

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**DISEÑO DEL AISLAMIENTO EXTERNO DE LÍNEAS ELÉCTRICAS
DE 22,9 KV BAJO CONTAMINACIÓN AMBIENTAL**

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

PRESENTADO POR:

MARIA ELIZABETH WHARTON CRUZ

**PROMOCIÓN
2001 - I**

LIMA – PERÚ

2006

**DISEÑO DEL AISLAMIENTO EXTERNO DE LÍNEAS ELÉCTRICAS DE 22.9 KV
BAJO CONTAMINACION AMBIENTAL**

SUMARIO

Para el diseño del aislamiento en la Línea de Transmisión MT, se dividió en dos tramos según las condiciones meteorológicas de la zona, se analizaron las interrupciones y estadística del sistema de fallas. Con esta información se definió los niveles de contaminación, basado en mediciones de la resistencia del agua del lavado superficial del aislador, para reconsiderar y replantear el cronograma de mantenimiento preventivo de la línea primaria.

Se realizaron 02 mediciones de ESDD, en aisladores extraídos de los lugares mas críticos del sistema eléctrico, (propenso a mayor contaminación, cerca de la carretera), realizado en los meses de mayor velocidad del viento (fenómeno paraca, ocurrido en el mes de Enero o Febrero), completado con el análisis químico de los depósitos de contaminación y adicionalmente con análisis de la superficie fina del nivel adyacente del terreno de los lugares de prueba, esto permitió establecer el mes adecuado para realizar la limpieza manual a trapo seco de los aisladores de porcelana.

ÍNDICE

| | |
|---|-----------|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| CAPITULO I | 3 |
| PLANTEAMIENTO DE INGENIERÍA DEL PROBLEMA | 3 |
| 1.1. Objetivo | 3 |
| 1.2. Alcances | 3 |
| 1.3. Ubicación Geográfica | 3 |
| 1.4. Condiciones Climáticas | 5 |
| 1.5. Descripción de la Instalación | 6 |
| 1.6. Característica de Aislamiento | 7 |
| 1.6.1. Cálculo de la Distancia de Fuga Específica (Df) | 8 |
| 1.7. Frecuencia de Interrupciones | 9 |
| CAPÍTULO II | 11 |
| MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL | 11 |
| 2.1. Concepto de Aislamiento | 11 |
| 2.2. Clases de Aislamiento | 11 |
| 2.2.1. Aislamiento Externo | 11 |
| 2.2.2. Aislamiento Interno | 12 |
| 2.3. Conceptos Previos | 12 |
| 2.3.1. Conductividad Eléctrica | 12 |
| 2.3.2. Arco Eléctrico | 13 |
| 2.3.3. Fenómeno de Disrupción | 14 |
| 2.3.4. Voltaje Soportado | 14 |
| 2.3.5. Sobretensión Temporal a Frecuencia Industrial | 14 |
| 2.4. Componentes de la Corriente Total de Un Aislamiento Sólido | 14 |
| 2.4.1. Corriente de Carga Capacitiva | 14 |

| | | |
|---------|---|----|
| 2.4.2. | Corriente de Absorción o Polarización | 14 |
| 2.4.3. | Corriente de Fuga Superficial | 16 |
| 2.5. | Componentes de Corriente Total en Una Superficie aislante | 18 |
| 2.6. | Contaminación del Aislante Externo | 19 |
| 2.6.1. | Contaminación Natural | 19 |
| 2.6.2. | Contaminación Artificial | 19 |
| 2.7. | Propiedades que determinan el Nivel de Contaminación | 20 |
| 2.7.1 | Contaminación de Sales | 20 |
| 2.7.2 | Potencial de Hidrógeno (PH) | 20 |
| 2.7.3 | Humedad de la Contaminación | 21 |
| 2.7.4 | Temperatura de la Contaminación | 21 |
| 2.7.5 | Solubilidad | 22 |
| 2.7.6 | Potencial de Ionización | 22 |
| 2.7.7 | Higroscopocidad | 22 |
| 2.7.8 | Hidrofobicidad | 22 |
| 2.8. | Bases para el Estudio de la Contaminación | 23 |
| 2.8.1 | Naturaleza de los Contaminantes | 23 |
| 2.8.2 | Fuerzas que determinan la Contaminación | 23 |
| 2.8.3 | Factores que influyen en la contaminación | 25 |
| 2.8.4 | Frecuencia de Mediciones de las Muestras de Contaminación | 26 |
| 2.8.5 | Criterios de Evaluación de la Contaminación | 26 |
| 2.8.6 | Características de la Contaminación en las Cadenas Horizontales | 27 |
| 2.8.7 | Características Conductivas de la Contaminación | 27 |
| a) | Cantidad de Acumulación de la Contaminación | 28 |
| • | Saturación Salina Conductiva | 29 |
| • | Saturación Acumulativa | 29 |
| b) | Variación de la Temperatura y Humedad Ambiental | 29 |
| 2.8.8 | Resistencia Estática del Aislamiento | 30 |
| 2.8.9 | Impedancia Dinámica del Aislamiento | 31 |
| 2.8.10. | Correlación de la Contaminación con el Contenido Salino del Suelo | 32 |

| | | |
|--|--|-----------|
| 2.8.11 | Correlación de Sales Solubles e Insolubles | 32 |
| 2.8.12 | Influencia del Suelo en la Contaminación | 33 |
| 2.8.12 a) | Clasificación del Suelo | 34 |
| 2.9 | Diseño del Aislamiento Bajo Contaminación | 34 |
| 2.9.1. | Mecanismo de Contorneo de un Aislador Contaminado | 34 |
| 2.9.2. | Sostenimiento Superficial Longitudinal de un Aislador | 35 |
| 2.9.3. | Características de la Contaminación Natural | 36 |
| 2.9.4. | Esfuerzos Eléctricos en el Aislamiento | 37 |
| 2.9.5. | Características de Sostenimiento o Contorneo a 5% | 37 |
| 2.9.6. | Tensión de Sostenimiento | 38 |
| 2.9.7. | Diseño del Aislamiento | 38 |
| 2.10. | Mantenimiento Preventivo | 39 |
| 2.11. | Plazos de Mantenimiento | 40 |
| CAPITULO III | | 41 |
| METODOLOGÍA PARA LA SOLUCION DEL PROBLEMA | | 41 |
| 3.1. | Métodos de Estudio | 41 |
| 3.1.1. | Método Directo | 41 |
| 3.1.2. | Método Simulado | 41 |
| 3.2. | Métodos de Medición de la Contaminación | 41 |
| 3.2.1. | Medida de la Conductancia | 42 |
| 3.2.2. | Medida de la Resistividad Volumétrica Especifica | 43 |
| 3.2.3. | Medida Indirecta del Equivalente Salino | 43 |
| 3.2.4. | Medida de la Resistencia Volumétrica | 43 |
| 3.3. | Procedimientos para la Medida de la Contaminación | 45 |
| 3.4. | Determinación del Programa de Mantenimiento Preventivo | 48 |
| 3.4.1. | Procedimiento | 48 |
| 3.4.2 | Plazos de Mantenimiento | 49 |
| CAPITULO IV | | 51 |
| PLANTEAMIENTO | | 51 |
| 4.1. | Proceso Disruptivo | 51 |
| 4.1.1. | Tramo Humay-Huancano | 51 |

| | |
|--|-----------|
| 4.1.2. Tramo Huancano-Cuyahuasi | 52 |
| 4.2. Elección del Método de Estudio | 52 |
| 4.3. Elección del Método de Medida de la Contaminación | 53 |
| 4.4. Ejecución de la Prueba | 53 |
| 4.5. Datos Adicionales de la Muestra de Contaminación | 55 |
| 4.6. Programa de Mantenimiento | 56 |
| 4.7. Resultados | 57 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 58 |
| Conclusiones | 58 |
| Recomendaciones | 59 |
| ANEXO A | 60 |
| Norma IEC 60815 (1986) | 60 |
| ANEXO B | 61 |
| Características Geométricas del Aislador de Prueba | 61 |
| ANEXO C | 62 |
| Ubicación Geográfica | 62 |
| ANEXO D | 63 |
| Especificaciones Técnicas del Aislador | 63 |
| ANEXO E | 64 |
| Equivalencia Directa de Mediciones | 64 |
| Lavado Superficial de Aisladores Contaminados | 64 |
| Equivalencia Directa de Mediciones | 65 |
| Lavado Superficial de Aisladores Contaminados | 65 |
| ANEXO F | 66 |
| Análisis de Tres Muestras | 66 |
| ANEXO G | 67 |
| Humedad Relativa Media Mensual 2004 | 68 |
| ANEXO H | 68 |
| Humedad Relativa Media Mensual 2004 | 68 |
| ANEXO I | 69 |
| Dirección Predominante y Velocidad Media del Viento | 69 |

| | |
|---|----|
| ANEXO J | 70 |
| Dirección Predominante y Velocidad Media del Viento | 70 |
| ANEXO K | 71 |
| Humedad Relativa Humay Pisco – Ica | 71 |
| BIBLIOGRAFÍA | 72 |

INTRODUCCIÓN

El aislamiento eléctrico de los componentes del sistema, no solamente están sometidos a sobretensiones de origen externo o interno, también están expuestos a la acumulación paulatina de contaminantes, que evolucionan hacia condiciones de funcionamiento anormal, los cuales dan origen a gradientes superficiales excesivos, formando el contorno por medio de un arco eléctrico.

Para el análisis del aislamiento externo bajo contaminación ambiental, primero se debe tener claro la causa, es decir los factores que generan la contaminación en la superficie del aislador, y segundo el efecto, el mecanismo de contorno de un aislador contaminado. Los métodos de análisis para cuantificar la contaminación, son herramientas indispensables que proporcionan la base para el diseño correcto del aislamiento externo. La disrupción por contaminación se puede evitar mediante los mantenimientos preventivos de las líneas eléctricas.

La contaminación de los aislamientos exteriores deteriora el aislamiento externo en las líneas eléctricas, es decir reduce gradualmente la calidad dieléctrica superficial del aislamiento. Cuando el aislamiento externo no soporta la máxima tensión de servicio, se produce una falla eléctrica (cortocircuito fase-tierra), lo cual afecta la continuidad del servicio eléctrico, esto puede ser controlado mediante el diseño de un programa de mantenimiento preventivo adecuado, de tal manera que el grado de contaminación del aislamiento externo, no supere los límites de saturación conductiva.

La degradación del sostenimiento del aislamiento externo depende del tiempo de exposición, el programa de mantenimiento preventivo esta basado en el máximo tiempo de exposición, tal que el aislamiento externo soporte la máxima tensión de servicio, sin producir ninguna falla, que afecte la confiabilidad del sistema.

Los parámetros que determinan la formación de los depósitos de contaminantes, son de naturaleza aleatoria, porque dependen de las variaciones climáticas y de las condiciones de operación, por ello es necesaria la toma de muestras en periodos cortos, con el fin de realizar un análisis exhaustivo. El estudio proporciona los métodos y procedimientos para realizar la cuantificación de los depósitos de contaminación en el aislamiento externo, con el fin de determinar el máximo tiempo de exposición, que evite la saturación conductiva en la superficie del aislador.

El capítulo I, proporciona las características de las redes eléctricas, las condiciones atmosféricas de las zonas donde se desempeña, así como el resumen del estudio efectuado.

El capítulo II indica algunas definiciones básicas, para la comprensión del fenómeno en estudio.

El capítulo III, detalla los métodos y procedimiento para el calculo de los depósitos de contaminación, y para determinar el cronograma de mantenimiento preventivo

El capítulo IV calcula los niveles de contaminación y el programa de mantenimiento, mediante la aplicación del método Medida de la Resistencia Volumétrica.

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DE INGENIERIA DEL PROBLEMA

1.1. Objetivo

Asegurar la confiabilidad del suministro eléctrico en Media Tensión, reduciendo las interrupciones eléctricas debido a fallas del aislamiento por contaminación ambiental, mediante el mantenimiento preventivo adecuado basado en la evaluación del grado de contaminación a lo largo de la línea eléctrica.

1.2. Alcances

El presente proyecto analiza las diferentes metodologías de diseño y define la solución mas adecuada, que permita el mantenimiento preventivo anual, del aislamiento externo en 22,9 Kv, para el correcto funcionamiento de los aisladores en el sistema eléctrico Humay- Pampano, ubicado en el distrito de Huancano, provincia de Pisco, departamento de Ica.

1.3. Ubicación Geográfica

El PSE Humay Pampano se encuentra ubicado en el distrito de Huancano, provincia de Pisco, departamento de Ica, entre los kilómetros 31 y 90, de la carretera Los Libertadores ruta Lima- Ayacucho.

Las instalaciones eléctricas se dividen en dos tramos, cuyas características geográficas son las siguientes:

- Tramo Humay – Huancano

Altitud : 430 m.s.n.m.

Latitud : 13° 43'' 06'

Longitud : 75° 53'' 00'

- Tramo Huancano – Cuyahuasi

Altitud : 1019 m.s.n.m.

Latitud : 13° 35'' 45'

Longitud : 75° 37'' 00'



Fig. 1.1. Ubicación Geográfica

1.4. Condiciones Climáticas

Las instalaciones eléctricas se dividen en dos tramos, cuyas características climáticas son las siguientes:

- Tramo Humay – Huancano

Abarca la región de la costa, con relieve poco accidentado y donde solo se observan sistemas de colinas que enmarcan valles y pampas construidas por acumulaciones desérticas. La insolación es alta en los desiertos.

El viento Paracas (Agosto), es una brisa marina de gran fuerza que sopla en la zona. Solo excepcionalmente se producen lluvias de gran intensidad pero de corta duración.

| | |
|-------------------------|--|
| Clima | :Templado y desértico. |
| Precipitación | :Escasa. |
| Lluvia | :Escasa. |
| Temperatura Máxima | :27.4 °C |
| Velocidad Viento Maxima | :6.0 m/s (Febrero y Marzo) |
| Humedad Relativa Máxima | :86 % (Junio, Julio, Agosto y Noviembre) |

- Tramo Huancano – Cuyahuasi

Abarca la región de la sierra. El clima andino es templado – cálido.

| | |
|-----------------------------|--------------------------------------|
| Clima | :Templado frío |
| Lluvia | :Frecuente |
| Temperatura Máxima | :27.4 °C |
| Velocidad del Viento Maxima | : 7.0 m/s (Enero) |
| Humedad Relativa Máxima | : 72 %(Mayo, Noviembre y Diciembre) |

1.5. Descripción de las Instalaciones

Las instalaciones tienen las siguientes características:

- Tramo Humay – Huancano (Carretera Los Libertadores Km 31-66)

| | |
|----------------------------|--|
| Sistema | : Trifásico Aislado |
| Nivel de Tensión | : 22.90 Kv. |
| Aisladores Tipo Pin | : Porcelana, clase ANSI 56-2 |
| Aisladores Tipo Suspensión | : Porcelana, clase ANSI 52-3 |
| Nº Estructuras | : 156 (01-126) |
| Conductor | : Aleación de Aluminio Seco (AAAC) de 25 mm ² |
| Longitud | : 32.184 Km |
| Nº de Ternas | : 01 |
| Postes | : Madera Tratada Eucalipto de 12 mts, Clase 6, Grupo C. |
| Subestaciones 1 Φ | : 17 |
| Subestaciones 3 Φ | : 01 |
| Car. Los Libertadores | : Km Nº 31-66 |

- Tramo Huancano – Cuyahuasi (Carretera Los Libertadores Km 66-90)

| | |
|----------------------------|--|
| Sistema | : Monofásico Aislado Retorno por Tierra (MRT) |
| Nivel de Tensión | : 13.20 Kv. |
| Aisladores Tipo Pin | : Porcelana, clase ANSI 56-2 |
| Aisladores Tipo Suspensión | : Porcelana, clase ANSI 52-3 |
| Nº Estructuras | : 106 (126-206) |
| Conductor | : Aleación de Aluminio Seco (AAAC) de 25 mm ² |
| Longitud | : 22.581 Km |
| Postes | : Madera Tratada Eucalipto de 12 mts, Clase 6, Grupo C. |
| Subestaciones 1 Φ | : 17 |
| Car. Los Libertadores | : Km Nº 66-90 |

1.6. Características del Aislamiento

Los aisladores que actualmente funcionan en el sistema eléctrico Humay-Pampano, tiene las siguientes especificaciones técnicas:

TABLA N° 1.1. Longitud de la Línea de Fuga

| NIVELES DE AISLAMIENTO | AISLADOR TIPO PIN CLASE 56-2 | CADENA DE 2 AISLADORES CLASE 52-3 |
|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| Longitud de fuga total (mm) | 432 | 584 |

En la Tabla N° 1.1. Se consignan las longitudes de líneas de fuga de los aisladores tipo pin y cadenas de aisladores cuyo uso está normalizado para líneas de electrificación rural.

TABLA N° 1.2. Nivel de Aislamiento Mínimo

| Tensión Nominal entre fases(Kv) | Tensión Máxima entre fases (Kv) Um | Tensión de sostenimiento a la onda 1,2/50 entre fases y fase a tierra (kVp) | Tensión de Sostenimiento a frecuencia industrial entre fases y fase-tierra (kV) |
|---------------------------------|------------------------------------|---|---|
| 22,9/13,2 | 25/14,5 | 125 | 50 |
| 22,9 | 25 | 125 | 50 |

A continuación se muestran los niveles de aislamiento que se aplica a la línea primaria en condiciones Standard:

1.6.1. Cálculo de la Distancia de Fuga Específica (Df)

Según la norma IEC 815, la distancia de fuga se determina, con la siguiente relación:

$$Df = \frac{\text{Longitud de fuga total (mm)}}{\text{Tensión de servicio entre fases (kV) * Regulación de Tensión}} \quad (1.1)$$

Donde:

Tensión de servicio entre fases = 22.9 kV

Regulación de Tensión = 1.050

Se obtiene la siguiente tabla en aplicación a la relación anterior:

TABLA N° 1.3 Distancia de Fuga Específica

| NIVELES DE AISLAMIENTO | AISLADOR TIPO PIN CLASE 56-2 | CADENA DE 2 AISLADORES CLASE 52-3 |
|--------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| Distancia de fuga específica (mm/kV) | 17.96 | 24.29 |

1.7. Frecuencia de Interrupciones

La frecuencia de interrupciones por fallas del sistema debido a disrupciones por contaminación, se detallan a continuación:

TABLA N° 1.4 Frecuencia de Interrupciones Año-2004

| INTERRUPCIONES DEL SUMINISTRO ELECTRICO PSE HUMAY PAMPANO – 2004 | | | | |
|---|------|-------|------------|---------------------------------------|
| N° | LLPP | Horas | Corte | Descripción del Evento |
| | | | Fecha | |
| 1 | X | 6 | 27/05/2004 | Disrupción por contaminación +neblina |
| 2 | X | 1 | 03/06/2004 | Disrupción por contaminación +neblina |
| 3 | X | 1 | 06/06/2004 | Disrupción por contaminación +neblina |
| 4 | X | 10 | 10/11/2004 | Disrupción por contaminación +neblina |
| 5 | X | 5 | 16/11/2004 | Disrupción por contaminación +neblina |

TABLA N° 1.5 Frecuencia de Interrupciones Año-2005

| INTERRUPCIONES DEL SUMINISTRO ELECTRICO PSE HUMAY PAMPANO – 2005 | | | | |
|---|------|-------|----------------|---------------------------------------|
| N° | LLPP | Horas | Corte Fecha | Descripción del Evento |
| 1 | X | 5 | 19/02/2005 | Disrupción por contaminación +neblina |
| 2 | X | 4 | 02/05/2005 | Disrupción por contaminación +neblina |
| 3 | X | 6 | 01/06/2005 | Disrupción por contaminación +neblina |
| 4 | X | 7 | 05/06/2005 | Disrupción por contaminación +neblina |
| 5 | X | 17 | 03/07/2005 | Disrupción por contaminación +neblina |
| 6 | X | 6 | 11/10/2005 | Disrupción por contaminación +neblina |
| 7 | X | 6 | 09/11/2005 | Disrupción por contaminación +neblina |
| 8 | X | 8 | 21/11/2005 | Disrupción por contaminación +neblina |

Estas interrupciones por contaminación, ocurren frecuentemente en la madrugada, en las primeras horas del día (1:00 a 3:00 a.m.), o en las últimas horas de la noche (10:00 a 12:00p.m.), con mayor frecuencia en los meses de Junio y Noviembre, a pesar de tener aislamiento estandarizado de 17.96 y 24.29 mm/Kv fase- fase (nivel de contaminación ligero y alto).

Las fallas en el sistema eléctrico, se producen particularmente cerca de áreas desérticas, debido al clima poco lluvioso, a la frecuente polvadera de arena, al fenómeno de condensación, así como al rocío en la madrugada; producido por la gran temperatura de fluctuación entre el día y la noche.

CAPITULO II MARCO TEORICO CONCEPTUAL

2.1. Concepto de Aislamiento

El aislamiento es la capacidad para mantener una resistencia alta al flujo de la corriente. Según la ecuación de la Ley de Ohm, para una resistencia dada, a mayor voltaje, mayor corriente. Alternativamente, a menor resistencia, mayor es la corriente que fluye con el mismo voltaje.

$$E = I \times R \quad (2.1)$$

Donde:

| | | |
|---|---|------------------------|
| E | = | Voltaje en voltios. |
| I | = | Corriente en amperios. |
| R | = | Resistencia en ohmios. |

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.

2.2. Clases de Aislamiento

En general, el aislamiento eléctrico puede clasificarse en externo e interno.

2.2.1. Aislamiento Externo

Los efectos de la disrupción del aislamiento externo no son tan destructivos como la disrupción del aislamiento interno.

El aislamiento externo en general, es autoreparable (se restaura por si solo) al dejar de existir la causa de la disrupción (los sobrevoltajes, la contaminación). Para la protección del aislamiento externo, el objetivo es hacer mínimo el número esperado de rupturas del aislamiento. En este sentido se han desarrollado muchos acercamientos elaborados que equilibran la confiabilidad del sistema (que esta relacionado principalmente con las rupturas del aislamiento). El aislamiento externo se refiere a las superficies aislantes externas, el ambiente que lo rodea y las distancias de fuga. Entre ellos tenemos: El aire, la porcelana, el vidrio, etc.

2.2.2. Aislamiento Interno

La ruptura del aislamiento interno generalmente da lugar a un daño permanente en el equipo y posiblemente a una falla catastrófica. Para la protección del aislamiento interno, se aplican métodos deterministas, donde el objetivo es diseñar para cero disrupciones del aislamiento. Citamos algunos ejemplos: El aceite, la mica, el SF₆.

En nuestro estudio se analizara los factores que degradan el aislamiento externo. Mediante el método directo, se cuantificara la cantidad de contaminación ambiental impregnado en la superficie del aislador, y como este afecta en el nivel de aislamiento. Para ello debemos definir:

2.3. Conceptos Previos

2.3.1. Conductividad Eléctrica

Es el movimiento de una carga eléctrica de un lugar a otro. Los cuerpos eléctricamente conductores, permiten el paso de los portadores de cargas eléctricas a través de su interior, estos portadores pueden ser electrones o iones, estos últimos se denominan electrolitos.

La conducción en la mayoría de los aisladores es casi siempre electrolítica, y se da prácticamente en los poros del aislador. Los iones por los cuales se conduce la corriente resultan de la disociación de sales; tal disociación se produce cuando las sales son disueltas en agua, ya que cada ion es capaz de transportar solo una cantidad definida de carga, al aumentar el número de iones obviamente aumentara la carga transportada. De esto se deduce que una solución que tenga mayor cantidad de iones disueltos, mostrara mayor conductividad.

2.3.2. Arco Eléctrico

Se genera mediante una avalancha de electrones, que toma un tiempo finito para formarse.

2.3.3. Fenómeno de Disrupción

Es el desarrollo completo de un arco entre los extremos o las caras de un aislador.



Fig. 2.1. Formación Arcos Eléctricos en la superficie de un aislador contaminado.

2.3.4. Voltaje Soportado

Es el máximo voltaje que el aislador es capaz de soportar sin falla o descarga disruptiva al probarse en las condiciones especificadas.

2.3.5. Sobretensiones Temporales a Frecuencia Industrial

Son tensiones temporales elevadas a frecuencia industrial, que generan descargas superficiales y gradientes anormales en el aislamiento externo. En el aislamiento interno producen descargas parciales y envejecimiento.

2.4. Componentes de la Corriente Total de un Aislamiento sólido

La resistencia de un aislamiento sólido, se puede calcular mediante la Ley de Ohm ($R = E / I$), aplicando un voltaje de prueba a través de una pieza de aislamiento y realizando la medición de la corriente resultante. Cabe destacar que la corriente total que fluye por el aislamiento sólido, es diferente a la corriente de fuga de los aislamientos externos.

La corriente total de un aislamiento sólido esta compuesta por:

2.4.1. Corriente de Carga Capacitiva

Está asociado con 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 aislador bajo prueba se carga. El material aislante se carga del mismo modo que el dieléctrico de un capacitor.

2.4.2. Corriente de Absorción o Polarización

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

- La primera es ocasionada por una deriva general de electrones libres a través del aislamiento bajo el efecto del campo eléctrico.
- La segunda es ocasionada por distorsión molecular, donde 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.

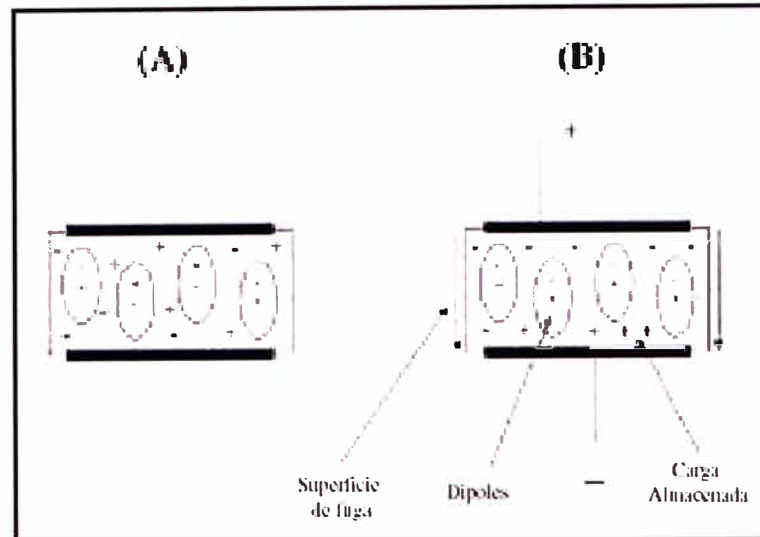


Fig. 2.2. Alineación de Moléculas Polarizadas

2.4.3. 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.

- 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.

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

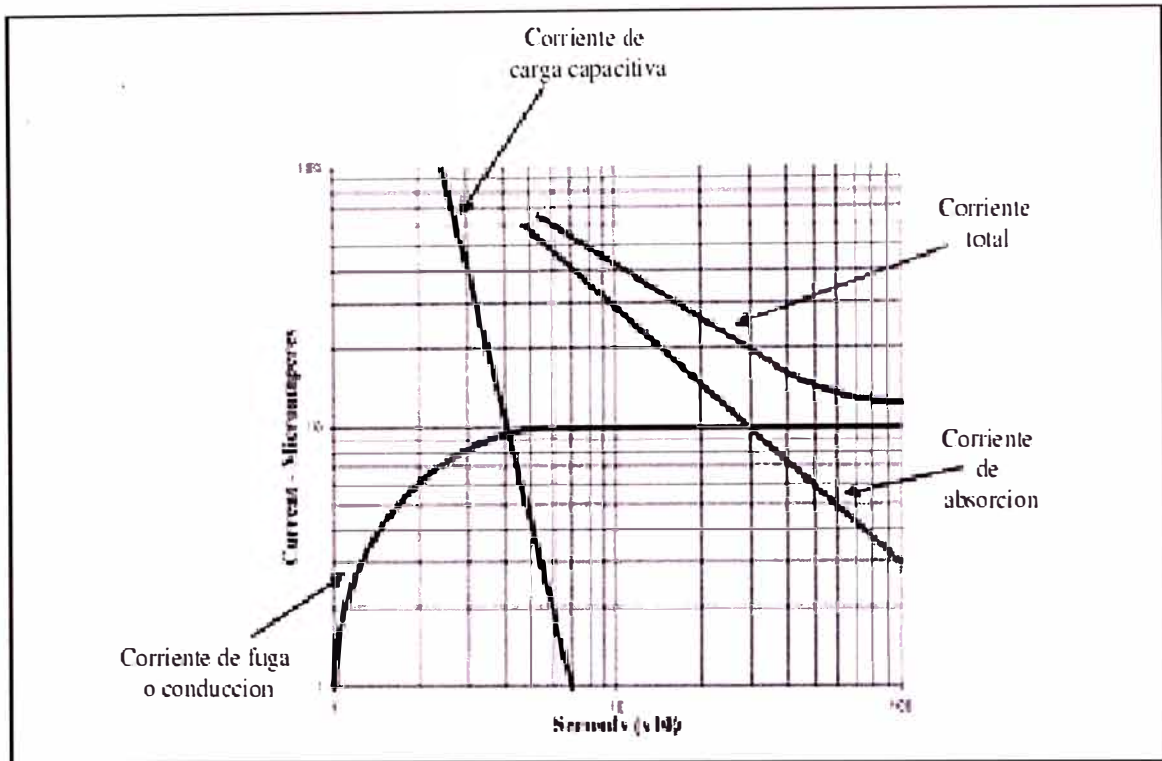


Fig. 2.3 Componentes de la Corriente de Prueba

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 en términos de megaohms, a un voltaje particular por medio de un probador de aislamiento.

Si 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.

2.5. Componentes de la Corriente total en una Superficie Aislante

La superficie aislante esta compuesta de una corriente resistiva y otra capacitiva. Su representación eléctrica es la siguiente:

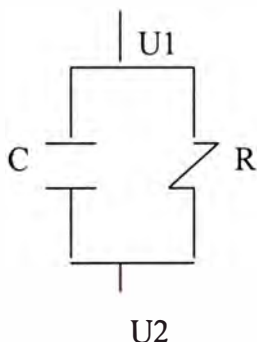


Fig. 2.4. Representación Eléctrica de una Superficie Aislante

Ambos extremos se encuentran energizados a diferente potencial, donde su rigidez dieléctrica es constante en todas las direcciones. La resistencia R, puede ser medido con un Megometro, cuando el medio que lo rodea es húmedo, la resistencia tiende a cero, y circula una corriente de fuga sobre la superficie aislante, lo cual produce una falla.

La capacitancia intrínseca de la superficie aislante se carga con la corriente de fuga que circula por la resistencia. La capacitancia puede ser medida usando el Puente de Schering o utilizando un frecuencímetro, un voltímetro y un amperímetro; se aplica una tensión a la frecuencia dada que se controlan junto con la corriente y se aplica la siguiente formula:

$$C = \frac{I}{2\pi f n U n} \quad (2.2)$$

Se debe asegurar la ausencia de armónicos de tensión o corriente, para no introducir errores en la medición.

Aplicando una tensión continua entre los terminales y midiendo la corriente, se calcula la resistencia de descarga del condensador.

$$R = \frac{U_{dc}}{I} \quad (2.3)$$

2.6. Contaminación del Aislante Externo

La contaminación disminuye la resistencia del aislamiento y producen la pérdida del aislamiento externo. El cual ocasiona una espiral gradual de declinación en la calidad del aislamiento.

Cuando la contaminación se adhiere a la superficie, estos se ionizan fácilmente bajo el efecto de un voltaje aplicado y proporcionan una trayectoria de baja resistencia para la corriente de fuga superficial que aumenta, en comparación a las superficies secas sin contaminar. Sin embargo, limpiando y secando el aislamiento, se rectificará fácilmente esta situación.

Se tiene dos tipos de contaminación:

2.6.1. Contaminación Natural

La contaminación natural, se origina debido a factores como neblina salada costera, vientos terrales y paracas, microorganismos del tipo alga, insectos y aves.

Las sales de origen eólico, es otra causa de contaminación. El viento en las regiones áridas arrastra gran cantidad de partículas en suspensión, principalmente cloruros que pueden contribuir en gran medida a la formación de superficies con sales.

El enriquecimiento de sales, se produce en las zonas costeras, por contaminación directa del mar, a partir del nivel freático salino y por la contribución del viento.

Frecuentemente, las sales se originan a partir de mantos freáticos suficientemente superficiales. Los mantos freáticos siempre contienen sales disueltas en mayor o menor proporción. En general, la existencia de mantos freáticos superficiales existen en las depresiones y tierras bajas, de aquí la relación entre la salinidad y la topografía.

2.6.2. Contaminación Artificial

Se producen en áreas urbanas periféricas, industrializadas, mineras, agrícolas, así como áreas adyacentes a redes viales.

2.7. Propiedades que Determinan el Nivel de Contaminación

Se definen algunas propiedades que determinan el comportamiento de la conductividad en la contaminación:

2.7.1. Concentración de sales

Siendo la conductividad de la contaminación, dependiente de la cantidad de agua retenida en este, y conociendo el hecho de que la conductividad del agua, esta gobernada por las sales disueltas en esta (conducción electrolítica), se concluye que la conductividad de la contaminación es influenciado por la cantidad y tipo de sales disueltas en esta.

La medición de la concentración de sales esta basado en la cantidad de equivalente salino ESDD en mg NaCl /cm².

2.7.2. Potencial de Hidrogeno (PH)

Cuando la concentración de H⁺ es igual a la concentración de OH⁻, se dice que el medio es neutro.

Un medio ácido es aquel en que la concentración de iones H^+ es mayor que la concentración de OH^- , cuando ocurre en forma inversa es un medio básico. Según esto el agua es una sustancia neutra a $25^\circ C$, y el ph de la neutralidad es 7. El ph se define como:

$$ph = \text{Log} (1/aH^+) = - \text{Log} (H^+) \quad (2.4)$$

$$ph + poh = 14 \quad (2.5)$$

Ácido: Sustancia que se disocia en agua, para producir hidronio (H_3O^+), los cuales algunas veces se indican como $H^+(ac)$ solución acuosa, donde el ion H^+ es fuertemente atraído hacia un par electrónico de una molécula de agua.

Base: Sustancia que contiene iones de hidróxido OH^- , o que se disuelve en agua para producir iones de hidróxido hidratados $OH^- (ac)$.

2.7.3. Humedad en la Contaminación

La conductividad de la contaminación aumenta, a medida que aumenta la humedad. Esto posibilita los procesos electrolíticos necesarios para dispersar la carga eléctrica que es absorbida por la contaminación.

2.7.4. Temperatura de la Contaminación

Un aumento en la temperatura disminuye la viscosidad de agua, lo que se traduce en un aumento de la movilidad de los iones disueltos en esta. El aumento de la movilidad iónica hace que se produzca un aumento de la conductividad.

* Ecuación 2.4

Favio Casas Ospina, "Soporte de la Seguridad Eléctrica", Segeléctrica LTDA – Colombia, 2003.

2.7.5. Solubilidad

Si se agrega un cristal de una sal u otra sustancia al agua, los dipolos de esta, ejercen fuerzas de atracción sobre los iones, obligando al cristal a romperse y a las moléculas a ionizarse. Cuando esto ocurre se dice que dicha sustancia tiene solubilidad en agua. Entre las sustancias mas solubles tenemos al NaCl. La temperatura incrementa la solubilidad de las sales en el agua, aumentando la conductividad.

2.7.6. Potencial de Ionización

Es la energía que se necesita comunicar a un electrón, para separarlo de un átomo, removiéndose aquel retenido con menor intensidad. Se produce así, un ion cargado positivamente y un electrón libre. La energía necesaria se llama energía de ionización o potencial de ionización y se expresa en electrón-voltios. Los elementos alcalinos como Li, Na o K, poseen baja energía de ionización y son fuertemente electropositivos, es decir tienen tendencia a perder electrones.

2.7.7. Higroscopicidad

Es la cantidad de agua (mg o %) absorbida por una muestra de dieléctrico de forma determinada, al sumergirla en agua destilada durante 24 horas y a una temperatura de 20° C o superior. La magnitud de la higroscopicidad muestra la porosidad del material y la existencia de sustancias solubles en el. Al aumentar la higroscopicidad aumentan las propiedades conductoras del dieléctrico.

2.7.8. Hidrofobicidad

Es la capacidad de repeler la humedad en la superficie del aislador. Cuando el aislador esta expuesto a una alta contaminación, después de 3 a 6 meses en servicio, el aspecto externo de la superficie de los aisladores brillante y liso se convierte menos lustrosos y opaco (previa condición natural); la sequedad deteriora el nivel de barniz siliconado (agente no natural o

similar), el cual disminuye las propiedades de hidrofobicidad de los aisladores. La clasificación de hidrofobicidad, ejecutado en los aisladores, han demostrado que el lado inferior posee deficiente hidrofobicidad que el lado superior.

2.8. Bases para el Estudio de la Contaminación

El estudio de la contaminación en los aisladores, se basa en determinar las características de la acumulación en función del tiempo, esta información permite establecer el dimensionamiento y la programación de los mantenimientos. Para ello debemos definir los siguientes puntos:

2.8.1. Naturaleza de los Contaminantes

La contaminación natural depende del índice de ensuciamiento, que se produce por el contenido salino procedente del mar y por las partículas salitrosas e inertes, que son barridos y transportados por el viento.

2.8.2. Fuerzas que determinan la Contaminación

La fuerza gravitacional y la velocidad del viento, son los que determinan una contaminación irregular predominante en la superficie del aislador. Siendo la fuerza gravitacional despreciable respecto a la fuerza del viento. Esto se observó en los aisladores retirados después de 3 meses de exposición, donde la superficie superior es menos representativa, debido a los diferentes agentes que lo desagregan sistemáticamente.

La superficie inferior presenta mayores montos estables, debido a las hendiduras del aislador, cuyas faldas verticales se oponen directamente al viento, creando zonas protegidas, dando lugar a que la línea de fuga se cubra de depósitos de diferente poder conductivo. Por ello las muestras se toman en época de máxima velocidad del viento, cuando las características del aislador son críticas.



Fig. 2.5. Distribución de la Contaminación en un Aislador Tipo Pin

La distribución no uniforme de la contaminación afecta y contribuye a la disrupción del aislador, principalmente debido al gran campo eléctrico local. La máxima cantidad de contaminación esta generalmente concentrado en el lado opuesto del viento predominante, según mediciones de ESDD , ejecutadas en diferentes zonas.

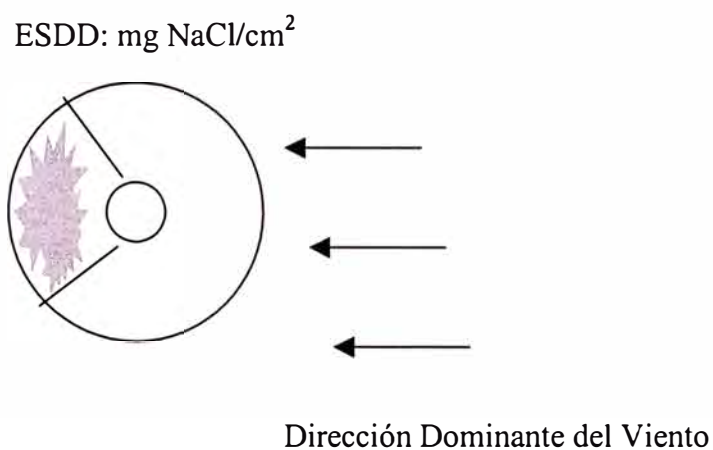


Fig. 2.6. Distribución No Uniforme de la Contaminación.

El depósito de contaminación, es influenciado por la velocidad del viento, especialmente en áreas desérticas, donde el fuerte viento 'polvadera desértico' puede llevar hasta cierto punto, abundantes partículas de arena y 'rafagas de arena', los cuales fácilmente se adhieren a la superficie húmeda de los aisladores, por esta razón aumenta el nivel del depósito de contaminación.

2.8.3. Factores que influyen en la Contaminación

Los factores que influyen en la acumulación de la contaminación son:

- La distancia al mar.
- La altitud geográfica.
- La topografía del terreno.
- La naturaleza del suelo.
- El clima.
- Las condiciones ambientales.
- La geometría de los aisladores.

La mayor acumulación de contaminación se produce en lugares cercanos a la costa, en altitudes menores a 500 m.s.n.m., en terreno seco, arenoso, o cuando la superficie tiene una topografía irregular que interfiere y desvía las corrientes de aire o viento.

Por el contrario la contaminación es menor en época de verano, cuando la superficie del suelo esta cubierta de vegetación, es compacta, o esta constituida de sólidos pesados y piedras. Cuando el clima tiene marcadas diferencias de temperatura en medio de alta humedad relativa, las gotas de agua condensada, abandonan el aislador arrastrando los electrolitos disueltos, pero dejando los inertes.

Respecto a la geometría de los aisladores, la acumulación de la contaminación es mayor, cuando el diámetro es menor, cuando tienen faldas pequeñas, cuando el ángulo medio es mayor y cuando los ribetes están mas juntos.

Los análisis químicos han confirmado que la acumulación de la contaminación en la superficie de los aisladores y las componentes de la superficie del suelo adyacente fueron relativamente similares.

2.8.4. Frecuencia de Mediciones de las Muestras de Contaminación

Cuando las muestras son únicas, la toma se debe realizar en intervalos prolongados de 3 a 6 meses, al finalizar los meses de máxima velocidad del viento, cuando las características del aislador son críticas, para obtener resultados confiables.

Para un estudio mas exhaustivo, la toma de muestras debe ser trimestral, semestral y anual, coincidentes con los cambios de estación, que involucran la acción del clima.

2.8.5. Criterios de Evaluación de la Contaminación

Para evaluar el nivel de contaminación, se adoptara el criterio de saturación conductiva correspondiente a 0.50mg/cm² NaCl, los valores menores se consideran contaminación media y baja; los valores mayores se denominan contaminación severa y alta.

La solubilidad de la sal, es una propiedad muy importante, pues además de afectar a la movilidad y precipitación, va a regular su máxima concentración en la solución. Y cuanto mayor sea esta, su efecto perjudicial es mayor. Las sales más tóxicas son las que presentan elevadas solubilidades, que darán soluciones muy concentradas.

TABLA N° 2.1 Solubilidad del Cloruro de Sodio

| | |
|--|--------|
| Solubilidades en agua del Cloruro de Sodio a 20° de temperatura, en gramos/litro | |
| NaCl | 360,00 |

2.8.6. Características de la Contaminación en las Cadenas Horizontales

Si la dirección predominante del viento es paralela al eje de la cadena, el aislador que da cara al viento se contamina mas en la superficie que recibe el impacto directo, los demás elementos lo hacen en forma decreciente con mayor concentración en la parte inferior, este fenómeno se acentúa con la actuación desagregante de la neblina, o cuando se produce condensación, especialmente en los aisladores de faldas profundas, cuya cara inferior se opone al viento.

Por lo tanto, se recomienda el uso de aisladores de hendiduras, poco profundas y que permitan el fácil y total escurrimiento del agua, lo cual permite el efecto de autolavado.

2.8.7. Características Conductivas de la Contaminación

Las características conductivas de la contaminación, dependen de:

- La cantidad de la acumulación de la contaminación.
- La variación de la temperatura
- La humedad ambiental

El aislamiento externo está diseñado para una capacidad de soporte determinada, que garantice la continuidad del servicio, sin falla en el aislamiento. Existen factores que degradan el aislamiento y varían en forma aleatoria el voltaje de soporte.

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

Un aislador tiene un voltaje entre el conductor de alto voltaje y la pantalla, por lo tanto, desarrolla una corriente de salida entre estos dos puntos. La magnitud de esta corriente de fuga es inversamente proporcional a la resistencia del aislamiento de la superficie.

a) Cantidad de Acumulación de la Contaminación.

Los aisladores están sujetos al proceso irreversible de la pérdida de la capacidad de aislamiento, debido a la formación de caminos conductivos en la superficie.



Fig. 2.7. Pérdidas de la Capacidad de Aislamiento por la Contaminación

La nocividad del ensuciamiento, con igual equivalente salino superficial, depende del contenido de inertes, que forman una capa, que produce la saturación natural. Existen 2 tipos de saturación natural:

- **Saturación Salina Conductiva**

En este tipo de saturación, las muestras se encuentran cargadas de materias neutras, con equivalentes salinos entre 0,50 y 0,10 mg/cm² NaCl, en la superficie inferior y superior respectivamente. Los bajos niveles de contaminación se debe a la acción disolvente de la condensación, que arrastra las sales electrolíticas filtrándolas a través de los inertes y no solubles.

- **Saturación Acumulativa**

Este tipo de saturación natural es característico en zonas industriales, donde el ensuciamiento saturado, con equivalente salino de 1.00 mg/cm² NaCl, empieza a desprenderse por su propio peso. Este proceso disminuye el equivalente salino a valores entre 0.70 y 0.30 mg/cm² NaCl, en la superficie inferior y superior respectivamente, porque no se produjo la acción de la condensación, debido a las cualidades higroscópicas de la contaminación y por falta de porosidad.

b) Variación de la Temperatura y Humedad Ambiental

La humedad tiene un efecto en la resistencia de aislamiento, pero no se puede cuantificar como la temperatura, debido a que los diferentes tipos de aislamiento, absorben distintos grados de humedad. La humedad es un factor que no se debe pasar por alto cuando se evalúan los resultados. A diferencia de la temperatura, el efecto de la humedad no es un gradiente constante y en tanto la temperatura permanezca arriba del punto de rocío, la humedad no afectará en forma apreciable las lecturas de aislamiento.

El incremento de humedad en el aire del entorno (ambiente) puede variar la resistencia de aislamiento. Si el aislador opera regularmente sobre la temperatura del punto de rocío (temperatura de condensación del vapor a líquido de la humedad en el aire), y las superficies del aislamiento están libres de contaminantes (como ciertas pelusas y ácidos o sales, que tiene la propiedad de absorber humedad), tales lecturas de la prueba no serán afectadas por la humedad.

En los aisladores, la preocupación principal es la condición de las superficies expuestas donde se condensa la humedad y afecta la resistencia total del aislamiento. Los estudios muestran, que el punto de rocío se forma en las grietas y huecos del aislamiento, antes de que sea evidente en la superficie. La medición del punto de rocío, permite determinar si tales condiciones invisibles, pueden existir y alterar los resultados. Los efectos de la humedad requieren mayor atención conforme aumenta el valor del voltaje de prueba, porque los voltajes altos facilitan la ionización.

2.8.8. Resistencia Estática del Aislamiento

Al realizar mediciones sobre el terreno en aisladores des-energizados, se observó que el crecimiento de la resistencia estática se produce cuando la densidad de contaminantes superficiales disminuye, estas características están supeditadas a los valores de la humedad relativa del sitio, lo cual varía según las horas del día. Es decir la resistencia estática es inversamente proporcional a la cantidad de contaminantes superficiales.

La energización de una línea contaminada, bajo fuerte humedad, equivale a un cortocircuito trifásico. En los primeros instantes de energización, se registran corrientes senoidales y de arco, que al interrumpirse bruscamente por la formación de zonas secas, producen la caída de tensión, a partir del cual se producen los chisporroteos.

2.8.9. Impedancia Dinámica del Aislamiento

En una cadena de aisladores contaminado y energizado dentro de un ambiente seco, se verifica que la corriente hacia tierra, es prácticamente capacitiva, debido a las capacitancias propias de los aisladores, y las capacitancias de dispersión hacia tierra y hacia la línea, es decir la capa contaminante actúa como un dieléctrico perfecto.

Una vez que la humedad se hace presente, circula una corriente de fuga resistiva, produciendo el secado superficial; es así que el termino resistivo se hace predominante y se determina la impedancia dinámica del aislamiento, el cual depende de la tensión aplicada y cuyo valor ohmico es superior a la resistencia estática, debido a la formación de zonas secas alrededor de la espiga.

Para establecer el nivel de tensión sostenible sin descargas, ni chisporroteos, se toma como muestra:.

Una cadena de aisladores que debe pasar por un proceso de enfriamiento, durante 12 horas, a -2°C , con una tensión aplicada de 7.5kV y 9.5 kV, dentro de una cámara saturada de vapor de agua, para garantizar la condensación, con un 100% de humedad ambiental.

Los ciclos de medición se deben realizar con un Megometro de 800V, en intervalo de 2min y 5min de tensión aplicada a frecuencia industrial, para asegurar la estabilidad térmica del proceso de humedecimiento y secado. En los dos intervalos mencionados, los resultados deben ser similares.

Los aisladores cuya resistencia estática es del orden de 0.1 Mo (promedio mayor de 0,75 mg/cm² NaCl), se comportan como conductores.

2.8.10. Correlación de la Contaminación con el Contenido Salino del Suelo.

Los niveles de contaminación dependen de las características físico-químicas de las componentes livianos de la superficie del suelo.

Para realizar el análisis químico, se deben tomar muestras de tierra, recogidas a 50 mts sobre el eje del viento en dirección a los puntos de captación, desechando los materiales pesados y los gránulos gruesos.

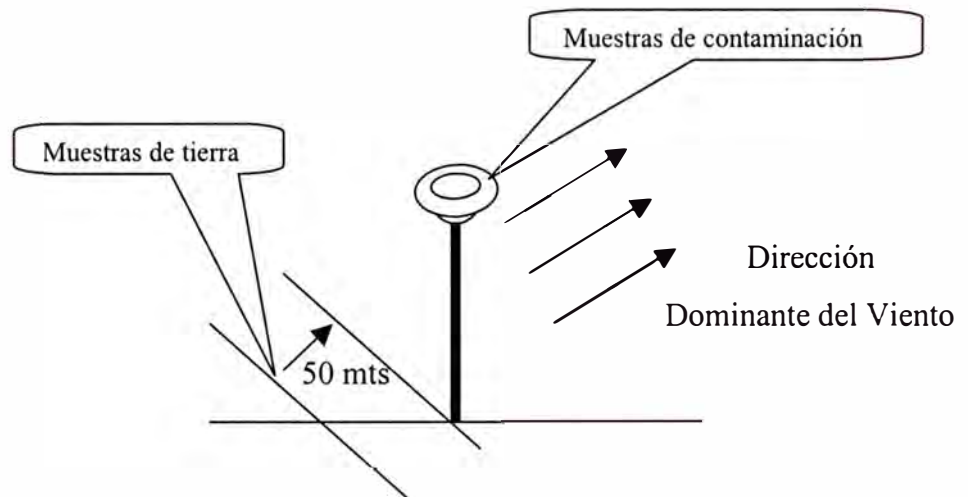


Fig. 2.8. Método para la Toma de Muestras

De las muestras realizadas, se deben determinar los porcentajes salinos globales puros, obtenidos en la contaminación, así como las cantidades de sales solubles, como los sulfatos (SO_4) y Cloruros de Sodio (NaCl), y sales insolubles, en cada punto de captación.

2.8.11. Correlación de Sales Solubles e Insolubles

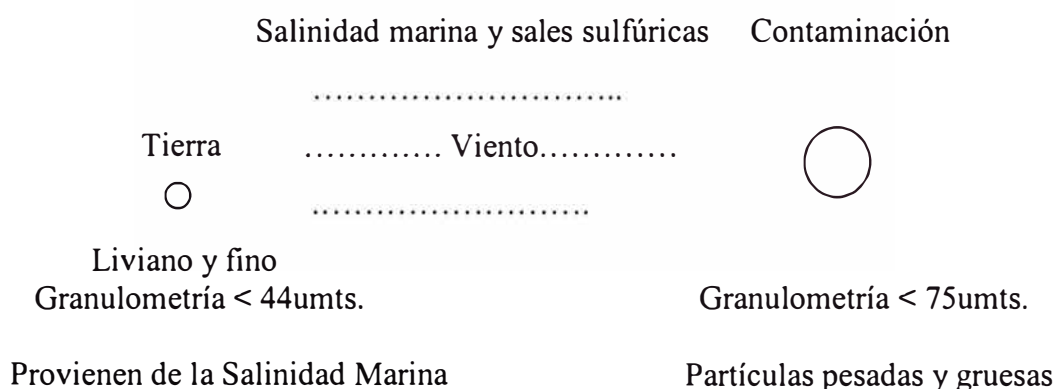
Existe un equilibrio inverso entre las sales solubles, obtenidos en las muestras de contaminación y tierra.

TABLA N° 2.2 Porcentaje de Sales Solubles

| Muestra | Porcentaje Sales Solubles |
|---------------|---------------------------|
| Contaminación | 15% peso |
| Tierra | 01% peso |

Cerca a terrenos de cultivo o suelos polvorientos, los porcentajes aumentan fuertemente.

La contaminación con granulometría menor a 75µm, provienen de la salinidad marina y de las sales sulfúricas de la atmósfera costera, unido a la tierra liviano y fino (Granulometría menor a 44 µm.); este tipo de contaminación es fácilmente suspendibles aun con ligeros movimientos de aire.

**Fig. 2.9. Formación de la Contaminación**

2.8.12. Influencia del Suelo en la Contaminación

El suelo en su estado normal es un mal conductor de la electricidad y totalmente seco se comporta como un material semiconductor o un aislante. El valor de la conductividad, depende de la composición de la mismas, de su estructura, de la presencia de agua, de las sales y de otros parámetros.

El suelo es un sistema complejo, naturalmente desarrollado en el que tienen lugar procesos físicos, químicos y biológicos. Consiste de componentes sólidos, líquidos y gaseosos irregularmente dispuestos, variadamente asociados y en proporciones diversas.

a) Clasificación del Suelo

Se clasifican según la naturaleza del suelo costero en:

| | |
|-------------------------|-----|
| 1.- Terrenos Arenosos | 35% |
| 2.- Terrenos Eriazos | 39% |
| 3.- Terrenos de Cultivo | 21% |
| 4.- Otros usos | 05% |

Según estos porcentajes, se excluye la influencia directa de las sales solubles de la tierra, en la contaminación.

La contribución de los componentes de la tierra en la contaminación, se circunscribe a las sales no solubles y las componentes inertes y neutros.

2.9. Diseño del Aislamiento Bajo Contaminación

2.9.1. Mecanismo de Contorneo de un Aislador Contaminado

La capa contaminante húmeda, uniforme o no uniforme, de los aisladores energizados, son afectados por el secado de la corriente a lo largo de la línea de fuga (teoría de sequedad fisiológica; el agua tiende a pasar de las soluciones salinas menos concentradas a las más concentradas, con objeto de diluir éstas últimas e igualar las presiones osmóticas de ambas) en las superficies mas estrechas, donde la concentración es mayor, es decir las hendiduras de las faldas, o las zonas que rodean el muñón y la espiga, tienden a calentarse mas rápido y a secarse, interrumpiendo bruscamente la corriente.

La primera zona seca, se produce alrededor de la espiga, y en el primer ribete, el cual debe sostener la tensión correspondiente. Cuando esta zona, no soporta la tensión, entonces se forma un arco, en su parte más angosta. La corriente inicial termina de secar las zonas de superficie estrecha, que al ser desbordadas, son puenteadas por otros pequeños arcos intermitentes, especialmente entre el muñón y la superficie superior del aislador, en ese momento, la tensión del aislador se reparte en lo que queda de la línea de fuga. Se intensifica el proceso de secado, avalancha de electrones y descargas, y se produce la repartición lineal de la tensión, a lo largo de la cadena, hasta que un ligero incremento de la tensión o incremento de la humedad ambiental determina la inminencia del contorneo.

Es decir, al inicio, los aisladores idénticamente contaminados, tienen el mismo comportamiento, solo el 10% de la línea de fuga se seca, las cuales al ser puenteadas por arcos, no intervienen en el sostenimiento de la tensión previo al contorneo.

2.9.2. Sostenimiento Superficial Longitudinal de un Aislador

El sostenimiento longitudinal de la tensión del aislador, corresponde a la línea de fuga mas contaminada aun húmeda, y a los sostenimientos unitarios fijos de cada superficie de diferente contaminación, resultando a lo largo de ella una repartición superficial casi uniforme, donde ocurrirá el contorneo, debido a la conductividad de la capa contaminante, Por lo cual se deduce los niveles de sostenimiento longitudinal simplemente desechando en las estimaciones un mínimo del 10% de la línea de fuga.

Se debe verificar la validez de los valores obtenidos, para el caso de los aisladores contaminados naturalmente.

Cuando se realizan mediciones de la resistencia estática, se definen dos líneas de fuga con diferente poder conductivo, los cuales son proporcionales a la densidad superficial de contaminación.

Evidentemente el contorneo ocurrirá por la línea de fuga mas contaminada, es decir si se toma como referencia un aislador normalizado, se deduce teóricamente el sostenimiento de otro aislador de geometría similar, pero de distintas dimensiones con solo adicionar los sostenimientos respectivos de sus superficies diferentemente contaminadas a lo largo de la línea de fuga mas contaminada.

Los lavados se deben realizar a las superficies de diferente contaminación. Con ensuciamiento natural, no saturado, tomando como referencia las características de contorneo de aisladores estándar $L=280\text{mm}$, luego se deducen los sostenimientos longitudinales, en base a estimados de equivalente salino promedio, con las sumatorias de tensiones sostenibles parciales.

Como sabemos, la tensión de contorneo real del aislador es del orden de $7,8\text{Kv/aislador}$.

2.9.3. Características de la Contaminación Natural

La acumulación de la contaminación sobre el aislador no es uniforme, la relación entre:

- La superficie inferior y superior, varían de 3 a 8 veces.
- Ambas mitades de una misma superficie, superior o inferior, varían de 1.5 a 5 veces
- Ambos lados de las faldas, varían de 1 a 3 veces

Las estimaciones cuantitativas, del equivalente salino superficial, se dan a partir de soluciones de agua destilada, el cual no tiene en cuenta el enlace conductivo que representan los inertes. Para el caso de la costa, los inertes representan mas del 80% en peso, a distancias entre 5 y 10 Km del mar, mientras que en las proximidades de la playa, se han detectado niveles cercanos al 60%.

2.9.4. Esfuerzos Eléctricos en el Aislamiento

Las longitudes de línea de fuga del aislamiento externo bajo contaminación, se dimensionan en función de las sobretensiones temporales más elevadas que provienen de desconexiones bruscas de carga, con coeficientes de tensiones fase- tierra, generalmente del orden de $k_t \leq 1.4$ p.u. También puede ser estimado, incluyendo la coexistencia superpuesta del efecto Ferranti (línea en vacío) y del desplazamiento del punto neutro (falla monofásica), con coeficientes del orden $k_{t \max} \leq 1.8$ p.u.

Para determinar los valores específicos de las tensiones de diseño, para el aislamiento mínimo seguro y el aislamiento máximo requerido, se aplicará la siguiente fórmula, utilizando los coeficientes de tensiones fase- tierra K_t y considerando U_0 el valor de la tensión nominal de servicio, así como U_m la tensión máxima de servicio, cuyo sostenimiento garantiza el aislamiento.

$$U_{\min} = \frac{K_t}{\sqrt{3}} \times U_m \quad (2.6)$$

$$U_{\max} = \frac{K_{t \max}}{\sqrt{3}} \times U_m \quad (2.7)$$

2.9.5. Características de Sostenimiento o Contorneo a 5%

Los sostenimientos superficiales longitudinales de un aislador, pueden ser deducidos a partir de las características de sostenimiento o contorneo a 5%, obtenidos con pruebas normalizadas, bajo contaminación uniforme.

Los sostenimientos de tensión, dependen del tipo de aislador, cuando se presentan altos niveles de contaminación.

2.9.6. Tensión de Sostenimiento

Mediante las muestras de contaminación, se puede determinar los equivalentes salinos promedio, y con ello se obtiene las características de sostenimiento o contorneo a 5%, se selecciona los sostenimientos longitudinales, correspondientes a las superficies superiores e inferiores de cada unidad, deduciendo el sostenimiento longitudinal total (U_{total}), con la suma de dichas magnitudes.

Referente a los aisladores de suspensión, el número mínimo y máximo de elementos, se obtiene con las siguientes expresiones, que tienen en cuenta el margen de 10% de error, redondeando los resultados, según sea por exceso o por defecto.

$$N_{min} = \frac{U_{min}}{0.9U_{total}} \quad (2.8)$$

$$N_{max} = \frac{U_{max}}{0.9U_{total}} \quad (2.9)$$

El número máximo de elementos, tiene un solo valor referencial para áreas de contaminación severa o alta, cuyos índices de ensuciamiento semestral sobrepasan el límite de saturación salina conductiva de 0.75 mg/cm² de NaCl, en la superficie inferior.

2.9.7. Diseño del Aislamiento

El diseño se debe hacer para sobretensiones temporarias mas drásticas, pero en la practica, tales contingencias, ocurren excepcionalmente.

El límite máximo, define el coeficiente $K_{max} \leq 1.8$ p.u., correspondiente a líneas sin reactancia de compensación, cuya probabilidad de ocurrencia es 2%. El límite mínimo lo define el coeficiente $K_{min} \geq 1.4$ p.u., correspondiente a desconexiones bruscas de carga, en la extremidad de líneas compensadas., cuya probabilidad de ocurrencia es 33%.

Si asignamos un coeficiente de aislamiento seguro $K_{seg} = 1.6$ p.u., esto representa para las líneas largas de los sistemas futuros, que también serán compensados, una probabilidad de ocurrencia ínfima; para líneas cortas no compensadas, una probabilidad de 10% y 5% de ocurrencia.

El dimensionamiento con $K_{max} = 1.8$ p.u., corresponde a un aislamiento sobredimensionado, para contaminación media o inferior, en tramos de acceso difícil.

$$N_{seg} = \frac{U_{seg}}{0.9U_{total}} \quad (2.10)$$

Se recomienda el sobredimensionamiento de líneas altamente contaminadas, solo para tensiones medias hasta 60 Kv, para tensiones mayores no es práctico ni económico, porque la probabilidad de contorneo es grande, y produce interferencias, para este caso se recomienda estructurar programas de mantenimiento secuencial.

2.10. Mantenimiento Preventivo

Aunque hay casos donde la caída de resistencia de aislamiento puede ser repentina, generalmente se reduce gradualmente, lo que permite una advertencia suficiente si se prueba periódicamente. Estas verificaciones regulares permiten el reacondicionamiento planeado antes que falle el servicio y / o una condición de choque.

Sin un programa de pruebas periódico todas las fallas se presentarán sorpresivamente, no planeadas, inconvenientes y posiblemente muy costosas en tiempo y recursos y, por tanto, caras para rectificarlas. Sin embargo, si se consideran pruebas de diagnóstico de aislamiento en el programa de mantenimiento preventivo, se evitara tales imprevistos.

Si la degradación avanzada del aislamiento no se detecta, existe mayor posibilidad de choque eléctrico y aún de muerte para el personal. Hay mayor posibilidad de que las instalaciones pueden enfrentarse a paros no programados y caros. La medición de la calidad del aislamiento regularmente es una parte crucial de cualquier programa de mantenimiento puesto que ayuda a predecir y prevenir fallas eléctricas.

2.11. Plazos de Mantenimiento

Primero se debe determinar, si la naturaleza de los contaminantes permite su desagregado por soplado neumático, lavado a presión o limpieza manual, y según los tramos afectados, se determinan los plazos de intervención.

Cuando no se presentan precipitaciones pluviales, es recomendable el lavado a presión, al final del periodo, para evitar:

- El anquilosamiento de las partes metálicas móviles, debido a la corrosión y al ensuciamiento.
- El crecimiento de algas, debido al ensuciamiento de la superficie del dieléctrico, en atmósferas con H.R. $\leq 60\%$.

CAPITULO III METODOLOGIA PARA LA SOLUCION DEL PROBLEMA

3.1. Métodos de Estudio

Existen dos métodos para evaluar la contaminación ambiental de los aisladores:

3.1.1. Método Directo

Para evaluar la contaminación es necesario largos periodos de registros, debido a que este método tiene en cuenta los parámetros reales, las mediciones de la contaminación son realizadas en el terreno y los aisladores están contaminados naturalmente. La evaluación en función del contorneo no es posible ya que se presenta rara vez, y el estudio de las corrientes de fuga permanentes y transitorias recién están en la etapa inicial.

3.1.2. Método Simulado

Este método permite evaluar en laboratorio el comportamiento de los aisladores bajo contaminación artificial uniforme, sometiéndolos a las condiciones más difíciles, los tiempos de prueba son cortos y dan resultados rápidos. Sin embargo la semejanza a la contaminación natural resulta difícil de cumplirse debido a los factores que determinan la acumulación progresiva de la contaminación.

3.2. Métodos de Medición de la Contaminación

Para medir la contaminación en el dieléctrico, se evalúa las características electrolíticas, los montos y las propiedades de las componentes inertes.

La medida del grado de contaminación superficial de un aislador se efectuara asociando el carácter conductivo de la contaminación, los cuales determinan la nocividad en presencia de la tensión aplicada.

Existen 4 métodos para realizar la medición de la contaminación:

3.2.1. Medida de la Conductancia

Este método consiste en aplicar una baja tensión durante un intervalo corto a un aislador o a la cadena de aisladores en estado húmedo, midiendo simultáneamente la corriente de fuga.

Con los datos obtenidos se calcula:

a.- La conductancia

$$G=I/R \quad (3.1)$$

b.- La conductividad superficial

$$\sigma = \frac{I}{\rho} = G \int_0^L \frac{ds}{2\pi r(s)} \quad (3.2)$$

Estas formulas suponen una sección conductora uniforme, pero la capa contaminante es de espesor irregular y según el intervalo de aplicación de tensión, la conductividad adopta un carácter dinámico debido a la corriente superficial que tiende a crear zonas por efecto Joule.

Por ello, este método solo se utilizara en la etapa de síntesis y pruebas de laboratorio donde se adoptaran tiempos definidos de medición y las conductividades superficiales se utilizaran como parámetro comparativo, ya que los contaminantes artificiales tienen espesor uniforme.

3.2.2. Medida de la Resistividad Volumétrica Especifica

Este método mide en forma indirecta la densidad equivalente del deposito salino en una superficie aislante, se obtiene una solución electrolítica de un volumen determinado, lavando con pincel una parte o todo el área de un aislador contaminado; el agua utilizada puede ser destilada o de servicio publico, se mide la Resistividad Volumétrica Especifica con un puente de resistividades, también se mide la temperatura de la solución, el cual mediante la característica del instrumento se convertirá a la temperatura de trabajo 18° C, este valor se ubica en la tabla que relaciona la concentración molar salina, y se calcula la cantidad de NaCl en mg/cm².

3.2.3. Medida Indirecta del Equivalente Salino.

Este método utiliza un dispositivo denominado Monitor de Contaminación, que permite la apreciación cuantitativa de NaCl en mg/cm², lo cual determina la contaminación acumulada sobre el dieléctrico en base a la medida de la conductividad superficial, de la capa contaminante de un aislador des-energizado previamente saturada de humedad.

En el proceso de medición, se tiene en cuenta la geometría del dieléctrico (tamaño y perfil). El equivalente salino se calcula con el promedio de las lecturas obtenidos en los diferentes sectores más representativos, de la superficie del dieléctrico.

Este método presenta una cierta dificultad cuando:

- a.- Los aisladores tienen faldas profundas, lo cual no permite el manipuleo de los puntos de exploración.
- b.- La velocidad del viento es alta, lo cual no permite el proceso humidificador.

3.2.4. Medida de la Resistencia Volumétrica

El procedimiento es similar al método anterior, pero solo se debe utilizar agua destilada de alta resistividad, la medición se realiza con un Megometro, obteniendo directamente los valores de resistencia volumétrica del agua de lavado contenido en un tubo de vidrio.

Es necesario la medición de la temperatura de la solución, para apreciar en forma rápida las concentraciones del equivalente salino mediante las tablas.

A continuación se cita los materiales necesarios para la medición:

- Megometro portátil con rango de $0-10M\Omega$, centro de escala $0.2M\Omega$.
- Termómetro de precisión con rango de $0-100^{\circ}C$.
- Soporte de aislador
- Bandejas de porcelana $33x 23x 5$ cm.
- Vasos de vidrio, graduados con capacidad de 200 cm^3 .
- Pinceles de pelo semi-duro, de $1,5$ cm de diámetro.
- Regla graduada de 30 cm.
- Tubo de vidrio, de 22 cm de longitud, y $0,8$ cm de diámetro, con tapones de jebe y electrodos centrales para 20 cm de longitud efectiva.
- Bidones de plástico con capacidad de 8 litros.
- Agua destilada de resistencia volumétrica mínima de $10M\Omega$.
- Frascos de boca ancha con capacidad de 500 cm^3 .
- Franela de 1 metro de largo.

También se puede utilizar agua de servicio público, pero se debe tomar en cuenta la concentración salina, para este caso el Megometro debe tener una escala adicional de $0-1M\Omega$, con centro de escala $0.02 M\Omega$.



Fig. 3.1. Limpieza de un Aislador en Laboratorio, con un pincel y agua destilada.

3.3. Procedimientos para la Medida de la Contaminación

De los cuatro métodos citados anteriormente, detallaremos el procedimiento del último método, Medida de la Resistencia Volumétrica, el cual realiza la medición de la resistencia volumétrica mediante un megómetro o la medición de la conductividad eléctrica con un conductímetro.

- I : Conductímetro.
- II : Megómetro.

Los pasos a seguir para el diseño del nivel de aislamiento son los siguientes:

1.-Elegir para la prueba, los aisladores mas contaminados, previa inspección del Sistema Eléctrico en estudio. El desmontaje de los aisladores en estudio, se debe realizar con mucho cuidado, evitando el contacto con la superficie del aislador, para no alterar el grado de contaminación adherido en la superficie.

2.-Utilizar los siguientes materiales, para cada prueba:

- I

a) Brocha o trapo, limpio.

b) Un recipiente limpio de vidrio o porcelana.

c) Agua nueva, des-ionizada y destilada, con una conductividad (σ), inferior a 5 uS/cm.

d) Conductímetro

e) Termómetro

- II

a) Brocha o trapo, limpio.

b) Un recipiente limpio de vidrio o porcelana.

c) Agua nueva, des-ionizada y destilada, con una conductividad (σ), inferior a 5 uS/cm.

d) Megómetro portátil con rango de 0-10M Ω , centro de escala 0.2M Ω .

e) Termómetro

f) Tubo de vidrio, de 22 cm de longitud, y 0,8 cm de diámetro, con tapones de jebes y electrodos centrales para 20 cm de longitud efectiva.

3.-Limpiar con agua y trapo, el recipiente a utilizar, antes de cada prueba.

4.-Limpiar y lavar la superficie superior e inferior del aislador, en forma separada, sobre el recipiente, con una brocha y con una cantidad conocida de agua, en forma exacta, sin derramar el agua, también enjuague la brocha utilizada, para disolver todos los contaminantes adheridos.

5.-El siguiente paso depende del instrumento a utilizar:

- I

Mida la conductividad (σ), del agua de lavado, con el conductímetro.

- II

Mida la resistencia volumétrica del tubo de vidrio.

6.-Mida la temperatura (° C), del agua de lavado, con el termómetro, al mismo tiempo de realizar el paso N°5.

7.-Con el valor obtenido en el paso N°6, y utilizando el grafico de corrección de temperatura, determine el factor K.

8.-Dividir el valor de la conductividad entre el factor de corrección obtenido en el paso N°7.

9.-Obtener la concentración equivalente de sal (Na Cl),

- I

Aplicando la ecuación:

$$S = \frac{((5.70 \times 10^{-4} \times \sigma))^1.03}{10} \quad (3.3)$$

Se obviara el paso N°7, si el Conductimetro determina la conductividad a cualquier temperatura.

- II

Utilizando la tabla de 'Equivalencias Directas de Mediciones Eléctricas en soluciones electrolíticas de contenido salino', para cada resistencia eléctrica medida en la superficie superior e inferior del aislador, se obtiene las concentraciones de NaCl en mg, para un volumen de 100cc. Si el volumen utilizado para el lavado de la contaminación es diferente a 100 cc, se aplicara a la concentración de NaCl un factor directamente proporcional al volumen.

El valor obtenido en mg de NaCl, se divide entre el área de cada superficie del aislador, y se obtiene el equivalente salino de contaminación para una unidad de superficie en mg/cm².



Fig. 3.2. Medición de la Cantidad de Cloruro de Sodio de la Muestra de Agua

Para realizar la corrección de la temperatura (temperatura diferente a 25 °C), los datos obtenidos se dividen entre un factor K, el cual se determina con el siguiente grafico

3.4. Determinación del Programa de mantenimiento Preventivo

3.4.1. Procedimiento

1.- Los tiempos máximos de sostenimiento posterior (T_{max}), se determinan a partir de las características incrementales en tiempo real, asignando hipotéticamente intervalos adicionales de exposición, mediante el incremento ficticio de equivalentes salinos hasta el nivel intermedio de saturación 0.75 mg/cm², .

2.-A partir del tiempo máximo de sostenimiento (T_{max}), se puede determinar los plazos normales de mantenimiento, el cual permite asegurar cualquier incremento inesperado en la contaminación o evitar intervenciones adelantadas, que no se justifican económicamente.

TABLA N° 3.1. Plazos de Mantenimiento

| Contaminación | (*) Plazo | |
|------------------|-----------|--------|
| | Máximo | Mínimo |
| Severa | 90%. | 60% |
| Media e inferior | 70 % | 50% |

(*) Porcentajes respecto al T_{max}

3.4.2. Plazos de Mantenimiento

Se ha establecido que la naturaleza de los contaminantes permite su desagregado por medio de la Limpieza Manual a trapo seco.

Para determinar los tiempos mínimos de sostenimiento posterior T_{min} , se debe asignar hipotéticamente intervalos adicionales de exposición, mediante el incremento ficticio de los equivalentes salinos, hasta el nivel intermedio de saturación 0.75 mg/cm^2 .

Los tiempos máximos de sostenimiento posterior (T_{max}), se determina a partir de las características incrementales en tiempo real.

El programa de mantenimiento, se basa en la densidad del equivalente salino de la contaminación en mg/cm^2 , obtenida mediante el lavado separado, de las superficies superior e inferior, contaminadas en intervalos de 3 meses, durante un año estacional, para contaminación alta-severa.

Los plazos de mantenimiento para un sostenimiento seguro, se establece a partir de la contaminación media máxima, en un intervalo de muestreo, donde se hallan los límites de sostenimiento posterior, mediante la asignación hipotética de intervalos adicionales de contaminación, como incremento lineal, hasta llegar al límite intermedio de saturación de $0.75 \text{ mg/cm}^2 \text{ NaCl}$.



Fig. 3.3 **Mantenimiento Preventivo- Limpieza de Aisladores**

CAPITULO IV PLANTEAMIENTO

El estudio de la contaminación solo se realizo a los aisladores tipo pin, de porcelana, debido a la facilidad para ejecutar el desmontaje.

4.1. Proceso Disruptivo

Se obtuvo los datos del INEI, referente a la velocidad máxima del viento y la humedad máxima, de la estación ubicada en Bernales-Humay, así como de la estación ubicada en Humay, de un año estacional mas próximo 2004.

4.1.1. Tramo Humay-Huancano

En este tramo el lugar más característico de la zona, es la estación Humay Bernales.

TABLA N° 4.1. Características Climáticas – Zona Humay Bernales

| MES | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-----------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Velocidad Máx (m/s) | 5 | 6 | 6 | 5 | 4 | 3 | 3 | 3 | 5 | 5 | 5 | 4 |
| Humedad Máx (%) | 73 | 74 | 76 | 78 | 80 | 82 | 82 | 86 | 79 | 76 | 80 | 79 |
| Contaminación Crítica | | X | X | | | | | | X | X | | |
| Humedad Crítica | | | | | | X | X | X | | | | |
| Disrupción | | | | | | X | X | X | | | | |
| Limpieza Preventiva | | | | | X | | | | | | | |

Según esta tabla, Febrero y Marzo son los meses donde ocurre la máxima velocidad, por ello las mediciones de las muestras se realizaron en el mes de Abril, donde ocurre la contaminación mas critica de esta zona.

En el mes de Junio, empieza la máxima humedad relativa mayor al 80%. El viento paraca, ráfagas de arena con viento, característico de esta zona, ocurre en el mes de Setiembre, donde la contaminación es severa.

4.1.2. Tramo Huancano-Cuyahuasi

En este tramo el lugar más característico de la zona, es la estación Huancano.

TABLA N° 4.2. Características Climáticas – Zona Huancano-Cuyahuasi

| MES | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-----------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Velocidad Máx (m/s) | 7 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Humedad Máx (%) | 68 | 67 | 71 | 71 | 72 | 65 | 62 | 61 | 67 | 67 | 71 | 72 |
| Contaminación Critica | X | X | | | | | | | X | X | | |
| Humedad Maxima | | | X | X | X | | | | | | X | X |
| Disrupción | | | | | | | | | | | | |
| Autolavado | X | X | X | | | | | | | | | X |

Según esta tabla, Enero es el mes de máxima velocidad, este valor comparado con el tramo anterior es mayor, y constante en todos los meses del año, es decir mayor contaminación. Pero la humedad relativa máxima es 72%, por lo cual no ocurre la disrupción en este tramo, la limpieza en esta zona se basa en el autolavado, mediante las lluvias características en esta zona, en los meses de Enero, Febrero, Marzo y Diciembre.

4.2. Elección del Método de Estudio

Para evaluar la contaminación ambiental se aplicara el Método Directo, mediante el análisis de muestras en los puntos mas críticos del sistema eléctrico, que se determinaran previa inspección de la línea eléctrica, estos datos se realizaron al finalizar el mes de máxima velocidad del viento .

4.3. Elección del Método de Medida de la Contaminación.

Para obtener la densidad del equivalente salino de la contaminación ambiental (ESDD), se aplicara el método 'Medida de la Resistencia Volumétrica', debido a la facilidad de disposición de materiales a utilizar.

4.4. Ejecución de la Prueba

Se retiro 2 aisladores tipo pin de porcelana 56-2, instalados en las estructura N°10 y N°15 (distancia al mar Km 30 y 32), ubicados en la localidad de Montesierpe, cercano a la carretera Los Libertadores, expuestos al medio ambiente durante 3 meses, para realizar la medición del equivalente salino se aplico el método II, medida de la resistencia volumétrica de la solución de lavado, donde se obtuvo los siguientes resultados:

TABLA N° 4.3. Medición de la Resistencia Volumétrica del Lavado

| Resistencia(Mohm) | Superior | Inferior | Volumen (cc) | Temperatura(°C) |
|-------------------|----------|----------|--------------|-----------------|
| Tipo A | 0.05 | 0.03 | 200 | 29.00 |
| Tipo B | 0.03 | 0.02 | 200 | 28.50 |

De las tablas de 'Equivalencias directas de mediciones eléctricas en soluciones electrolíticas de contenido salino', se obtiene:

TABLA N° 4.4. Medición del Equivalente Salino por Unidad de Volumen

| Equivalente Salino (mg/100cc) | Superior | Inferior | Volumen (cc) |
|----------------------------------|----------|----------|--------------|
| Tipo A | 36.28 | 61.14 | 100 |
| Tipo B | 61.80 | 93.54 | 100 |

Teniendo en cuenta que los volúmenes de lavado, es decir de la solución agua destilada mas contaminación, son para ambas superficies de 200 cc, la cantidad total de NaCl, para dicho volumen será proporcional a la relación de volumen de lavado entre el volumen base, es decir 200cc/100cc, es decir, para un volumen de 200cc, resulta:

TABLA N° 4.5. Medición del Equivalente Salino

| Equivalente Salino (mg) | Superior | Inferior | Volumen (cc) |
|-------------------------|----------|----------|--------------|
| Tipo A | 72.56 | 122.28 | 200 |
| Tipo B | 123.60 | 187.08 | 200 |

Donde las superficies superior e inferior de cada aislador tienen las siguientes áreas:

TABLA N° 4.6. Área de las Superficies del Aislador

| Área (cm ²) | Superior | Inferior |
|-------------------------|----------|----------|
| Tipo A | 888 | 1020 |
| Tipo B | 888 | 1020 |

Dividiendo ambos resultados, se obtiene:

TABLA N° 4.7. Equivalente Salino por Area

| Equivalente Salino (mg/cm ²) | Superior | Inferior | Total |
|--|----------|----------|--------|
| Tipo A | 0.0817 | 0.1199 | 0.2016 |
| Tipo B | 0.1392 | 0.1834 | 0.3226 |

4.5. Datos Adicionales de la Muestra de Contaminación

Se realizó el análisis de la muestra de agua contaminada, obtenida de la limpieza del aislador Tipo A, donde se obtuvo los siguientes resultados:

TABLA N° 4.8. Características de la Muestra de Agua de Lavado

| Superficie | ph | Medio | Temperatura | Conductividad (uS/cm) |
|------------|------|--------|-------------|-----------------------|
| Inferior | 5.80 | Básico | 29.6 | 1198 |
| Superior | 7.30 | Ácido | 29.6 | 583 |

Según la tabla, podemos afirmar que la superficie inferior está más contaminada, que la superficie superior, el valor de la conductividad prácticamente se duplica.

Se realizó la medición de la resistencia, de un aislador tipo pin 56-2, se obtuvo los siguientes valores:

TABLA N° 4.9. Medición del Aislamiento-Aislador Tipo Pin

| Resistencia (MΩ) | Tipo A | Tipo B | Tipo C | Tipo D | Tipo E |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Contaminado | | | 6500 | 9500 | 3000 |
| Limpieza Superior | | | | | 3500 |
| Limpio | 40000 | 30000 | 40000 | 29000 | 15000 |

4.6. Programa de Mantenimiento

Tomamos como referencia el aislador mas critico, cuyo equivalente salino corresponde a 0.1834 mg/cm² Na Cl, en la superficie inferior del aislador, después de 3 meses de exposición. De acuerdo a la tabla N° III Rangos de contaminación esperados de los muestreos a intervalos fijos de exposición.

TABLA N° 4.10. Rangos de Contaminación Esperados de los Muestreos

| Grado de Contaminación | Intervalo del Estimador mg/cm ² Na Cl | | | |
|------------------------|--|-------------|-------------|-------------|
| | Mensual | Trimestral | Semestral | Anual |
| Baja | Hasta 0.030 | Hasta 0.048 | Hasta 0.065 | Hasta 0.080 |
| Media | 0.031-0.050 | 0.049-0.110 | 0.066-0.170 | 0.081-0.240 |
| Severa | 0.051-0.120 | 0.111-0.300 | 0.171-0.550 | 0.241-0.950 |
| Alta | 0.121 a mas | 0.301 a mas | 0.551 a mas | 0.950 a mas |

Según el cuadro adjunto el grado de contaminación en esta zona es severa, si realizamos un incremento lineal de la contaminación, obtenemos la siguiente curva:



Fig. 4.1. Incremento Lineal de la Contaminación

De la curva Características y Tendencias Evolutivas de las Densidades Salinas de la Contaminación Depositada en la Superficie Inferior, vemos que el nivel intermedio de saturación (0.75mg/cm^2) se produce a los 12 meses.

De acuerdo a los resultados obtenidos podemos determinar el tiempo máximo de exposición igual a 12 meses, con el fin de evitar la disrupción por contaminación.

Según las condiciones climáticas de la zona, analizadas en (4.1), Mayo es el mes adecuado para realizar el mantenimiento preventivo de la línea eléctrica, antes de las condiciones atmosféricas severas.

4.7. Resultados

Los resultados relacionan los valores de la acumulación de contaminación en términos de ESDD y los tiempos máximos de exposición antes de la disrupción.

Los resultados muestran que la hidrofobicidad y el área de la superficie rugosa determinan la acumulación de los depósitos de contaminación. El mayor nivel de hidrofobicidad, induce menor cantidad depósito de contaminación en atmósferas húmedas o bajo condensación.

La dirección predominante del viento es noroeste, donde la velocidad máxima es 7.0 m/s .

La Contaminación se acumula mas en las zonas protegidas del aislador, es decir en las faldas interiores, al abrigo del barrido del viento.

También la mayor acumulación de la contaminación se produce detrás de las superficies superiores que reabren directamente viento.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

1. Los niveles de contaminación dependen de sus características geométricas y el estado de la superficie. Considerando relevante las condiciones atmosféricas, velocidad del viento y humedad relativa superior al 80%.
2. Cuando existe igualdad de contaminación y humedad, la nocividad depende de la cantidad de partículas inertes.
3. Los aisladores limpios tienen mayor tendencia al ensuciamiento, lo que no ocurre con aisladores que han estado en proceso de contaminación.
4. La fuerza gravitacional y la fuerza eléctrica es despreciable comparado con la fuerza del viento sobre las partículas que contaminan el aislador.
5. La saturación conductiva determina el límite inferior de sostenimiento estable del aislador. Esto se da entre 0.50 a 1.0 mg/NaCl, en la superficie inferior.
6. El criterio más importantes para una selección confiable de aisladores bajo agresiva contaminación costera y desértica son las características geométricas del aislador.

7. La contaminación esta compuesto de las sales solubles (sodio y sulfato), que son procedentes del mar, cuya contribución es pequeña y de sales no solubles (inertes y neutros), que son procedentes del suelo, cuya contribución es mayor cerca al 80%.
8. Los aisladores de las extremidades de una cadena, se contaminan en forma variable, pero la contaminación de los aisladores intermedios es idéntico, los cuales tienen comportamiento similar en los instantes previos al contorneo, donde se reparte uniformemente la tensión sobre la superficie húmeda, definiendo el último nivel de sostenimiento.
9. A partir de las características de sostenimiento o contorneo al 5%, se puede definir el diseño de las cadenas de aisladores y conocer el nivel de sostenimiento bajo contaminación.

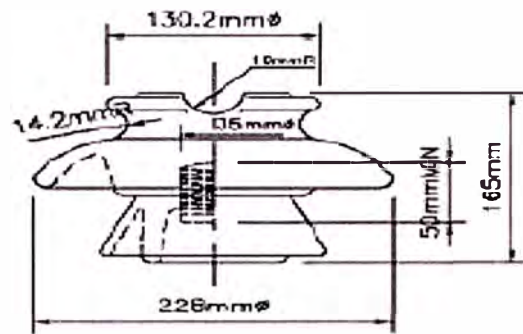
Recomendaciones.

1. Se debe determinar la estandarización de las normas complementarias, tales como el tiempo de duración de las mediciones (15 minutos es el tiempo mínimo estable para la disolución de sal) y el volumen de agua destilada (300 cc es una cantidad suficiente para incluso baja solubilidad de sales), con el fin de disminuir algunas inconsistencias referente a las mediciones de la conductividad, mediante el método ESDD.
2. Profundizar y complementar los actuales estudios con el fin de disponer de información más acorde con la realidad, para futuros diseños y evaluación de los ya realizados.

ANEXO A
Norma IEC 60815 (1986).

| Nivel de Contaminación | Distancia nominal de fuga (mm/kV) |
|------------------------|-----------------------------------|
| Ligero | 16 |
| Medio | 20 |
| Pesado | 25 |
| Muy pesado | 31 |
| Extremadamente Pesado | 40 |
| Casos Excepcionales | 50 |

ANEXO B
Características Geométricas del Aislador de Prueba.



AISLADOR TIPO PIN
CLASE ANSI 56-2

ANEXO C
Ubicación Geográfica

| PROVINCIA Y DISTRITO | CAPITAL LEGAL | | | | | | | |
|-------------------------|---------------|-------------------------|-------------------|-------|-------------|-----------------------|----------------|-------------------|
| | NOMBRE | CALIFICACION DECREACION | | | | UBICACION GEOGRAFICA | | |
| | | CATE- GORIA | DISPOSITIVO LEGAL | | | ALTITUD (m.s.n.m.) | LATITUD SUR | LONGITUD OESTE |
| | | | NOMBRE | N° | FECHA | | | |
| PISCO | PISCO | CIUDAD | LEY | S/N | 19 SET 1898 | 17 | 13°42'24" | 78°12'00" |
| HUANCANO | HUANCANO | PUEBLO | LEY | S/N | 13 OCT 1900 | 1019 | 13°35'46" | 75°37'00" |
| HUMAY | HUMAY | PUEBLO | LEY | 12301 | 03 MAY 1955 | 430 | 13°43'06" | 75°53'00" |
| INDEPENDENCIA | INDEPENDENCIA | PUEBLO | LEY | 9637 | 29 OCT 1942 | 203 | 13°41'21" | 78°01'33" |
| PARACAS | PARACAS | PUEBLO | LEY | 11597 | 08 MAR 1951 | 2 | 13°49'52" | 78°15'10" |
| SAN ANDRES | SAN ANDRES | PUEBLO | LEY | 4431 | 09 NOV 1921 | 3 | 13°43'14" | 78°13'07" |

FUENTE: INSTITUTO NACIONAL DE ESTADISTICA E INFORMATICA.

ANEXO D Especificaciones Técnicas del Aislador

AISLADOR TIPO PIN ANSI 56-2

| N° | CARACTERISTICAS | UNIDAD | VALOR REQUERIDO | VALOR GARANTIZADO (*) |
|------|--|--------|-----------------|-----------------------|
| 1.0 | FABRICANTE | | | |
| 2.0 | NUMERO O CODIGO DEL CATALOGO DEL FABRICANTE | | | |
| 3.0 | MODELO O CODIGO DEL AISLADOR (SEGUN CATALOGO) | | | |
| 4.0 | CLASE ANSI | | 56-2 | |
| 5.0 | MATERIAL AISLANTE | | Porcelana | |
| 6.0 | NORMA DE FABRICACION | | ANSI C 29.6 | |
| 7.0 | DIMENSIONES: | | | |
| 7.1 | DIAMETRO MAXIMO | mm | 229 | |
| 7.2 | ALTURA | mm | 165 | |
| 7.3 | LONGITUD DE LINEA DE FUGA | mm | 432 | |
| 7.4 | DIAMETRO DE AGUJERO PARA ACOPLAMIENTO | mm | 35 | |
| 8.0 | CARACTERISTICAS MECANICAS: | | | |
| 8.1 | RESISTENCIA A LA FLEXION | kN | 13 | |
| 9.0 | CARACTERISTICAS ELECTRICAS | | | |
| 9.1 | TENSION DE FLAMEO A BAJA FRECUENCIA: | | | |
| | - EN SECO | kV | 110 | |
| | - BAJO LLUVIA | kV | 70 | |
| 9.2 | TENSION CRITICA DE FLAMEO AL IMPULSO: | | | |
| | - POSITIVA | kVp | 175 | |
| | - NEGATIVA | kVp | 225 | |
| 9.3 | TENSION DE PERFORACION | kV | 145 | |
| 10.0 | CARACTERISTICAS DE RADIO INTERFERENCIA: | | | |
| 10.1 | PRUEBA DE TENSION EFICAZ A TIERRA PARA INTERFERENCIA | kV | 22 | |
| 10.2 | TENSION MAXIMA DE RADIO INTERFERENCIA A 1000 kHz. EN AISLADOR TRATADO CON BARNIZ SEMICONDUCTOR | uV | 100 | |
| 11.0 | MASA POR UNIDAD | kg | | |
| 12.0 | MATERIAL DEL ROSCADO DEL AGUJERO PARA LA ESPIGA DE CABEZA DE PLOMO | | EN LA PORCELANA | |

(*) Obligatoriamente deberá consignarse el íntegro de la información solicitada, bajo causal de descalificación.

ANEXO E
Equivalencia Directa de Mediciones
Lavado Superficial de Aisladores Contaminados

E.1. Temperatura de Solución: 28.5 grados C.

| RESISTENCIA MEDIDA (MΩ) | EQUIVALENCIA SALINA MG/100CC | RESISTENCIA MEDIDA (MΩ) | EQUIVALENCIA SALINA MG/100CC | RESISTENCIA MEDIDA (MΩ) | EQUIVALENCIA SALINA MG/100CC |
|-------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| 0.001 | 19.00 | 0.046 | 39.92 | 0.155 | 11.53 |
| 0.002 | 984.57 | 0.047 | 39.05 | 0.160 | 11.16 |
| 0.003 | 650.48 | 0.048 | 38.22 | 0.165 | 10.85 |
| 0.004 | 484.75 | 0.049 | 37.43 | 0.170 | 10.49 |
| 0.005 | 385.88 | 0.050 | 36.66 | 0.175 | 10.19 |
| 0.006 | 320.26 | 0.051 | 35.93 | 0.180 | 9.90 |
| 0.007 | 273.57 | 0.052 | 35.22 | 0.185 | 9.62 |
| 0.008 | 238.66 | 0.053 | 34.54 | 0.190 | 9.37 |
| 0.009 | 211.59 | 0.054 | 33.89 | 0.195 | 9.12 |
| 0.010 | 189.99 | 0.055 | 33.26 | 0.200 | 8.89 |
| 0.011 | 172.35 | 0.056 | 32.65 | 0.210 | 8.45 |
| 0.012 | 157.68 | 0.057 | 32.06 | 0.220 | 8.06 |
| 0.013 | 145.29 | 0.058 | 31.50 | 0.230 | 7.70 |
| 0.014 | 134.69 | 0.059 | 30.95 | 0.240 | 7.38 |
| 0.015 | 125.52 | 0.060 | 30.43 | 0.250 | 7.07 |
| 0.016 | 117.51 | 0.062 | 29.42 | 0.260 | 6.80 |
| 0.017 | 110.44 | 0.064 | 28.48 | 0.270 | 6.54 |
| 0.018 | 104.18 | 0.066 | 27.60 | 0.280 | 6.30 |
| 0.019 | 98.57 | 0.068 | 26.77 | 0.290 | 6.08 |
| 0.020 | 93.54 | 0.070 | 25.99 | 0.300 | 5.87 |
| 0.021 | 88.99 | 0.072 | 25.25 | 0.310 | 5.68 |
| 0.022 | 84.86 | 0.074 | 24.56 | 0.320 | 5.50 |
| 0.023 | 81.09 | 0.076 | 23.89 | 0.330 | 5.33 |
| 0.024 | 77.63 | 0.078 | 23.27 | 0.340 | 5.17 |
| 0.025 | 74.46 | 0.080 | 22.67 | 0.350 | 5.02 |
| 0.026 | 71.53 | 0.082 | 22.11 | 0.360 | 4.87 |
| 0.027 | 68.83 | 0.084 | 21.57 | 0.370 | 4.74 |
| 0.028 | 66.32 | 0.086 | 21.06 | 0.380 | 4.61 |
| 0.029 | 63.98 | 0.088 | 20.57 | 0.390 | 4.49 |
| 0.030 | 61.80 | 0.090 | 20.10 | 0.400 | 4.38 |
| 0.031 | 59.76 | 0.092 | 19.66 | 0.425 | 4.11 |
| 0.032 | 57.85 | 0.094 | 19.23 | 0.450 | 3.88 |
| 0.033 | 56.06 | 0.096 | 18.82 | 0.475 | 3.67 |
| 0.034 | 54.38 | 0.098 | 18.43 | 0.500 | 3.48 |
| 0.035 | 52.79 | 0.100 | 18.05 | 0.550 | 3.16 |
| 0.036 | 51.29 | 0.105 | 17.17 | 0.600 | 2.89 |
| 0.037 | 49.87 | 0.110 | 16.37 | 0.650 | 2.66 |
| 0.038 | 48.53 | 0.115 | 15.65 | 0.700 | 2.47 |
| 0.039 | 47.26 | 0.120 | 14.98 | 0.750 | 2.30 |
| 0.040 | 46.05 | 0.125 | 14.37 | 0.800 | 2.15 |
| 0.041 | 44.91 | 0.130 | 13.80 | 0.850 | 2.02 |
| 0.042 | 43.81 | 0.135 | 13.28 | 0.900 | 1.91 |
| 0.043 | 42.77 | 0.140 | 12.80 | 0.950 | 1.81 |
| 0.044 | 41.78 | 0.145 | 12.35 | 1.000 | 1.71 |
| 0.045 | 40.83 | 0.150 | 11.92 | 1.500 | 1.13 |

**Equivalencia Directa de Mediciones
Lavado Superficial de Aisladores Contaminados**

E.2. Temperatura de Solución: 29.0 grados C.

| RESISTENCIA MEDIDA (MΩ) | EQUIVALENCIA SALINA MG/100CC | RESISTENCIA MEDIDA (MΩ) | EQUIVALENCIA SALINA MG/100CC | RESISTENCIA MEDIDA (MΩ) | EQUIVALENCIA SALINA MG/100CC |
|-------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| 0.001 | 1975.95 | 0.046 | 39.51 | 0.155 | 11.42 |
| 0.002 | 973.11 | 0.047 | 38.65 | 0.160 | 11.05 |
| 0.003 | 643.01 | 0.048 | 37.82 | 0.165 | 10.71 |
| 0.004 | 479.24 | 0.049 | 37.04 | 0.170 | 10.39 |
| 0.005 | 381.52 | 0.050 | 36.23 | 0.175 | 10.09 |
| 0.006 | 316.67 | 0.051 | 35.55 | 0.180 | 9.80 |
| 0.007 | 270.52 | 0.052 | 34.85 | 0.185 | 9.53 |
| 0.008 | 236.01 | 0.053 | 34.18 | 0.190 | 9.27 |
| 0.009 | 209.25 | 0.054 | 33.54 | 0.195 | 9.03 |
| 0.010 | 187.89 | 0.055 | 32.91 | 0.200 | 8.80 |
| 0.011 | 170.46 | 0.056 | 32.31 | 0.210 | 8.37 |
| 0.012 | 155.95 | 0.057 | 31.73 | 0.220 | 7.98 |
| 0.013 | 143.71 | 0.058 | 31.17 | 0.230 | 7.63 |
| 0.014 | 133.22 | 0.059 | 30.63 | 0.240 | 7.30 |
| 0.015 | 124.16 | 0.060 | 30.11 | 0.250 | 7.00 |
| 0.016 | 116.23 | 0.062 | 29.12 | 0.260 | 6.73 |
| 0.017 | 109.25 | 0.064 | 28.19 | 0.270 | 6.48 |
| 0.018 | 103.05 | 0.066 | 27.32 | 0.280 | 6.24 |
| 0.019 | 97.51 | 0.068 | 26.50 | 0.290 | 6.02 |
| 0.020 | 92.53 | 0.070 | 25.72 | 0.300 | 5.81 |
| 0.021 | 88.03 | 0.072 | 24.95 | 0.310 | 5.62 |
| 0.022 | 83.95 | 0.074 | 24.30 | 0.320 | 5.44 |
| 0.023 | 80.22 | 0.076 | 23.65 | 0.330 | 5.27 |
| 0.024 | 76.80 | 0.078 | 23.03 | 0.340 | 5.12 |
| 0.025 | 73.57 | 0.080 | 22.44 | 0.350 | 4.97 |
| 0.026 | 70.77 | 0.082 | 21.88 | 0.360 | 4.83 |
| 0.027 | 68.61 | 0.084 | 21.35 | 0.370 | 4.69 |
| 0.028 | 65.61 | 0.086 | 20.84 | 0.380 | 4.57 |
| 0.029 | 63.30 | 0.088 | 20.36 | 0.390 | 4.45 |
| 0.030 | 61.14 | 0.090 | 19.90 | 0.400 | 4.33 |
| 0.031 | 59.13 | 0.092 | 19.46 | 0.425 | 4.07 |
| 0.032 | 57.24 | 0.094 | 19.03 | 0.450 | 3.84 |
| 0.033 | 55.47 | 0.096 | 18.63 | 0.475 | 3.64 |
| 0.034 | 53.80 | 0.098 | 18.24 | 0.500 | 3.45 |
| 0.035 | 52.23 | 0.100 | 17.87 | 0.550 | 3.13 |
| 0.036 | 50.75 | 0.105 | 17.00 | 0.600 | 2.86 |
| 0.037 | 49.35 | 0.110 | 16.21 | 0.650 | 2.64 |
| 0.038 | 48.02 | 0.115 | 15.49 | 0.700 | 2.45 |
| 0.039 | 46.78 | 0.120 | 14.83 | 0.750 | 2.28 |
| 0.040 | 45.57 | 0.125 | 14.22 | 0.800 | 2.13 |
| 0.041 | 44.43 | 0.130 | 13.66 | 0.850 | 2.01 |
| 0.042 | 43.35 | 0.135 | 13.15 | 0.900 | 1.89 |
| 0.043 | 42.32 | 0.140 | 12.67 | 0.950 | 1.79 |
| 0.044 | 41.34 | 0.145 | 12.22 | 1.000 | 1.70 |
| 0.045 | 40.40 | 0.150 | 11.81 | 1.500 | 1.12 |

BIBLIOGRAFIA

1. R Znaidi, “ Research and Assessment of Insulators Performance in Marine and Desert Environment”, World Congreso on Insulator Technologies for the Year 2000 and Beyond – Steg - Tunisia, 1999.
2. K J Lloyd and H M Schneider, “Insulation for Power Frequency Voltage”, Project UHV– United States, 1977.
3. Michael J. Owen, “Hydrophobicity Loss and Recovery of Silicone High voltaje Insulation”, Dow Corning Corporation, Midland, Michigan - Estados Unidos, 1994.
4. Jairo León García, “Diseño del aislamiento bajo contaminación del segundo circuito de interconexión a 500 kv, del Sistema Central Colombiano con la Costa Atlántica”, Electroporcelana GAMMA S.A – Colombia, 1988.
5. Claudia Arango B., “.Metodología para el diseño del aislamiento en una línea de transmisión”, Electroporcelana GAMMA S.A. - Colombia, 1988.
6. Favio Casas Ospina, “Soporte de la Seguridad Eléctrica”, Segeléctrica LTDA – Colombia, 2003.
7. Justo Yanque Montufar, “Técnicas de Alta Tensión”, Universidad Nacional de Ingeniería- FIEE –Perú, 2004.
8. Luis Maria Checa, “Líneas de Transporte de Energía ”, Alfa Omega Grupo Editor S.A.- México, 2000.
9. Mejia Villegas, “Subestaciones de Alta y Extra Alta Tensión”, Mejía Villegas S.A – Colombia, 2003.
10. Justo Yanque Montufar, “Electricidad del Perú”, Instituto de Investigaciones Energéticas y Servicios de Ingeniería Eléctrica- Perú, 2000.
11. David O. Jones-Jeffrey R. Jowerr-S. Graeme Thomson-David S. Danner, “Guía para pruebas de diagnóstico de aislamiento”, Megger- Estados Unidos, 2003.