

Comportamiento del aislamiento bajo lluvia y contaminación.

Ensayos y normalización

Ingeniero Julio Rugeles Jones-u.i.s.

Parte I

Ensayos Bajo Lluvia

Introducción

Dada la necesidad de ofrecer al sector eléctrico y a la industria, la posibilidad de efectuar ensayos para los equipos de uso a la intemperie, bajo condiciones de lluvia y/o contaminación, a partir de 1985 se han realizado estudios en el laboratorio de Alta Tensión de la U.I.S., tendientes al montaje del equipo y accesorios necesarios para la puesta en funcionamiento de estos ensayos.

En el presente artículo se presenta entonces una conceptualización del fenómeno, una breve descripción de las normas aplicables en Colombia, el equipo y montaje utilizados, los resultados hasta ahora obtenidos y, finalmente, las alternativas a seguir para una propuesta de normalización para que, con el concurso de las empresas del sector y los fabricantes, se obtengan unas instalaciones óptimas con beneficios económicos para los futuros usuarios.

1. Conceptualización

El fenómeno de la lluvia es transitorio y sus consecuencias sobre el aislamiento son diferentes si se considera que el aislador está o no contaminado. Para el propósito de los ensayos bajo lluvia, la superficie del aislador debe estar libre de cualquier impureza ya sea inerte o conductora y además libre de grasas de tipo orgánico o inorgánico. Esto de por sí, establece un desacoplamiento entre el ensayo bajo lluvia y bajo contaminación. Bajo estas condiciones, la tensión de flameo a baja frecuencia (60 Hz) se reduce apreciablemente con referencia a la obtenida con el aislador seco. Esto se debe a la reducción de la distancia de fuga por efecto del puente que ocurre al estar completamente humedecida (capa de agua conductora) la parte superior o faldón superior del aislador. Por su mismo

diseño, el faldón inferior de los aisladores permanece seco, (el agua empieza a escurrir desde el borde del aislador y nunca se dirige hacia el pin). Entonces, esto quiere decir que prácticamente toda la tensión queda aplicada entre el borde del aislador y el pin. Conclusión: flameo a menor tensión por reducción de la distancia de aislamiento. Ver figura 1.

El proceso descrito hasta ahora, está muy bien definido, por cuanto la tasa de crecimiento de la tensión es rápida (≈ 2 kV / seg.) para unidades motorizadas, o aplicación manual (75% de la **tensión prospectiva** de flameo rápidamente y el resto en no más de 20 seg.). Para ensayos de la **tensión soportable** el problema es más complejo por cuanto ya se habla de tensión sostenida por un minuto (IEC) o por 10 segundos (ANSI).

La razón es la siguiente: cuando se aplica el voltaje a manera de rampa hasta que ocurra flameo, el fenómeno que lo produce es el rompimiento del aislamiento en el aire (de ahí que en estas pruebas hay necesidad de efectuar correcciones por condiciones ambientales).

Cuando el voltaje se sostiene, pueden ocurrir fenómenos de predescarga sobre la superficie húmeda del aislador, teniendo como consecuencia la alteración del procedimiento antes descrito. La conceptualización del proceso a la luz de observaciones experimentales no se ha llevado a cabo aún en el laboratorio.

2. Normas

- Norma ICONTEC 1285 basada en la norma ANSI C29-I/82: describe el montaje y los ensayos eléctricos que deben realizarse a los aisladores de potencia.
- IEEE - 4 Standard Techniques for High -Voltage Testing basado en la norma ANSI/IEEE std 4 - 1978: en la cual se enumeran los procedimientos generales para las pruebas de aisladores en condiciones húmedas y con contaminantes.

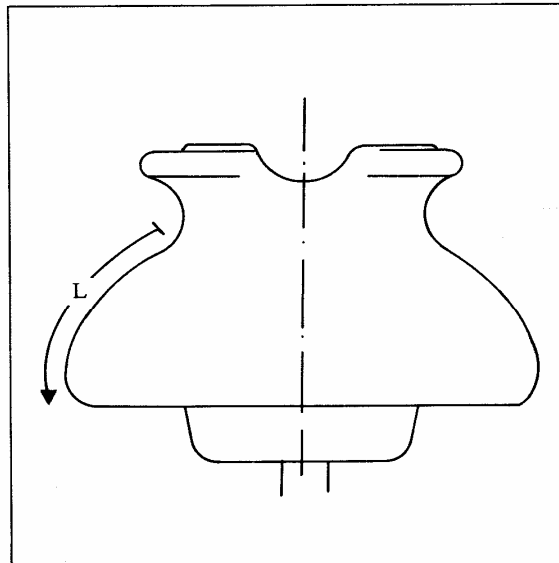


Figura 1. La distancia de Flameo se reduce en L por puente conductivo.

- Norma ICONTEC 739 basada en la norma ANSI C29-5/84: esta norma especifica los valores de flameo en húmedo para los diferentes tipos de aisladores tipo pin.
- Norma ICONTEC 1170 basada en la norma ANSIC29-2/83: en la cual se tratan especificaciones de flameo en condiciones húmedas, para las diferentes clases de aisladores tipo suspensión.

3. Instalaciones para ensayos

En la figura 2 se observa el esquema general de las instalaciones, cuyos accesorios aparecen detallados (con su disposición) en la figura 3.

El montaje se efectuó para llevar a cabo los ensayos de acuerdo con la norma ICONTEC vigente (numeral anterior).

El procedimiento recomendado para la ejecución del ensayo es como sigue:

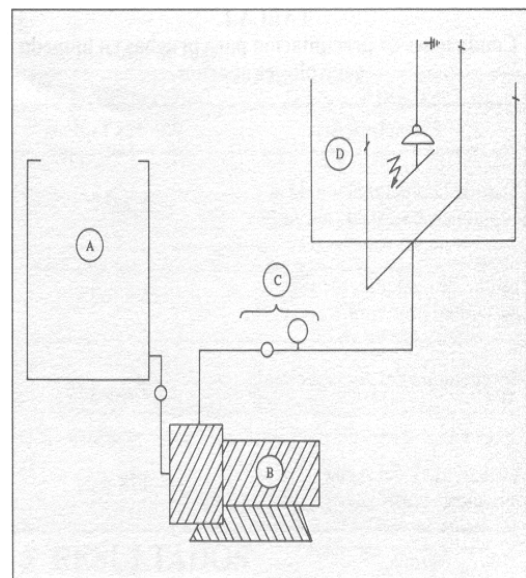


Figura 2. Sistema general del equipo para generación de lluvia.

- A - Tanque
- B - Motobomba
- C - Control precipitación (Válvula - Manómetro)
- D - Boquillas y accesorios para simular lluvia

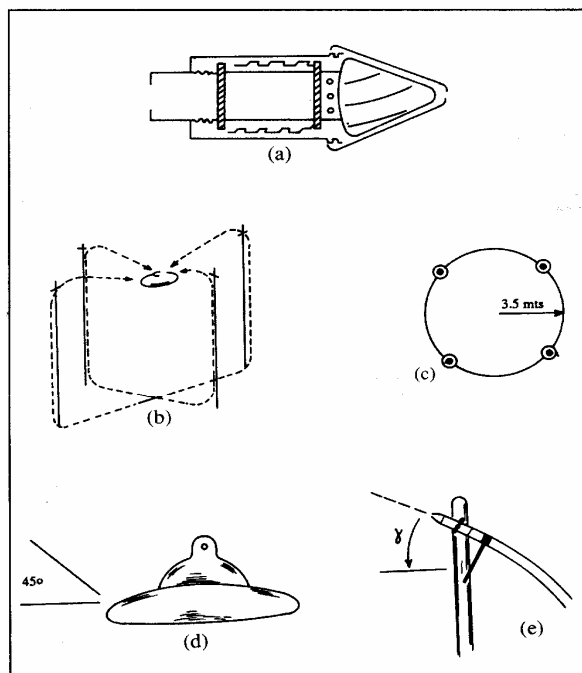


Figura 3. Accesorios y disposición de los mismos.

- a - Boquilla para simular lluvia
- b, c - Soportes, boquillas, separación
- d, e - Caída de la lluvia y ajuste vertical

- Humedecimiento del aislador.

El aislador a ensayar se rociará con agua de determinada resistividad, cayendo uniformemente en forma de gotas a una precipitación específica, sobre la superficie del aislador. El rocío se realizará por medio de boquillas, que podrán ser de cualquier tipo que cumpla las condiciones de precipitación de la tabla 1.

- Condiciones de precipitación

Estas condiciones son usadas por el método convencional estadounidense para pruebas con voltaje alterno y son adoptadas por la norma ICONTEC Tabla 1.

- Medida de la precipitación

La intensidad de la lluvia puede medirse por medio de recipientes que deberán tener una abertura de 100 a 750 cm². Deberá medirse la componente vertical y horizontal de la lluvia, no obstante se puede medir solo la componente vertical, considerando que la lluvia cae con un ángulo de 45°.

- Pluviómetros.

Utilizados para la medida de la precipitación, con área de 201 cm² que están dentro del rango establecido por la norma. Adicionalmente, para la medida de la cantidad de lluvia se requieren un cronómetro y una probeta de 500 cc.

- Conductímetro

Aparato utilizado para la medición de la conductividad del agua recogida en los recipientes.

- Termómetro

Termómetro capilar de 0°C a 100°C utilizado para medir la temperatura ambiente y la temperatura de la muestra recolectada.

La norma requiere un período de humedecimiento de mínimo un minuto antes de la aplicación de la tensión. El sistema de la figura 2 y sus accesorios y disposiciones indicados en la figura 3, se diseñaron para cumplir con las normas descritas anteriormente.

4. Resultados

Las instalaciones descritas en el numeral anterior se pueden utilizar para ensayos en aisladores tipo pin, de línea tipo poste y aisladores de suspensión, aún cuando en este último caso se probó solo una mitad. Por la disposición de las boquillas se podrían ensayar hasta tres aisladores en cadena (tipo línea de 34.5 kV). En las tablas 2 y 3 se enumeran algunas cifras obtenidas sobre aisladores tipo pin y tipo suspensión.

TABLA 1 . Condiciones de precipitación para pruebas en húmedo con voltajes alternos

Características	Valores típicos
Tasa de la precipitación de la componente vertical (mm/min)	5±0.5
Límite de cualquier medida individual	5±1.25
Temperatura del agua recogida (°C)	T _{amb} ± 15
Resistividad del agua recogida (Ωm)	178±27

TABLA 2. Datos correspondientes a pruebas realizadas sobre aisladore clase ANSI 55-4

Resistividad del agua a 20°C (Ω m)	Precipitación	Muestra No.	Tensión de flameo (kV)
83.77	4.5	1	33.8±1.8
83.77	4.5	2	34.7±1
83.77	5.25	3	34.8±1.5

TABLA 3. Datos correspondientes a pruebas realizadas sobre aisladores clase ANSI 52-4

Resistividad del agua a 20°C (Ω m)	Precipitación (mm/min.)	Muestra No.	Tensión del flameo (kV)
80.68	4.55	1	42.9±1.8
80.68	5.00	2	45.1±0.3

5. Resultados

5.1 Precipitación

La rata de precipitación de 5 mm/min. Se considera alta en relación con la práctica Europea. Ahora bien, la influencia de la variación de la precipitación sobre el voltaje de flameo se trató de investigar dando como resultado la figura 4. Aparentemente, una reducción de la rata de precipitación conduciría a una tensión de flameo mayor. Por falta de una desagregación de otros factores, no es posible obtener una conclusión definitiva. De la conceptualización anterior no debería de experimentar variación (recordar que la distancia de fuga en el faldón inferior permanece constante). Se deja esta gráfica como punto de discusión (variación de la capa conductora y por ende de la resistividad).

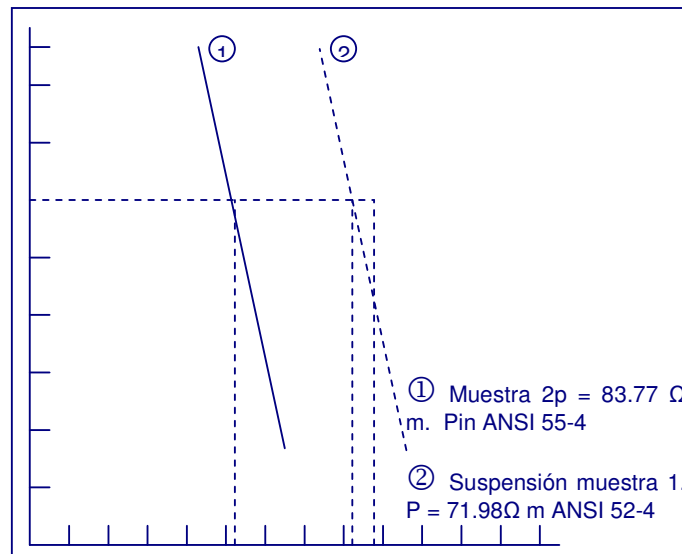


Figura 4. Precipitación vs. voltaje de flameo

5.2 Conductividad del agua

La variación en la conductividad (resistividad) del agua sí presenta una marcada influencia sobre la tensión de flameo. Esto se debe a que al aumentar la resistividad (disminuir la conductividad), la caída de tensión a través de la capa conductora (ver figura 1), es mayor, o sea que la parte de la tensión a través de la parte seca (faldón inferior) es menor. Conclusión: se necesita aplicar mayor tensión para obtener flameo.

Se pretendía, al efectuar los ensayos con agua de tubería, obtener valores de flameo que estuvieran dentro de la tolerancia permitida por la norma (-8% del valor

declarado), pero no fue así. Es necesario desmineralizar el agua para obtener la resistividad apropiada.

5.3 Fuente de potencia

Se utilizó un transformador elevador de C.A. de las siguientes características: potencia 20 kVA. tensión primaria regulada de 0 a 500 V. tensión secundaria regulada de 0 a 300 Kv r.m.s.

No se observaron problemas de regulación. Para la investigación sobre voltajes de soporte habría que analizar su comportamiento.

6. Propuesta de normalización

La norma ICONTEC vigente, aplicable a los ensayos bajo lluvia, la ANSI C29, contempla la obtención de un valor de la tensión de flameo como se explica en el numeral 3. La norma IEC 383, no contempla esta figura de ensayo y propone la ejecución de la tensión de soporte (withstand). Plantear un cambio de norma, sería cambiar de ensayo. Se propone entonces continuar aplicando la norma ICONTEC, para cuyo efecto el montaje descrito requeriría únicamente un desmineralizador como equipo complementario para ofrecer la correspondiente homologación.

Bibliografía

Las figuras y tablas de resultados han sido tomadas de los siguientes proyectos de grado:

Parte II

Ensayos bajo contaminación

Introducción

El fenómeno de la deposición de agentes contaminantes sobre el aislamiento externo, ha sido tratado en el país desde el punto de vista teórico, con el fin de establecer parámetros de diseño en áreas consideradas de posible riesgo o alto riesgo. La inexistencia de sitios para ensayo en el país ha motivado el diseño y la construcción de una cámara para ensayos de aislamiento bajo contaminación salina o de estrato sólido. Se plantea en este reporte, la descripción de las instalaciones, ensayos y resultados hasta ahora obtenidos y las necesidades para ensamblar un laboratorio de pruebas autosuficiente para ensayos a nivel de distribución (13.2 y 34.5 kV).

1. Descripción del proceso de contaminación

Aún cuando ya existe numerosa literatura sobre el tema (ver el excelente boletín publicado por el Ing. Adolfo Cano H.), vale la pena efectuar algunas anotaciones en relación con las pruebas que se efectúan en el laboratorio.

1.1 Contaminación de estrato sólido.

Todo aislamiento externo está sometido al efecto de agentes contaminantes (polvos, humos, cenizas, etc.). Ahora bien, la deposición de estos agentes sobre la superficie del aislador es de por sí muy heterogénea. Por ejemplo: si la deposición de las cenizas provenientes de una planta de cemento, fuera únicamente por gravedad, entonces se contaminaría exclusivamente el faldón superior. Sin embargo, la acción de los vientos y de las fuerzas de tipo electrostático, distorsiona todo el proceso y por consiguiente no se contamina homogéneamente. Un

Arias O., Juan O. y Luna Edgar. Accesorios necesarios para la prueba de aisladores en húmedo y con contaminantes. Diseño y montaje. Bucaramanga, 1987, 72 Págs. Tesis. Universidad Industrial de Santander.

Rincón C., Raúl J. y Cantillo G., Ernesto. Aislamiento en ambientes contaminantes. Ensayo y normalización. Bucaramanga 1988, 84 Págs. Tesis. Universidad Industrial de Santander.

Nota

El anterior estudio ha sido financiado con fondos de la coordinación de investigación de la facultad de ciencias Físico-mecánicas de la Universidad Industrial de Santander.

caso aparte se presenta con el crecimiento de hongos. El autor ha visto aisladores cubiertos totalmente por una capa vegetal, parecida al musgo y en este caso si se obtiene un cubrimiento total.

Para los ensayos de laboratorio, el contaminante recubre totalmente la superficie aislante.

1.2 Contaminación salina

La sal marina se deposita sobre los aisladores, por efecto de la brisa marina, la cual tiene un alto contenido de sal, especialmente donde existe oleaje fuerte, por rompimiento contra las rocas. Este tipo de contaminación es propia entonces de las regiones costeras y va disminuyendo a medida que nos alejamos del mar, hasta desaparecer completamente en el interior. En este caso, la deposición puede ser más homogénea (neblina o rocío) y por consiguiente, los ensayos son una reproducción de estas condiciones críticas para el aislamiento.

1.3 La conducción de corriente ohmica en el aislamiento contaminado

Para que exista conducción de corriente eléctrica de carácter óhmico es condición necesaria y suficiente que existan portadores. En el caso de la contaminación estos portadores son de tipo electrolítico y por consiguiente, necesita un agente electrolítico dentro de los componentes del contaminante. Esto condiciona el efecto a la presencia de sales y de agua.

El proceso de conducción es diferente ya sea que se trate de deposición por estrato sólido o por sal marina.

Supongamos que el aislador se contamina por estrato sólido, pero está seco. Resultado: no existe conducción, corriente ≈ 0 .

En presencia de niebla o rocío, el aislador se humedece y empieza a conducir hasta alcanzar un valor máximo de la corriente. Posteriormente, la parte superior del aislador empieza a lavarse y la corriente disminuye. (resistividad del agua mayor que la del electrolito, que va desapareciendo). El proceso se repite si el agente contaminante persiste. Figura 5.

Para el caso salino, el aislador conducirá permanentemente ya que siempre estará humedecido debido a la neblina o brisa marina, entonces la corriente, dadas ciertas condiciones de tensión aplicada, permanecerá constante. Figura 6.

La influencia del faldón inferior en estos procesos, se discutirá a la luz de las observaciones sobre los ensayos realizados en el laboratorio.

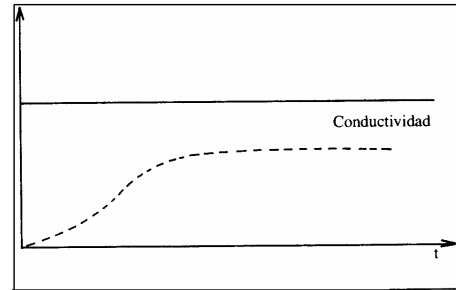


FIGURA 6. Variación de la conductividad como función del tiempo de humedecimiento. Contaminación salina.

2. Instalaciones de prueba

2.1 Cámara de ensayo

Se construyó una cámara con paredes de plexiglas de 1.8 m de altura y de ancho 1.2 m. Esta cámara se encuentra completamente aislada de tierra, esto es para evitar fugas de corriente hacia las paredes de la cámara durante los ensayos. Además permite la utilización de bujes de baja tensión para las conexiones eléctricas y una optimización de las distancias de aislamiento.

Detalles de la cámara y del montaje para los ensayos descritos en este reporte, se encuentran en las figuras 7a, 7b y 7c.

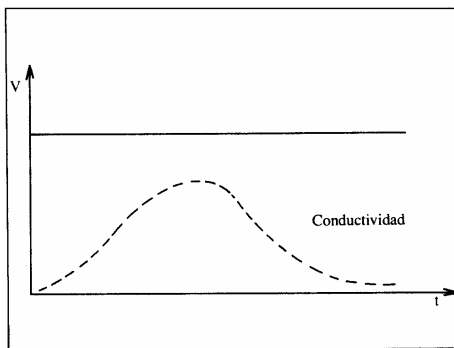


FIGURA 5. Variación de la conductividad como función del tiempo de humedecimiento. Estado sólido.

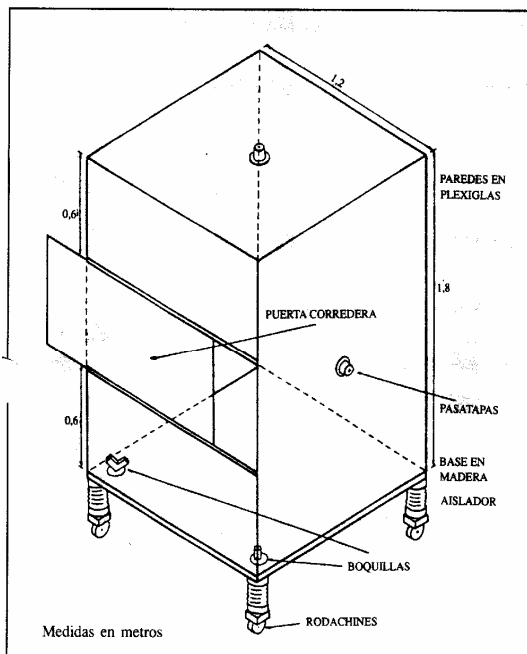


Figura 7a. Cámara de ensayos.

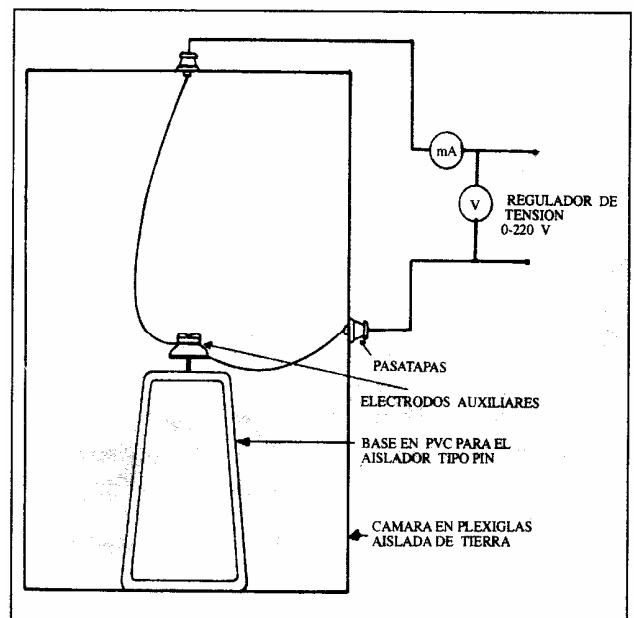


Figura 7b. Ensayo del aislador pin a tensión reducida.

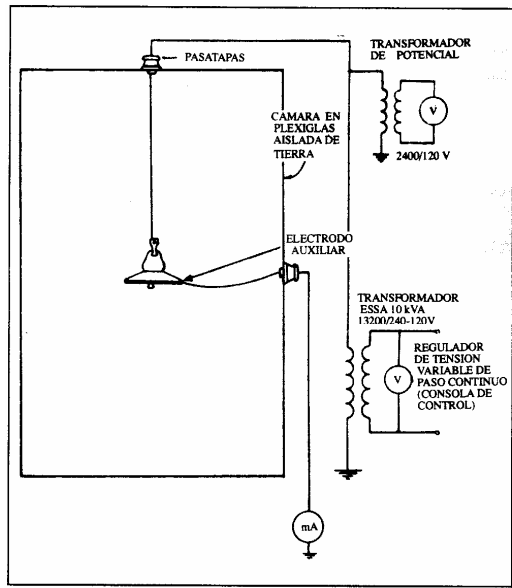


Figura 7c. Ensayo del aislador de suspensión con alta tensión (1000 V - 2000V).

2.2 Boquillas

Se construyeron unas boquillas que cumplan con las especificaciones y tolerancias de la norma. Figura 8.

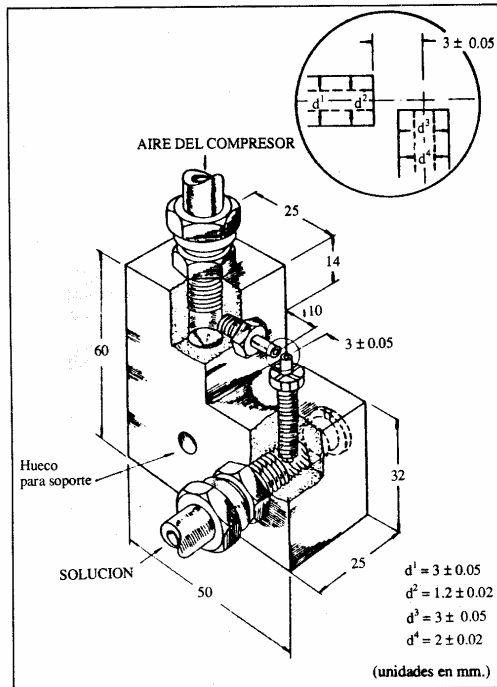


Figura 8. Boquilla usada en pruebas de contaminación.

2.3 Sistema para la generación de la neblina

Se observa en la figura nro. 9.

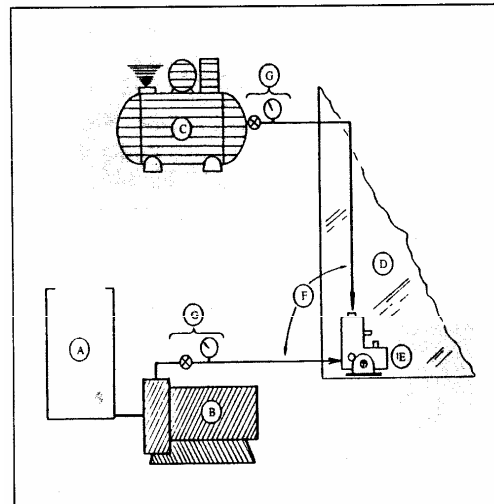


Figura 9. Sistema general usado para la generación de niebla.

A - Tanque, B - Motobomba, C - Compresor, D - Cámara, E - Boquilla (son cuatro), F - Accesorios de conducción, G - Control de salida de aire y solución.

2.4 Conductímetro

Para la determinación de la resistividad y conductividad de la solución preparada y de las muestras obtenidas al lavar los aisladores se usó el conductímetro Yellow Springs Instrument, modelo YSI 35.

La resistividad del líquido es la resistencia eléctrica del líquido entre los dos electrodos de la celda dividida por la constante K de la celda. La conductividad es el recíproco de la resistividad.

La constante K es una función del área de los electrodos, la distancia entre ellos y el tamaño de los electrodos. Estos elementos son controlados en su fabricación dando una exactitud de $\pm 1\%$.

La celda disponible tiene las siguientes características:

Celda de inmersión	YSI No. 3402
Constante de la celda	$K = 0.1 / \text{cm}$
Material	Pirex 7740
Longitud máxima	6 ¼ "
Profundidad de la cámara	2 ⅜ "
Diámetro interno	13/16"

Los electrodos son una aleación de platino de iridio cubiertos en platino negro y soldados en oro y platino a los conductores.

Especificaciones del instrumento:

Fuente requerida 115V $\pm 10\%$, AC.; 60 Hz; 0.1 A ó 230V $\pm 10\%$, AC.; 50 Hz; 0.05 A.

Rango	Lectura máx	Resolución
0 – 20 μs	19.99	0.01 μs
0 – 200 μs	199.90	0.1 μs
0 - 2000 μs	1999.00	1 μs
0 –20 ms	19.99	0.01 ms
0 – 200 ms	199.90	0.1 ms
0 – 2000 ms	1999.00	1 ms

Calibración: las celdas se calibran para una exactitud de $\pm 1\%$ por medio de una solución normalizada. La norma ASTM Standard ha elegido la solución de KCl 0.01.

2.5 Transformador

Las características de la placa son:

Monofásico	
Potencia	10kVA.
Voltaje primario	13200 V
Voltaje secundario	240/120 V
Corriente primaria	0.76 A.
Corriente secundaria	41.7 A.
Frecuencia	60 Hz.

Utilizando el regulador de la consola de mando del transformador elevador de C.A. del laboratorio de alta tensión, se reguló la tensión de entrada al secundario entre 0 y 240 V.

2.6 transformador de potencial

Se utilizó para medir las tensiones iguales o superiores a 1000 V. El transformador es marca G.E., y su relación nominal es de 2400/120.

2.7 Electrodo auxiliares

Para los ensayos se usan electrodos auxiliares que consisten en una tira delgada de aluminio de ancho de 5 mm.

Los electrodos en el aislador de pin se ubican en el cuello y en el borde inferior del faldón. Para el aislador de suspensión se toma como electrodo auxiliar superior el soporte metálico y el electrodo auxiliar inferior se sitúa al final del faldón. El área del aislador escogida para la ubicación de los electrodos facilita el cálculo del factor de forma y a la vez sobre esta área el contaminante se deposita de manera uniforme, siendo esta una de las condiciones de los ensayos (que exista una capa uniforme). Las figuras 10a y 10b indican la posición de los electrodos auxiliares.

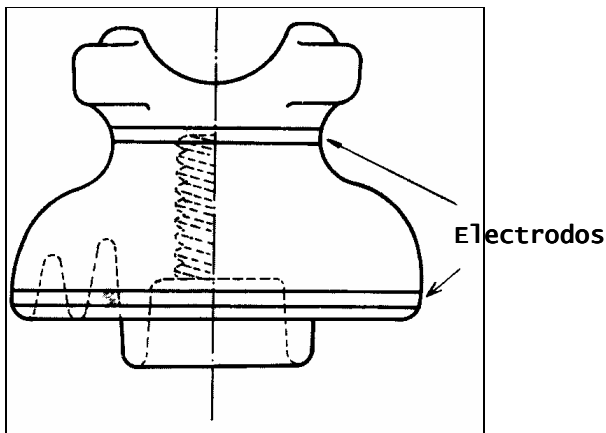


FIGURA 10a. Ubicación de los electrodos auxiliares del aislador tipo suspensión clase ANSI 52-5

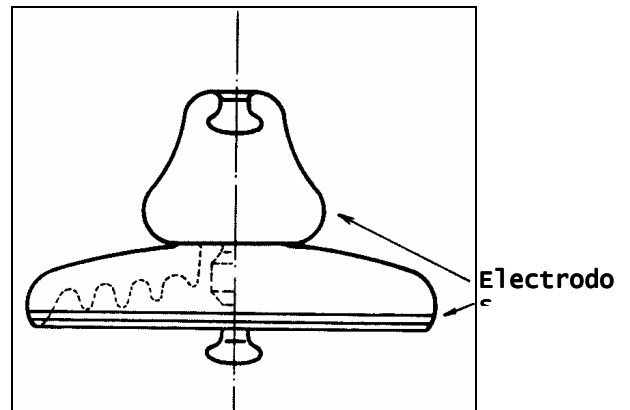


FIGURA 10b. Ubicación de los electrodos del aislador tipo pin clase ANSI 55-4

3. Ensayos y procedimientos

3.1 Muestras utilizadas

Los ensayos se realizaron sobre dos tipos de aisladores:

- De porcelana, tipo pin, clase ANSI 55-4
- De vidrio, tipo suspensión, clase ANSI 52-5.

Las características relevantes de los aisladores utilizados son:

Aislador tipo pin, material: porcelana.

Clase ANSI	55-4
Tensión recomendada kV	13.2
Distancia de fuga mm.	229
Distancia de fuga entre electrodos auxiliares	60mm

Aislador de suspensión, material vidrio.

Clase ANSI	52-5
Distancia de fuga mm.	292
Distancia de fuga entre electrodos auxiliares	105mm

Utilizando los electrodos auxiliares se elimina la influencia del faldón inferior. Se facilita así la determinación del factor de forma y se hace coincidir el área lavada para la determinación de la **Densidad del Depósito Equivalente de Sal**, con el área sometida a tensión. Figura 10a y 10b.

3.2 Preparación de la mezcla contaminante

El material contaminante consiste de dos componentes separados, uno conductivo y otro inerte. La suspensión contaminante tiene la siguiente composición:

- 100 gramos de tierra diatomacea (kieselguhr).
- 10 gramos de dióxido de silicio en partículas de 2 a 20 μm .
- 1000 gramos de agua destilada.
- Contenido de sal (gramos) variable.

La conductividad de esta suspensión se ajusta adicionando una apropiada cantidad de sal (cloruro de sodio), para obtener la conductividad de la capa de referencia elegida de la tabla 4 (tomada de la IEEE Standard Techniques for high Voltage Testing).

TABLA 4. Conductividades recomendadas IEEE.

Conductividad de la capa con referencia a $20^{\circ}\text{C} \pm 15\% \mu\text{S}$	5	10	15	40
Valores de conductividad correspondiente a la suspensión preparada a $20^{\circ}\text{C} \mu\text{S/cm}$.	1500	3000	6000	12000

TABLA 5. Rangos de ESDD para diferentes grados de contaminación

ESDD (mg/cm^2)	Grados de contaminación
0 – 0.03	Muy ligera
0.03 – 0.06	Ligera
0.06 – 0.1	Pesada
0.1 mayores	Muy pesada

3.3 Preparación de la muestra

El aislador antes del ensayo se debe limpiar cuidadosamente con agua corriente y fosfato de trisodio (Na_3PO_3) hasta que los trozos de grasa se remuevan completamente.

Después del secado el aislador se contamina utilizando el método de inmersión dentro de la mezcla. Posteriormente se deja nuevamente secar.

3.4 Determinación de la densidad del depósito equivalente de sal, esdd

Una vez contaminado el aislador, se procede a remover la capa de contaminante de un área específica del aislador, esto se hace por vertimiento de agua destilada y utilizando un cepillo de cerdas finas. Se recoge en un recipiente esta solución, se mide su conductividad, se corrige a 20°C. Conociendo los datos del área lavada, del volumen de la solución y de su conductividad, se obtiene el ESDD, de acuerdo con el procedimiento siguiente:

Con la conductividad se obtiene el valor de la resistividad que corresponde a su recíproco.

Utilizando ábacos normalizados o la fórmula (1) obtenida a partir de ellos, se obtiene la salinidad de la solución:

$$.. S = 10 \exp \left[\left(\frac{0.741076774 -}{\log_{10} R} \right) / 0.955 \right] \quad (1)$$

Donde:

S Valor de gramos de sal por litro de agua de la solución

R Resistividad en Ωm corregida para 20°C

Aplicando la fórmula 2, se obtiene el ESDD.

$$ESDD = \frac{S * V}{A} \quad (2)$$

Donde:

A Área de la superficie lavada en cm^2

V Volumen del agua recogida en cm^3

S Valor en gramos de sal por litro de agua de la solución

TABLA 6. Variables involucradas en la obtención del depósito equivalente de sal (ESDD)

Aislador tipo pin. Clase ANSI 55-4, material porcelana, área de lavado: 391.8 cm^2

Cantidad de sal: 3.5 g/l					
Conductividad de la solución: 5096.6 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 20°C					
Conductividad $\mu\text{S}/\text{cm}$	Temperatura °C	Volumen recogido cm^3	Resistividad Ωm 20°C	Salinidad g/l	ESDD mg/cm^2
63.6	27.0	208.0	182.5472	0.026564	0.01360
64.9	27.5	201.5	180.6626	0.02592	0.01332
Cantidad de sal: 10 g/l					
Conductividad de la solución: 14203.3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 20°C					
164.7	26.5	175.0	69.7936	0.07013	0.03131
246.0	26.0	153.0	46.2602	0.10785	0.04210
Cantidad de sal: 40 g/l					
Conductividad de la solución: 41435 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 20°C					
765.0	26.5	155.8	15.0261	0.34989	0.13907
758.0	26.5	174.0	15.1649	0.34654	0.15383

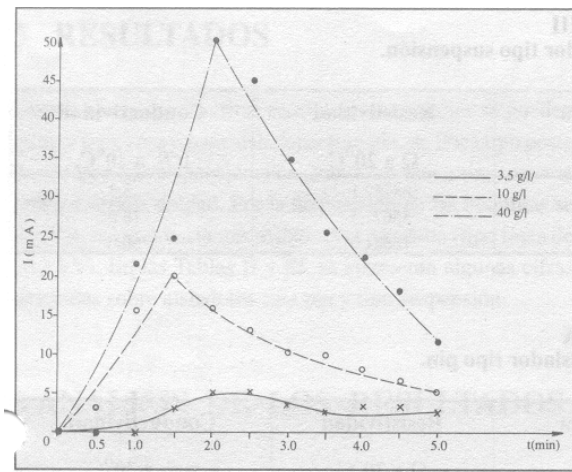


Figura 11a Corriente óhmica (valor r.m.s) vs Tiempo de humedecimiento. Aislador tipo pin ANSI 55 - 4.

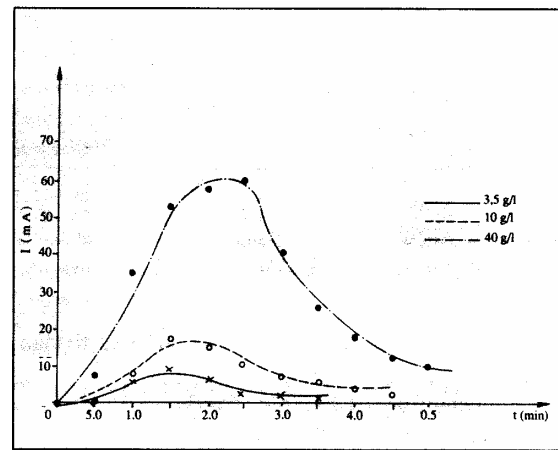


Figura 11b. Corriente óhmica (valor r.m.s) vs. Tiempo de humedecimiento. Aislador tipo suspensión ANSI 52 - 5.

TABLA 7. Variables involucradas en la obtención del depósito equivalente de sal (ESDD)

Aislador tipo suspensión. Clase ANSI 52-5, material vidrio, área de lavado: 544.36 cm²

Cantidad de sal: 3.5 g/l Conductividad de la solución: 5096.6 μS/cm a 20°C					
Conductividad μS/cm	Temperatura °C	Volumen recogido cm ³	Resistividad Ωm 20°C	Salinidad g/l	ESDD mg/cm ²
88.7	27.0	202.0	130.8906	0.03632	0.01348
141.8	27.5	168.7	82.6869	0.05873	0.01820
Cantidad de sal: 10 g/l Conductividad de la solución: 14203.3 μS/cm a 20°C					
264.0	26.0	176.5	43.1061	0.11613	0.03765
310.0	26.0	162.0	36.7097	0.13738	0.04088
Cantidad de sal: 40 g/l Conductividad de la solución: 41435 μS/cm a 20°C					
750.0	26.5	220.6	15.3267	0.34272	0.13888
1088.0	27.0	203.2	10.6710	0.50061	0.18687

TABLA 8. Conductividad para el aislador tipo suspensión

Contenido de sal en la solución g/l	I _{max} mA	Resistencia Ω	Resistividad Ω a 20°C	Conductividad μS. A 20°C
3.5	5.3	40.000	188752.1	5.3
10.0	17.8	11.797	55671.3	18.0
40.0	60.0	3.500	16681.0	60.0

Factor de forma: 0.2436 (ver apéndice)

Tabla 9. Conductividad para el aislador tipo pin

Contenido de sal en la solución g/l	I _{max} mA	Resistencia Ω	Resistividad Ω a 20°C	Conductividad μS. a 20°C
3.5	5.0	24.000	171989.4	5.8
10.0	21.5	5.581	39997.5	25.0
40.0	50.0	2.400	17198.9	58.0

Factor de forma: 0.16201 (ver apéndice)

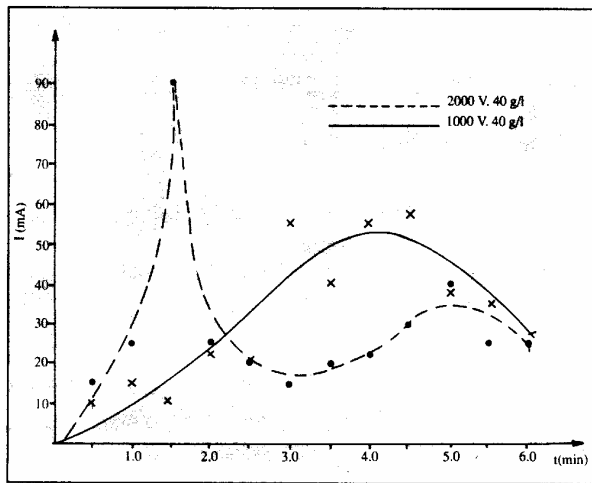


Figura 12a. Corriente óhmica (valor r.m.s.) vs. Tiempo de humedecimiento (min.). Aislador tipo pin ANSI 55-4

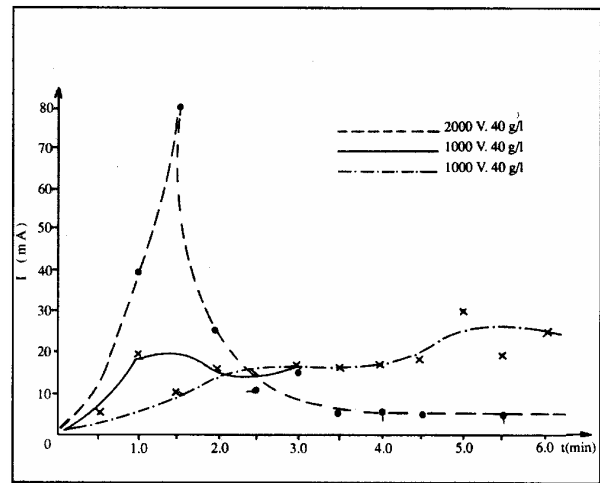


Figura 12b. Corriente óhmica (valor r.m.s.) vs. Tiempo de humedecimiento (min). Aislador tipo suspensión ANSI 52-5.

3.5 Selección del grado de contaminación

La concentración de sal en la solución contaminante, debe estar acorde con el grado de contaminación deseado. Ya es práctica universal definir este grado de contaminación por el valor de ESDD, de acuerdo con la tabla V.

3.6 Selección del voltaje aplicado

DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD DE LA CAPA CONTAMINANTE

De acuerdo con las recomendaciones de la norma, no se debe aplicar una tensión mayor de 2 kV por cada cm de la distancia de fuga.

DETERMINACIÓN DE LAS CORRIENTES OHMICAS EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE HUMEDECIMIENTO

Utilizando los electrodos auxiliares (cinta de aluminio), se aplicaron dos tensiones: 1000 y 2000 V. Se pretendía estudiar el comportamiento de la corriente al duplicar la tensión, pero a una tensión no tan baja como para no permitir la formación de las bandas secas, ni tan alta como para producir flameo.

PROCEDIMIENTOS PARA LOS ENSAYOS

- Se contamina el aislador
- Se determina su ESDD (muestra alterna)
- Se introduce a la cámara
- Se aplica tensión y se deja en el valor asignado para la prueba
- Se inicia la neblina
- Se registran valores de corriente a intervalos constantes, hasta que la corriente haya disminuido monótonamente.

TABLA 10. Línea de fuga específica vs. corriente máxima de fuga.

Tensión kV	Línea de fuga específica mm/kV	Corriente máxima 40 gr NaCl/l	Aislador
2	30	90	Pin
2	52.5	80	Suspensión
1	60	50	Pin
1	105	25	Suspensión
8	28	<2,5	Pin
6	48.7	40	Suspensión
2	114.5	<2,5	Pin
2	146	<2,5	Suspensión

Para los aisladores tipo pin la tensión se aplica entre los electrodos auxiliares y para los de suspensión a través de todo el aislador. Los datos de corriente corresponden a las figuras 12a y 12b.

4 Resultados

4.1 Determinación del esdd

Los resultados se encuentran tabulados en las tablas 6 y 7. Para cada tipo de aislador (pin y suspensión) se utilizaron dos muestras.

4.2 Determinación de la conductividad de la capa

Tensión aplicada: aislador tipo pin 120V, aislador tipo suspensión 210 V.

Con los registros de corriente, se obtuvieron las gráficas de las figuras 11a y 11b.

A partir de los valores máximos de cada ensayo se procede a calcular la conductividad de la capa para cada nivel de contaminación. Con la resistencia (obtenida de los valores de tensión y corriente máximos de cada ensayo), dividida por el factor de forma se obtiene la resistividad, su recíproco será la conductividad de la capa contaminada.

Los resultados se muestran en las tablas 8 y 9 respectivamente para cada aislador.

4.3 Ensayos con tensiones de más de 1000 y 2000 v

Para este tipo de ensayos se prefirió trabajar con niveles de contaminación ligera y pesada, por consiguiente se contaminaron los aisladores con soluciones a las que se agregaron 10 y 40 gramos de sal por litro de solución.

En estas pruebas las tensiones se seleccionaron para estudiar el crecimiento de la corriente, por ello se duplicó la tensión de 1000 a 2000 V (fase-tierra), y comprobar si era aritmético el comportamiento. Asegurando a la vez la formación de bandas secas sin que exista flameo.

Dentro de este tipo de ensayos se observó la formación de bandas secas con mayor intensidad en la contaminación pesada y en los aisladores tipo pin, desapareciendo este fenómeno después de tres minutos.

Las figuras 12a y 12b muestran el comportamiento de la corriente en cada aislador.

4.4 Línea de fuga específica

La línea de fuga específica esta dada por la relación entre la longitud de la línea de fuga (distancia entre electrodos), y la tensión aplicada.

Para obtener diferentes valores de máxima corriente en función de la línea de fuga específica se hicieron algunas medidas aplicando una tensión entre los electrodos auxiliares y a través de todo el aislador. Los resultados se presentan en la tabla 10.

5 Algunas observaciones sobre los resultados

5.1 Determinación del esdd

Se comprobó la validez de la metodología, por cuanto se correlaciona el contenido de sal para la solución contaminante, contra el ESDD obtenido para ambos tipos de aisladores.

5.2 Determinación de la conductividad de la capa

También se comprobó la correlación entre la conductividad de la capa y el contenido de sal en la solución contaminante. Para ambos tipos de aisladores debe ser la misma (existe una variación para 10 g/l, que se debe aclarar al efectuar más ensayos).

5.3 Línea de fuga específica

De observaciones sobre la tabla 10 se obtiene lo siguiente:

Para el aislador de pin: considerando una línea de fuga específica de 28 mm/kV y contaminación pesada, tenemos entre electrodos auxiliares una corriente máxima de 90 mA. y a través de todo el aislador una corriente menor de 2.5 mA (observación mínima legible en el multímetro). Esto quiere decir que el aislador tipo pin 55-4 conlleva una distancia de fuga específica suficiente para su utilización en una línea de 13,2 kV, con regulación de 5%, para todo tipo de contaminación.

Para el aislador tipo suspensión: presupone una tensión máxima de 2 kV para contaminación plena.

Nota

La Electricité de France tiene como valor de diseño para contaminación plena en subestaciones, una distancia de fuga mínima de 25 mm/Kv.

6. Conclusiones

PROPUESTA SOBRE UNA POSIBLE NORMALIZACIÓN DEL AISLAMIENTO BAJO CONDICIONES DE CONTAMINACIÓN PARA EL MEDIO COLOMBIANO

Como se puede observar, no se han efectuado hasta ahora ensayos de flameo o de tensión soportable (withstand). No existen valores normalizados para estos parámetros y si se encuentran en la literatura son valores optados por determinadas empresas de energía. El estudio se concentra en la determinación de la línea de fuga específica porque creemos que este es el parámetro de diseño más útil cuando se trata de contaminación. Si se logra definir una determinada línea de fuga específica para cada nivel de tensión y de acuerdo con el grado de contaminación del área definida en ESDD, en primer lugar se reducirán las pérdidas en gran porcentaje y se eliminará en gran medida la probabilidad de flameo.

7. Proyecciones de este estudio hacia el futuro

Como se advirtió en la parte I, este estudio, hacia la fecha, ha contado con el apoyo interno de la Universidad. Al dar a conocer estos resultados, pretendemos despertar el interés y el apoyo del sector eléctrico en general. Hemos circunscrito los montajes al nivel de distribución, por cuanto ya a niveles de 115 kV y superiores, el costo y el volumen de las instalaciones de prueba se magnifican (ver documentos pertinentes de la asesoría Italiana). Para optimizar los ensayos se necesitarían unas instalaciones autosuficientes con equipos propios puesto que se ha tenido que contar con la colaboración de diferentes departamentos de la Universidad. Adicionalmente, se carece de accesorios más apropiados como boquillas plásticas en su totalidad para los ensayos de niebla salina, compresor de especificaciones más ajustadas, agitadores motorizados para las mezclas, etc.

Finalmente el autor agradece cualquier comentario o sugerencia sobre este proyecto, el cual se puede hacer llegar al departamento de Ingeniería Eléctrica.

Apéndice

Determinación de la resistencia del contaminante.

Si se tiene un aislador contaminado como el de la figura 13 y se toma una parte cualquiera, la resistencia de un segmento se determina por la siguiente expresión:

$$RAB = p * \frac{1}{s * b} [\Omega] \quad (1)$$

Donde:

- p Resistividad volumétrica del material localizado entre los puntos A y B, [Ω, m]
- s Espesor o sección dependiendo del tipo de contaminante, [m]
- b Ancho, [m].
- l Longitud, [m].

p/s depende de las características propias del contaminante y l/b depende de la geometría del aislador.

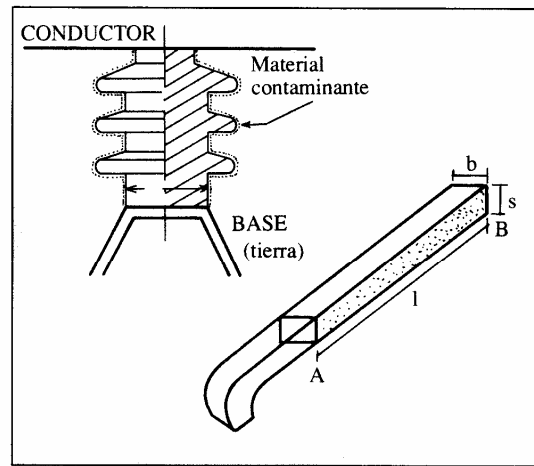


Figura 13 . Vista frontal y sección transversal de un aislador contaminado.

Definiendo la resistividad superficial:

$$p' = p/s \quad (2)$$

$$RAB = p' * l/b [\Omega] \quad (3)$$

$$\text{siendo } \delta' = l/p' [s] \quad (4)$$

δ' Conductividad superficial en siemens

Esta expresión es válida cuando la cantidad del contaminante es uniforme a lo largo del aislador.

El valor del diámetro (D) es una función de la distancia L por tanto, la resistencia de un elemento diferencial es:

$$\partial r = p' \frac{\partial x}{\pi * D(x)} [\Omega] \quad (5)$$

Donde ∂x es un diferencial de longitud. Obteniendo la expresión general para el aislador en función de las características geométricas se tiene:

$$R_{total} = p' \int_0^L \frac{\partial x}{\pi * D(x)} [\Omega] \quad (6)$$

Donde:

- D(x) Diámetro del aislador en función de la longitud de la trayectoria de fuga
- L Longitud total medida sobre la superficie del aislador sometida a la diferencia de tensión (línea de fuga)

La integral

$$F = \int_0^L \frac{\partial x}{\pi * D(x)} \quad (7)$$

El cálculo del factor de forma de los aisladores utilizados se efectuó por integración numérica.

Reemplazando se tiene que:

$$R = F * p' [\Omega] \quad (8)$$

$$\delta' = F * G [s] \quad (9)$$

Siendo G la conductancia

Bibliografía

Cubillos P., Luis F. y Delgado V. Gisela. Aisladores de distribución en contaminación salina. Ensayo y normalización. Tesis. Universidad Industrial de Santander. 1990.

Asistencia Técnica Italiana. Sector eléctrico Colombiano. Volumen IV. Tomo IV. Conferencias del profesor G. Carrara. Capítulo 5.

Asistencia Técnica Italiana. Sector eléctrico Colombiano. Volumen IV. Tomo I. Capítulo 9. Equipo para las pruebas de contaminación.

Artificial Pollution test on high-voltage insulators to be used on AC systems. IEC Publication 507 (1989).

Cherney, E.A. Standard contamination test method for high voltage insulators systems. CEA Contract report. No. 78-77. (Jul 1980); p. 27

et.al. The AC clean-fog test for contamination insulators. IEEE transactions on power apparatus and systems. Vol. pas-102, No. 3. (mar 1983); p. 604-613.

High-Voltage Testing Techniques. British Standard guide. BS 923 (1980).

IEEE Standard Technique for High Voltage Testing. Std. 4 Institute of Electrical and Electronic Engineers. 6 ed. New York: IEEE. 1978. 125.p.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas. Bogotá. ICONTEC No. 612, 739, 1170, 1207.

Wilkins, R. Flashover voltage of high-voltage insulators with uniform surface-pollution films. IEEE PROC. Vol. 116. No. 3(mar1969); p. 457-465.

Cano H. Adolfo León. Consideraciones en la selección de aisladores bajo condiciones de contaminación. Boletín Técnico Electroporcelana Gamma S.A.

Nota

La mayor parte de la bibliografía consultada (de la cual se transcribe una fracción), fue suministrada gentilmente por el Ing. Ricardo Cifuentes B. de la división de sistemas de calidad de ISA.

Si desea cambiar su dirección electrónica, suscribir a un colega, solicitar ediciones anteriores o borrarse de la lista de distribución, envíenos un mensaje a:

carango@gamma.com.co

Atn Ing. Claudia Arango Botero.

Visítenos en nuestra página Web:

<http://www.gamma.com.co> o www.corona.com.co