo de flameo durante el lavado. Este procedimiento también se puede usar antes del lavado en caliente (vivo) para reducir la posibilidad de flameo.

El trabajador de línea que realiza la limpieza en caliente puede hacer esta labor desde una escalera o en el piso, en un camión de canasta o desde la torre de acero.

La técnica requiere una pértiga que se engancha en un ojal de la lona, la cual se coloca alrededor del aislador o buje, y se engancha en un segundo ojal en la lona con el gancho de una segunda pértiga.

Cuando esto se logra, la porcelana se puede limpiar con un movimiento de sierra. Las pértigas con la lona se deben mantener lo suficientemente ajustadas de manera que los ojales no se aflojen de la lona. Generalmente, la limpieza empieza en la parte adyacente al conductor energizado y termina en la torre.

La pértiga usada para este propósito debe tener aproximadamente 19 mm (0,75 pulgadas) de diámetro y 3 050 mm (10 pies) de longitud. El aro terminal se une a la pértiga con tornillo y tuerca.

Una empresa que usa este método recomienda lo siguiente:

- a) El material de la lona debe tener un peso de 540 g/m² (10 onzas/yarda²).
- b) Las lonas de limpieza se deberían cortar con 460 mm (18 pulgadas) de ancho y 610 mm (24 pulgadas) de longitud para 46 Kv, y con 760 mm (30 pulgadas) de ancho por 910 mm (36 pulgadas) de longitud para 69 Kv, para aisladores de campana y perno y de apoyo. Se debería hacer un dobladillo en ambos extremos cortos. Luego, se doblan pliegues de 25 mm (1 pulgada). Un alambre de hierro de 3,8 mm de diámetro (# 9), con longitud de 305 mm (12 pulgadas), se pasa a través del dobladillo plisado de manera que se forman el gancho y el aro necesarios. Véanse las Figuras 27 y 28.

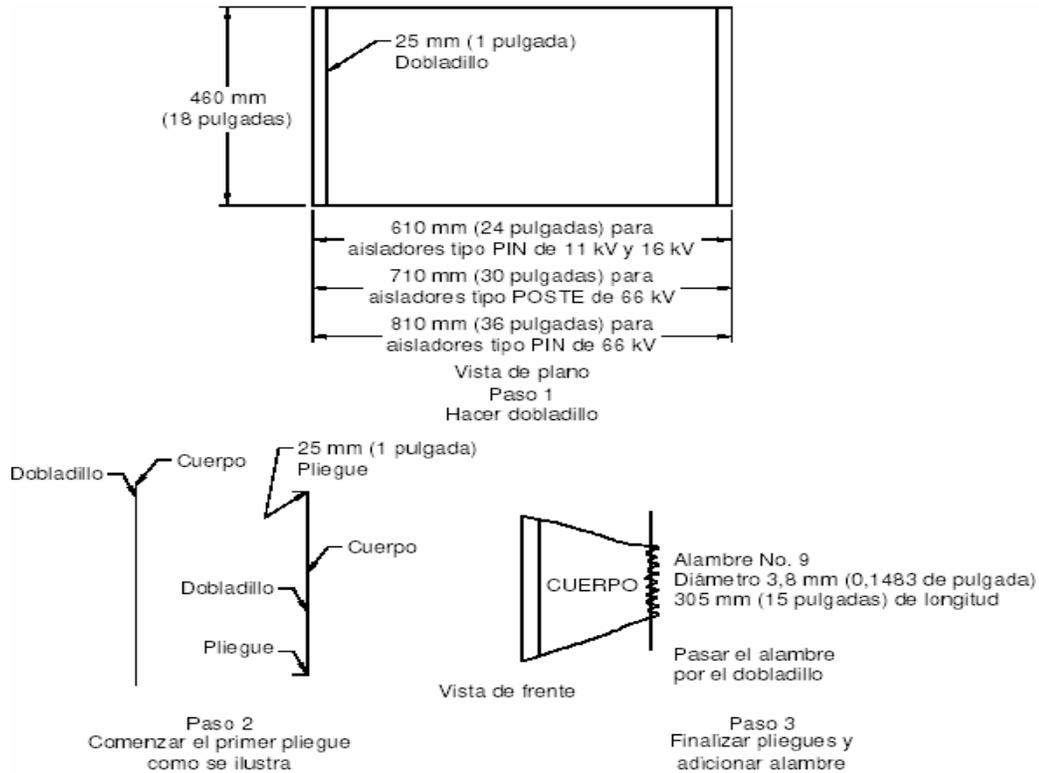


Figura 27. Material para el frotamiento en vivo.

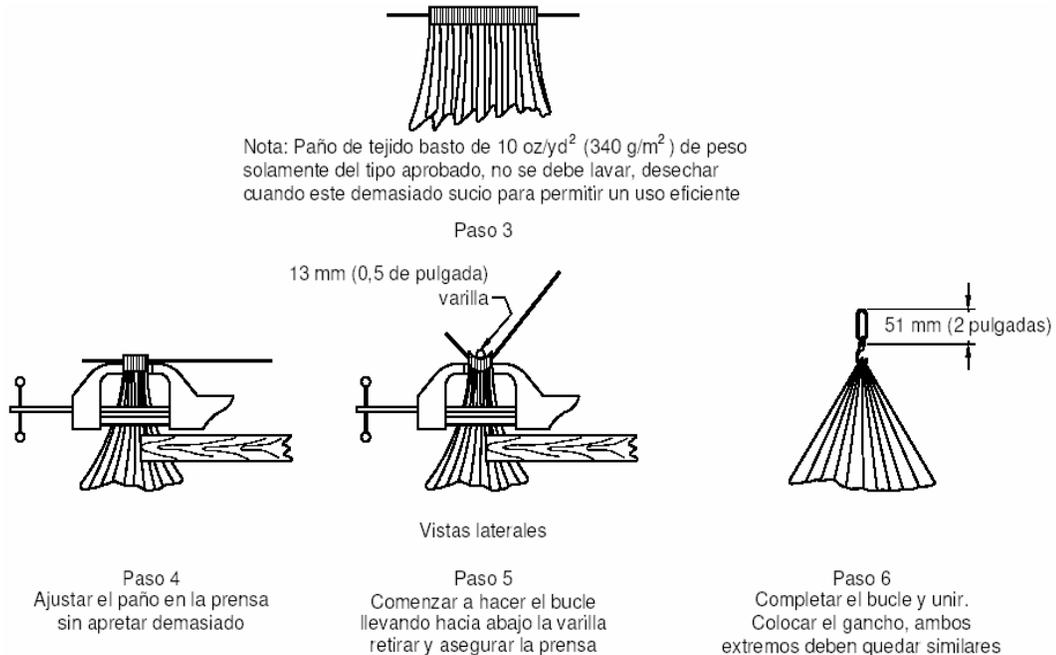


Figura 28. Ensamble de material para el frotamiento en vivo.

4.1.2 Equipos no energizados

Todos los métodos discutidos en el numeral 4.1.1 también se pueden utilizar en adición a los métodos de limpieza manual y de agua a baja presión que se discuten posteriormente, si la instalación no esta energizada.

4.1.2.1 Limpieza manual

La limpieza de los aisladores con frotación manual con un paño es completa y efectiva pero, es un proceso tedioso, que consume mucho tiempo, costoso y que requiere interrupciones del equipo. Generalmente, sólo se realiza la frotación manual cuando el lavado no es práctico por problemas del acceso de los vehículos pesados, altura o diseño de las estructuras o por el tipo de contaminación. La frotación manual normalmente se usa en los aisladores de la estación en donde el lavado con presión alta tampoco es práctico debido a la proximidad de equipo energizado, o no es efectivo debido a la dureza de los depósitos en la superficie. El trabajador de línea porta un dispositivo de conexión a tierra personal, Paños necesarios, lana de acero, cinturones de seguridad corporales y una línea de vida de seguridad, si se requiere.



Figura 29. Equipo de limpieza manual.

4.1.2.2 Almohadillas de lana de acero y/o nylon no abrasivo

Estas almohadillas se usan cuando los Paños o las toallas de papel no son efectivos. Se debe tener precaución de eliminar todas las partículas de metal que deje la lana de acero.

4.1.2.3 Solventes

Se pueden usar solventes para ayudar en la limpieza. Se debe tener cuidado con los agentes fuertes de limpieza debido a los vapores o los residuos. Después de la limpieza, se recomienda enjuagar el aislador con agua limpia para eliminar los residuos.

4.2 EQUIPOS PARA LA LIMPIEZA DE AISLADORES

4.2.1 Equipo para limpieza con agua a alta presión

4.2.1.1 Bomba

La bomba debe ser de tipo centrífugo o de desplazamiento positivo.

a) Centrífuga: esta bomba usa uno o una serie de impulsores rotatorios, en una a cuatro etapas y se usa comúnmente en aplicaciones contra incendios. El agua se extrae de un tanque mediante succión en la primera etapa, luego, la presión se combina en todas las etapas restantes. Es mejor una succión de riego, sin embargo, una vez se ha cargado la bomba, se puede sacar un dispositivo de control de flujo o un cabezal negativo, desde varios pies por debajo de la bomba.

Se atornilla directamente un conjunto de engranajes al volante de la unidad de potencia de diesel o gasolina, o se puede conducir desde la toma de potencia de un camión.

b) Desplazamiento positivo: se usan uno o más pistones para producir la presión alta. Esta bomba se puede hacer funcionar mediante poleas y

bandas en V procedentes de la toma de potencia impulsada con motor, que pueda absorber la carga de la banda; o con una toma de potencia accionada por el chasis, con poleas de diferentes tamaños para hacer coincidir las revoluciones por minuto del motor con las del cigüeñal de la bomba, necesarias para producir presión y flujo apropiados. En un sistema como este, se utiliza el cárter del cigüeñal lleno de aceite. Usualmente, se requiere un amortiguador de succión o, un amortiguador de choques junto con un amortiguador de salida y un acumulador de presión.

4.2.1.2 Fuente de potencia

a) Los motores de los camiones (motores separados, ya sea de gasolina o de diesel) hacen funcionar las bombas. La curva del torque vs rpm del motor debe satisfacer la demanda del sistema de bombeo. Los motores a gasolina funcionan con mayor rpm que los de diesel; los motores de cuatro o seis cilindros desarrollarán un torque máximo a rpm inferior a V8. Se deben considerar estos factores cuando se acople el motor a la bomba. Se pueden usar variaciones en el tamaño de las poleas impulsadas con banda o de los conjuntos de engranaje para lograr un acople apropiado Óptimo entre el motor y la bomba. La ventaja principal de usar la potencia del motor separado es no tener que activar el motor de movimiento del vehículo (con frecuencia grande y costoso) para obtener potencia intermitente para la bomba. La desventaja es que el peso agregado puede limitar la capacidad de porte de agua del vehículo, así como añadir complejidad al sistema.

b) Las bombas con toma de potencia (desde el chasis del camión) con diseño centrífugo o de pistón, que producen la presión (kPa) y tienen la capacidad (l/s) requeridas para soportar el lavado de alta cabeza de presión y para dos eyectores simultáneos, en las subestaciones, requerirán 50 Kw a 67 Kw (68 bhp a 90 bhp). La toma de potencia del chasis del camión debe tener la capacidad para generar esta potencia. Para esa potencia se

requiere una toma de potencia impulsada desde un acople tipo SAE de ocho agujeros proveniente de una abertura en la transmisión principal (de tipo de relevo manual) o desde una transmisión automática con seguro de convertidor. El torque y la salida de potencia del motor del camión deben adaptarse a las rpm de la bomba y al requisito de potencia en toda la relación de la toma de potencia. La variación en la velocidad desde 60 % hasta 115 % en el motor, usualmente esta disponible para la selección del conjunto de engranajes. Observe que la mayoría de los motores de camión de gasolina medianos a grandes, se controlan en las revoluciones máximas por minuto. Este hecho, junto con el mejor valor de revoluciones por minuto para el torque máximo del motor, se debería considerar en todos los chasis con tracción en todas las ruedas. Usualmente, esta disponible un torque completo (el mismo de la salida en el cigüeñal del motor) desde la caja de transferencia de la dirección de todas las ruedas. Cuando se utiliza esta toma de potencia, debe ser del tipo aceitado total, el cual garantiza lubricación en condiciones de carga y velocidad sostenidas.



Figura 30. Fuente de potencia mas bomba de alta presión.

4.2.1.3 Tanque

Tipo de material

Para transportar el agua para el lavado se usan tres materiales básicos: fibra de vidrio, acero dulce recubierto o acero inoxidable. Para cualquiera de estos tipos de tanque, se debe suministrar una base de soporte firme y rígido, como el bastidor de un camión o de un remolque o, una plataforma de aluminio y acero. En los tanques con mayor capacidad, en donde se presenta la oscilación y la flexión, se deben usar montajes con sistemas de amortiguación o, de lo contrario, se puede producir deterioro. El chasis del camión o del remolque se puede flexionar mientras transporta la carga, por lo tanto, el tanque y su base o plataforma se deben mover a medida que se presenta la oscilación o torsión del bastidor. Es esencial una base o plataforma sólida para el tanque. El montaje deberá compensar el movimiento del chasis.

Los tanques de fibra de vidrio o plástico pueden tener capacidad limitada. Los tanques de 1,9 m³ (500 gal) o menos, son los más populares. Si se requiere mayor capacidad, se deben considerar los tanques de acero.

Los tanques de acero dulce se pueden recubrir en su interior e imprimir y pintar en su exterior para evitar la oxidación. Antes de recubrir el interior, es esencial que se realice aplicación de arena a chorro con presión y luego se lave completamente. Se debe eliminar toda la cubierta de fundente de la soldadura.

Es esencial la limpieza de todas las uniones y soldaduras, el conjunto de partes soldadas en el relleno del domo y las copas de entrada y salida. Se recomienda que después, personal calificado aplique un recubrimiento epóxico o material similar. El recubrimiento debe ser adecuado para la inmersión en agua.

La altura, la longitud y el ancho del tanque determinarán la selección del material, espesor del metal, tipo de tapa, número y ubicación de los deflectores. En los tanques de acero dulce de 1,9 m³ a 4,5 m³ (500 galones a 1 200 galones), es adecuado una tapa con calibre 10 (3,4 mm ò 0,1345 pulgadas) con envoltura calibre 10 (3,4 mm o 0,1345 pulgadas), con una base apropiada. Si se usa acero inoxidable con capacidad de 1,9 m³ a 9,5 m³ (500 galones a 2 500 galones), es adecuado un calibre total 12 (2,7 mm ò 0,1046 pulgadas) o, tapas calibre 12 (2,7 mm ó 0,1046 pulgadas) con envoltura calibre 10 (3,4 mm ó 0,1345 pulgadas).

Se reitera que los deflectores y la base son consideraciones importantes en la selección del grosor requerido para el metal.

Capacidad

Para el lavado de aisladores se han usado tanques de 0,9 m³, 1,9 m³ y 9,5 m³ (50 galones, 500 galones y 2 500 galones). Los helicópteros y los camiones de diez ruedas para servicio fuera de carretera proporcionan la potencia motriz. La fuente de agua, el grado de lavado que se va a realizar, la disponibilidad de vehículos de suministro y el tipo de terreno de servidumbre, son factores que afectan el tamaño del tanque y del vehículo portador. Para el lavado con helicóptero, con tanques pequeños a bordo, el vehículo de suministro de agua usualmente se ubica en la zona de aterrizaje o en la base auxiliar.

Método de llenado

Cuando se usa la descarga aérea para el suministro de agua, debe estar disponible un domo con abertura superior. Debe tener un diseño venteado. Se recomienda utilizar una pantalla de relleno de acero inoxidable para filtrar todo material extraño. Es necesario un acceso desde el piso hasta el domo. El domo se debe ajustar firmemente antes de ascender para evitar el oleaje y la pérdida de agua.

Cuando se usa llenado con hidraté o a presión desde el suelo, el sistema de llaves y válvulas usualmente se acoplan en la parte posterior o en el lado derecho del vehículo. Algunos sistemas de bombeo para lavado permiten el uso de la bomba del agua con cambios en la selección de la válvula para extraer un volumen alto de agua a presión baja desde un hidrante o un portador hasta el tanque. Es esencial un indicador del nivel del agua, un calibrador de mira o un indicador electrónico. Los sistemas modernos pueden estar conectados electrónicamente a indicadores del bajo nivel del agua y a sistemas de detención y regulación del motor.

Se pueden requerir restricciones de flujo inverso en los tanques portátiles para cumplir los códigos locales.

Diseño

La capacidad, las dimensiones del vehículo y el terreno que se va a atravesar, son parámetros de diseño importantes. Un centro de gravedad bajo y una deflexión apropiada son muy importantes. Los fabricantes de tanques ofrecen una cantidad limitada de tapas estándar y configuraciones intermedias del deflector del tanque.

Tanques redondos, elípticos y semielípticos son muy populares, así como los planos, cuadrados o rectangulares. La resistencia, el peso y la apariencia son consideraciones en el diseño básico del tanque. El transporte de líquidos por carretera no experimenta el mismo movimiento de agua que se produce durante el lavado de aisladores fuera de carretera. El fabricante del tanque debe estar consciente del uso previsto. Cuando se fabrica el tanque se deben proveer aberturas de tamaño adecuado para la succión, retorno de purga a presión, calibrador de mira, medidor de nivel y medidor de resistividad. Se puede suministrar un rectificador de vértice en la copa de la salida de succión para mejorar la eficiencia.



Figura 31. Tanque de lavado con capacidad de 3000 Lts.

4.2.1.4 Tubería

Es importante una tubería eficiente. La restricción del agua entre la bomba y la punta de la boquilla afectan la eficiencia de todo el sistema de lavado. El sistema de succión, la tubería y la manguera deben ser lo suficientemente grandes para suministrar capacidad de flujo excedente a la bomba de alta presión cuando funciona a presión y flujo máximos.

4.2.1.5 Manguera

Tipo

Las normas para la limpieza del aislador en las instalaciones varían dependiendo del tipo de lavado y de la estructura que se va a limpiar. Se utilizan mangueras tanto conductoras como no conductoras. Las mangueras para incendios de material no conductor y las reforzadas con nylon poliplástico se usan cuando se utilizan prácticas no conductoras. Cuando las prácticas requieren mangueras conductoras, se usan mangueras recubiertas de goma, con trenza de alambre y acoplamientos grapados.

Tamaño

Se usan mangueras con *diámetro interno* desde 15,8 mm hasta 25,4 mm (0,625 pulgadas a 1,0 pulgadas). Entre mayor sea el *diámetro interno*, menor la pérdida de presión. La manguera de mayor tamaño es más pesada, más costosa, requiere carretes más grandes, mayor radio de doblamiento, etc., pero es mucho más eficiente. En el extremo de la salida se puede unir un trozo corto de manguera con *diámetro interno* menor. Un puente conectivo de 2,43 m a 3,05 m (8 pies a 10 pies) producirá una caída no medible de la presión y el operador tendrá mayor flexibilidad.

Carrete

Se pueden utilizar carretes móviles para manguera o con transferencia final de agua a través de una unión rotatoria. Se reitera que el tamaño de la unión rotatoria no debe ser inferior a 25,4 mm (1 pulgada) de *diámetro interno*. El carrete puede ser activado manual, eléctricamente o hidráulicamente. Se debe suministrar una guía para el rodillo de la manguera. Todos los accesorios deben ser de tipo sumergible. Es esencial un freno para bloquear el carrete cuando se desee. El funcionamiento de encendido y apagado continuo hará que la manguera se arrastre, a menos que se instale y utilice un freno manual.

Acoplamiento

La seguridad es lo más importante. Se recomienda usar accesorios a presión, según lo especifique el fabricante de la manguera y del accesorio. Una persona calificada debería hacer el ensamblaje, verificar cuidadosamente la manguera tanto en su parte interna como externa (ensamble - acople si así se especifica), realizar la medición visual y marcar la profundidad hasta donde se introduce el acople macho a medida que penetra dentro de la manguera.

Cuando el acoplamiento está completo, el componente engastado externo debe estar a la profundidad medida previamente. Las mangueras de plástico o nylon no

conductoras se deberían acoplar según las especificaciones del fabricante del accesorio para la manguera.



Figura 32. Manguera de lavado.

4.2.1.6 Boquilla

Manual

El último sitio por donde pasa el agua es la boquilla. El diseño y el acabado apropiados producirán un flujo de agua recto con mínima discontinuidad. Un rectificador de flujo, ubicado delante de la boquilla, cambia el agua que gira turbulenta a un flujo recto a medida que pasa por la boquilla. Los tamaños de los orificios varían entre 3,2 mm y 7,94 mm (0,125 pulgadas y 0,3125 pulgadas) dependiendo de la distancia y la presión del agua. La limpieza efectiva se logra con el impacto del agua, seguido de enjuague del contaminante. El objetivo es la utilización efectiva del agua. Comercialmente, puede ser difícil obtener una punta fina y pulida. Muchos usuarios las pulen y terminan manualmente. Se pueden usar cuerpos de aluminio o bronce con puntas de acero, acero inoxidable, cerámica o metal compuesto. La boquilla se acopla a un eyector de lavado manual. El disparador abre y cierra la fuente de agua. El extremo delantero o el asa y la orquilla con almohadilla para el hombro, son características adicionales para el

operador. Cuando se seleccionan los eyectores de lavado, se deben tener en consideración la caída de la presión en el eyector, el peso, el costo de fabricación, la detención positiva y el disparador de interrupción automática.



Figura 33. Boquillas de Lavado (Foto tomada por los autores).

Toma de agua a distancia

Las torres de transmisión pueden tener tuberías con boquillas montadas en la parte superior predirigidas hacia los aisladores y la línea. Luego, se conecta una autobomba o carro tanque a la toma de agua para lavar los aisladores a distancia.

4.2.1.7 Portador

Camiones

Se usa el chasis de vehículos desde pequeños con tracción en las cuatro ruedas hasta de tipo diesel con tracción en diez ruedas de 27 216 kg (60 000 lb) Los camiones pequeños con tracción en todas las ruedas y equipados únicamente con bomba de agua, recogen el agua desde carro tanques o remolques. Los camiones medianos y pesados, equipados con motor, bomba o toma de potencia, pueden llevar el agua y realizar el lavado. El camión también puede portar una bomba de tanque montada sobre una plataforma y un elevador para usar cuando se realiza la limpieza desde una canasta.

Remolque

Se puede acoplar un remolque de lavado en la parte posterior del equipo de camión existente.

El funcionamiento del freno del remolque, el vacío eléctrico, el aire o sus combinaciones proporcionan capacidad de detención, la cual permite acoplar vehículos con diversos sistemas de frenado para acoplar al remolque. El remolque se puede acoplar en la parte posterior de un elevador de 10,6 m a 19,8 m (35 pies a 65 pies) para el lavado en distribución o, a uno de 27,4 m a 38,1 m (90 pies a 125 pies) para el de transmisión.

El liniero puede subir a las torres metálicas portando una línea manual y halar luego el eyector hacia el o ella. Desde el remolque, dos personas pueden realizar el lavado según los requisitos para cadenas de alta tensión en V, si la unidad de potencia de la bomba esta equipada para producir flujo y presión para el funcionamiento simultaneo de dos eyectores. Con este método han sido lavados aisladores con tensiones de hasta 800 Kv. El lavado de la subestación, a menudo requiere un vehículo de poca altura, con llantas especiales para evitar el desplazamiento de la grava en la subestación. En una subestación se puede usar un remolque corto, acoplado, y se puede hacer la limpieza con dos eyectores.



Figura 34. Camión de Lavado con equipos (Foto tomada por los autores).

Helicóptero

Cuando el acceso a los aisladores es difícil, escarpado o lejano, o cuando se requiere mucha movilidad para las funciones del lavado rápido en distancias largas, el lavado aéreo con helicóptero es una opción. Estos aparatos tienen limitación de la cantidad de agua que pueden portar. El sistema de bombeo y el eyector manual o guiado, con varilla, usualmente se hacen funcionar con un sistema de presión mayor y volumen menor que los de sistemas portados en tierra. Con este sistema autocontenido, aislado y no conectado a tierra, la boquilla de aspersion se puede ubicar con mayor seguridad más cerca de los aisladores que se van a limpiar. Se deben tener en consideración el tipo de estructura y la accesibilidad para el helicóptero, antes de usar una boquilla montada en un helicóptero.

4.2.1.8 Agua

Calidad

Se recomienda la utilización de agua con alta resistividad o baja conductividad para la limpieza de aisladores energizados. Se sabe que, en general, el agua de lluvia, la nieve derretida y el destilado de la planta de vapor, tiene buenas

características de resistividad. Es importante el ensayo constante del agua que se usa; la resistividad puede cambiar rápidamente debido a la temperatura. El agua con resistividad pobre, entre 750 Ωcm y 1000 Ωcm (295 $\Omega\text{pulgadas}$ a 394 $\Omega\text{pulgadas}$), se puede purificar mediante sistemas de desionización o filtración. Se deben determinar las características mínimas del agua con base en las prácticas planificadas de funcionamiento y las tensiones esperadas. Es conveniente una resistividad mayor de 1 500 Ωcm (591 $\Omega\text{pulgadas}$).

Aditivos

Se recomienda no adicionar jabones ni detergentes al agua. La limpieza se logra con el impacto del agua y el enjuague. En climas árticos y nórdicos, no se adiciona alcohol ni anticongelante. El peligro de llama, los contaminantes residuales y las consideraciones ambientales eliminan su uso. El agua tibia (no caliente) eliminara los contaminantes y, aunque se puede producir congelamiento a medida que se funde el hielo o el agua contaminada y congelada, los contaminantes serán lavados. No se aconseja dejar que el hielo forme puentes entre las aletas de los aisladores.

Monitoreo

Están disponibles sistemas de monitoreo o ensayo continuo portátiles. Los más comunes son los probadores de estado sólido y manuales. Independientemente de que se conozcan o no las características del agua, se debe ensayar cada llenado o adición al tanque. Se deben mantener las normas mínimas de seguridad. La resistividad del agua disminuye a medida que aumenta su temperatura. Se recomienda el uso de probadores no compensados según la temperatura.

Una práctica común es vaciar el tanque que haya quedado parcialmente lleno al finalizar el día de lavado y volverlo a llenar con agua recién ensayada el día siguiente. Los sistemas de monitoreo continuo usualmente requieren una sonda dentro del tanque. La sonda (o sondas) mide constantemente la conductividad del fluido.

En el circuito de monitoreo se pueden integrar una alarma luminosa o sonora y un control de estrangulación para la bomba. Se prefieren los sistemas que funcionan con corriente directa de doce voltios a los dispositivos industriales de corriente alterna que requieren un convertidor o inversor de corriente alterna /corriente directa.



Figura 35. Equipo de monitoreo de Calidad del agua.

4.2.1.9 Agua a baja presión

Los aparatos de agua a baja presión (lavado por riego) son similares al equipo de alta presión excepto, por los requisitos de servicio menos estrictos. Puede ser conveniente un sistema repetitivo manual o automático dependiendo del grado y el tipo de contaminación.

4.2.1.10 Agua a presión media

El equipo para este sistema es, esencialmente, el mismo que para el agua a alta presión.

4.2.1.11 Aspersión fija

El equipo esta compuesto por un tanque de agua, una bomba, un motor, varias válvulas, boquillas, sistema de tubería y sistema de control.

Tubería y motor

En general, se usa una bomba centrífuga y un motor de inducción de tres fases. La capacidad de bombeo requerido se decide según el flujo máximo de agua de las secciones de lavado.

Boquillas

Las boquillas deben ser de fabricación simple y fuerte, y que no se obstruyan fácilmente con cuerpos extraños. Deben tener la capacidad de proporcionar un efecto de limpieza satisfactorio teniendo en cuenta los vientos fuertes. El tipo de aislador que se va a limpiar determinar los parámetros del sistema de limpieza.

Sistema de tubería

Los accesorios y tuberías que se usan, generalmente están hechos de acero, galvanizado por inmersión en caliente interno y externo. Tienen soldadura a tope para tubería subterránea, y soldadura a tope, con brida o con unión roscada para tuberías por encima del suelo.

Los tamaños de las tuberías están determinados por las necesidades de flujo de agua.

Sistema de control

Para operar de manera efectiva el equipo de lavado y lavar los aisladores con seguridad, se debe suministrar un sistema de control que verifique que el equipo de lavado esta en condición normal, con resistividad del agua, presión y nivel del agua satisfactorios antes del lavado.

Cualquier anomalía en el sistema, después de empezar el lavado, detendrá automáticamente la operación. Todos los procesos, desde la decisión de iniciar el

lavado hasta la finalización de dicha operación, se deberían programar en el sistema de control. Un control automático de contaminación puede ser el control para el sistema.

También se debe tener en cuenta, en la secuencia de lavado, la dirección del viento y la cantidad de contaminación que acarrea el viento.

4.3 TIPOS DE CONTAMINANTES

En todas las áreas de funcionamiento, los aisladores expuestos están sujetos a la deposición de suciedad en la superficie. Los contaminantes que se encuentran con más frecuencia tienen poco efecto en el desempeño del aislador, siempre y cuando la superficie esté seca. La neblina, el rocío o la lluvia liviana usualmente crean condiciones que producen una película conductora sobre la superficie del aislador sucio, sin lavar las impurezas de dicha superficie.

Se han identificado ocho tipos de contaminantes como fuente de depósitos sobre la superficie de los aisladores, que afectan el desempeño del aislador:

- Sal
- Cemento /cal
- Polvo
- Defecación
- Sustancias químicas
- Neblina por contaminantes (emisiones vehiculares)
- Humo

Estos contaminantes se distinguen principalmente por la fuente de impurezas. Las condiciones agrícolas, industriales y geográficas locales determinan el contaminante que estará presente en la atmósfera. Comúnmente, el viento y la lluvia brindan suficiente acción de lavado para eliminar la mayoría de los depósitos comunes.

Más de uno de estos contaminantes se pueden depositar sobre un grupo de aisladores, en una ubicación en particular. La mezcla e intensidad del depósito de estos contaminantes determinan las características de la mezcla.

4.3.1 Sal

En áreas cercanas a un cuerpo de agua salada o en áreas adyacentes a carreteras, particularmente a vías elevadas, en donde la sal se usa para derretir la nieve o el hielo, se pueden producir depósitos importantes de sal debido a la aspersión por el viento. Tales depósitos pueden hacer necesario realizar la limpieza de los aisladores en estas áreas en donde los periodos largos y secos están seguidos por intervalos de neblina o lluvia brumosa. La aspersión de sal puede originar flameos e incendios por la corriente de fuga en estructuras adyacentes a vías con tráfico alto, particularmente, aquellas a lo largo de vías elevadas. Los aisladores se deben limpiar antes de que se presente la neblina o la bruma, no después. La sal se disuelve rápidamente y se lava cuando hay lluvia fuerte o un flujo de agua.

4.3.2 Cemento /cal

Los aisladores cercanos a plantas de cemento, sitios de construcción o canteras de roca pueden acumular depósitos de cemento o cal. Estos materiales se pueden acumular formando una capa gruesa, la cual se adhiere firmemente a la superficie del aislador y puede requerir lavado manual. Puede ser necesario un agente químico para eliminar las capas de cemento. El método de limpieza seco ha probado ser muy efectivo.

4.3.3 Polvo

Los tipos de polvo que se pueden depositar sobre los aisladores se originan en una amplia variedad de fuentes. Algunos de los tipos que afectan el desempeño del aislador son el polvo de tierra, fertilizantes, polvo metálico, polvo de carbón,

polvo de los corrales de engorde y ceniza volcánica. Esta no es una lista completa pero cubre muchas fuentes de polvo.

Tierra

El polvo de tierra se puede originar en los campos arados, en el transporte de tierra, en los proyectos de construcción, etc.

Fertilizante

El polvo de fertilizante se origina en las plantas de fertilizantes y en la aplicación de fertilizantes en la agricultura. Se sabe que el polvo de fertilizante crea un recubrimiento grueso que el lavado a alta presión no puede eliminar. En estos casos, el lavado manual o en seco es necesario para limpiar los aisladores. El fertilizante líquido del tipo de urea se limpia con agua.

Metálico

El polvo metálico se origina en diferentes procesos de minería y manipulación de minerales.

Carbón

Las operaciones de minería de carbón y de manipulación de carbón, así como la quema industrial de carbón son fuentes importantes de polvo de carbón. El hollín y la ceniza flotante que se producen por la quema de carbón pueden formar compuestos que se adhieren firmemente a la superficie del aislador y se pueden eliminar únicamente con lavado a alta presión o con aire comprimido con una sustancia abrasiva.

Ceniza volcánica

La actividad volcánica puede emitir grandes cantidades de contaminantes hacia la atmósfera en periodos cortos. Las capas gruesas de ceniza volcánica se acumulan sobre los aisladores expuestos durante y poco después de periodos de actividad volcánica. Esta ceniza no se elimina fácilmente, a menos que se realice la limpieza lo más pronto posible después de que se ha depositado.

4.3.4 Defecación

Los aisladores ubicados en cercanías de refugios para aves están sometidos a contaminación por defecación. Usualmente, estos depósitos son lavables y con frecuencia, la lluvia fuerte los limpia, pero pueden presentar serios problemas en la confiabilidad del sistema.

4.3.5 Sustancias químicas

Los contaminantes atmosféricos provenientes de una amplia variedad de procesos industriales y aspersión aérea de agroquímicos, así como las sustancias químicas para la extinción de incendios, se depositan sobre los aisladores. Las características de estos contaminantes químicos varían ampliamente. Algunas sustancias son altamente solubles y se pueden lavar fácilmente, mientras que otras se adhieren con firmeza y sólo se pueden eliminar mediante restregado manual.

4.3.6 Neblina por contaminación (emisión vehicular)

En áreas urbanas, las emisiones de los automóviles introducen una cantidad significativa de material particulado hacia el ambiente. Además, las emisiones de los motores diesel, provenientes particularmente de los trenes, afectan áreas adyacentes a servidumbres. Normalmente, las sustancias químicas industriales están presentes en áreas con problemas graves de neblina por contaminación. Los contaminantes resultantes tienen características variadas, dependiendo de la combinación de contaminantes presentes.

4.3.7 Humo

La combustión industrial y agrícola, o los incendios pueden, junto con otras condiciones compatibles (como humedad y precipitación), hacer que la contaminación resultante se acumule sobre el aislamiento.



Figura 36. Aislador contaminado debido a los diferentes contaminantes (Foto tomada por los autores).

4.4 PROCEDIMIENTO

El aislador se debe lavar de manera que las aletas de los aisladores recién lavados mantengan el aislamiento adecuado. Por ejemplo, en los aisladores verticales, el lavado se debe iniciar en la base e ir ascendiendo.

4.4.1 Frecuencia de lavado

Los aisladores de polímeros que requieren lavado, no lo necesitan con tanta frecuencia como los aisladores de porcelana o de vidrio. Se pueden lavar, si se tiene precaución durante el procedimiento de lavado y la aprobación del fabricante.

4.4.2 Otro Procedimiento

Los aisladores de polímeros se pueden limpiar con métodos diferentes a los del lavado con agua.

Limpieza no energizada: si se puede retirar la energía a los aisladores para la limpieza, se pueden lavar a mano con paños de limpieza, con agua y detergente suave. Se recomienda que este procedimiento sea seguido por el enjuague con riego con agua limpia, a presión baja para eliminar cualquier residuo.

Normalmente, no se recomiendan solventes ni abrasivos fuertes. Se pueden usar agentes humectantes y aditivos para mejorar la acción del lavado del agua para la limpieza. Se pueden usar solventes, siempre y cuando se eliminen todos los residuos de limpieza mediante el enjuague final con agua limpia y sólo con aprobación del fabricante.

4.5 TÉCNICAS

4.5.1 Energizada

4.5.1.1 Agua a presión alta

4.5.1.1.1 Boquilla manual

Se recomienda verificar la resistividad del agua, proveniente del tanque del camión de lavado, por medio de un medidor portátil de resistencia, cada vez que se adiciona agua. El camión de lavado se debería ubicar de manera tal que la manguera de lavado salga de su carrete en las patas de la torre que se va a ascender. De este modo, la manguera no se arrastra alrededor de la torre.

Algunas instalaciones especifican manguera conductora con cable trenzado y unen el camión a la torre. La continuidad de esta conexión unida se verifica antes de empezar el trabajo. De manera rutinaria, se recomienda verificar todas las conexiones de unión para determinar la corrosión, y limpiarlas según se requiera. Ya que el camión de lavado puede adquirir un potencial relativamente alto, cuando se realiza el lavado es importante que ninguna persona ascienda o descienda del camión y que todas las personas en tierra se mantengan alejadas del mismo. Las personas en el camión también deben evitar tocar árboles, postes, torres u otros objetos adyacentes.

Algunas instalaciones usan manguera no conductora para el lavado y no unen el camión a la torre, de modo que no es probable que el camión adquiera un potencial alto. No obstante, es una buena práctica no permitir que alguien descienda de o ascienda al camión y que las personas en tierra se mantengan alejadas del camión durante la operación de lavado.



Figura 37. Equipo de lavado de la Subestación (Foto tomada por los autores).

Luego, el trabajador de línea debe ascender por la torre portando una línea manual. El conductor del camión debe enviar la manguera, el eyector y la boquilla. El trabajador de línea debería conectar la boquilla con la torre de acero o al cable unido al poste.



Figura 38. Líniero preparándose para lavado de torre (Foto tomada por los autores).

El trabajador de línea le indica al conductor del camión que incremente la presión del agua. Si la unidad está equipada con un obturador de demanda, la presión (revolución por minuto) aumentará automáticamente cuando se abra el eyector. El agua se dirige lejos de la cadena de aisladores hasta que se alcance la presión total. Entonces, el trabajador de línea en la torre debería dirigir el flujo de agua hacia el aislador.

La distancia entre la boquilla y el conductor no debe ser inferior a la distancia de lavado mínima establecida. Las cadenas de aisladores de suspensión se lavan dirigiendo primero el flujo de agua hacia el aislador más cercano al conductor energizado, para tomar ventaja tanto del impacto como de la acción de remolino del agua para eliminar los depósitos. Después de lavar los aisladores de la base de la cadena, el flujo de lavado se debe mover varias unidades hacia arriba. Después de lavar estas unidades, el flujo se debería dirigir hacia las unidades

limpias que se encuentran por debajo para enjuagarlas. Se recomienda repetir este proceso lavando hacia arriba unos pocos aisladores a la vez, hasta que la cadena completa esté limpia. La falla al enjuagar los aisladores inferiores antes de ascender por la cadena puede originar flameo. El flujo se debe retirar de cualquier parte energizada de los aisladores antes de que se reduzca la presión del agua. Se debe tener cuidado para evitar la aspersion procedente de aisladores sucios cercanos humectados de manera no adecuada, particularmente en la estación.



Figura 39. Lavado de aisladores de torres (Foto tomada por los autores).

Los aisladores de terminal de línea se deben lavar cuidadosamente para evitar que la sobreaspersión origine flameo. Empiece el lavado en el extremo del aislador que se halla en la misma dirección en que sopla el viento y luego trabaje en la dirección en contra del viento.

Es importante que se sigan los procedimientos anteriores y los parámetros de lavado establecidos cuando se realiza el lavado de línea viva.

5. MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DE AISLAMIENTO

El aislamiento eléctrico se degrada con el tiempo debido a las distintas fatigas que se le imponen durante su vida normal de trabajo. El aislamiento está diseñado para resistir esas fatigas por un periodo de años que se considera como la vida de trabajo de ese aislamiento. Esto con frecuencia dura décadas. La fatiga anormal puede llevar a un incremento en este proceso natural de envejecimiento que puede acortar severamente la vida de trabajo del aislamiento. Por esta razón es buena práctica realizar pruebas regularmente para identificar si tiene lugar un incremento del envejecimiento y, si es posible, identificar si los efectos son reversibles o no.

Los propósitos de las pruebas de diagnóstico son:

- Identificar el incremento de envejecimiento.
- Identificar la causa de este envejecimiento.
- Identificar, si es posible, las acciones más adecuadas para corregir esta situación.

En su forma más simple, las pruebas de diagnóstico toman la forma de una “prueba puntual (spot)”. La mayoría de los profesionales de mantenimiento eléctrico han hecho pruebas puntuales (spot) cuando se aplica un voltaje al aislamiento y se mide una resistencia. El diagnóstico en este caso se limita a “el aislamiento es bueno” o “el aislamiento es malo”.

Los probadores de aislamiento se remontan a principios del siglo XX cuando Sydney Evershed y Ernest Vignoles desarrollaron su primer probador de aislamiento (desarrollado en 1903 en el rango de probadores MEGGER).

En sus inicios, la mayoría de los instrumentos eran operados manualmente por manivela. Esto limitaba su capacidad para realizar pruebas que tomaban tiempo para completarse, y limitaban la estabilidad del voltaje a la habilidad del operador para operar la manivela sostenidamente. Más tarde, estos mismos instrumentos fueron impulsados por un motor externo que ayudaba en las pruebas de larga duración pero que mejoraba muy poco la estabilidad del voltaje. Sin embargo, el rango de estos instrumentos raramente excedía 1000 M Ω . Los movimientos análogos eran muy pesados y realmente servían para amortiguar cualquier evento transitorio.

Con la nueva era electrónica y el desarrollo de la tecnología de las baterías revolucionaron el diseño de los probadores de aislamiento. Los instrumentos modernos son impulsados por potencia de línea o baterías y producen voltajes de prueba muy estables en un rango de condiciones muy amplio. También pueden medir corrientes muy pequeñas de modo que su rango de medición de resistencia de aislamiento se extiende varios miles de veces en el rango de los teraohms (T Ω). Algunos pueden aún reemplazar el lápiz, papel y cronómetro, que se usaban anteriormente para coleccionar los resultados manualmente, registrando los datos en la memoria para descargarlos y analizarlos posteriormente.

Estas mejoras asombrosas se hicieron desde que los fabricantes de materiales de aislamiento han estado trabajando duro, también, con el resultado que los materiales de aislamiento modernos ahora exhiben mejores características que aquellas de principios del siglo XX.

La tecnología más nueva ofrece un funcionamiento mejorado de modo que los procedimientos establecidos pueden producir mayor comprensión y se puede disponer de nuevos métodos. Los instrumentos modernos entregan un voltaje estable en todo su rango de resistencia, con sensibilidad de procesador en el circuito de medición que permite mediciones en el rango de T Ω .

La combinación de voltaje estable y la sensibilidad mejorada permite al probador medir las cantidades minúsculas de corriente que pasan por el aislamiento de calidad en el equipo nuevo. Consecuentemente, se han desarrollado procedimientos sofisticados que dependen de mediciones precisas y que se pueden implementar fácilmente.

Ahora que el probador de aislamiento no está limitado a valores asociados con equipos defectuosos o envejecidos, se puede usar para localizar con toda precisión la posición del objeto de prueba en cualquier lugar a lo largo de su curva de envejecimiento. La indicación “infinito” que es una delicia para el técnico de reparación representa un espacio vacío para el que diagnostica. Algunos instrumentos tienen pruebas de diagnóstico programadas en su software y pueden correrlas automáticamente, llenando ese vacío con datos analíticos valiosos.

5.1 CÓMO SE MIDE LA RESISTENCIA DE AISLAMIENTO

5.1.1 Cómo opera un probador de resistencia de aislamiento

Los probadores de aislamiento son instrumentos portátiles que proporciona una lectura directa de la resistencia de aislamiento en ohms, megaohms o teraohms (según el modelo seleccionado) independientemente del voltaje seleccionado. Para un buen aislamiento, la resistencia generalmente da lectura en el rango de megaohms o más alto.

Los probadores de aislamiento son esencialmente medidores de resistencia de rango alto (óhmmetro) con un generador de CD incorporado.

El generador del instrumento, que puede operarse por manivela manualmente, batería o por línea, desarrolla un voltaje de CD alto que ocasiona varias corrientes pequeñas a través y sobre la superficie del aislamiento que se prueba. La

corriente total la mide el óhmmetro que lleva una escala de indicación analógica, lectura digital o ambas.

5.1.2 Componentes de la corriente de prueba

Si se aplica un voltaje de prueba a través de una pieza de aislamiento, luego por medición de la corriente resultante y aplicando la Ley de Ohm ($R = V / I$), se puede calcular la resistencia de aislamiento. Desdichadamente, fluye más de una corriente, que tiende a complicar las cosas.

5.1.3 Corriente de carga capacitiva

Es la corriente requerida para cargar la capacitancia del aislamiento que se está probando. Esta corriente inicialmente es grande pero su vida es relativamente corta, cae exponencialmente a un valor cercano a cero conforme el objeto bajo prueba se carga. El material aislante se carga del mismo modo que el dieléctrico de un capacitor.

5.1.4 Corriente de absorción o polarización

La corriente de absorción está compuesta realmente hasta por tres componentes, que decaen con un índice de decrecimiento a un valor cercano a cero en un período de varios minutos.

La primera es ocasionada por una derivación general de electrones libres a través del aislamiento bajo el efecto del campo eléctrico.

La segunda es ocasionada por distorsión molecular por la que el campo eléctrico impuesto distorsiona la carga negativa de las capas de electrones que circulan alrededor del núcleo hacia el voltaje positivo.

La tercera se debe a la alineación de moléculas polarizadas dentro del campo eléctrico aplicado. Esta alineación es casi aleatoria en un estado neutro, pero cuando se aplica un campo eléctrico, estas moléculas polarizadas se alinean con el campo a un mayor o menor grado.

Las tres corrientes se consideran generalmente juntas como una sola corriente y son afectadas principalmente por el tipo y las condiciones del material de unión usado en el aislamiento. Aunque la corriente de absorción se aproxima a cero, el proceso toma mucho más tiempo que con corriente capacitiva.

La polarización de orientación se incrementa con la presencia de humedad absorbida puesto que los materiales contaminados están más polarizados. Esto incrementa el grado de polarización.

La despolimerización del aislamiento también lleva a un incremento en la corriente de absorción.

No todos los materiales poseen las tres componentes y, por cierto, los materiales tales como el polietileno, exhiben poca, si alguna, absorción por polarización.

5.1.5 Corriente de fuga superficial

La corriente de fuga superficial se presenta porque la superficie del aislamiento está contaminada con humedad o con sales. La corriente es constante con el tiempo y depende del grado de ionización presente, que depende a la vez de la temperatura. Con frecuencia se ignora como corriente separada y se incluye con la corriente de conducción como la corriente de fuga total.

5.1.6 Corriente de conducción

La corriente de conducción es estable a través del aislamiento y generalmente se representa por un resistor de valor muy alto en paralelo con la capacitancia del aislamiento.

Es una componente de la corriente de fuga, que es la corriente que se mediría cuando el aislamiento está totalmente cargado y tiene lugar la absorción plena. Nótese que incluye la fuga superficial, que puede reducirse o eliminarse por el uso de la terminal de guarda (que se analizará más tarde).

La gráfica siguiente muestra la naturaleza de cada una de las componentes de corriente con respecto al tiempo

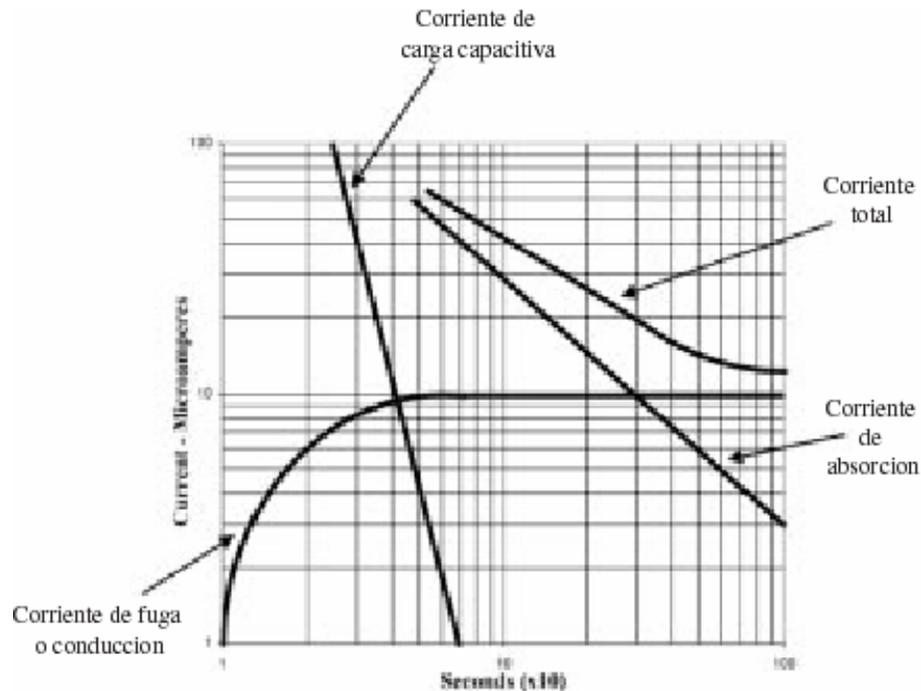


Figura 40. Componentes de la corriente de prueba.

La corriente total es la suma de estas componentes. (La corriente de fuga se muestra como una corriente). Esta corriente es la que puede medirse directamente por medio de un micro amperímetro o, en términos de megaohms, a un voltaje particular por medio de un probador de aislamiento MEGGER. Algunos instrumentos ofrecen las alternativas de desplegar una medición en términos de corriente o como una resistencia.

Debido a que la corriente total depende del tiempo que se aplica el voltaje, la Ley de Ohm ($R = V / I$) sólo se mantiene, teóricamente, para un tiempo infinito (lo que

implica esperar para siempre al tomar una lectura). También es altamente dependiente del arranque de un nivel base de descarga total. El primer paso en cualquier prueba de aislamiento es, por tanto, asegurar que el aislamiento esté completamente descargado.

Nótese que, la corriente de carga desaparece relativamente rápido conforme se carga el equipo bajo prueba. Las unidades grandes con más capacitancia tomarán más tiempo para cargarse. Esta corriente almacena energía y, por razones de seguridad, debe descargarse después de la prueba. Afortunadamente, la descarga de esta energía tiene lugar relativamente rápido. Durante la prueba, la corriente de absorción decrece con una rapidez relativamente baja, según la naturaleza exacta del aislamiento. Esta energía almacenada, también, debe liberarse al final de la prueba, y requiere mucho más tiempo para descargarse que la corriente de carga de la capacitancia.

5.2 CONEXIÓN DEL PROBADOR DE AISLAMIENTO

Con los materiales aislantes modernos hay poca, si alguna, diferencia en la lectura obtenida, independientemente de la manera en que se conecten las terminales. Sin embargo, en los aislamientos antiguos, un fenómeno poco conocido llamado electroendósmosis ocasiona que se obtenga una lectura más baja con la terminal positiva conectada al lado a tierra del aislamiento que se está probando. Si se prueba un cable sub-terráneo, la terminal positiva se debe conectar normalmente al lado exterior del cable puesto que éste estará a tierra por contacto con el terreno, como se muestra en la Figura 41. Nótese que no se conecta directamente al aislamiento sino más bien al neutro del cable o tierra.

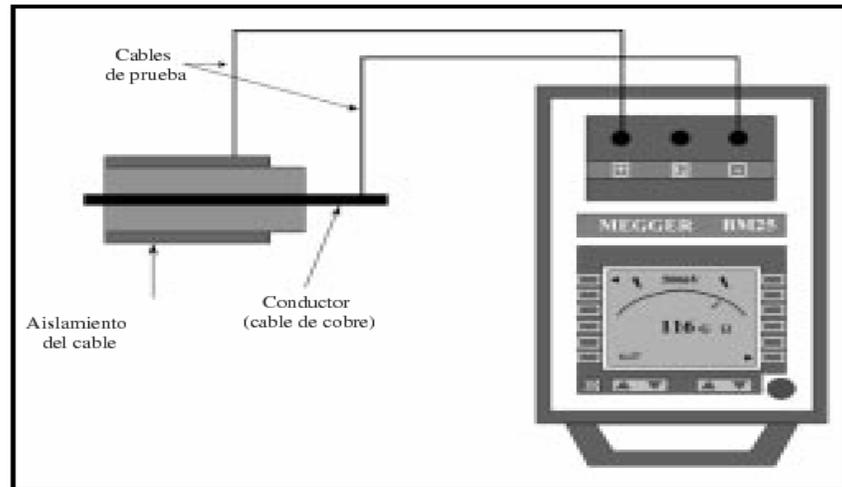


Figura 41. Conexión simple a un cable.

El equipo utilizado por el equipo de mantenimiento de la subestación Cartagena es el MEGGER BM25, fabricado por AVO.

El cual tiene las siguientes características, Medidor de aislamiento analógico/digital 5Kv; 500, 1000, 2500, 5000V; y con una medida de aislamiento hasta 5 Tohmios.



Figura 42. Medidor de aislamiento BM25 (Foto tomada por los autores).

5.2.1 Conexiones típicas seleccionadas para los equipos

5.2.1.1 Cable de potencia blindado

Conectado para medir la resistencia de aislamiento entre un conductor y tierra.

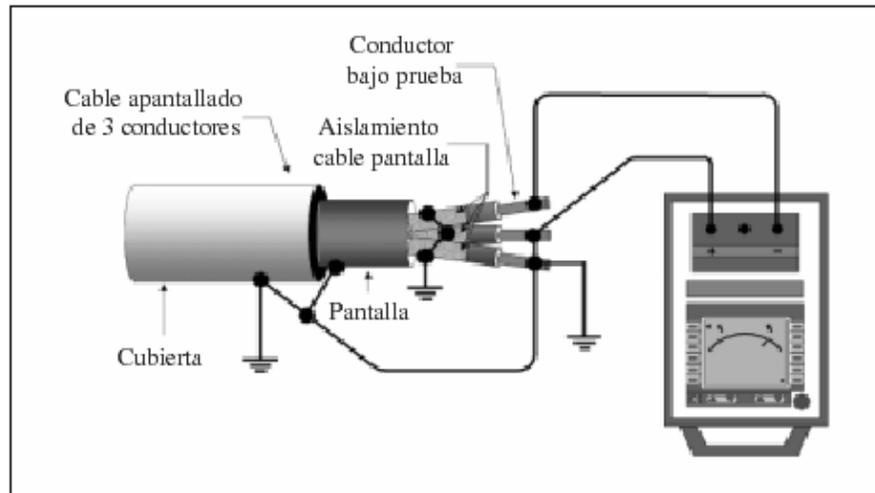


Figura 43. Conexión a un cable de potencia blindado.

5.2.1.2 Interruptor / Boquillas

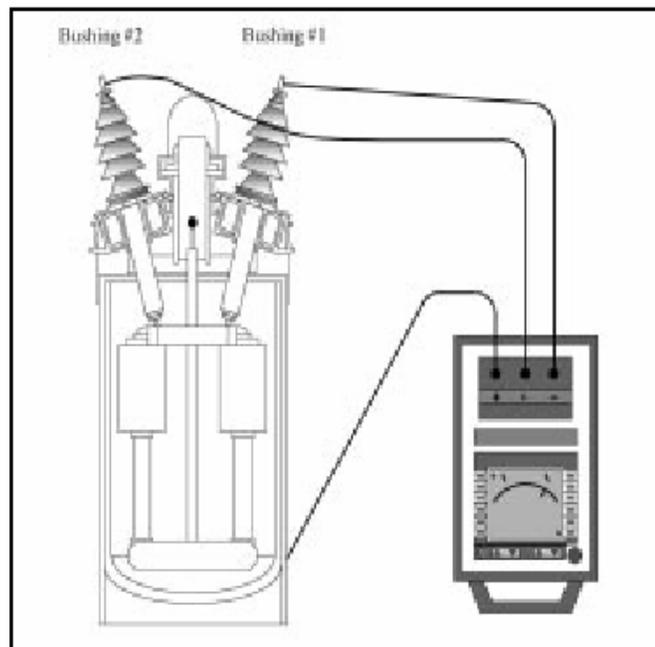


Figura 44. Conexión a un interruptor.

5.2.1.3 Transformador de potencia

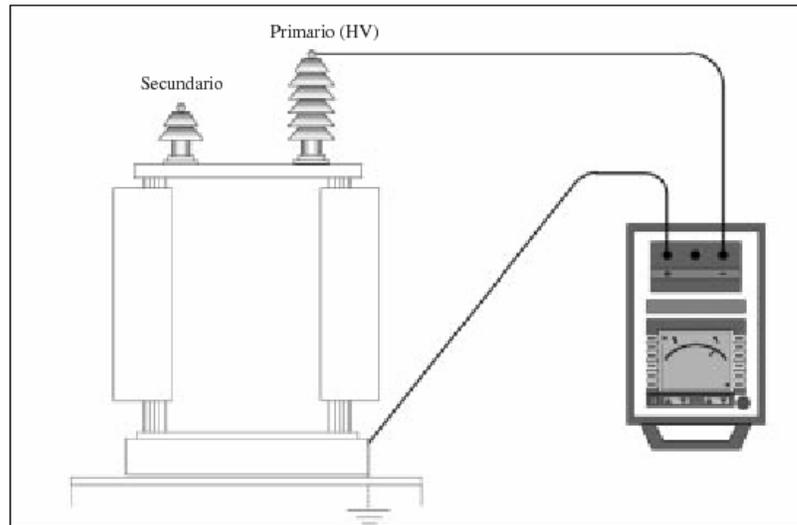


Figura 45. Conexión a un transformador de potencia.



Figura 46. Grupo de Mantenimiento realizando pruebas de aislamiento (Foto tomada por los autores).

5.3 PRUEBAS DE AISLAMIENTO DE DIAGNÓSTICO DE ALTO VOLTAJE

Las pruebas de aislamiento de diagnóstico estimulan eléctricamente el aislamiento y miden la respuesta. Según la respuesta, se pueden sacar algunas conclusiones sobre las condiciones del aislamiento.

Las pruebas de aislamiento de diagnóstico cubren un amplio rango de técnicas, algunas que involucran equipo portátil y algunas que requieren equipo fijo considerable. Aquí se considerarán sólo aquellas pruebas que se pueden realizar rápidamente con un probador de aislamiento de CD portátil. Estas son:

- Pruebas puntuales de tendencia
- Constante de tiempo
- Índice de polarización (PI)
- Voltaje de paso (SV)
- Descarga dieléctrica (DD)

Cada prueba da una vista diferente, o ventana, sobre las condiciones del aislamiento; el panorama completo está sólo disponible cuando se han completado todas las pruebas requeridas.

5.3.1 Prueba de lectura puntual (spot)

La prueba de lectura puntual (spot) es la más simple de todas las pruebas de aislamiento y la más asociada con los probadores de aislamiento de voltaje más bajo; El voltaje de prueba se aplica por un período corto específico de tiempo (generalmente 60 segundos puesto que usualmente cualquier corriente de carga capacitiva decaerá en este tiempo) y luego se toma una lectura. La lectura se puede comparar con las especificaciones mínimas de la instalación.

A menos que el resultado sea catastróficamente bajo, se usa mejor cuando tienda hacia los valores obtenidos previamente.

Sin embargo, la resistencia de aislamiento es altamente dependiente de la temperatura y por tanto los resultados deben corregirse a una temperatura normal, generalmente 40° C. Una buena regla de dedo es que por cada 10° C de incremento en la temperatura la corriente se dobla (la resistencia se reduce a la mitad). La clave para hacer válida la prueba de lectura puntual (spot) es consistente con mantener el tiempo, mantener el registro efectivo, y la tendencia de los resultados.

Como se hizo notar anteriormente, el incremento de sensibilidad disponible en los probadores de aislamiento de diagnóstico con base en microprocesador permite al operador identificar los problemas de aislamiento en sus etapas iniciales más que cuando esos problemas se hacen catastróficos. En muchos casos, la tendencia es mucho más importante que el valor absoluto.

Compárense los dos trazos en la Figura 47. El equipo A muestra una resistencia de aislamiento alta mientras que el equipo B muestra un valor bajo. Sin embargo, cuando se examina la tendencia, el equipo B muestra pocas causas por qué preocuparse; ha estado alrededor del mismo valor por varios años y muestra todos los prospectos de continuar en las mismas condiciones por muchos años por venir. Por el contrario, la curva del equipo A se está disminuyendo dramáticamente y el equipo fallará, si no se hace nada para evitarlo, en los próximos años.

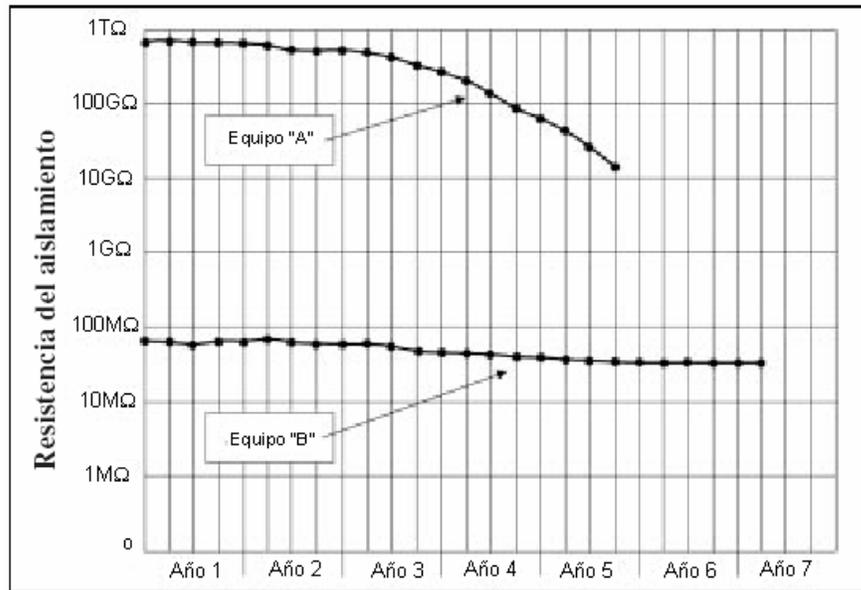


Figura 47. Comparación de las tendencias de los resultados de las pruebas.

Mientras que el equipo A tiene valores de resistencia absoluta mucho más altos que el equipo B, la tendencia es bastante preocupante. El equipo B tiene una tendencia casi plana y consistente, lo que indica que la calidad del aislamiento es probablemente aceptable.

Las lecturas de resistencia de aislamiento se deben considerar relativamente más que absolutamente. Pueden variar de un motor o máquina probada tres días en una fila, todavía no significa un aislamiento malo. Como se mencionó, la información importante es la tendencia de las lecturas en un periodo de tiempo, que muestren reducción de la resistencia y advertencia de problemas venideros.

Las pruebas periódicas son, por tanto, críticas en el mantenimiento preventivo del equipo eléctrico. El intervalo entre pruebas (mensualmente, semestralmente, anualmente, etc.) depende del tipo, localización e importancia del equipo. La evaluación de una serie de lecturas tomadas en un período de meses o años lleva al ingeniero a convertirse en un diagnósta.

Las pruebas periódicas deben hacerse del mismo modo cada vez. También deben hacerse alrededor de la misma temperatura, o el ingeniero debe corregirlas a la misma temperatura. El registro de la humedad relativa cerca del equipo en el momento de la prueba es útil para evaluar la lectura y la tendencia puesto que las temperaturas bajas y la humedad alta podrían sugerir condensación en la superficie del aislamiento. Por esta razón es esencial asegurar que el equipo que se va a probar esté a una temperatura en exceso del punto de rocío, puesto que de otra manera se formará condensación que distorsionará las lecturas a menos que la medición se “proteja” bien. Más adelante se dan mayores detalles sobre este asunto.

La tabla 18 siguiente contiene algunas observaciones generales sobre cómo interpretar las pruebas periódicas de resistencia de aislamiento y de que se debe hacer con los resultados:

Tabla 18. Interpretación de pruebas periódicas.

Condición	Qué hacer
(a) Valores aceptables a altos y bien mantenidos	<ul style="list-style-type: none"> • No es causa preocupación
(b) Valores aceptables a altos, pero con una tendencia constante a valores más bajos	<ul style="list-style-type: none"> • Localizar y remediar la causa y verificar la tendencia hacia abajo
(c) Bajos pero bien mantenidos	<ul style="list-style-type: none"> • Las condiciones probablemente estén bien pero debe verificarse la causa de los valores bajos; tal vez sea simplemente el tipo de aislamiento usado
(d) Tan bajos como para no ser seguros	<ul style="list-style-type: none"> • Limpie y seque, o eleve los valores antes de poner el equipo en servicio (pruebe el equipo mojado mientras lo seca)
(e) Valores aceptables o altos previamente bien mantenidos pero que baja súbita	<ul style="list-style-type: none"> • Haga pruebas a intervalos frecuentes hasta que la causa de los valores bajos se localice y se remedie o, • Hasta que los valores se estabilicen a un nivel más bajo pero seguro para la operación o, • Hasta que los valores sean tan bajos que sea inseguro para mantener el equipo en operación

5.3.2 Prueba de tiempo vs. Resistencia

Los procedimientos de prueba familiares normales que se han empleado por años se benefician de las capacidades perfeccionadas de las pruebas de diagnóstico mejoradas.

La más básica de estas es el método tiempo-resistencia. Una propiedad valiosa del aislamiento, pero que debe entenderse, es que “carga” durante el curso de una prueba gracias al movimiento de los electrones como se explicó previamente. Este movimiento de los electrones constituye una corriente.

Su valor como un indicador de diagnóstico se basa en dos factores opuestos; la corriente se desvanece conforme la estructura alcanza su orientación final, mientras que la “fuga” promovida por la humedad o el deterioro pasa una corriente constante comparativamente grande. El resultado neto es que con “buen” aislamiento, la corriente de fuga es relativamente pequeña y la resistencia se eleva continuamente conforme la corriente decrece por los efectos de carga y absorción dieléctrica. El aislamiento deteriorado pasará cantidades relativamente grandes de corriente de fuga a una tasa constante para el voltaje aplicado, que tenderá a disfrazar los efectos de carga y absorción.

Graficando las lecturas de resistencia a intervalos de tiempo desde la iniciación de la prueba produce una curva uniforme para “buen” aislamiento, pero una gráfica “plana” para equipo deteriorado. El concepto de la prueba tiempo-resistencia es tomar lecturas sucesivas a tiempos especificados. Se basa en las magnitudes relativas de las corrientes de fuga y absorción en aislamientos limpios y secos comparada con la de aislamientos húmedos o contaminados; la corriente de fuga es mucho más grande y los efectos de la corriente de absorción son por tanto menos aparentes.

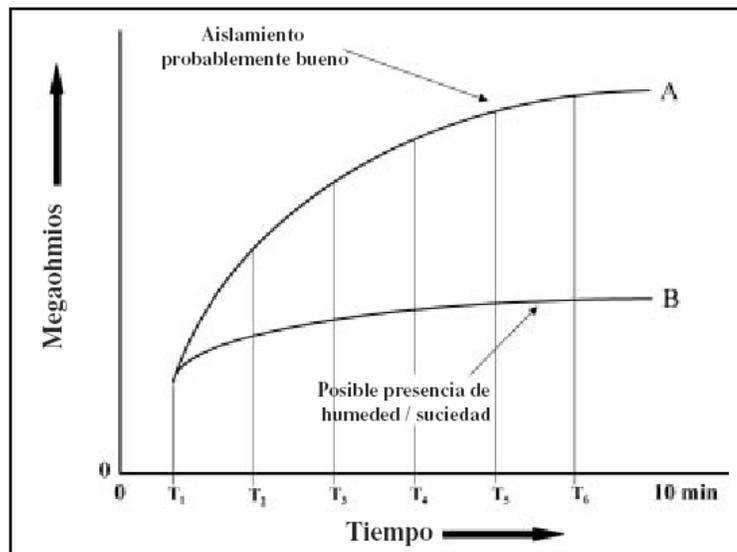


Figura 48. Gráfica de prueba tiempo-resistencia.

Los beneficios de la prueba de tiempo-resistencia son que es relativamente independiente de la temperatura y puede dar información concluyente sin los registros de pruebas pasadas.

5.3.3 Prueba de índice de polarización

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

En general, una relación baja indica poco cambio, consecuentemente aislamiento pobre, mientras que una relación alta indica lo opuesto. Las referencias a valores PI típicos son comunes en la literatura, lo que hace que esta prueba sea

fácilmente empleada. Sin embargo, se dice “en general” porque como se mencionó previamente hay materiales que exhiben muy poca o ninguna absorción dieléctrica. Llevando a cabo una prueba en esos materiales produciría entonces un resultado muy próximo a 1.

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

Una prueba como la PI es particularmente útil porque se puede realizar aún en equipos grandes, y produce una evaluación auto-contenida con base en lecturas relativas más que en valores absolutos. Pero no se puede calcular PI con un probador de rango limitado, porque “infinito” ¡no es un número! Los probadores avanzados alcanzan el rango de teraohms, y por tanto, no se salen de la gráfica. El equipo mayor más grande y más nuevo se puede probar fácilmente para producir datos repetibles para registro y evaluación de tendencias subsecuentes. El cuadro siguiente pone de relieve valores PI seleccionados y lo que significan para el operador.

Tabla 19. Índice de polarización.

Índice de polarización de la condición del aislamiento	
< 1	Pobre
1-2	Cuestionable
2-4	OK
> 4	Bueno

Los valores arriba de 4 indican equipo excelente para el que probablemente no sea necesaria ninguna acción dentro del programa de mantenimiento inmediato. Sin embargo, el operador puede ser llamado para hacer juicios críticos. Algunos valores de PI (arriba de 5) podrían indicar aislamiento quebradizo o agrietado; esto

podría ser casi obvio. Un aumento súbito de PI mayor de 20%, sin haber realizado mantenimiento alguno, debe servir como una advertencia; el aislamiento puede mantener su valor por periodos largos, pero no es probable que los mejore espontáneamente de por sí.

Un beneficio de la prueba PI es que puede proporcionar una indicación de la calidad del aislamiento en diez minutos en partes muy grandes de equipo que podrían tomar una hora o más para cargarse totalmente. Con la prueba de lectura puntual (spot), el operador debe esperar hasta que se estabilice la lectura. Por esta razón es normal realizar una prueba PI con voltaje relativamente bajo antes de aplicar los voltajes altos usados en una prueba de resistencia.

Aunque la tabla de valores PI se ha usado durante muchos años y es bien aceptada, se puede encontrar ocasionalmente que las lecturas PI son excepcionales. Hace muchos años se probó el estator de un generador de 3750 KvA y se obtuvo una lectura de PI de 13.4. El estator se había enfriado y no había duda de que todavía estaba en su fase de cura. Las pruebas subsiguientes produjeron valores reducidos de PI hasta que se estabilizaron en 4.7. Durante el mantenimiento de rutina los valores de PI no alcanzan esas alturas.

Es interesante, también, hacer notar que mucha gente ha tratado de usar la prueba PI en transformadores llenados con aceite y no puede entender por qué un transformador que se sabe que está bueno les da resultados próximos a 1. La respuesta es simple. La prueba PI no es adecuada para transformadores llenados con aceite. El concepto depende de las estructuras relativamente rígidas de los materiales aislantes sólidos, donde se requiere energía de absorción para reconfigurar la estructura electrónica de moléculas comparativamente fijas en contra del campo del voltaje aplicado. Puesto que este proceso puede llevar a un estado teórico de terminación (en "tiempo infinito", que obviamente no puede lograrse en el campo práctico, pero que puede aproximarse razonablemente), el resultado es una disminución sostenida de la corriente conforme las moléculas

llegan a su alineamiento “final”. Debido a que la prueba PI se define por este fenómeno, no se puede aplicar con éxito a materiales fluidos puesto que el pasaje de la corriente de prueba a través de una muestra llena de aceite crea corrientes de convección que constantemente forman remolinos en el aceite, lo que da lugar a una carencia caótica de estructura que se opone con la premisa básica sobre la que descansa la prueba PI.

5.3.4 Prueba de voltaje de paso

Puesto que el aislamiento bueno es resistivo, un incremento en el voltaje de prueba conducirá a un incremento en la corriente mientras la resistencia permanece constante.

Cualquier desviación de esto podría significar aislamiento defectuoso. Con voltajes de prueba más bajos, 500 V o 1000 V, es bastante posible que estos defectos no se observen, pero conforme se eleva el voltaje se llega a un punto donde tiene lugar la ionización dentro de las grietas o las cavidades, lo que da por resultado un incremento de la corriente, y por tanto una reducción de la resistencia de aislamiento. Nótese que no es necesario llegar al voltaje de diseño del aislamiento para que estos defectos se hagan aparentes, puesto que se busca simplemente la ionización en el defecto.

La prueba de Voltaje de Paso sigue exactamente este principio y puede emplearse útilmente con voltajes que alcanzan 2500 V y más. La prueba de Voltaje de Paso se puede emplear como una prueba de bajo voltaje o sobre voltaje. Sin embargo, se debe recordar que una prueba de sobrevoltaje puede llevar a una falla catastrófica si se rompe el aislamiento debido a que los probadores de voltaje tienen mucha potencia disponible. Una prueba de bajo voltaje realizada con un probador de aislamiento tiene relativamente poca potencia disponible y por lo tanto es menos probable que resulte una prueba destructiva.

Un procedimiento normal reconocido es incrementar el voltaje en cinco pasos iguales en incrementos de un minuto y registrar la resistencia de aislamiento final en cada nivel. Cualquier reducción marcada o inusual de resistencia es una indicación incipiente de debilidad. La electrónica moderna permite que esas lecturas se capturen automáticamente.

Enseguida se dan algunos resultados posibles de una prueba de Voltaje de paso en un motor de 500 a 2500 volts y lo que significan para el operador:

- Si no hay diferencia apreciable en los valores - el aislamiento está en buenas condiciones.
- Si hay diferencia apreciable en los valores - el aislamiento requiere reacondicionamiento minucioso.
- Si el aislamiento falla a 2500 V – el motor es cuestionable; lo más probable es que falle cuando se ponga en servicio aún cuando se haga un intento de reacondicionarlo con base en pruebas de bajo voltaje solamente.

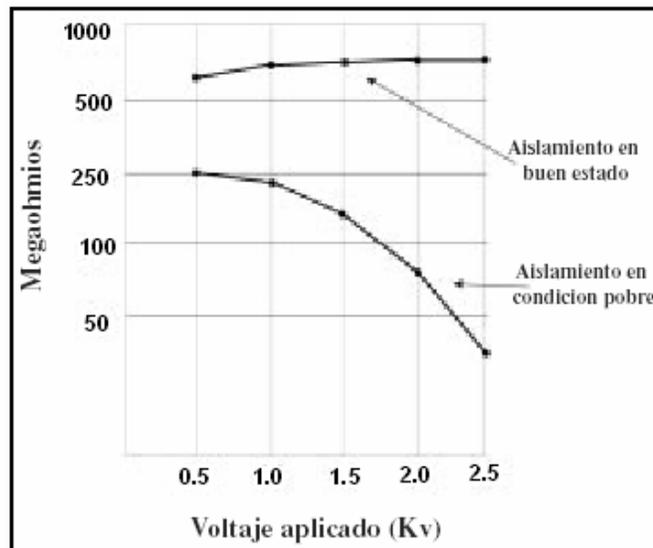


Figura 49. Gráfica de paso voltaje de paso.

Las gráficas de la Figura 49 se tomaron de un motor inundado y sucio (trazo inferior) y después de limpiarlo y secarlo (trazo superior).

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

Como la prueba PI, la prueba de Voltaje de Paso es una prueba repetible, auto-evaluable que, por su corta duración, está libre de influencias extrañas como el efecto de la temperatura.

5.3.5 Prueba de descarga dieléctrica

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

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

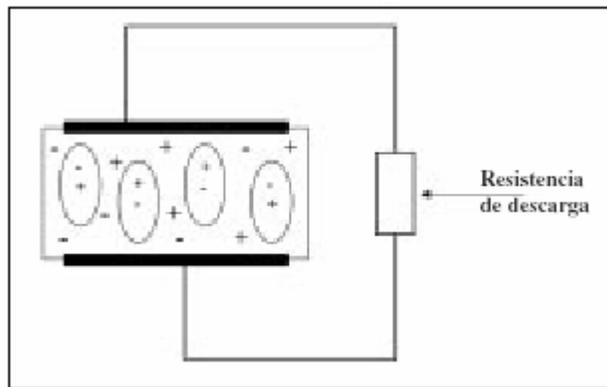


Figura 50. Descarga de la carga almacenada en el objeto en prueba.

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

La corriente capacitiva decae rápidamente desde un valor alto con una constante de tiempo relativamente corta (unos cuantos segundos). La corriente de absorción (o reabsorción durante una descarga) siempre comienza a un nivel alto pero tiene una constante de tiempo mucho más larga (hasta muchos minutos). Es ocasionada por los dipolos que hacen aleatoria su alineación dentro del aislamiento y la capa de electrones a una forma no distorsionada. Esto tiene el efecto de una corriente que fluye si el circuito de descarga todavía está conectado, o un voltaje que reaparece en la muestra si se deja en circuito abierto. Removiendo rápidamente los efectos de las corrientes de fuga y capacitiva permite la posibilidad de interpretar el grado de polarización del aislamiento y relacionarlo con la humedad y otros efectos de la polarización.

El objeto en prueba se carga primero de 10 a 30 minutos a alto voltaje hasta que haya tenido lugar la absorción total. (Los probadores de aislamiento MEGGER que automatizan esta prueba cargan la muestra en prueba durante 30 minutos). En este tiempo, la capacitancia se carga totalmente y la absorción eléctrica está esencialmente completa. Sólo la corriente de fuga continúa fluyendo. En este punto se remueve el voltaje de prueba y el aislamiento se descarga a través de los resistores internos del instrumento para descargar rápidamente la carga capacitiva. Después de 60 segundos de descarga, se mide cualquier flujo de corriente remanente. En este tiempo, la capacitancia se descarga y el voltaje se colapsa de modo que la carga almacenada en los dipolos puede verse independiente de las corrientes de “máscara” que dominan durante la fase de una prueba de aislamiento.

Los resultados medidos se introducen en la fórmula siguiente y se calcula un índice.

$$\frac{\text{Corriente que fluye después de 1 minuto (nA)}}{\text{Voltaje de prueba (V) x Capacitancia (mF)}}$$

La medición es dependiente de la temperatura, por lo que es importante probar a una temperatura de referencia o registrar la temperatura.

El aislamiento en equipos de alto voltaje consiste de capas, cada una tiene su propia capacitancia y la resistencia de fuga asociada. Cuando el aislamiento se construye de esta manera, la meta es hacer cada capa de modo que la fatiga de voltaje se comparta por igual entre las capas. Cuando se descarga el aislamiento, la carga de cada capa decrecerá en forma igual hasta que ya no hay voltaje remanente.

Cuando hay una capa defectuosa entre dos capas buenas, su resistencia de fuga decrecerá mientras que la capacitancia probablemente permanece igual. Una

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

Las condiciones típicas de investigación práctica, realizada principalmente en generadores por Electricité de France, llegaron a los valores de mérito de la tabla siguiente. Esta técnica se desarrolló para generadores HV pero tiene aplicaciones en cualquier aislamiento de capas múltiples.

Tabla 20. Valores prácticos para generadores HV.

Valor DD (en mA V ⁻¹ F ⁻¹)	Condiciones del aislamiento
> 7	Malo
4 - 7	Pobre
2 - 4	Cuestionable
< 2	OK

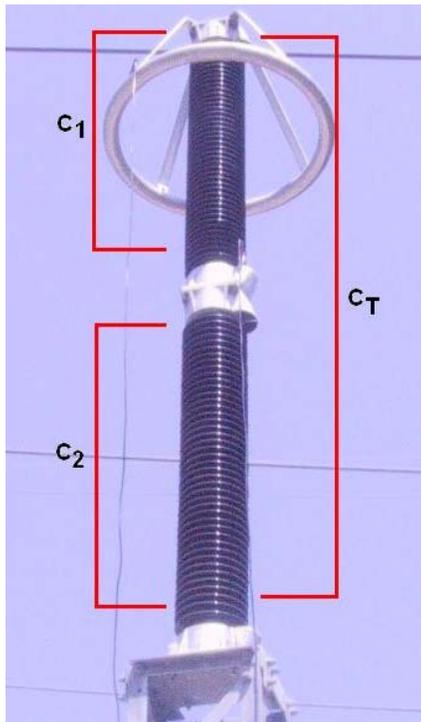
5.4 Análisis de pruebas realizadas en la subestación Cartagena 220 Kv.

Durante las visitas de campo realizadas a la subestación Cartagena 220 Kv, se observaron las pruebas de aislamientos realizadas por el grupo de mantenimiento de Tránselca S.A. E.S.P. a diferentes equipos de potencia, las cuales analizaremos a continuación.

A continuación se muestran los resultados obtenidos de una prueba de aislamiento sobre un descargador de sobretensión de la bahía del transformador Cartagena 04 220/66 Kv.

La conexión para la prueba de aislamiento en este descargador de sobretension se realiza entre cada uno de sus cuerpos, pero los resultados que muestran a

continuación corresponden a todo el cuerpo del descargador (C_T). Donde estas pruebas se realizaron con el aislamiento del equipo contaminado y después previamente se limpio y se repitieron las pruebas obteniéndose lo siguiente.



Las pruebas para este descargador se realizaron con el medidor de aislamiento BM25. Donde se conecta el medidor entre el extremo superior e inferior del descargador de sobretensión.

Tabla 21. Prueba de aislamiento descargador de sobretensión.

PRUEBA DE AISLAMIENTO			
AISLAMIENTO CONTAMINADO		AISLAMIENTO LIMPIO	
FASE	VALOR (Ω)	FASE	VALOR (Ω)
R	1.056 G Ω	R	15.2 G Ω
S	1.56 G Ω	S	10.5 G Ω
T	960 M Ω	T	2.84 G Ω

Figura 51. Descargador de sobretensión.
(Foto tomada por los autores).

Como se puede observar de la tabla anterior el aislamiento efectivamente mejora cuando el contaminante es completamente retirado de la superficie del aislador, donde podemos notar como los valores de la resistencia de aislamiento aumentan inmediatamente se limpia el equipo.

A continuación se presentan los resultados comparativos de las pruebas de aislamiento realizados sobre dos interruptores Siemens tipo 3SA2.

Estas pruebas se realizan entre las diferentes caramas de los interruptores, como en la siguiente imagen. También realizadas para un equipo contaminado y el otro no.

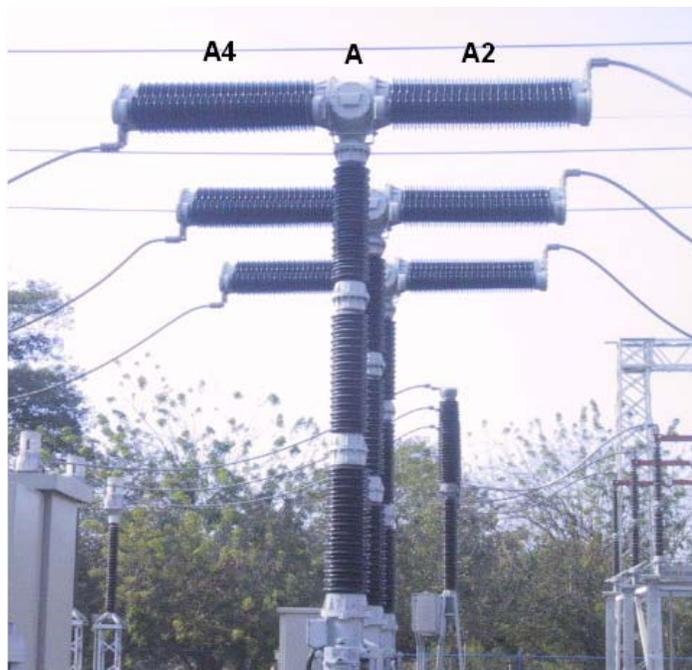


Figura 52. Interruptor Siemens tipo 3AS2 (Foto tomada por los autores).

Estas pruebas se realizan entre (A-A2, A-A4, A-Tierra). Se realizaron con dos clases de medidores de aislamiento uno es el BM25 de megger, el otro equipos es el M4000 de doble ingeniería. Para mas detalle de este ultimo equipo favor consultar el anexo C, los resultados se muestran a continuación.

Tabla 22. Prueba de aislamiento Interruptores Siemens tipo 3AS2

PRUEBA DE AISLAMIENTO					
AISLAMIENTO CONTAMINADO			AISLAMIENTO LIMPIO		
Interruptor 1			Interruptor 2		
	FASE	VALOR (Ω)		FASE	VALOR (Ω)
R	A-A2	222 M Ω	R	A-A2	475 M Ω
	A-A4	270 M Ω		A-A4	406 M Ω
	A-Tierra	300 M Ω		A-Tierra	3.34 G Ω
S	A-A2	218 M Ω	S	A-A2	573 M Ω
	A-A4	180 M Ω		A-A4	558 M Ω
	A-Tierra	352 M Ω		A-Tierra	1.81G Ω
T	A-A2	206 M Ω	T	A-A2	561 M Ω
	A-A4	150 M Ω		A-A4	525 M Ω
	A-Tierra	180 M Ω		A-Tierra	593 M Ω

Para este caso se puede observar como para el interruptor 1 que se encuentra contaminado se obtuvieron unos valores bajos de los niveles de aislamiento del orden aproximado de dos y tres veces menores que para el interruptor 2, esto es debido a que el interruptor 1 se encontraba totalmente contaminado por el contaminante que se describió previamente en el capítulo 4. En cambio en las pruebas del interruptor 2 si se obtuvieron unos valores buenos de aislamiento ya que este interruptor fue limpiado previamente a la prueba, por lo tanto notamos como la limpieza de los aisladores mejora notablemente los niveles de aislamiento de los equipos de potencia de la subestación Cartagena 220 Kv.

CONCLUSIONES

Las técnicas de lavado en caliente de subestaciones y líneas de transmisión, aplicándolas con un buen programa de mantenimiento preventivo en subestaciones con problemas de contaminación ambiental como los presentados en la subestación Cartagena 220 Kv, es la solución ideal cuando se requiera recuperar el aislamiento de los equipos de una subestación, ya que estas técnicas de lavado son muy eficientes, rápidas, segura y no se requiere la desenergización de ninguna clase de equipo de potencia de la subestación.

Llevando a cabo la práctica del lavado en caliente de subestaciones se puede asegurar que la subestación y las líneas de transmisión de energía eléctrica, mejoran la confiabilidad del sistema de potencia ya que no se tendrá la incertidumbre de fallas en las subestaciones y las líneas de transmisión por causa de la contaminación ambiental circundantes a estas.

Para llevar a cabo el lavado en caliente de subestaciones no solo es necesario contar con los recurso y los equipos, hay que tener en cuenta la experiencia de otras empresas a nivel nacional e internacional que llevan lavando aisladores hace varios años, además de esto se debe tener en cuenta las consideraciones técnicas de la resistividad del agua, la cual se debe monitorear debido a que esta varia notablemente con la temperatura, tener en cuenta las distancias de seguridad según el nivel de tensión en el cual se quiere lavar, y considerar las características de la boquilla para el lavado y finalmente contar con un grupo de mantenimiento altamente calificado para esta labor tan importante.

Se concluye a su vez que el lavado de subestaciones es con el fin de evitar el flameo en los aisladores y eliminar la contaminación, el continuo monitoreo de la

contaminación y la inspección nocturna por parte de los operadores de subestación son las pautas para determinar el tiempo de lavado de la misma.

Además podemos agregar las penalizaciones estipuladas por parte de la COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS (CREG) a que se ven expuestas las empresas transportadoras de energía al momento que unos de sus activos salga de servicio por contaminación en aisladores o fallas.

En cuanto a los equipos requeridos para el lavado de subestaciones hay que tener en cuenta la técnica de lavado que se desee implementar, considerando las especificaciones puntuales del caso y del contaminante que se presente en la subestación. Las características de los equipos de deben seleccionar de tal forma que se busque el mayor rendimiento en lavado sin dejar de tener en cuenta los costos de los equipos.

Los niveles de aislamiento en los equipos de potencia, se pueden medir con los medidores de aislamiento como lo es el BM25 de Megger y M4000 de doble ingeniería, los cuales son unos equipos de muy buenas especificaciones técnicas.

El control de los niveles de aislamiento en los equipos de potencia es de fundamental importancia en los programas de mantenimientos ya que las diferentes pruebas de aislamiento son la que indican el estado en el cual se encuentra el aislamiento del equipo ya sea deteriorado o en mal estado.

De las pruebas de aislamiento analizadas nos damos cuenta que efectivamente con las técnicas de lavado en caliente de subestaciones si se logra recuperar el aislamiento de los equipos, ya que el contaminante que se adhiere a los equipos es conductor en cierta medida y por tanto nos disminuye la resistencia de aislamiento de estos.

BIBLIOGRAFÍA

IEEE, Guide for Cleaning Insulators. IEEE Std 957-1987.

HARPER, Gilberto Enrique. Elementos de diseño de subestaciones Eléctricas, Editorial Noriega Limusa.

HARPER, Gilberto Enrique. Técnica de las Altas Tensiones Volumen I, Segunda preedición. Editorial Noriega Limusa.

MARTÍN. José Raúll. Diseño de subestaciones Eléctricas, Mc Graw Hill.

Universidad Tecnológica de Bolívar. Minor en Potencia, modulo de Alta tensión.

Universidad Tecnológica de Bolívar. Minor en potencia, modulo de Subestaciones y protecciones.

TRANSELCA. Conferencia equipos de potencia.

TRANSELCA. CIDET, Curso de Capacitación en Interpretación de planos de subestaciones de transmisión.

ANEXOS

ANEXO A. MEMORIAS DE COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO
SUBESTACIÓN CARTAGENA 220 KV.

ANEXO B. CATALOGO DE FABRICANTE DE TRANSFORMADOR
DE POTENCIAL TIPO CAPACITIVO.

ANEXO C. CATALOGO DE FABRICANTE DE EQUIPO M4000.