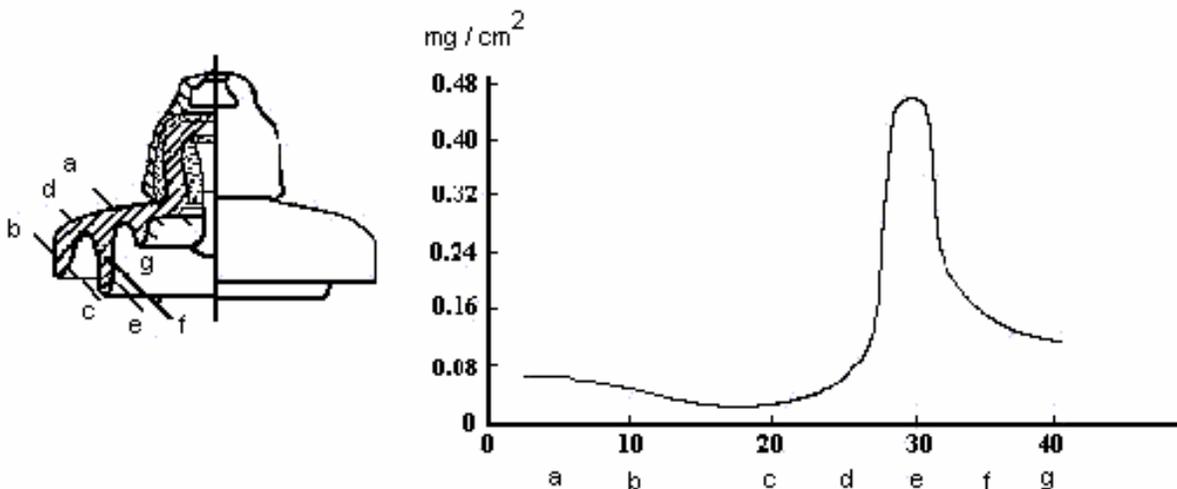


Capítulo 1.

El proceso de contaminación del aislamiento eléctrico externo.

Los aisladores que se encuentran bajo condiciones de explotación están sometidos a las condiciones del medio en que se encuentran situados, las cuales varían ampliamente de un lugar a otro, dependiendo de las características de la zona en que se encuentre la parte de la instalación en cuestión. Estas características hacen posible que el nivel de aislamiento requerido pueda variar a lo largo de una misma línea, pues las condiciones de contaminación son diferentes a lo largo de la traza de la misma.

Así mismo, la forma del aislador va a intervenir grandemente en el modo en que dicho contaminante se va a acumular a lo largo de su superficie, como se muestra en la Figura más abajo.



Curva de distribución del contaminante acumulado a lo largo de la superficie de un aislador tipo neblinero

De manera general puede decirse que los aisladores ubicados en las líneas eléctricas aéreas siempre están expuestos a la contaminación, pues aún cuando se toman medidas con respecto a limitar o reducir las emisiones de contaminantes por parte de las fuentes industriales, la contaminación de tipo natural es prácticamente imposible de controlar, por lo que internacionalmente el trabajo investigativo se ha dirigido al diseño y selección de aislamientos adecuados así como a establecer medidas y procedimientos para su explotación, bajo las diferentes condiciones meteorológicas y de contaminación que se pueden presentar.

Existen tres tipos fundamentales de contaminación: **marina**, **industrial** y **desértica**, pudiéndose incluir un cuarto tipo en los casos de las zonas industriales cercanas al mar. La contaminación marina puede ubicarse no sólo en las inmediaciones de la costa, sino también a considerables distancias de las mismas por la acción de los vientos; la contaminación industrial tiene su aparición con el desarrollo de las industrias y los efectos

contaminantes de las mismas al medio, pudiendo ser de diversos tipos, en dependencia de la fuente que la origina: química, petroquímica, metalúrgica, cemento, etc., teniendo sus particularidades cada una de ellas. Existe un caso particular de contaminación que se presenta en las zonas desprovistas de vegetación, por efecto del polvo que puede llegar a depositarse en los aisladores; esto es muy común en períodos de seca muy prolongados o durante el laboreo de las tierras. En algunos de los casos vistos el contaminante puede ser eliminado con facilidad con el uso de medidas de lavado, mientras que en otros como el cemento, puede llegar a formarse incrustaciones que sólo pueden ser eliminadas con el uso de agentes químicos.

En su forma más general, los contaminantes constan de dos partes fundamentales: una parte **eléctricamente inerte** que al humedecerse no se disocia en iones, y que por lo tanto no es conductora y cuya función es darle a la capa sus características adhesivas y absorbentes, y una parte **eléctricamente activa** que al humedecerse se disocia y presenta por tanto características conductoras.

Las partículas contaminantes que se encuentran en suspensión en el aire, y que pueden ser trasladadas por este a las cercanías de los aisladores, poseen un diámetro que se encuentra en el rango de 0,001 a 400 micrones. La magnitud y distribución de la capa de contaminante sobre la superficie del aislador no es posible determinarla con precisión debido a la diversidad de factores involucrados en el proceso. Cuando una partícula de contaminante se encuentra en las cercanías de un aislador energizado la misma está sujeta a diversas fuerzas, por lo que se moverá en una dirección resultante hasta que se deposita sobre el aislador, después de lo cual estará sometida a la acción de la lluvia, el rocío y la niebla, las cuales actuarán sobre la distribución original. Las fuerzas que actúan sobre las partículas pueden resumirse en:

- **Fuerza gravitacional**, cuya tendencia es la de depositar las partículas más pesadas en la superficie superior del aislador, acentuándose su efecto en la medida que aumenta el tamaño de las mismas.
- **Fuerza del viento**, que se plantea es la de mayor incidencia; es la encargada de llevar las partículas contaminantes a las proximidades del aislador, permitiendo que actúen el resto de las fuerzas. En su efecto tiene un papel importante las características aerodinámicas del aislador.
- **Fuerza electrostática**, cuyo efecto tiene una gran dependencia del estado de carga de la partícula. El efecto de esta fuerza se hace presente cuando ocurre el fenómeno de la **corona**, que permite bajo la polarización alterna de las tensiones de inicio, un desplazamiento efectivo de la partícula hacia las zonas de mayor intensidad de campo.

Por otro lado, **la lluvia** es otro de los factores de mayor incidencia en la no uniformidad de la capa de contaminante, por su efecto de lavado, en un mayor grado, sobre la superficie de los aisladores. Esto contribuye a que el nivel de contaminación de las áreas protegidas del aislador sea muy superior al del resto. Así mismo, debido fundamentalmente al efecto del lavado de la lluvia, se comprueba que las cadenas aislantes dispuestas

horizontalmente, o con cierto ángulo, presentan un mejor comportamiento con relación a las cadenas verticales.

Proceso de la descarga por contaminación en el aislamiento.

Independientemente de la condición de contaminación existente, para que se produzca una descarga total existen una serie de requisitos mínimos a cumplirse:

- Formación de la capa de contaminante.
- Humedecimiento de la capa de contaminante y aumento de su conductividad y de la corriente de filtración.
- Secado de la capa de contaminante en las regiones de mayor densidad de corriente. Formación de las bandas secas.
- Descarga a través de las bandas secas y crecimiento de las mismas.
- Descarga total.

La secuencia anterior no implica que cada uno de los eventos mencionados esté completamente definido en tiempo, pudiendo desarrollarse varios simultáneamente, como es el caso de la contaminación marina directa cerca de la costa en la cual la formación de la capa de contaminante, así como su humedecimiento, son eventos que ocurren al mismo tiempo.

Cuando la capa de contaminación depositada sobre la superficie del aislador se humedece, su comportamiento es el de un electrolito, disminuyendo su resistencia e incrementándose la corriente de filtración a través de ella. Con el aumento de la corriente se incrementa el calor generado y a su vez la temperatura de la capa contaminante, lo que hace que disminuya aún más su resistencia, debido al coeficiente térmico negativo de los electrolitos. Esta disminución de la resistencia de la capa se pone de manifiesto hasta que la temperatura alcanza el punto de ebullición, comenzando la capa a perder humedad por evaporación. En este instante la resistencia de la capa comienza lentamente a aumentar, hasta que la pérdida de humedad sea tal que la capa se seca, momento en el cual la misma alcanza rápidamente altos valores de resistencia; este fenómeno es más acentuado en las partes más estrechas del aislador, donde la densidad de corriente es superior, llegándose a formar a través de este mecanismo, zonas secas perfectamente detectables, a las cuales se les nombra **bandas secas** por su disposición en el aislador. El incremento en la resistencia, producido por la formación de la banda seca, hace que la corriente disminuya, pero su formación implica que la mayor parte de la tensión aplicada al aislador aparezca a través de ella, por estar aún mojado o húmedo el resto de la capa contaminante depositada sobre el aislador y por tanto poseer baja resistencia.

El ancho de la banda seca varía en dependencia de varios factores: **características de absorción de la capa, régimen de humedificación, lugar donde se forma la banda seca, etc.** Dicha banda se sigue formando a través de un proceso cíclico hasta un punto en que la tensión aplicada a la misma es ligeramente inferior al valor requerido para iniciar la descarga por el aire, por lo que cualquier disminución del ancho de la banda, distorsión del campo eléctrico o el desarrollo de algún proceso de ionización provocará la descarga;

el arco crecerá hasta un límite, en que dependiendo de las características del sistema éste se extingue o produce el cortocircuito del aislador. Durante años se han desarrollado diversos estudios para obtener modelos matemáticos que permitan un estudio más detallado sobre el fenómeno de la descarga del aislamiento por la contaminación; dichos modelos matemáticos presentan un compromiso entre complejidad y exactitud, ya que existen un gran número de variables de difícil obtención.

La selección del nivel de aislamiento necesario para asegurar una explotación eficiente del mismo en las instalaciones eléctricas que operan bajo los diferentes ambientes que se presentan en un país o región determinada, involucra tres aspectos fundamentales:

- La determinación del nivel (grado, severidad) de contaminación de la región.
- La caracterización del comportamiento de los diferentes tipos y modelos de aisladores bajo las diferentes condiciones ambientales naturales.
- El procedimiento de diseño y selección del aislamiento propiamente dicho.

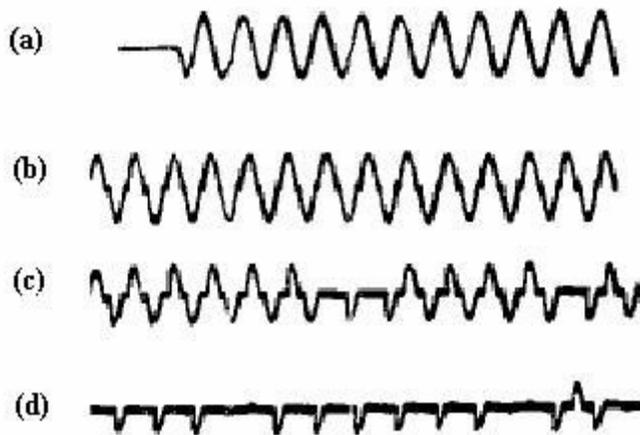
No en todos los países son utilizados los mismos criterios y métodos para determinar o considerar cada uno de estos aspectos; el fenómeno de la contaminación del aislamiento, su proceso y desarrollo son tan complejos, y por tanto el comportamiento del aislamiento ante este problema, que no existe una fórmula única para dar solución al mismo y cada país ha desarrollado aquellos métodos o metodología de trabajo que más eficiente, económica o factible técnicamente, le ha sido.

La gran distorsión y concentración de altas intensidades de campo sobre la superficie de los aisladores contaminados, provocada por la formación de las bandas secas, explican por qué, siendo la tensión disruptiva del aire del orden de los kV/cm y estando los aisladores diseñados para tener una intensidad de campo sobre su superficie en su régimen normal de trabajo del orden de los 500 V/cm, se pueden producir descargas que pongan en peligro la operación normal del sistema.

En el mecanismo de elongación del arco inciden diversos factores tales como: la fuerza ascendente del vapor de agua generado por la descarga, el secado del contaminante en los puntos de contacto de la descarga con la superficie contaminada que aumenta el ancho de las bandas secas, la fuerza ascendente del aire calentado por la descarga, las fuerzas electrostáticas que se generan en los extremos de la descarga debido a la alta concentración de campo, la variación de la corriente con el crecimiento de la descarga, etc.

Todo lo anterior muestra lo difícil que es efectuar este análisis, ya que en cada caso intervienen varios factores, pudiendo ser el principal uno o la combinación de varios.

Sobre la superficie de los aisladores sometidos a los efectos de la contaminación se producen tres tipos diferentes de descargas eléctricas: descarga tipo arco, descarga incandescente (“glow”) y descarga por efluvios (“streamer”)



Características de la corriente para cuatro estados diferentes de secado de la capa contaminante.

- a) Antes de la formación de las bandas secas.
- b) Durante la formación de las bandas secas.
- c) Durante el aumento de amplitud de las bandas secas.
- d) Durante el proceso de secado intenso.

Descarga tipo arco. - Una vez humedecido el contaminante, y antes de la formación de las bandas secas, la corriente mantiene su forma sinusoidal tal como se muestra en la Figura más abajo. Después de formadas las bandas secas e iniciado el proceso de descargas a través de ellas, la corriente sufre bruscas variaciones en su magnitud y en su forma de onda.

Como se puede observar en la Figura, la corriente pierde su continuidad apareciendo períodos finitos de corriente cero. La descarga observada en este estado es la característica de los arcos, lo que se comprueba por su característica U-I negativa y por su intensidad luminosa que permite su

fácil reconocimiento. El proceso inicial de la descarga comienza sin prácticamente ningún proceso previo de ionización, estando determinado básicamente por la ruptura dieléctrica del aire producido por las altas y bruscas concentraciones de campo aplicadas a las bandas secas.

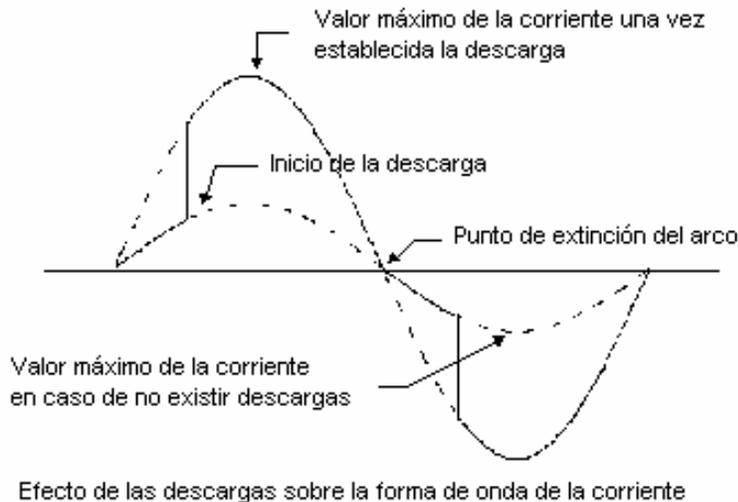
Bajo las condiciones iniciales los pasos altamente ionizados por las descargas precedentes aseguran una rápida reignición de los mismos cada medio ciclo, siendo los períodos de corriente cero menores de 2 ms.

Como el proceso de secado sobre los aisladores continúa, el incremento en la resistencia hace que los picos de corriente disminuyan, disminuyendo por tanto la ionización producida por las descargas, por lo que las mismas se producirán cada vez a más altos valores de tensión, aumentando con ello los períodos de corriente cero.

Al aumentar los períodos de corriente cero el proceso de recombinación en los pasos ionizados se hace más efectivo, llegando a un punto tal en que se hace necesario un proceso de ionización previo para que se establezca la descarga.

Cuando los intervalos de corriente cero alcanzan un tiempo del orden de las 2 ms se requiere un proceso previo de ionización antes de que se pueda establecer la nueva descarga, lo cual dependerá del grado de desionización alcanzado, la longitud del paso a ionizar, etc.

A partir de este punto del fenómeno el proceso de reignición no se repite cada medio ciclo, pasos c) y d) de la Figura anterior, desarrollándose la descarga predominantemente en el semiciclo negativo debido a las características propias del efecto corona.



Debido a que cada vez se produce la descarga a valores mayores de tensión, la corriente sube rápidamente llegando en tiempos del orden de los $10 \mu\text{S}$ al valor que determinen para ese instante la magnitud de la tensión aplicada, la resistencia del resto del aislador y la caída de tensión en el arco que se establece, siguiendo después la forma característica que le corresponda de acuerdo a la onda de tensión aplicada, como se muestra en la Figura a la derecha del texto.

A medida que aumenten los períodos de corriente cero, aumenta el tiempo en que la mayor parte de la tensión aplicada lo está sobre las bandas secas, con lo que se producen altas intensidades de campo en sus extremos permitiendo el desarrollo de los demás fenómenos asociados al efecto corona.

Descarga incandescente.- Este tipo de descarga se caracteriza por ser de muy corta duración y por producirse en los alrededores de los valores máximos de la onda de tensión, siendo una de las fuentes de radio interferencias asociadas con el fenómeno producido por la contaminación.

Este tipo de descarga desaparece cuando el aislador se ha secado por completo y por tanto no existen puntos sobre su superficie con intensidades de campo suficientemente altas para permitir su formación.

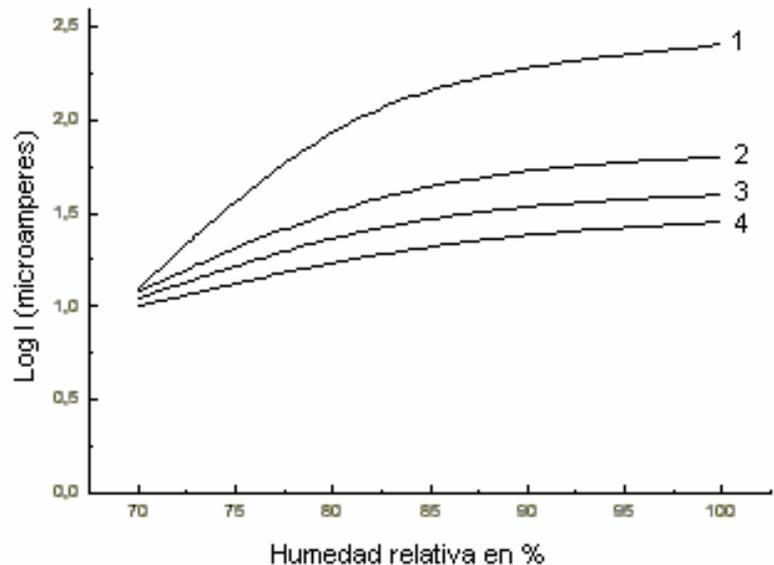
Dada la corta longitud que alcanzan estas descargas, no juegan un papel fundamental en el proceso de ionización, pero crean las condiciones de ionización necesarias para el desarrollo de las descargas tipo "streamer" o efluvios.

Descargas por efluvios.- Después de la aparición de las descargas incandescentes, si el aislador contaminado sigue sometido a algún proceso de humedecimiento el ancho de las bandas secas disminuye, aumentando la intensidad del campo a través de ellas, lo que hace posible que se puedan desarrollar descargas de mucha mayor longitud y que se caracterizan por su naturaleza ramificada, las que dentro del fenómeno de corona son conocidas como descargas tipo "streamer".

Estas descargas son las que producen la ionización necesaria para la formación de descargas tipo arco cuando los periodos de corriente cero exceden los 2 ms. Estas descargas son las máximas responsables de la intensidad de las radiointerferencias que acompañan a las descargas superficiales en los aisladores contaminados.

Conductividad superficial en los aisladores.

Como se conoce, la conductividad superficial de un elemento aislante expuesto al medio ambiente depende básicamente de las condiciones ambientales, fundamentalmente de la humedad y de la contaminación ambiental. De los parámetros propios del aislador. La naturaleza hidrofóbica o hidrofílica son muy importantes pues ellas determinan su respuesta ante el agua, en estas propiedades también juega un papel importante la naturaleza polar o no del material. Los elementos aislantes, con la superficie perfectamente limpia y seca, tienen una resistencia superficial del orden de $10^7 - 10^{10} \Omega$ y después de ser expuestos al aire con 100 % de humedad relativa la resistencia de las superficies hidrofóbicas disminuye de dos a cuatro ordenes de diez y las superficies hidrofílicas disminuyen de cinco a siete ordenes.



Variación de la corriente superficial con la humedad.
1.- Aislador de vidrio contaminado.
2.- Aislador de porcelana contaminado.
3.- Aislador de vidrio limpio.
4.- Aislador de porcelana limpio.

En los aisladores que están sometidos a condiciones de contaminación ambiental, el efecto de la humedad es aún mayor debido a que la capa de contaminante absorbe humedad y con ello aumenta considerablemente la conductividad superficial de la misma tal como se muestra en la Figura anterior para aisladores limpios y contaminados. Como se aprecia en la misma, el aumento de la corriente superficial es apreciable a medida que aumenta la humedad y también es apreciable la diferencia en el comportamiento en los aisladores sometidos a prueba.

Valor máximo de la conductividad de una capa de contaminante.

Si se tiene una capa de contaminante uniformemente distribuida que tenga W (g/cm^2) de contaminante soluble al humedecerse adquiere una concentración que se expresa por:

De la expresión se observa que para valores pequeños del espesor (**h**) la concentración tiende a valores muy altos, los cuales, independientemente del grosor de la capa nunca podrán ser mayores que el de la concentración (**C_o**) correspondiente al límite de solubilidad a la temperatura de la capa, por lo que la conductividad específica será constante. La conductividad superficial está dada por:

$$\sigma_S = \sigma h$$

donde: σ_S - Conductividad superficial (S).
 σ - Conductividad específica (S/cm).
 h - Espesor de la capa (cm).

De la expresión anterior se observa que la conductividad superficial se incrementa linealmente con **h** hasta que la capa adquiere el grosor **h_o**, el cual está determinado por la expresión:

A partir de que se cumpla lo anterior, la concentración y con ello la conductividad superficial siguen aumentando con **h**, ya que el efecto del aumento de esta última es mayor que la disminución de la primera. La capa presentará su máxima conductividad cuando ambas tendencias se compensen. Para esta condición, la capa contaminante será una solución infinitamente diluida y la conductividad específica será proporcional a la concentración, cumpliéndose la siguiente relación:

$$\sigma = \frac{A_o C}{G}$$

donde: A_o - Conductividad equivalente de la solución infinitamente diluida.
 G - Peso equivalente en gramos del contaminante soluble.

A partir de ello se puede decir entonces que la conductividad específica en función del espesor de la capa y de la concentración de contaminante será:

$$\sigma = \frac{A_o W}{G h}$$

Por tanto, la expresión de la máxima conductividad posible a una temperatura dada puede expresarse como:

$$\sigma_S (\text{max}) = \frac{A_o W}{G}$$

Como un ejemplo se puede citar el NaCl a 20 °C en que $A_o = 113.4$ y $G = 58.5$ luego:

$$\sigma_S (\text{max}) = 1,94 W$$

La forma práctica de determinar la conductividad máxima de una capa de contaminante es la de obtener sus valores a medida que se humedece. Bajo el efecto de la tensión de prueba, la corriente de fuga hará que la temperatura de la capa aumente, lo que incrementa aun más su conductividad, dado su coeficiente térmico negativo, hasta que se llegue a la temperatura de ebullición, momento a partir del cual la conductividad comienza a disminuir.

El efecto del incremento en la conductividad con la temperatura se tiene en cuenta mediante un factor, el cual se expresa como:

$$K = 1 + \beta (T_b - T_{amb})$$

donde:

- T_b - Temperatura del punto de ebullición de la capa.
- T_{amb} - Temperatura del medio ambiente.
- β - Coeficiente de conductividad, cuyo valor oscila entre 0.016 - 0.019 y 0.022 - 0.025 para los ácidos y las sales respectivamente.

El análisis anterior se refiere a elementos aisladores uniformemente contaminados y de diámetro constante; cuando los elementos no están uniformemente contaminados y son de diámetro variable, el factor se define como sigue:

$$K = \frac{I_1}{I}$$

donde: I_1 - Corriente de filtración en el instante anterior a la formación de las bandas secas.
 I - Corriente de filtración en el instante de aplicación de la tensión de prueba.

Para este caso, la conductividad máxima de la capa de contaminante se determina aplicando una tensión nunca mayor de 2 kV (r.m.s) por metro de la distancia de chispa del aislador y sólo por el tiempo necesario para medir la corriente, determinándose así su valor máximo, con lo que se puede calcular el valor de su resistencia R. El cálculo de la conductividad superficial se efectúa mediante la expresión:

$$\sigma = \frac{F}{R} \quad \text{donde:} \quad F = \frac{1}{\pi} \int_0^L \frac{dl}{D(l)}$$

Siendo:

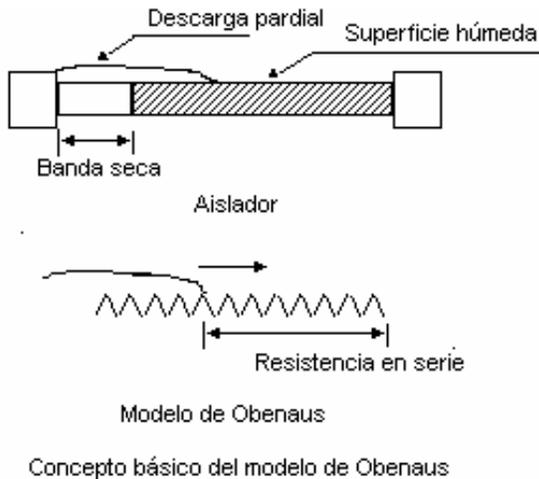
- dl - Elemento de longitud infinitesimal a lo largo de la superficie del aislador.
- $D(l)$ - Diámetro del aislador que corresponde a cada dl .

También es factible determinar el valor de la resistencia a medida que el aislador se humedece usando un óhmímetro o usando equipos graduados directamente para expresar el valor de la conductividad superficial en su equivalente salino.

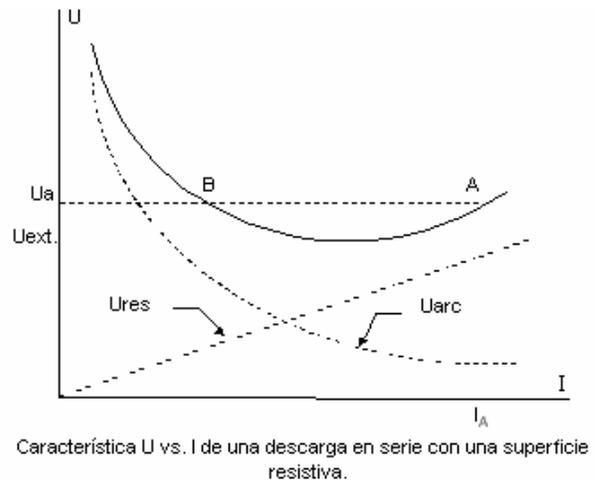
El proceso de humedecimiento tiene que ser lo más uniforme posible a fin de que todas sus partes alcancen la máxima conductividad al mismo tiempo, pues la tendencia normal de un aislador sometido a un proceso de humedecimiento es que su área no protegida alcance la máxima conductividad antes que el área protegida, comenzando en ella el proceso de lavado por escurrimiento. De ocurrir lo antes expuesto nunca se sabrá el valor máximo de conductividad de la capa midiendo su resistencia.

Modelo de Obenaus.

Para la explicación de la teoría y análisis matemático de la descarga sobre los aisladores ontaminados se han empleado diferentes modelos, siendo el modelo más desarrollado el que analiza el fenómeno representándolo como una descarga en serie con una resistencia.

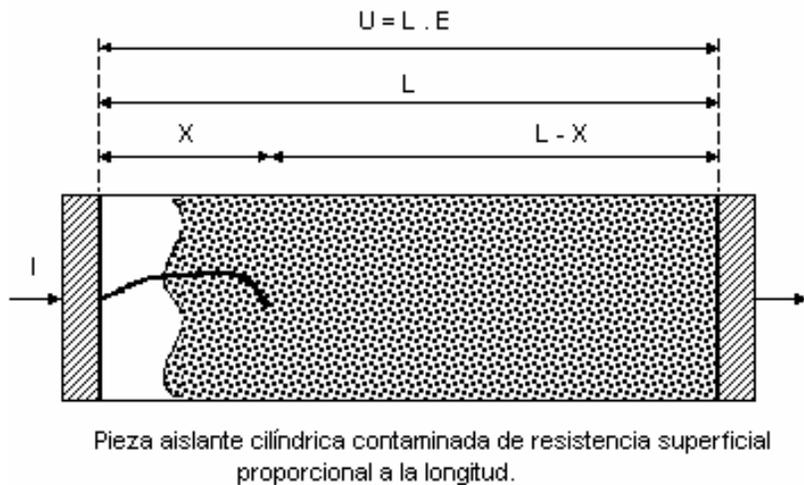


En la Figura a la izquierda se presenta el concepto básico del modelo en tanto que en la Figura que se muestra más abajo se presenta la característica **U-I** que le corresponde para el rango de corriente de 20 – 1000 mA que es el de más interés para los estudios de contaminación.



En dicha Figura la característica U_{arc} representa el comportamiento que le corresponde a la descarga en el aire y la característica U_{res} representa la caída en el resto de la pieza contaminada. La curva restante representa la suma de las anteriores y corresponde a la característica total del sistema analizado. Como se puede observar, para tensiones menores de U_{ext} no existe solución posible para el sistema, por lo que cualquier descarga que se produzca se extinguirá, en tanto que para una tensión de magnitud U_a existen dos posible soluciones, siendo I_a la corriente que le corresponde a la solución estable debido a que el punto B es una solución inestable del sistema.

Para el caso de una pieza aislante cilíndrica, como la que se muestra en la Figura más abajo, y en la cual la resistencia es proporcional a la longitud, se tiene que para una sola descarga en serie con el resto de la capa de contaminante se cumple la siguiente relación:



$$U = U_d + IR$$

donde: U - Tensión total aplicada.
 U_d - Caída de tensión en la descarga.
 R - Resistencia en serie con la descarga.
 I - Corriente en el sistema.

Experimentalmente se ha determinado que U_d se puede expresar según la relación:

$$U_d = A X I^{-n} + \beta \quad \text{donde: } A = 63 ; n = 0,76 ; X - \text{Longitud del arco.}$$

$\beta = 370$ para las condiciones de descarga tipo "glow".
 $\beta = 50$ para las descargas tipo arco.

Arreglando las expresiones anteriores y despreciando β por ser pequeña comparada con las tensiones normalmente usadas en las pruebas se tiene que:

$$U = X A I^{-n} + IR$$

De la Figura anterior se puede obtener la relación:

$$R = R_c (L - X) \quad \text{donde: } R_c - \text{Resistencia por unidad de longitud.}$$

Finalmente puede llegarse a una expresión que sería la tensión aplicada al modelo bajo prueba:

$$U = X A I^{-n} + I R_c (L - X)$$

La tensión mínima para la cual la descarga puede existir (U_{ext} en la Figura anterior) se obtiene hallando el mínimo que le corresponde a la expresión arriba mencionada, el que está dado para:

$$I = \left[\frac{n X A}{R_c (L - X)} \right]^{\frac{1}{n+1}}$$

Partiendo de ella, puede obtenerse la expresión del valor mínimo de la tensión:

$$U_{\min} = (n - 1) (A X)^{\frac{1}{n+1}} \left[R_c \frac{L - X}{n} \right]^{\frac{n}{n+1}}$$

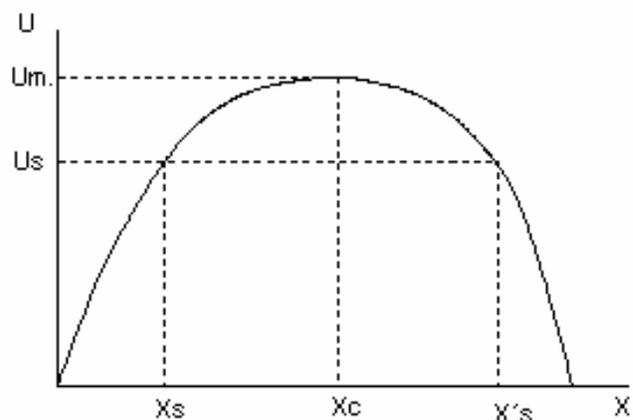
La expresión anterior puede verse representada gráficamente en la Figura que se muestra más abajo en función de la distancia para la cual es posible la existencia de la descarga.

El valor máximo de U_{\min} se determina hallando el máximo que le corresponde a la expresión anterior, el que está dado para el punto:

$$X_c = \frac{L}{n+1}$$

encontrándose el valor máximo de U_{\min} expresado según la relación:

$$U_c = A^{\frac{1}{n+1}} L R_c^{\frac{n}{n+1}}$$



Característica de la tensión en función de la longitud de la descarga.

En la Figura anterior se observa que si el aislador se le aplica una tensión U_s y la longitud de la descarga inicial fuera menor que X_s la misma podría crecer hasta alcanzar una longitud $X = X_s$, siendo imposible cualquier crecimiento posterior ya que la tensión requerida para ello es mayor que U_s y la descarga se extinguiría.

Si la descarga inicial alcanza la longitud $X > X'_s$ la descarga puede crecer hasta llegar a la descarga total, pues a medida que la descarga crece la tensión requerida para mantenerla es menor.

Se observa que hay un valor crítico para la tensión y un valor crítico para la longitud inicial de la descarga. Para valores superiores de cualquiera de los dos parámetros existe la posibilidad de una descarga total.

La expresión anterior puede expresarse, en función de la intensidad de campo, por la relación:

$$E_c = A^{\frac{1}{n+1}} R_c^{\frac{n}{n+1}}$$

Esta expresión define la relación crítica que existe entre la intensidad del campo aplicado y la resistencia de la capa de contaminante, siendo E_c el valor máximo de la intensidad de campo al cual la descarga total es imposible.

Para los valores de A y n dados la relación toma la siguiente forma:

$$E_c = 10,5 R_c^{0,43}$$

Para un valor dado de R_c la descarga total es imposible para cualquier intensidad de campo menor que la definida por la expresión anterior; de igual manera para un valor de E_c dado la descarga total es imposible para cualquier resistencia mayor que la definida por esta expresión.

Así mismo se tiene que para los valores de A y n dados la distancia crítica es:

$$X_c = 0,57 L$$

Como se vio anteriormente, la descarga total para valores de tensión menores que U_c sólo es posible si $X > X_c$, para lo cual la descarga inicial tendría que cubrir una longitud mayor que la mitad de la longitud del aislador según se observa en la expresión de más arriba, lo cual es imposible para las longitudes reales de los aisladores.

La corriente asociada con las condiciones críticas analizadas se obtiene según:

$$I = \left(\frac{A}{R_c} \right)^{\frac{1}{n+1}}$$

De la expresión anterior A o R_c pueden ser eliminados usando una de las expresiones anteriores, con lo que se obtienen las siguientes relaciones:

$$I_c = \left(\frac{A}{R_c} \right)^{\frac{1}{n}} \qquad I_c = \frac{E_c}{R_c}$$

La corriente dada por las expresiones anteriores es la máxima que puede circular en un estado de contaminación dado, para el cual la descarga total es imposible.

Para los valores dados de **A** y **n** la corriente crítica está dada por:

$I_C = 223 E_c^{-1,31}$ Es importante dejar claro que el análisis anterior se refiere a las condiciones bajo las cuales la descarga total es imposible, pero ello no implica que para valores superiores a los críticos la descarga total tenga que ocurrir siempre a causa de los otros factores que intervienen en el proceso.

En el análisis anterior se asumió que la intensidad de campo a lo largo del aislador es uniforme y que sólo existía una descarga en serie con la capa de contaminante, condiciones que no son reales ya que en los puntos de contacto de la descarga con la superficie contaminada existe una intensificación del campo eléctrico y además siempre se presentan varias descargas en serie-paralelo, lo cual aumenta aún más la no uniformidad en la intensidad de campo a lo largo del modelo de prueba. El efecto de estos factores es el incrementar la constante de proporcionalidad de la expresión de E_c en función de **A** y R_c , lo que implica un incremento en el valor de la intensidad de campo crítica.

Diferentes autores plantean como condición necesaria y suficiente para que en un sistema aislante se presente la descarga total la de que incrementos en la corriente vayan acompañados de incrementos en la longitud de la descarga, es decir que:

$$\frac{dI}{dS} > 0$$

Capítulo 2.

El aislamiento eléctrico y la contaminación ambiental. Métodos de trabajos para su estudio.

Métodos para determinar el nivel de contaminación del aislamiento.

La determinación del nivel de contaminación del aislamiento se basa fundamentalmente en estudios de campo, que complementados por estudios a escala de laboratorio, permiten obtener diferentes clasificaciones del ambiente y la propuesta del nivel de aislamiento necesario para el mismo.

Inicialmente, la información sobre el comportamiento del aislamiento contaminado en líneas y subestaciones bajo operación, en conjunto a datos locales relacionados a la contaminación, como podían ser la presencia de industrias, distancia hasta el mar y otros, fue utilizada como base para la evaluación del nivel de contaminación de diferentes áreas {10}.

Posteriormente fueron desarrollados otros métodos de medición que permitieron evaluar el nivel de contaminación y a su vez facilitaron llevar al laboratorio, representativamente, el mismo, iniciándose así un estudio más detallado del problema. Estos métodos o técnicas de evaluación de los niveles de contaminación local pueden ser agrupados en dos categorías:

- Métodos de evaluación indirecta.
- Métodos de evaluación directa.

Se consideran métodos indirectos de evaluación del nivel de contaminación, aquellos que caracterizan la zona sin tomar el aislamiento en consideración. Estos métodos evalúan en sí el ambiente a través del análisis o monitoreo de polvos en el ambiente en depósitos o equipos diseñados para este fin y puede decirse que los principales métodos que han sido utilizados, son:

- Colectores de polvo no direccionales.
- Colectores de polvo tipo direccionales.
- Cilindro engrasado.
- Lozas de porcelanas.
- Monitoreo de partículas sólidas en el aire.
- Colectores de niebla.

Por otro lado, se consideran como métodos directos para determinar el nivel de contaminación aquel donde se define un parámetro que es medido sobre la propia

Capítulo 2. El aislamiento eléctrico y la contaminación ambiental. Métodos de trabajos para su estudio.

superficie del aislador lo cual permite tener en cuenta, en cierto grado, la influencia de factores como el perfil y el estado de la superficie del aislador y tomarlo como patrón siendo los métodos más aceptados internacionalmente:

- Densidad equivalente de sal depositada.
- Aisladores de control.
- Conductancia superficial.
- Conteo de pulsos.
- Corriente de fuga.

Tanto los métodos directos como indirectos han sido ampliamente utilizados durante décadas. Por ejemplo, en Checoslovaquia {11} y en el Reino Unido {12} se han empleado métodos indirectos para determinar los niveles de contaminación de las regiones en estudio, en particular, los depósitos colectores no direccionales y direccionales respectivamente, mientras que en Francia {13}, Alemania, Dinamarca, Suecia {14}, Italia {10}, Rusia {15}, Estados Unidos {16} y Japón {17} se han empleado con mayor fuerza los métodos directos. También en el Reino Unido se han empleado métodos directos como se expone en {18}.

Cada uno de los métodos, ya sea directo o indirecto tiene sus propias características, ventajas y desventajas, las cuales deben tenerse en cuenta a la hora de su selección.

Métodos de evaluación indirecta.

a. Colectores de polvo no direccionales.

En el diseño de este método se tuvo en cuenta la posibilidad de recolectar la deposición debido al viento desde todas las direcciones; el objetivo del mismo es obtener la conductividad de los depósitos colectados y normalizar los mismos para un período de muestreo de 30 días y un volumen de recolección fijo de 1.7 litros.

Según Lambeth {18}, este método da un estimado de toda la cantidad de polvo depositado sobre una superficie horizontal, y por el análisis del depósito y la medición de la conductividad de los componentes solubles en el agua, puede obtenerse alguna idea del nivel de contaminación. Los resultados han indicado que se obtiene una distribución Gaussiana en las muestras, que permite determinar los niveles de 50 y 97.5% de probabilidad y compara los resultados obtenidos con otros métodos.

En Checoslovaquia se desarrolló un método derivado de los colectores de polvo no direccionales que contiene en sí dos técnicas de medición: colectores de polvo normalizados y colectores de polvo de volumen constante. El objetivo de este método no sólo es obtener una conductividad normalizada, sino obtener un parámetro que caracterice la región bajo estudio {19}. Con el colector de polvo de volumen constante se logra incorporar al análisis el efecto de la lluvia sobre el contaminante depositado en la

Capítulo 2. El aislamiento eléctrico y la contaminación ambiental. Métodos de trabajos para su estudio.

superficie y sobre las suspensiones presentes en la atmósfera, lo que permite una mejor caracterización de las zonas.

b. Colectores de polvo tipo direccional.

Este tipo de colector se diseñó, en su esencia, para coleccionar las partículas de polvo de mediano tamaño, que son transportadas por el viento y se depositan en el aislamiento desde los cuatros puntos cardinales. Su objetivo es obtener la conductividad de los depósitos disueltos para cada colector direccional, normalizados a 0.5 litros de solución y un período de colección de 30 días. La experiencia indica que los valores de conductividad normalizados promedios tiene una distribución normal - logarítmica {20}, siendo posible determinar los valores probabilísticos del 50 y 97.5% que permitan su comparación con otros métodos.

c. Cilindro engrasado.

En este método se utiliza como recipiente colector un cilindro colocado verticalmente con respecto a su eje, de 30 centímetros de largo por 5 centímetros de diámetro, al cual se le coloca una grasa determinada en su superficie. Ello permite que el polvo llevado horizontalmente por el viento se adhiera a la grasa; esta grasa es lavada periódicamente, siendo el polvo recobrado al remover la grasa con un disolvente adecuado. Su objetivo es obtener el nivel de sólidos insolubles presentes en la contaminación del aislamiento y su influencia sobre al cantidad de solubles en dicho contaminante.

d. Lozas de porcelana.

Este método fue desarrollado por un grupo de investigadores {21} y el mismo consistió en instalar 8 lozas de porcelana rectangulares con la superficie lustrosa, a una altura determinada. Cada plato tenía a su alrededor una cinta de aluminio para proveer un fuerte contacto eléctrico con los electrodos exteriores, alimentados a una tensión de 4 kV rms, a través de un transformador de potencial. El análisis de las muestras se realiza en tres etapas, lo que permite determinar todo lo rápidamente que se difunde una gota de agua a través del contaminante y a lo largo de la superficie de exposición, obtener la densidad de masa superficial promedio del contaminante y la medición de la conductividad del mismo para obtener su equivalente salino

e. Monitoreo de partículas sólidas en el aire.

En este método se utilizan equipos que permiten determinar el contenido de partículas sólidas en el aire {22} a través de la selección de dichas partículas, utilizando filtros especiales. La concentración del contaminante se valora por comparación de la cantidad de aire, que pasa a través del filtro, con la masa de depósito sólido.

f. Colectores de niebla.

Capítulo 2. El aislamiento eléctrico y la contaminación ambiental. Métodos de trabajos para su estudio.

Este método se basa en que las investigaciones han podido caracterizar las condiciones de inicio de la descarga superficial, así como la capa de contaminante, a través de pruebas de laboratorio con niebla; a partir de ello se decidió seleccionar y exponer muestras de sedimentos húmedos a la neblina y obtenerla a través de colectores específicamente diseñados. El equipo cuenta con un hidróstato y una rejilla concentradora de humedad así como un reloj, para controlar y producir la humedad necesaria y el tiempo de trabajo, respectivamente {22}.

Métodos de evaluación directa.

a. Densidad equivalente de sal depositada.

Este método {23,24} es ampliamente conocido y aplicado internacionalmente y consiste en obtener el nivel de contaminación atmosférica a partir de un parámetro conocido como D.E.S.D. (densidad equivalente de sal depositada), y que no es más que el equivalente en miligramos de cloruro de sodio (NaCl) que es capaz de conformar una solución cuya conductividad sea igual a la obtenida a partir de la solución compuesta por el contaminante depositado sobre el aislador y un volumen de agua prefijado, de baja conductividad, que se utiliza para lavar el aislador contaminado. A partir de esta conductividad, y teniendo en cuenta el volumen de agua utilizado y el área del aislador se calcula el valor de D.E.S.D. correspondiente; las muestras se toman a intervalos adecuados que permitan obtener máximos niveles de conductividad entre períodos de lavado natural, aunque para los casos en que ocurren deposiciones o limpiezas naturales muy bruscas, se han desarrollado métodos de medición automática, como se presentaron por Kato {25}, la NGK Insulators LTD {26} e Igarashi y colaboradores {27}. Según Kimoto y colaboradores {28, 29}, los resultados de este método son afectados por la forma del aislador y su posición de montaje.

b. Aisladores de control.

En el desarrollo de este método, al igual que en el caso del DESD, se utilizan aisladores instalados previamente sin tensión eléctrica aplicada o en explotación, indistintamente, en función de los objetivos del estudio; si se desea realizar un estudio sobre el proceso de sedimentación del contaminante, se prefiere utilizar aisladores desenergizados para desmontar las muestras o testigos en diferentes intervalos de tiempo, pero si se desea sólo obtener el nivel de contaminación es preferible desmontar aisladores que lleven más de tres años de explotación, pues se aseguran condiciones estables en la capa de contaminante depositada sobre la superficie del aislador.

A diferencia del DESD, el parámetro que caracteriza este método se obtiene a través de las tensiones de descarga de los aisladores desmontados, para una determinada contaminación existente en la región, por lo que debe estar correlacionado con un método desarrollado a escala de Laboratorio y donde se controla el nivel de contaminación. Para su ejecución requiere de una cámara de niebla, donde se logre el humedecimiento del contaminante y las condiciones de predescarga; se plantea que los valores de tensiones

Capítulo 2. El aislamiento eléctrico y la contaminación ambiental. Métodos de trabajos para su estudio.

de descarga obtenidos se soportan sobre una distribución Normal, por lo que se caracteriza la contaminación a partir del valor medio.

Similarmente al caso del DESD, se plantea que los resultados de este método son afectados por la forma y posición de montaje del aislador, así como por las condiciones meteorológicas y la manipulación de los aisladores en el momento de su desmontaje. A ello debe agregarse el humedecimiento artificial de la capa que puede provocar, si no se tiene cuidado, el lavado del aislador. Autores y especialistas de países como Japón, URSS, EE.UU, México y Reino Unido {20, 30, 31, 32, 33} recomiendan este método.

c. Conductancia superficial.

El objetivo de este método es determinar el nivel de contaminación a partir de la medición de conductividad superficial de un aislador y su comparación con los resultados obtenidos en un Laboratorio. Dicha conductividad se obtiene como el producto matemático de la conductancia superficial y el factor de forma del aislador {34}, definidos el primero a partir de la medición de la corriente de fuga y la tensión aplicada, y el segundo a partir de la geometría del aislador. Como característica importante en este método se observa la aplicación por pequeños intervalos de una tensión inferior a la nominal de operación, por lo general de 30 kV por metro de longitud del aislador, a la frecuencia del sistema. El tipo de ensayo de Laboratorio será válido si todos los aisladores dan valores similares del nivel de contaminación aún cuando la conductancia superficial sea distinta.

d. Conteo de pulsos.

Con este método se hace un registro del número de pulsos de corriente de fuga que, por encima de cierta amplitud, anteceden al ocurrir de la descarga en el aislador contaminado, por lo que con experiencia en su aplicación puede ser utilizado para monitorear las condiciones de contaminación del aislamiento y para analizar el riesgo de falla del mismo, según plantea Forrest {35}. El conteo se realiza con instrumentos que tienen valores prefijados de corriente para operar; dichos instrumentos han variado en sus características hasta llegar a sofisticados circuitos electrónicos tal y como se presenta por la Electricity Trust of South Australia {36}, Macey {37}, Forrest {35, 38} y Sforzini {39}.

Se ha demostrado {13} que la ocurrencia de estos pulsos generalmente preceden la fase final de la descarga por contaminación, incrementándose tanto su valor en magnitud como en frecuencia de ocurrencia.

e. Corrientes de fuga.

De manera general existen diferentes valores de corriente que son medidos, siendo los más usuales el valor máximo (I_h) para un período dado sin que ocurra la descarga y el valor máximo (I_m), medio ciclo antes de la ocurrencia de la descarga. Cuando se mide el valor máximo de la corriente de fuga en un período dado este es referido a las curvas de corriente máxima vs. nivel de contaminación o de corriente máxima vs. tensión aplicada para un nivel dado de contaminación, lo que permite determinar el nivel correspondiente a

Capítulo 2. El aislamiento eléctrico y la contaminación ambiental. Métodos de trabajos para su estudio.

la medición de campo, así como cuan cerca está la condición necesaria para que ocurra la descarga, ya que por definición I_m corresponde a un nivel crítico de corriente por encima del cual la descarga ocurrirá, mientras que por debajo de dicho valor la descarga no ocurrirá {14} . El valor de I_m puede ser determinado experimentalmente, tal y como plantean Claverie y Porcheron {40}, Verma y colaboradores {41, 42}, Cimador y colaboradores {43} y Keller-Jacobsen y colaboradores {44}.

Caracterización del comportamiento del aislamiento ante diferentes condiciones ambientales.

Es conocido que los esfuerzos dieléctricos a los que se somete el aislamiento externo durante su explotación en la red pueden agruparse en cuatro categorías:

- Tensión a frecuencia industrial.
- Sobretensiones temporales.
- Sobretensiones por descargas atmosféricas.
- Sobretensiones por maniobra.

Cuando a los esfuerzos anteriores se superpone el efecto de la **contaminación ambiental**, las características aislantes de estos elementos pueden variar en órdenes tan determinantes como de un 70%, lo cual indica la necesidad de estudiar a profundidad cómo se comportan los mismos ante diferentes condiciones de trabajo con el objetivo posterior de tomar las decisiones correctas para su empleo, tanto en la etapa de diseño de las líneas y subestaciones eléctricas como para la ejecución de los mantenimientos.

Con el desarrollo en los últimos tiempos de nuevos modelos de pararrayos e interruptores, así como el empleo de sistemas de protección más apropiados contra los efectos de las descargas atmosféricas se ha logrado disminuir las afectaciones por estas causas; sin embargo, el fenómeno que aparece debido a la contaminación se mantiene aún como una de las limitantes principales para lograr disminuir los niveles de aislamiento a emplear.

La caracterización del comportamiento de los aisladores ante los diferentes ambientes de trabajo permite hacer una selección inicial correcta del tipo de aislador para la región que se esté analizando; en el mundo este comportamiento se busca en lo fundamental a través de ensayos naturales o a escala de Laboratorio, siendo este último método el de mayor extensión en la actualidad. El uso de ensayos a escala natural exige un gran número de muestras instaladas y un cuidadoso trabajo de recolección que asegure el traslado de las mismas al Laboratorio para su análisis; por otro lado los ensayos a escala de Laboratorio han exigido el desarrollo de métodos con contaminación artificial, así como la obtención de las correlaciones necesarias entre los métodos de determinación del nivel de contaminación, que permiten su empleo para la selección del nivel de aislamiento

Estos ensayos tienen objetivos fundamentales y bien definidos, pudiéndose mencionar los siguientes:

Capítulo 2. El aislamiento eléctrico y la contaminación ambiental. Métodos de trabajos para su estudio.

- a) Obtención de la tensión de descarga o de la tensión de soporte de los aisladores en función de una determinada contaminación.
- b) Determinación de la cantidad de contaminación máxima soportable para una tensión de operación dada.
- c) Obtener las curvas características de probabilidad de falla de los aisladores.
- d) Comparación del comportamiento de nuevos diseños y nuevos materiales para los aisladores.
- e) Evaluación del comportamiento de los diferentes tipos de aisladores y definición del **mejor** en función de la contaminación.

Se plantea que existen cuatro puntos que deben ser comunes a cualesquiera de los ensayos que se realicen, y que están relacionados con: la forma de deposición de la capa de contaminante, la posibilidad de reproducir el ensayo en otro Laboratorio y la simulación de las condiciones naturales de trabajo; el cuarto punto se relaciona con **que la bondad del diseño de un aislador debe ser estimada en función de la máxima contaminación que soporta a tensión nominal y no por la tensión de descarga o de soporte para una determinada contaminación.**

Los ensayos pueden ser divididos en dos grupos bien definidos según { 45 }:

- Aquel en el cual el aislador está sujeto a una condición ambiental definida.
- Aquel en el cual el aislador es cubierto por una capa de contaminación antes de aplicar la tensión.

En {45} se hace un análisis comparativo de los diferentes métodos y procedimientos de prueba, pudiéndose destacar algunas consideraciones como son:

- **La tensión se mantiene constante durante el ensayo**, excepto para el método japonés de niebla equivalente {46, 47}, el cual no se recomienda por el Grupo de Trabajo 04 de la Conferencia Internacional de Grandes Sistemas Eléctricos (CIGRE), **por considerar una complicación inútil la variación de la tensión en el procedimiento de ensayo**, apoyándose para ello en los resultados reportados por el Comité Técnico 36 de la C. E. I. {48}, **Lambeth {49} y Von Cron y Dorcsh {50}**.
- Los métodos conocidos como Niebla Salina, Soporte a la Niebla y Niebla por Vapor, simulan la condición de un sistema aislante energizado, donde la presencia de contaminación en el aislamiento y el propio proceso de humectación provocan incrementos en la corriente de fuga.
- Los métodos conocidos como Metilcelulosa, Niebla Equivalente y Contaminante Humedecido **simulan la condición de un sistema aislante que ha sido desenergizado, pero donde existe la condición de contaminación y humedecimiento de la capa, antes de la reenergización del sistema.**
- La disposición del contaminante sobre la superficie del aislador depende del procedimiento de ensayo, **tratándose en todos los casos de lograr una capa uniforme de contaminación**, aunque en el caso del método de Niebla Equivalente

Capítulo 2. El aislamiento eléctrico y la contaminación ambiental. Métodos de trabajos para su estudio.

se sugiere una contaminación no uniforme en los aisladores tipo barra y para los aislamientos de los equipos, de forma que se obtengan valores más reales en las tensiones de descarga así como se pueda simular el efecto del viento en los depósitos, tal y como se establece en {46}.

- Aún en los procedimientos donde las capas de contaminantes sólidos son uniformes, las conductividades que se obtienen en dicha capa no son uniformes debido, en lo fundamental, a que **es necesaria una completa saturación de dicha capa** para producir la máxima conductividad en cualquier punto de la superficie del aislador.

Por otro lado, también en {45} se establece que ante la dificultad de lograr en la práctica la validez de los datos de los ensayos en las condiciones naturales, **un modo alternativo es establecer la validez a partir de la evaluación del comportamiento de diferentes tipos de aisladores en ambientes similares.**

Lambeth y colaboradores {51, 52, 53}, **Ely y colaboradores** {54} y **Forrest** {55} reportan la validez del método de Niebla Salina en regiones costeras del **Reino Unido, Francia e Italia** y en algunas regiones con contaminación industrial, tierra adentro, en el propio **Reino Unido e Italia**. Así mismo **Heise** {56}, el **Grupo de Trabajo 04 de la CIGRE** {57} y **Schneider** {58} establecen la validez de los métodos de Kieselguhr, Niebla por Vapor y Soporte a la Niebla en **Alemania, Japón y Estados Unidos** respectivamente.

En la Figura que se presenta más abajo se muestra un resumen sobre los diferentes métodos de contaminación artificial empleados a escala internacional.

A partir de estos resultados se propuso una clasificación internacional por la **CIGRE** {45}. Posteriormente, la **I.E.E.E** sugirió otra tabla de clasificación que relacionaba los niveles de contaminación natural, desde el punto de vista del nivel equivalente de ambiente, para diferentes métodos de contaminación artificial {59}, tal y como se expone en la Tabla que se presenta más abajo.

<i>INTENSIDAD DE CONTAMINACION</i>	<i>CIGRE (mg/cm²)</i>	<i>IEEE (mg/cm²)</i>
<i>Muy leve</i>	<i>0.10 - 0.14</i>	<i>0.0 - 0.03</i>
<i>Leve</i>	<i>0.14 - 0.20</i>	<i>0.03 - 0.06</i>
<i>Mediana</i>	<i>0.20 - 0.30</i>	<i>0.06 - 0.10</i>
<i>Fuerte</i>	<i>0.30 - 0.45</i>	<i>> 0.10</i>
<i>Extrema</i>	<i>> 0.45</i>	<i>-</i>

El comportamiento de los aisladores ante los diferentes ambientes, desde el punto de vista de su función aislante, depende en lo fundamental del diseño y a la selección adecuada de los mismos de acuerdo al ambiente en que será explotado. Si se logra caracterizar las

Capítulo 2. El aislamiento eléctrico y la contaminación ambiental. Métodos de trabajos para su estudio.

limitantes que desde el punto de vista tienen los diferentes diseños de aisladores, se podrá tener segura la elección del **mejor aislador**. Los parámetros fundamentales que se tienen en cuenta para el diseño geométrico de un aislador según {31} son:

- Número de aletas.
- Número de nervaduras.
- Altura aislante.
- Distancia mínima entre aletas, **C**.
- Saliente de las aletas, **p**.
- Espaciamiento, **s**.
- Luz, **d**.

Partiendo de estos parámetros es posible definir aquellos que según {31} permiten caracterizar el perfil de un aislador:

- Alternación de las aletas.
- Inclinación de las aletas.
- Factor de fuga, (**F.F**).
- Factor de perfil, (**F.P**).
- Relación espaciamiento / saliente de la aleta (**s / p**).
- Relación distancia de fuga de la luz escogida / luz (**ld / d**).
- Diámetro de la campana.

Consideraciones finales.

Como se observa, la cantidad de métodos para caracterizar el nivel de contaminación es amplia y variada, pero no todos llevan a una caracterización similar, dependiendo la selección del método de los objetivos y posibilidades que se tengan.

Capítulo 2. El aislamiento eléctrico y la contaminación ambiental. Métodos de trabajos para su estudio.

NOMBRE DEL ENSAYO	CLASIFICACION	CONTAMINANTE	FORMACION DEL DEPOSITO	HUMECTACION	APLICACION DE LA TENSION	MAQUINA No. DE ENSAYOS SOBRE UN DEPOSITO	CRITERIO DEL ENSAYO
<i>Niebla salina</i>	Capa formada progresivamente a lo largo del ensayo	Agua salada	A partir de un ambiente con niebla salina	Por niebla salina	Constante desde que se empieza a aplicar la niebla	-	Salinidad aguatable: máximo valor obtenido en tres o más ensayos.
<i>Meticelulosa</i>	Capa formada previamente	Suspensión reposada de 30 grs. de meticelulosa y 25 grs. de yeso en un litro de agua.	Recubrimiento por inmersión estabilizado a 30 min. a Hr del 60% para alcanzar conductividad requerida.	Sin humectación adicional	Constante y puede aplicarse después que se ha alcanzado la conductividad requerida o hasta 5 min. después.	1	Conductividad aguatable: máximo valor obtenido en tres ensayos o tensión al 50% para 8-12 ensayos por el método del up and down .
<i>Niebla equivalente (Equivalent fog)</i>	Capa formada previamente.	Sal en suspensión de 40 grs. de Tonoto en polvo en un litro de agua.	Recubrimiento que puede ser por inmersión, atomizado o escurrimiento.	Sin humectación adicional	Constante o incrementándolo hasta la descarga con pazo de 10 kV.	1	5% de la tensión de descarga para 10 o más valores.
<i>Kieselguhr</i>	Capa formada previamente	Sal en suspensión de 100 grs. de Kieselguhr y 10 grs. de aerosil en un litro de agua o contaminante natural.	Recubrimiento por atomizado y secado, o por exposición a la intemperie.	Por niebla vaporizada para dar máxima conductividad en 15 ó 20 mins.	Constante cuando se ha alcanzado la conductividad requerida.	5	Tensión aguatable: obtenida a partir de 3 grupos de 5 ensayos usando el método del up and down .
<i>Niebla aguatable (Withstand fog)</i>	Capa formada previamente.	Sal en suspensión, fijador y agua o contaminante natural.	Recubrimiento por atomizado, inmersión y secado, o por exposición a la intemperie.	Por atomizado indirecto de agua.	Constante desde el inicio de la humectación.	1	Tensión aguatable: máximo valor obtenido en 4 ensayos usando el método del up and down .
<i>Niebla vaporizada (Steam fog)</i>	Capa formada previamente.	Sal en suspensión de 40 grs. de Tonoko o Caolin en un litro de agua o contaminante natural.	Recubrimiento por atomizado y secado, o por exposición a la intemperie.	Por condensación lenta de niebla caliente.	Constante desde el inicio de la humectación.	1	Tensión crítica de descarga (50%): obtenida de 8-10 ensayos usando el método del up and down .
<i>Contaminante húmedo</i>	Capa formada previamente.	Sal en suspensión de 20 grs. de Cab-O-Sil y 1 gr. de Photo-Flo en un litro de agua.	Recubrimiento or atomizado o inmersión.	Sin humectación adicional.	Constante.	1	Tensión aguatable: máximo valor obtenido en tres ensayos sin que se presente la descarga.
<i>Niebla limpia (Clean fog)</i>	Capa formada previamente.	Contaminante natural o agua salada.	Recubrimiento por exposición a la intemperie o por atomizado, inmersión.	Por niebla limpia.	Constante.	1	-

Resumen de los métodos de contaminación artificial.

**Capítulo 2. El aislamiento eléctrico y la contaminación ambiental.
Métodos de trabajos para su estudio.**

<i>PARAMETRO</i>	<i>VALOR SEGUN C.E.I.</i>
<i>Distancia mínima entre aletas</i>	$> 3.0 \text{ cm}$
<i>Inclinación de las aletas</i>	$> 5 \text{ grados}$
<i>Diametro de la campana</i>	. para $Dm < 30.0 \text{ cm} \Rightarrow kd = 1.0$. $30.0 \text{ cm} \leq Dm \leq 50.0 \text{ cm}$ $\Rightarrow kd = 1.1$. para $Dm > 50.0 \text{ cm} \Rightarrow kd = 1.2$
<i>Alternación de las aletas</i>	$(p_1 - p_2) \geq 1.5 \text{ cm}$
<i>s / p</i>	> 0.65
<i>ld / d</i>	< 3.0
<i>R.P.</i>	< 4.0
<i>R.P.</i>	> 0.8

**Exigencias de la Comisión Electrotécnica Internacional (CEI)
para los parámetros que definen el perfil de los aisladores.**

Todos los métodos tienen sus aspectos positivos y sus lados negativos, o desventajas, por así nombrarlas. Por ejemplo, en el caso de los métodos indirectos, puede observarse en el caso del monitoreo de partículas sólidas en el aire y los colectores de niebla que los mismos no permiten tener una evaluación integral de cual es el tipo de contaminante y su nivel en la zona.

Por otro lado, en la mayor parte de estos métodos indirectos no se ha podido encontrar una correlación clara entre los ensayos de campo y los de Laboratorio, así como entre dichas mediciones de campo y los diferentes ambientes, no permitiendo una clasificación real del mismo; de este grupo sólo es posible extraer la experiencia checoslovaca, la cual sí permite establecer estos niveles de contaminación y su correlación con valores de conductividad mínima de soporte, en función del método de ensayo de Laboratorio empleado.

En el método de las lozas de porcelana, aún cuando se han obtenido resultados que permiten correlacionar en cierta medida los muestreos de campo y los ensayos de Laboratorio, la influencia de los factores meteorológicos, al ser comparados con los resultados obtenidos por un método directo que se desarrolló en paralelo, hacen tener grandes dudas sobre su efectividad. Los otros métodos requieren de un trabajo más profundo, sobre todo desde el punto de vista estadístico, para tener una mayor confianza en sus resultados, siendo desde este punto de vista el más atrayente el método de los colectores de polvo direccionales, de acuerdo a lo visto en método similar desarrollado por los especialistas checos.

Capítulo 2. El aislamiento eléctrico y la contaminación ambiental. Métodos de trabajos para su estudio.

En cuanto a sus ventajas, estos métodos se caracterizan por ser casi todos de relativo bajo costo y la no-necesidad de emplear personal especializado durante las etapas de muestreo, así como la también relativa sencillez de su implementación.

En lo relativo a los métodos directos, puede observarse en todos la posibilidad de correlacionar los resultados en campo con los ensayos de Laboratorio diseñados específicamente para la reproducibilidad de los mismos, lo que los pone en franca ventaja con respecto a los métodos indirectos. Por otro lado, casi todos los métodos directos, a excepción del método de la densidad equivalente de sal depositada, evalúan y dan resultados sobre el nivel de contaminación a partir de ensayos de Laboratorio predeterminados, no pudiendo ser implementados si con anterioridad no se han realizado las adecuaciones de dichos ensayos, y por tanto si no se tienen las instalaciones de ensayo apropiadas.

Aún cuando estos métodos directos trabajan sobre la superficie del aislador no todos permiten evaluar, en su totalidad, el proceso de la descarga; esto provoca por ejemplo, que tanto el método DESD como el de conductancia superficial no permitan realizar un estudio total del comportamiento del aislamiento ante ambientes contaminados.

Integralmente, el método de las corrientes de fuga es el más completo; ello se demuestra en que la mayor parte de los países que han incidido en el desarrollo de esta temática, o por lo menos llevan a cabo estudios sobre la contaminación del aislamiento eléctrico, han decidido implementarlo como método de preferencia. Su gran desventaja radica en el costo de implementación, donde por lo general se requiere de varias estaciones de ensayo, incluidas en ellas la construcción civil, equipos de medición y control, así como personal especializado, que lo hacen comparativamente mucho más costoso que los otros y menos asequible para los países con menores niveles de desarrollo.

El método de conteo de pulsos, siendo menos costoso, pudiera ser la respuesta para estos últimos países, más con la limitante de tener que utilizar otro método si se desea estudiar el comportamiento de los diferentes aisladores utilizados en la operación del sistema eléctrico.

No obstante, puede considerarse que los problemas mayores que existen relacionados con la selección de la técnica de medición están en el factor tiempo y en la validación del método. El factor tiempo está directamente relacionado con las características de los contaminantes: algunos pueden mostrar tiempos de deposición bruscos (horas) como el proveniente del mar en presencia de tifones, fuertes vientos, etc., mientras que otros pueden presentar tiempos de deposición del orden de los meses, como el caso de los polvos provenientes de los suelos, todo lo cual hace que el tratamiento de la información sea diferente para ambos casos y determine los períodos de muestreo, análisis y validación.

El escoger un método u otro, o varios de ellos a la hora de realizar un estudio, es una decisión que el investigador debe tomar; la experiencia ha demostrado que en aquellos casos donde haya la posibilidad, el uso de más de un método permite la complementación

Capítulo 2. El aislamiento eléctrico y la contaminación ambiental. Métodos de trabajos para su estudio.

de la información que cada uno ofrece sobre los diferentes eventos que se involucran en el proceso de contaminación como son la deposición de contaminantes, el efecto de la lluvia, la distribución del contaminante sobre la superficie del aislador y su configuración.

Referencias bibliográficas.

1. Cortina, R. and Marrone, G. " Methods for measuring pollution severity in natural conditions and criteria adopted by ENEL for the choice and standarization of insulators for polluted areas ", report presented at the Colloquium of CIGRE SC No. 33, pp. A.27 - A.38, London, June 1977.
2. Kohoutova, D. " Selection of insulators used in the CSSR for polluted areas ", report presented at the Colloquium of CIGRE SC No. 33, pp. A.1- A.4, London, June 1977.
3. Lambeth, P.J. " The methods of choice of insulators and insulation levels in the U.K.", report presented at the Colloquium of CIGRE SC No. 33, pp. A.43 - A.50, London, June 1977.
4. Claverie, P. " The principlies applied by Electricite de France for selecting insulators in polluted areas ", report presented at the Colloquium of CIGRE SC No. 33, pp. A.4 - A.8, London, June 1977.
5. Verma, P. and et.al. " Procedures for insulation dimensioning under pollution. Application of the results of the site severity measurements and laboratory tests ", report presented at the Colloquium of CIGRE SC No. 33, pp. A.8 -A.26, London, June 1977.
6. Ostapenko, E. " USSR practice on polluted insulation investigation and selection ", report presented at the Colloquium of CIGRE SC No. 33, pp. A.56 -A.60, London, June 1977.
7. Scheneider, H.M. " Selection of insulators for contaminated areas - U.S. practice ", report presented at the Colloquium of CIGRE SC No. 33, pp. A.51 - A.56, London, June 1977.
8. Nakajima, Y. " Test methods and insulation criteria ", report presented at the Colloquium of CIGRE SC No. 33, pp. A.39 - A.41, London, June 1977.
9. Lambeth, P.J. " Methods of measuring pollution severity from the point of view of insulator performance and frecuency of cleaning ", Internal Report of CEGB, Laboratory Memorandum No.RD/L/M 63 (Job No. 4113), March 6, 1964.
10. Matousek, M. y Cremata, C. " Estudios de medidas básicas que se destinan a establecer normativas para determinar el nivel de aislamiento de líneas de muy alta tensión en Cuba ", estudio conjunto CIE - EGU, Habana - Praga, 1983.
11. Mc.Elroy, A. and et.al. " Part I.- Field conditions and their laboratory simulation ", IEEE Transaction on PAS, Vol.89, 1970.
12. Thompson, G.H. " The mechanism of the contamination porcelain insulators ", Journal Institute Eléctrical Engineers, Vol.91, Part II, pp. 317 - 327, 1944.
13. Maxlin, V.Y. " Aislamiento en líneas de transmisión y subestaciones abiertas en regiones con atmósfera contaminada ", Revista Energía, Moscu, 1975.
14. NGK Insulators," A Guide on the application of insulators in contaminated enviroments ", LTD, TF-53 114 (TN-78053), February 10, 1980.

Capítulo 2. El aislamiento eléctrico y la contaminación ambiental. Métodos de trabajos para su estudio.

15. IEEE Working group on Insulator Contamination, " Application guide for insulators in a Contaminated Enviroment, IEEE Paper No. F 77639-8, 1977.
16. Kato, T., Session of CIGRE Group 33, 1978.
17. NGK Insulators, " Supersonic washing type automatic pollution monitor ", Report No. ES - 53072, August, 1978.
18. Igarashi H. and et. al. " Pollution detector and its application to automation of hot - line insulator washing equipment, NGK Review, No. 34, September, 1973.
19. IEEE Transaction on PAS, Vol.91, No.1, pp. 311 - 316, 1972.
20. IEEE Transaction on PAS, Vol.91, No.1, pp. 317 - 327, 1972.
21. Hamed, E. and Zarzoura, M. " A new approach to the insulator contamination measurements in desert ", Pyramides Extra High Voltage Research Center, Cairo, Egypt.
22. CEI Publicación 815: " Guía para la selección de aisladores en condiciones de contaminación ", 1986.
23. Ministerio de la Energética y la Electrificación, " Indicaciones para la determinación de las tensiones de descarga en condiciones de contaminación natural ", Moscú, URSS, 1977.
24. NGK Insulators, " Measuring methods pollution degree on insulator surfaces ", February, 1970.
25. CIGRE Working Group 04, SC No. 33, " The measurement of site pollution severity and its application to insulators dimensioning for A.C. Systems ", Electra No.64, pp.101 - 116.
26. Forrest, J.S. " The electrical characteristics of 132 kV line insulators under various weather conditions ", Journal of IEEE, Vol.97, Part 2, pp.401 - 413, 1936.
27. Electricity Trust of South Australia, Australian Patent 480435, U.S. Patent No. 3882378.
28. Macey, R.E. " A surge counter for the assessment of polluted insulator performance ", report to the South African Electricity Supply Commission, June 1975.
29. Forrest, J.S. " The characteristics and performance in service of hihg voltage porcelain insulators ", Journal of IEEE Vol.89, Part.2, pp. 60 - 80, 1942.
30. Sforzini, M. CIGRE Discussion Group 33, pp. 29 - 31, Paris, 1970.
31. Claverie, P. and Percheron, Y. " How to choose insulators for polluted areas ", IEEE Transactions on PAS, Vol. 92, No. 3, pp. 1121 - 1131, May - June 1973.
32. Verma, M.P. and et. al. " A new criterion common for diferent pollution test procedures providing the link between service and test conditions ", CIGRE SC 33 - 74, WG 04, 18 IWD, 1974.
33. Verma, M.P. and et. al. " The criterion for pollution flashover and its application to insulation dimensioning and control ", CIGRE 33 - 09, 1978.
34. Cimador, A. and et. al. " Method of dimensioning insulators for overhead lines in polluted areas ", CIGRE 33 - 04, 1978.
35. Keller - Jacobsen, J. and et. al. " Field and laboratory tests for the proper dimensioning of insulator exposed to salt pollution ", CIGRE 33 - 11, 1978.
36. CIGRE SC 33, Working Group 04 " A critical comparison of artificial pollution test methods for H.V. insulators ", Electra No. 64, pp. 117 - 136.
37. CIGRE Japanese National Committee " The Japanese test method (Equivalent Fog method) ", CIGRE SC 33, Document 33 - 74, (WG 04) 2IWD.

Capítulo 2. El aislamiento eléctrico y la contaminación ambiental. Métodos de trabajos para su estudio.

38. CIGRE Japanese National Committee " The Japanese test method ", CIGRE SC 33, Document 33 - 75, (WG 04) 1IWD.
39. IEC Technical Committee No. 36, "IEC Report on artificial pollution test for H.V. insulation to be used on A.C. systems ", Document 36 (Central Office) 43, February 1971 and Document 36 (Central Office) 52, November 1972.
40. Lambeth, P.J. " Effect of pollution on high - voltage outdoor insulators ", Proc. IEEE No. 9R, I18, pp. 1107 - 1130, 1971.
41. Von Cron, H and Dorsch, H. " Proportioning transmission system insulation to service frequency overvoltages and switching surges, with due consideration for loss of insulation strength trough foreing - body surface layers ", CIGRE 402, 1958.
42. Lambeth, P.J. and et. al. " The salt fog artificial pollution test ", CIGRE SC 25 - 08, 1968.
43. Lambeth, P.J. and et. al. " International research on polluted insulators ", CIGRE , SC 33 - 02, 1970.
44. Lambeth, P.J. and et. al. " The salt fog test and its use in insulator selection for polluted localities ", IEEE Transaction on PAS, Vol. 92, Nov. - Dec. 1973.
45. Ely, C.H.A. and et. al. " Artificial and natural pollution test on outdoor 400 kV substation insulators ", Procceeding IEE, No. 118, 1, pp. 99 - 109, 1971.
46. Forrest, J. S. and et. al. " Research on the performance on high voltage insulators in polluted atmospheres ", Procceeding IEE, No. 107, A, pp. 72, 1960.
47. Heise, W. and et. al. " Assessment of the solid layer artificial pollution test ", CIGRE, SC 33 - 09, 1972.
48. CIGRE SC 33 " Artificial pollution test: V Fog Withstand Test ", Document 33 - 74, (WG 04) 2IWD (V), 1974.
49. Schneider, H.M. " Artificial pollution test: VI The steam - fog method, CIGRE, SC 33, Document 33 - 74 (WG) 2IWD (VI), 1974.
50. CEI Publicación 507 " Ensayos de contaminación artificial ", 1986.

Capítulo 3.

Evaluación de los efectos de la contaminación sobre el aislamiento eléctrico externo en una región.

El conocimiento objetivo de la magnitud y características de los fenómenos que ocurren en la operación de un sistema eléctrico permite la elaboración fundamentada de las decisiones que se adoptan para lograr el funcionamiento del sistema. Es posible afirmar que la explotación de las redes eléctricas sobre una base científica elimina el voluntarismo y el subjetivismo en la determinación de las tareas a ejecutar para alcanzar una adecuada confiabilidad en la operación de un sistema eléctrico cualquiera.

La confiabilidad y operación ininterrumpida de los Sistemas de Potencia dependen, en un alto grado, de la confiabilidad del aislamiento, el cual, de forma general, está diseñado para soportar no sólo las Sobretensiones, sino otro amplio grupo de fenómenos que no deben dañar o alterar las características de dicho aislamiento. Sin embargo, el aislamiento envejece y en ocasiones se deteriora rápidamente, pudiendo afirmarse que dicho deterioro depende, en lo fundamental, de la influencia del medio ambiente sobre el mismo.

La evaluación del impacto que el medio ambiente ejerce sobre el aislamiento eléctrico externo requiere el cumplimiento de varias etapas de trabajo, entre las cuales se destacan:

- Evaluación del comportamiento del aislamiento ante la contaminación.
- Caracterización regional o local de los niveles de contaminación a que está sometido el aislamiento.
- Evaluación económica de los efectos de la contaminación.
- Análisis de las alternativas de solución al problema de la contaminación del aislamiento.
- Evaluación técnico – económica de las alternativas de solución.

Evaluación del comportamiento del aislamiento ante la contaminación.

A la hora de analizar el comportamiento del aislamiento eléctrico externo ante la influencia del medio ambiente, se hace necesario evaluar desde el punto de vista técnico, dos aspectos muy importantes:

- Fallas ocurridas en el aislamiento.
- Nivel de aislamiento actual.

El primer aspecto contempla el análisis de la estadística de falla e interrupciones que reporta la empresa eléctrica en su operación normal, así como las condiciones meteorológicas y climatológicas que existían en el momento de que ocurrieran las mismas, con el objetivo de determinar cuáles de esas fallas e interrupciones pueden ser causadas, o al menos existe una alta probabilidad, por la contaminación.

Capítulo 3. Evaluación de los efectos de la contaminación sobre el aislamiento eléctrico externo en una región.

La determinación del nivel de aislamiento actual permitirá completar esta primera etapa de análisis técnico, y para ello el especialista deberá auxiliarse de los expedientes que la empresa posee en sus archivos para cada instalación energética, sea línea u subestación, así como cualquier otra información adicional que permita caracterizar el aislamiento en explotación.

Durante esta evaluación técnica debe culminarse un grupo de tareas como son:

- Caracterizar el índice de falla del aislamiento actual.
- Definir el nivel de aislamiento actual.
- Limpiar la estadística sobre la explotación del aislamiento y definir los lugares donde ocurre un mayor número de fallas.

Durante el análisis de las fallas e interrupciones se tiene en cuenta que las mismas se dividen en dos grandes grupos: las que ocurren por causas conocidas y las que no pueden determinarse la causa de su existencia. De las causas conocidas sólo se escogen aquellas relacionadas con las descargas superficiales del aislamiento, señalándose separadamente las ocurridas de forma masiva en una región particular. De las desconocidas se seleccionan aquellas que coincidan con fenómenos meteorológicos o climáticos como son la neblina, el rocío, llovizna, etc., eliminándose aquellas relacionadas con causas determinadas por un mal funcionamiento de las protecciones, coincidencia con tormentas, rachas de vientos mayores a 14 metros por segundo, etc., por lo que finalmente quedan sólo aquellas posibles de clasificar como provocadas por las descargas superficiales del aislamiento contaminado.

Finalmente, el total de fallas e interrupciones que caracterizarán la línea, tramo de línea, región o zona bajo estudio estará dada por la expresión:

$$N_i = N_c + N_d$$

siendo N_c el total de interrupciones que fueron clasificadas por contaminación, y N_d el total de fallas e interrupciones que inicialmente fueron clasificadas como desconocidas, pero que después del análisis, se reclasificaron como a causa de la contaminación.

Un grupo adicional de información es necesario utilizar para completar el análisis del comportamiento del aislamiento ante las condiciones de contaminación existentes, y son:

- Mapa del sistema eléctrico relacionado con el estudio.
- Datos del aislamiento eléctrico de las líneas de 110 kV y mayores.
- Datos del aislamiento de las subestaciones de 110 kV y mayores.

En caso de no existir suficiente información de los niveles de 110 kV o mayores en la zona o región bajo estudio, se pueden utilizar las informaciones de los niveles de 13 y 33 kV, o similares. El método para evaluar si la información que se posee es suficiente se fundamenta en el análisis de la experiencia de explotación.

Capítulo 3. Evaluación de los efectos de la contaminación sobre el aislamiento eléctrico externo en una región.

El análisis de la experiencia de explotación permite evaluar el comportamiento del aislamiento y la satisfacción o no de los requerimientos en la región donde opera. El método se fundamenta en el análisis y comparación, con la clasificación existente para el país, del nivel de aislamiento actual representado por la distancia de fuga específica efectiva en la región. Dicho método es válido si existe un cúmulo de datos suficientes en las instalaciones de transmisión de la zona, información que se evalúa a partir de la expresión:

$$\sum_{i=1}^m l_i \cdot T_i > 300$$

donde:

l_i .- longitud de la i -ésima línea o tramo de línea, ubicada en la región bajo estudio, Km.

T_i .- tiempo de explotación de la i -ésima línea o tramo de línea, años.

m .- número de líneas o tramos de líneas existentes en la región bajo estudio.

La longitud de fuga específica efectiva, a partir de la experiencia de explotación, tiene en cuenta el número de interrupciones específicas promedio de la región, provocadas por la falla del aislamiento contaminado, parámetro que es calculado por:

$$N_d = \frac{\sum_{i=1}^m N_i}{\sum_{i=1}^m l_i \cdot T_i} \cdot 100$$

donde:

N_i .- número de interrupciones por contaminación en la línea o tramo de línea.

Para una región homogénea, la línea de fuga específica efectiva se calcula por:

$$\lambda_e = \frac{\sum_{i=1}^m \lambda_{ei} \cdot l_i}{\sum_{i=1}^m l_i}$$

donde:

λ_{ei} .- es la línea de fuga específica efectiva para la línea o tramo de línea, y se calcula por:

Capítulo 3. Evaluación de los efectos de la contaminación sobre el aislamiento eléctrico externo en una región.

$$\lambda_{ei} = \frac{L}{V \cdot K_e}$$

donde:

L.- distancia de fuga de la ristra instalada en la líneas o tramo de líneas, cm.

V.- tensión máxima fase - fase de la líneas o tramo de líneas.

K_e .- es el coeficiente de efectividad del aislamiento ante la deposición del contaminante. Si el valor de K_e no se conoce se utiliza el valor de $K_e = 2$.

El nivel de contaminación de la región, definido a partir de la longitud de fuga específica efectiva de la región λ_{ed} , se determina por la expresión:

$$\lambda_{ed} = \frac{\lambda_e}{\alpha}$$

donde:

α .- coeficiente que depende del valor de Ni, tal y como se muestra en la tabla que se muestra más abajo, y que fue obtenido experimentalmente [62].

α	Ni
1.15	0,01 - 0,1
1,0	0,1 - 1,0
0,90	1,0 - 5,0
0,85	> 5,0

Determinación del Coeficiente α .

Para poder realizar este análisis la información que se requiere, relacionada con el aislamiento de las líneas, está:

- Datos generales.- Nombre de la línea, longitud, nivel de tensión de trabajo (incluyendo los cambios de tensión de trabajo que haya tenido), tensión máxima de trabajo, puesta en marcha.
- Datos de construcción.- tipo, material y cantidad de estructuras, incluyendo cuantas son tangentes y cuantas son de tipo ángulo, si hay tramos característicos su longitud, tipos de estructuras aislantes (V, Λ , simple, doble, etc.) y cantidad de aisladores por cadena o ristra.
- Datos sobre el aislamiento.- si ha ocurrido cambio del aislamiento, fecha y tipo de cambio realizado, en cual estructura, datos técnicos de los aisladores antes y después del cambio, si este ha sido efectuado.

Capítulo 3. Evaluación de los efectos de la contaminación sobre el aislamiento eléctrico externo en una región.

- Datos sobre la actividad de mantenimiento.- recorrido de las líneas, cantidad de aislamiento detectado con problemas, problemas principales detectados, tipos de mantenimiento que se efectúa relacionado con la contaminación, periodicidad.

En el caso de las subestaciones se requiere un cúmulo de información similar, adaptado a sus características. Partiendo de toda la información que hasta aquí se ha manejado, se está en condiciones de realizar un análisis realmente específico del comportamiento del aislamiento, que actualmente se encuentra en explotación, ante las condiciones de contaminación de la zona o región bajo estudio, aún antes de caracterizar como tal dicho nivel de contaminación.

Caracterización regional o local de los niveles de contaminación a que está sometido el aislamiento.

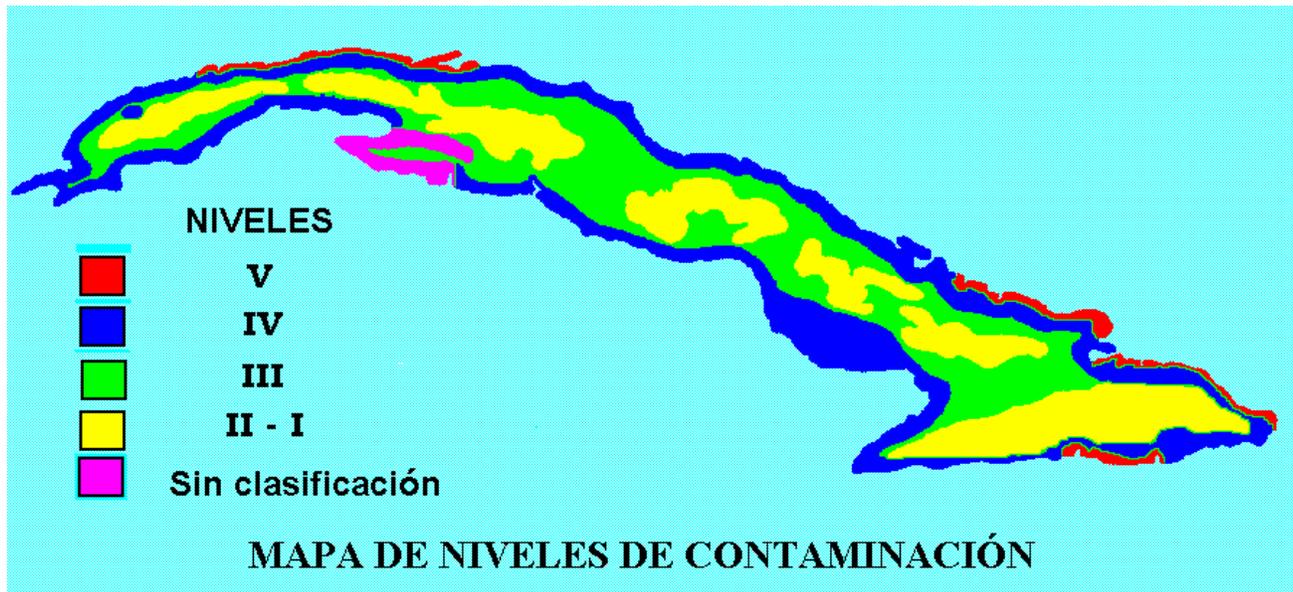
En un principio los estudios relacionados con la contaminación del aislamiento se caracterizaban por tener un carácter puntual, sin tenerse en cuenta que es un proceso que va más allá de las propias características del aislamiento, y que si bien es posible realizar una fotografía del nivel de contaminación en una localización dada, esto no permite asegurar que ese es el máximo nivel de contaminación en dicho lugar. Dado que los procesos contaminantes pueden ser, como se vio anteriormente, tanto de carácter súbito como monótono, y el grupo de parámetros que influyen en el mismo es muy grande como para poder caracterizarlo a través de una simple fotografía del momento actual, desde hace algunos años muchos países han apostado por la realización de mapas locales o regionales de contaminación, donde el estudio no sólo abarca conocer el estado, a través de una fotografía del problema actual, sino también como es que ocurre el fenómeno en el tiempo, si hay diferencias significativas entre zonas, regiones e incluso en tramos de líneas, etc.

Estos mapas dividen y caracterizan el territorio desde el punto de vista del Nivel de Contaminación del Aislamiento (NCA), pudiendo a partir de ese momento tomar decisiones sobre la ejecución del mantenimiento de una forma mucho más racional.

Existen dos formas de atacar el problema de la evaluación de los niveles de contaminación: a través de estudios y soluciones generales a escala regional, o a través de estudios particulares de casos a escala local. Un ejemplo de Mapa Regional de NCA se muestra en la Figura que se presenta más abajo.

De una forma u otra, entre los objetivos fundamentales para ambos casos está la elaboración de los mapas de niveles de contaminación, que permiten tener una base para la realización de los proyectos y planificación de las actividades de mantenimiento. Se elaboraran mapas de dos tipos:

- Mapas de contaminación natural.
- Mapas de contaminación en regiones con alta densidad de industrias.



Estos mapas se confeccionan siguiendo la siguiente secuencia:

1. Primera etapa: preparación de la base cartográfica y confección de los mapas de fuentes potenciales de contaminación.
2. Segunda etapa: confección del mapa preliminar de niveles de contaminación a partir de la experiencia de explotación.
3. Tercera etapa: corrección del mapa preliminar a partir de las investigaciones.
4. Cuarta etapa: elaboración y presentación del mapa final.

Durante la preparación de la base cartográfica se debe utilizar un mapa donde se ubicarán las posibles fuentes de contaminación y sus características, las trazas de las líneas aéreas y la ubicación de las subestaciones, características del aislamiento y de la región, posible influencia del mar y del terreno, influencias climatológicas y meteorológicas, así como la actividad en los suelos. Un ejemplo de mapa de fuentes potenciales a escala regional, de toda Cuba, se presenta en la Figura que se muestra más abajo.

Durante la segunda etapa se utilizan los datos de la experiencia de explotación vistas anteriormente. Por regla general se pasa a la tercera etapa en los casos siguientes:

- Proyección de una nueva línea o subestación sin experiencia de explotación suficiente en la región.
- Índices de falla muy altos, o sea, valores de N_i superiores a 1,0.
- No existen interrupciones por el uso exagerado de aislamiento u otras causas.

Capítulo 3. Evaluación de los efectos de la contaminación sobre el aislamiento eléctrico externo en una región.



La selección de los puntos de muestreo se realiza en función de la superficie total a estudiar, de acuerdo con el criterio de un punto de muestreo por cada 5000 Km² de superficie o fracción de este valor, en los casos de estudios a grandes escalas.

Cuando se realizan estudios locales la cantidad de puntos a definir para la ejecución del muestreo estarán en dependencia de las características del lugar, tipo y número de fuentes contaminantes y método de determinación del nivel de contaminación.

La presentación final del mapa se hará confeccionando los mismos en las escalas de interés del usuario y en dependencia del alcance del estudio, señalándose los límites entre regiones con líneas continuas.

Evaluación económica de los efectos de la contaminación.

Uno de los aspectos más importantes en el estudio y valoración de cualquier fenómeno, es el análisis económico asociado al mismo; en el caso de la contaminación es muy importante establecer los niveles de afectación que impone este fenómeno, dada la importancia social y económica que reviste. De manera general puede decirse que los principales costos asociados a la contaminación son:

- Mantenimiento.
- Pérdidas por facturación.
- Pérdidas asociadas a las industrias.
- Pérdidas asociadas a las corrientes de fuga.

Capítulo 3. Evaluación de los efectos de la contaminación sobre el aislamiento eléctrico externo en una región.

Costos por mantenimiento.

Los costos por mantenimiento, debido a la deposición de contaminantes sobre el aislamiento, son costos adicionales a la actividad propia que exige la instalación; en ellos están involucrados los problemas que trae al funcionamiento normal del sistema la acumulación de polvos sobre el aislamiento, los incrementos de la actividad corrosiva y el deterioro general de los componentes del sistema. Estos costos se calculan a partir de la expresión siguiente:

$$MCz = Cmat + Cmo + Ctrans.$$

donde:

MCz.-costo anual de mantenimiento debido a la contaminación en la zona bajo estudio.

Cmat.- costo del equipo reemplazado y los materiales empleados en el trabajo de mantenimiento realizado.

Cmo.- son los costos por salario, tanto básico como complementario, e incluye el tiempo de transportación.

Ctrans.- costo de los medios de transporte empleados en cada labor. Se asume igual a 0,15 Cmo.

Otra forma de calcular este costo es considerando de forma global todos los tipos de mantenimientos realizados y afectar la expresión anterior por un factor K que tenga en cuenta la porción probable que, de estos costos totales, corresponda a la contaminación.

Pérdidas por facturación.

Las pérdidas por facturación involucran fundamentalmente el concepto de la energía dejada de servir o no vendida debido a la contaminación. Su cálculo se realiza a través de la expresión:

$$PFz = p. Ens$$

donde:

PFz.- pérdidas por facturación en la zona de estudio.

p.- precio promedio de venta del kW.hora.

Ens.- energía no vendida durante la interrupción, en kW.

Pérdidas asociadas a las industrias.

Pueden ser utilizados tres métodos:

- Relación Ventas - Energía demandada.
- Relación Producción - Energía consumida.
- Relación Insumo Eléctrico - Producción.

Capítulo 3. Evaluación de los efectos de la contaminación sobre el aislamiento eléctrico externo en una región.

El método de la relación Ventas - Energía demandada considera la energía demandada pero no consumida, a causa de la contaminación, en cada alimentador más el factor obtenido de la propia relación ventas - energía. Es por ello que se utiliza la expresión:

$$Pla = Ra \cdot (\text{Suma total de Ensa} \cdot (\text{Ventas/Edem}))$$

donde:

Pla.- pérdidas anuales a la industria a causa de la contaminación en el alimentador.

RA.- relación de la energía suministrada por el alimentador con respecto a la energía demandada por los consumidores.

Ensa.- energía no suministrada por contaminación.

Ventas.- volumen de ventas anuales de cada consumidor.

Edem.- energía anual demandada por cada consumidor.

El método de la relación Producción - Energía consumida es similar al anterior, sólo que la relación entre ventas y energía demandada se sustituye por la relación que da nombre al método.

Por ultimo, las pérdidas calculadas por la relación Insumo - Producción se obtienen por la expresión:

$$Pla = (Sp/Sd) \cdot \text{Ens}$$

donde:

Sp.- suma de las producciones correspondientes a las actividades que se desarrollan en la zona.

Sd.- suma correspondiente a la demanda eléctrica

Pérdidas asociadas a las corrientes de fuga.

Este costo involucra las pérdidas que se producen en el sistema debido a las corrientes de fuga que circulan por la superficie del aislador contaminado, y que pueden llegar a ser tan molestas que interfieran las comunicaciones. Estas pérdidas se calculan según la expresión:

$$PCFz = p \cdot A \cdot B$$

donde:

PCFz.- pérdidas por corriente de fuga en la zona.

A.- número de horas con valores de humedad relativa superiores a un rango dado.

B.- pérdida de potencia promedio medida en la cámara de niebla para valores de humedad relativa dada.

Análisis de las alternativas de solución al problema de la contaminación del aislamiento.

Capítulo 3. Evaluación de los efectos de la contaminación sobre el aislamiento eléctrico externo en una región.

Desde hace varias décadas se realizan grandes esfuerzos a escala internacional con vistas a encontrar métodos eficaces que permitan combatir el efecto de la contaminación en el aislamiento y, por tanto, encaminados a lograr el comportamiento confiable del aislamiento en los sistemas eléctricos. Los métodos más utilizados internacionalmente son:

- Sobreaislamiento.
- Lavado del aislamiento.
- Empleo de grasas hidrófobas.
- Uso de aisladores con capa semiconductor.
- Eliminación de la fuente de contaminación.

El último método sólo es posible aplicarlo cuando el tipo de contaminante es industrial y, además, se justifica económicamente.

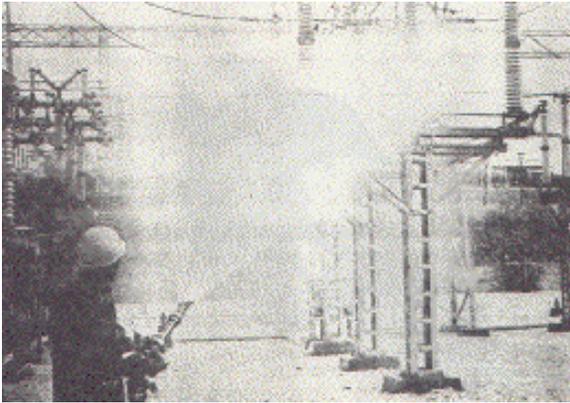
El método de lavado de aisladores puede aplicarse con el sistema energizado o desenergizado. Con el sistema desenergizado (ver Figura a la derecha) sólo es justificable en subestaciones coincidiendo con el período de mantenimiento capital de la misma, o en el caso donde no es posible aplicar otro tipo de método por razones técnicas, o cuando las características adhesivas del contaminante exijan el uso de lavado con soluciones químicas para recuperar el aislamiento.



La técnica de lavado del aislamiento con la línea o subestación energizada, comúnmente llamada lavado "en caliente", es de gran uso a escala internacional y fue utilizado por primera vez en Australia, por el año 1932 en líneas de 33 kV donde el lavado natural no eliminaba el contaminante depositado en el aislamiento. Posteriormente, esta técnica fue aplicada en países como Alemania, Rusia, Japón, Suecia, Noruega, Polonia, Estados Unidos, etc.

Este método consiste en aplicar al aislamiento un chorro de agua a presión o elementos no conductores suaves (como la fibra de maíz) para con esa acción eliminar el contaminante depositado sobre la superficie de los aisladores. Estos métodos se consideran de gran efectividad para lograr eliminar los contaminantes. En el caso del agua a presión para aquellos contaminantes de poca adherencia a la superficie del aislamiento o de alta solubilidad en agua, como pueden ser las sales, mientras que el otro, que es una variante del Sand Blasting, o lavado de superficie con arena, muy utilizado en la limpieza de buques, edificios, etc., permite eliminar de la superficie del aislamiento contaminantes que tienden a tener una alta adherencia en la superficie del aislador, como son el cemento o contaminantes provenientes de empresas químicas o de derivados del petróleo.

Capítulo 3. Evaluación de los efectos de la contaminación sobre el aislamiento eléctrico externo en una región.



En el caso del lavado de agua a presión, que puede decirse es el de mayor uso a escala internacional (ver Figura a la derecha), el lavado puede ser ejecutado de forma manual o automática. El método automático es utilizado fundamentalmente en las subestaciones, y en particular, en aquellas ubicadas en lugares donde el régimen de acumulación de contaminantes es intenso, dado el alto costo inicial de la inversión.

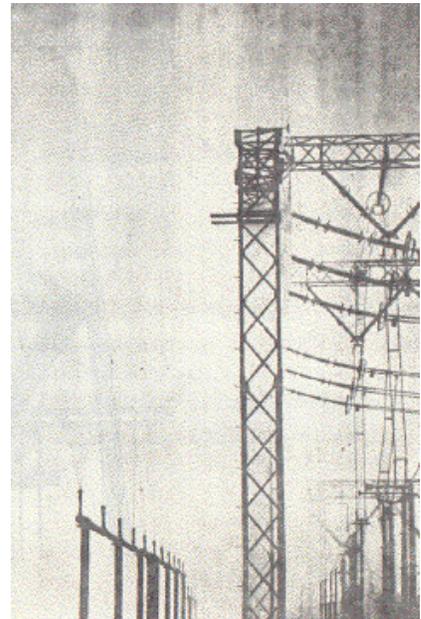
Para su aplicación se requiere un monitoreo continuo del nivel de contaminación, ya sea a través de la medición de la corriente de fuga, conteo de pulsos de las descargas que se producen en el aislamiento, u otra técnica que permita ese monitoreo. Una variante de este método es la "cortina de agua", método empleado para limitar la posibilidad de que el contaminante proveniente de una dirección predeterminada llegue al aislamiento, como puede ser observado en las Figuras mostradas más abajo.

El lavado manual es también de gran utilidad para las subestaciones, pero se extiende también a las líneas pues el mismo es ejecutado con un equipo portátil.

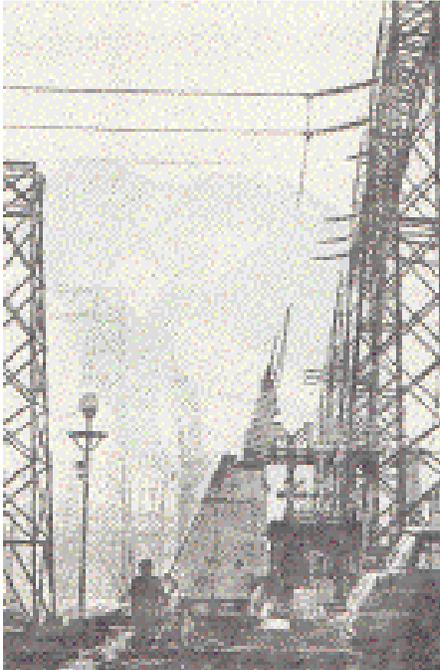
En la selección del método de lavado, y de su sistema de trabajo, tienen una gran importancia elementos como las características de la instalación que se va a lavar y del equipo de lavado, el régimen y proceso de lavado y los principios de seguridad para el personal y la instalación.

En la selección del equipamiento tiene que tenerse en cuenta aspectos tales como tipo y dimensión de las boquillas y presión y gasto de agua, mientras que en lo relativo al régimen y proceso de lavado influye la periodicidad y duración del mismo.

Uno de los problemas de seguridad que debe resolverse en la aplicación de esta técnica es el evitar la electrocución del operario en el momento de efectuar el lavado, siendo elementos que determinan esa seguridad la corriente superficial sobre los aisladores y por el chorro de agua, el nivel de aterramiento, la distancia desde la boquilla al elemento aislante, la presión del chorro y la conductividad del agua, las características de la boquilla, la velocidad del lavado y la forma del lavado.



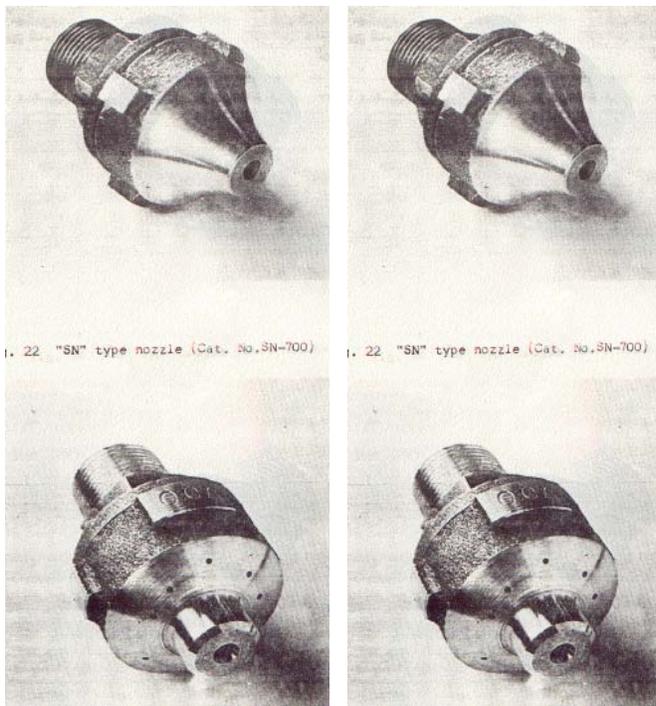
Capítulo 3. Evaluación de los efectos de la contaminación sobre el aislamiento eléctrico externo en una región.



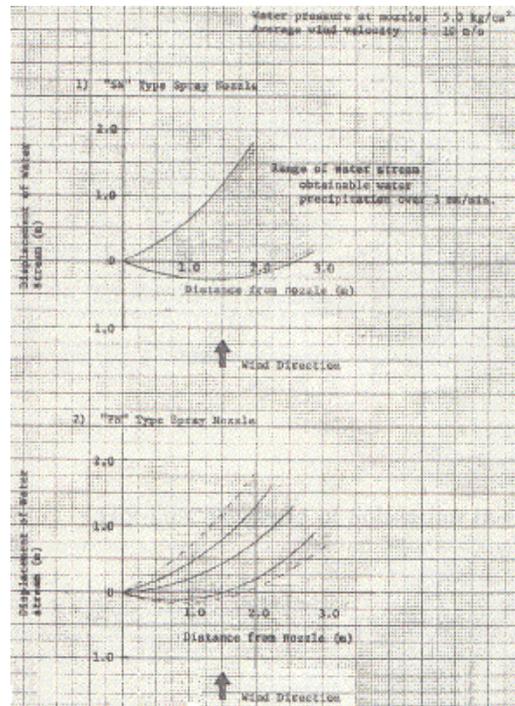
En la aplicación práctica del lavado "en caliente" para reducir al mínimo la posibilidad de una descarga en el momento de estarse efectuando el mismo, se deben cumplir, por parte del operario del equipo, los siguientes requerimientos:

- Mantener la distancia mínima de seguridad especificada.
- Efectuar el lavado de abajo hacia arriba en las cadenas verticales o con cierto ángulo.
- Escoger la posición de lavado de forma tal que la misma no afecte a otras partes de la instalación, mientras ejecuta el mismo.
- Tener en cuenta la dirección y velocidad del viento en el instante de efectuar el lavado.
- Mantener sólidamente aterrada la boquilla de salida del equipo.

En las Figuras que se muestran a continuación se presentan algunas características de la influencia de los elementos que se mencionaron anteriormente sobre la ejecución del lavado.

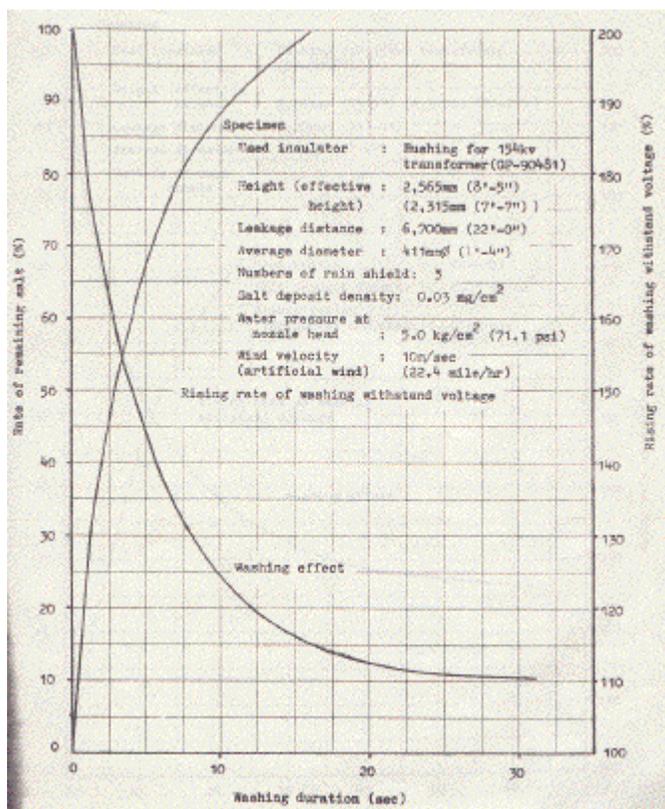


Modelos de boquillas

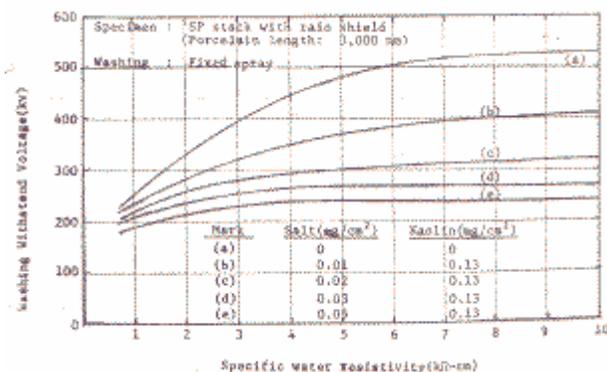


Influencia del tipo de boquilla

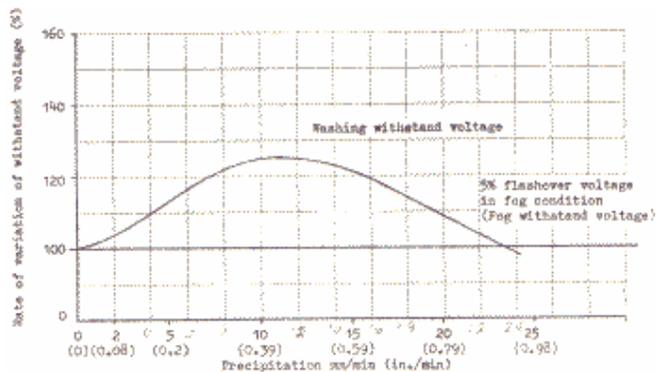
Capítulo 3. Evaluación de los efectos de la contaminación sobre el aislamiento eléctrico externo en una región.



Efecto del lavado y característica de la razón de variación de la tensión de soporte al efectuarse el lavado.



Efecto de la resistividad del agua empleada en el lavado sobre la tensión de soporte al efectuarse el lavado.



Relación entre cantidad de agua y tensión de soporte al efectuar el lavado.

El uso o *empleo de grasas hidrófobas* es una de las medidas más usadas

Un criterio definitivo para definir la vida útil de la grasa silicosa es difícil, sobre todo porque depende mucho de las condiciones ambientales. No obstante, existen algunos aspectos que pueden ayudar a definir cuando la grasa está ya para cambiarse, como son el estado y el grueso del recubrimiento, nivel de descargas detectado y nivel de radio interferencia.

En estudios que se han realizado, se ha demostrado que para condiciones severas de contaminación marina, la vida útil de la grasa está en el orden de los 8 a 12 meses, mientras que cuando se trata de contaminación industrial severa o marina moderada, el tiempo de vida útil está en el orden de los 2 a 3 años, así como si la contaminación es sólo industrial, pero moderada, el tiempo de vida puede ser de 3 a 4 años.

El principal inconveniente de este método es, además de los altos costos de las grasas, es la necesidad de monitorear continuamente el estado del recubrimiento y la necesidad de desenergizar el sistema tanto para su aplicación como para su remoción.

Capítulo 3. Evaluación de los efectos de la contaminación sobre el aislamiento eléctrico externo en una región.

El uso de *aisladores con capa semiconductoras* es un método que trabaja sobre la inhibición de las descargas superficiales, actuando sobre uno de los elementos principal del proceso: la corriente de fuga en la superficie del aislador. Estos aisladores tienen un diseño especial, basado en el recubrimiento de su superficie por una capa sobre la base de elementos semiconductores, lo que le permite mantener una corriente de fuga fija, del orden de 1 mA. La circulación de esta corriente hace subir la temperatura en la superficie del aislador lo que provoca, ante condiciones de humedad en la capa de contaminantes, un secado más rápido de la misma. Aunque este proceso es beneficioso no limita la formación de las bandas secas, pues la condición de reforzamiento de campo eléctrico en las zonas más agudas o estrechas del aislador hace que en esas zonas el secado sea más intenso; no obstante ello, la presencia ahora de dos capas con características resistivas, la de contaminación, con altos valores resistivos, y la semiconductor, de menor valor resistivo, conectadas técnicamente en paralelo a la superficie del aislador, hace que la resistencia equivalente que ve la tensión aplicada a los extremos de la banda seca sea menor, por lo que se inhibe la formación de la descarga superficial.

Este tipo de aislador ha ido cambiando el elemento semiconductor a lo largo de su uso; primero fue utilizado el óxido de hierro, el cual fracasó pues presentó problemas de corrosión electroquímica. Un segundo material usado fue el óxido de titanio, el cual fue muy sensible a las descargas parciales, siendo el que mejor resultado ha ofrecido el óxido de estaño enriquecido con antimonio. Estos aisladores además de su uso para actuar contra los efectos de la contaminación, tienen la ventaja de mejorar la distribución de tensión en la cadena aislante, pero como desventaja posee la de ser más caros que los aisladores normales, su corta vida útil y las pérdidas de energía que trae su principio de funcionamiento.

El *sobreaislamiento* es una medida muy empleada durante muchos años para disminuir las pérdidas que se asocian a las fallas por la acción de la contaminación, aunque la misma no trabaja sobre la inhibición del proceso, sino va a la busca de incrementar la longitud de fuga del aislamiento de forma que aún, en presencia de las bandas secas, no es posible que ocurra la descarga parcial que inicie el proceso de falla. Esta medida tiene la necesidad de realizar un estudio inicial de coordinación de aislamiento, ya que al sobre aislar el aislamiento exterior, puede llegarse a sobrepasar los niveles de coordinación diseñados en la línea y en sus equipos, lo que provocaría en determinadas condiciones, que esos equipos fallaran por esfuerzos dieléctricos.

La aplicación de cada método para combatir la contaminación, inhibir el proceso de las bandas secas o de la descarga, requiere un análisis técnico – económico que diga la última palabra en lo relacionado a la decisión a tomar.

Evaluación técnico – económica de las alternativas de solución.

1. Sobreaislamiento.

En la evaluación del costo de este método se involucran los siguientes factores:

Capítulo 3. Evaluación de los efectos de la contaminación sobre el aislamiento eléctrico externo en una región.

- Costo de la mano de obra (Cmo).
- Costo por transporte (Ctrans).
- Costo de la interrupción del suministro de energía para realizar el sobreaislamiento (Co).
- Costo adicional por incremento del aislamiento (Csa).

La expresión que define este cálculo será:

$$CA_{tsa} = C_{Asa} + \{(C_{mo} \cdot N_e) + C_{trans} + C_o\} \cdot 1/L$$

donde:

$$C_{Asa} = C_{sa} \cdot (N \cdot F \cdot N_e / L) + C_{nt} \cdot N_e / L + C_{BIL} / L$$

Ne.- número de estructuras en la líneas.

L.- longitud de la líneas.

N.- número de ristras por fase.

F.- número de fases.

Cnt.- costo adicional por robustecimiento mecánico de la estructura.

BIL.- costo por elevar el nivel básico de aislamiento a impulso (NBI) de los equipos de la línea.

Lavado de aisladores.

En el lavado con chorro de agua a presión el costo se calculará por la expresión:

$$CA_{lc} = (C_{mo} + C_a + C_{trans}) \cdot E/L + C_{eq} \cdot 1/L$$

donde:

Ca.- costo del agua y del material empleado para realizar el lavado.

E.- número de veces al año en que se ejecuta el lavado.

Ceq.- costo del equipo para efectuar el lavado.

Aplicación de grasas.

La evaluación de este método se hará por:

$$C_{ag} = (C_g + C_{mo} + C_{trans} + C_o + C_r) \cdot G/L$$

donde:

Cg.- costo de la grasa empleada = Q.N.F.Ne.S

Q.- cantidad de grasa requerida por aislador.

S.- costo del kilogramo de grasa.

Cr.- costo del material utilizado para remover la grasa.

G.- número de veces que se engrasa en un año.

Capítulo 3. Evaluación de los efectos de la contaminación sobre el aislamiento eléctrico externo en una región.

Capítulo 4.

Diseño y selección del aislamiento ante diferentes condiciones de contaminación.

Experiencias a escala internacional.

Internacionalmente, se acepta por regla general la escala de clasificación de los niveles de aislamiento que expone la Comisión Electrotécnica Internacional (C.E.I) en su norma CEI - 815: 1986 {31} así como el procedimiento general para la selección y diseño del aislamiento descrito en dicho documento; no obstante, cada país ha desarrollado su propia clasificación, de acuerdo a las características de su ambiente y al método de determinación empleado.

En {45} el Grupo de Trabajo 04 de la CIGRE plantea como posible forma de hacer una selección preliminar la utilización del concepto de la longitud de fuga específica, requerida para aisladores en servicio bajo diferentes ambientes de contaminación, de acuerdo a los diferentes métodos de ensayo.

En {31} también se presenta la aplicación del concepto de la longitud de fuga específica, que permite determinar la distancia de fuga mínima nominal según la expresión que se muestra más abajo teniendo en consideración el nivel de contaminación del lugar:

$$L = \lambda \cdot V_{\phi - \phi} \cdot k_d$$

donde:

L .- es la distancia de fuga mínima nominal, en cm.

λ .- es la longitud de fuga específica, según corresponde al nivel de contaminación determinado, en cm.

$\phi - \phi$.- tensión máxima entre fases del sistema para el equipo, en kV.

k_d .- factor de corrección a causa del diámetro del aislador.

En la determinación de la distancia de fuga mínima existen diferentes modos de realizar los cálculos al seleccionar el nivel de aislamiento en función de los ensayos de contaminación artificial; los especialistas han desarrollado métodos de calculo que tienen en cuenta la experiencia de cada país y validados como representativos de las condiciones de contaminación existentes. Por ejemplo, en Checoslovaquia se utilizan dos métodos de ensayos de contaminación artificial: el método de la niebla salina y el de la metilcelulosa (con predeposición de la capa de contaminante); inicialmente, según Kohoutova {11}, para cada método se definía un valor de soporte, para este caso salinidad y conductividad superficial respectivamente, los que permitían a través de un factor de correlación k (obtenido a escala de Laboratorio) calcular la longitud mínima de la cadena o ristra de aisladores según la expresión:

$$l_s \geq V / k$$

donde:

V .- tensión de fase a tierra, en kV.

k .- coeficiente que expresa la relación variable entre la tensión aplicada y la altura del aislador.

No obstante actualmente en Checoslovaquia se utiliza el método de cálculo expresado en {31}.

En Francia, según Claverie {13}, se utiliza el ensayo con Niebla Salina para obtener una salinidad de soporte mínima, que correlacionada con una longitud de fuga específica, permite realizar el cálculo de la longitud total de la cadena según la expresión:

$$L_{tcadena} = V_{max\phi - \phi} \cdot \lambda$$

El número de aisladores se calcula según la expresión:

$$No. \text{ aisladores} = L_{tcadena} / L_{faislador}$$

donde:

$L_{faislador}$.- es la longitud de fuga geométrica del aislador seleccionado, en cm.

En Japón {17} la selección del aislamiento se realiza a partir de los ensayos de Laboratorio utilizando el método de la Niebla Salina, definiéndose el número de aisladores según la expresión:

$$No. \text{ aisladores} = E \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot k_2 \cdot \frac{1}{B}$$

donde:

k_2 .- factor de seguridad = 1.1

B .- tensión de soporte del aislador seleccionado, en kV.

E .- tensión máxima del sistema entre fases, en kV.

En Holanda {11}, a partir de las experiencias adquiridas en estaciones de ensayo a escala natural, donde el parámetro de análisis fue la ocurrencia o no de las descargas en los aisladores contaminados, se desarrolló un método directo para determinar la longitud mínima de la cadena de aisladores a utilizar.

Capítulo 4. Diseño y selección del aislamiento ante diferentes condiciones de contaminación.

Riubrugent y colaboradores proponen en {60} un procedimiento de cálculo basado en sus experiencias a partir de las mediciones de la corriente de fuga máxima (I_h), realizando una evaluación estadística para obtener el riesgo de falla (r.o.f) por la expresión:

$$(r.o.f) = \int_0^{\infty} F_1\{\beta \sqrt{I_p}\} \cdot \alpha \cdot F_2\{\alpha \cdot \hat{I}_p\} \cdot d \hat{I}_p$$

donde:

$$\beta = \frac{3}{2} \left(\frac{\hat{V}}{\hat{l}}\right)_p \quad \text{y} \quad \alpha = \frac{\left(\frac{\hat{V}}{\hat{l}}\right)_{prueba}}{\left(\frac{\hat{V}}{\hat{l}}\right)_p} \cdot \frac{\hat{I}_h}{\hat{I}_p}$$

donde:

$\left(\frac{\hat{V}}{\hat{l}}\right)_{prueba}$.- tensión de prueba.

$\left(\frac{\hat{V}}{\hat{l}}\right)_p$.- tensión máxima permisible.

\hat{I}_p .- corriente de fuga permisible.

En Cuba, después de 4 años de trabajo de campo y laboratorio se llegó a proponer y aprobar una metodología de trabajo que se presenta a continuación.

Metodología para la explotación eficiente del aislamiento en condiciones de contaminación en Cuba.

1. Bases de elaboración de la metodología.

Toda metodología, por sencilla que sea, necesita de una elaboración teórica y experimental que permita expresar sus fundamentos y las conclusiones que han permitido llegar a su elaboración.

Internacionalmente, la temática de la contaminación del aislamiento ha sido trabajada fundamentalmente por países de un alto desarrollo, tal y como se ha visto con anterioridad y cuyas condiciones ambientales difieren grandemente de las existentes en los países del

3er. mundo. Es por ello que por regla general se requiere realizar un trabajo experimental que permita evaluar estas condiciones ambientales propias por un lado, y establecer clasificaciones, métodos de determinación y criterios propios en función de dichas condiciones.

El punto de partida es conocer la influencia del medio ambiente sobre el aislamiento de las instalaciones eléctricas asociadas al sistema eléctrico de la región a estudiar; para lograr obtener la influencia del medio ambiente sobre el aislamiento, es necesario realizar un pormenorizado y extenso trabajo experimental de campo y a escala de Laboratorio, que asegure resultados confiables en las evaluaciones.

Un experimento, como encuesta plasmada para probar nuevos hechos o para confirmar o negar los resultados de experimentos previos, puede ser de tres tipos: **preliminar, crítico o demostrativo**.

El **experimento preliminar** es aquel que siendo ejecutado por vez primera busca respuesta a determinado fenómeno o comportamiento del parámetro o parámetros analizados.

En el **experimento crítico** su objetivo central es comparar las respuestas que se obtienen para diferentes procedimientos (tratamientos) de obtención del parámetro o parámetros analizados.

El **experimento demostrativo** pretende comparar las respuestas de los diferentes tratamientos con un tratamiento normalizado.

Por regla general, el experimento preliminar no lleva implícito el realizar un diseño experimental; sin embargo, necesita poner un gran número de tratamientos a prueba; los otros dos tipos de experimentos llevan acoplado de por sí un diseño de experimento y tienden a aplicar un número mínimo de tratamientos

Por otro lado puede establecerse que todo experimento busca dos objetivos fundamentales:

- Probar una hipótesis, concerniente a diferencias entre tratamientos bajo condiciones comparables.
- Establecer las diferencias entre las medias de los tratamientos.

El diseño de experimentos como método científico de trabajo, es una herramienta que permite preelaborar, y obtener posteriormente, los resultados buscados de forma racional, teniendo en cuenta para ello las características de los parámetros que se van a censar y los objetivos del trabajo experimental. Todo estadístico tiene su lista propia de los pasos que el sigue cuando diseña un experimento; no obstante la comparación de las diferentes listas, revela en ellos, esencialmente, los mismos puntos.

Capítulo 4. Diseño y selección del aislamiento ante diferentes condiciones de contaminación.

Cuando se establece un procedimiento de ensayo para investigar, estadísticamente, la factibilidad de una hipótesis enunciada, existen varios factores que deben ser considerados, según plantea Ostle {63}. Entre estos factores están:

- La definición de la **naturaleza del experimento**, o sea, el tipo de experimento.
- Seleccionar la **prueba estadística**, o sea, **el método** para analizar los datos.
- Elegir la **naturaleza y el tamaño** de la región crítica (de rechazo de la hipótesis), o sea, el **nivel de significación** de la prueba **y la desviación admisible** para la prueba.
- Determinar el **tamaño de la muestra**, o sea, el número de veces en que se efectuará el experimento.

Partiendo de lo anterior puede concebirse la ejecución de un Diseño Experimental donde se estudien los **diferentes procedimientos** a emplear para la determinación de los niveles de contaminación en los distintos puntos de muestreo que se seleccionen.

Los objetivos fundamentales del trabajo experimental a realizar podrían ser los siguientes:

- Obtener una **clasificación general de los niveles de contaminación** del aislamiento eléctrico externo que permita evaluar la región bajo estudio a partir de sus características naturales o artificiales, estas últimas creadas por el hombre, ya sean estas generales o particulares, en caso de no ser posible realizar un estudio local.
- Obtener **los niveles de aislamiento mínimos requeridos** para cada nivel de contaminación señalado, de manera que se asegure el trabajo confiable del aislamiento eléctrico externo.
- Caracterizar el **comportamiento de los aisladores** más utilizados en las líneas aéreas de transporte de energía eléctrica en el SEN, tanto desde el punto de vista de su explotación como de su diseño.

La cantidad de procedimientos para determinar el nivel de contaminación es amplia y está normalizado a escala internacional; es, por tanto, necesario al definir la naturaleza del experimento, dejar claro cuales serán las características del trabajo experimental a desarrollar.

La **selección del método** para analizar los datos depende de la selección de los métodos de determinación que se empleen en el estudio; siendo para ello necesario realizar una prueba de **Bondad de Ajuste** sobre los resultados experimentales; la prueba de Bondad de Ajuste permite asegurar si el grupo de datos experimentales cumple con una determinada distribución. Entre estas pruebas están:

- La prueba de Ji - cuadrada (χ^2).
- La prueba G
- La prueba de Kolmogorov-Smirnov.

Según la práctica internacional, el diseño del aislamiento se realiza para un alto nivel de confianza, del orden del 95 y 99.5%, por lo que en el estudio debe tenerse como niveles de significación tanto para la prueba de bondad de ajuste como para los cálculos

posteriores los valores de 0.05 y 0.005 partiendo del planteamiento de hipótesis hecho. Así mismo, por regla general se acepta una desviación para la prueba del orden de $2 - 3 \tau^2$ con una probabilidad de detección del 95%, por lo que el tamaño de la muestra para cada procedimiento utilizado, o sea el número total de observaciones no podrá ser en ningún caso menor que 6, según se establece en {63}.

2. Metodología desarrollada.

La distancia que existe entre un conductor o parte energizada a un equipo, o a cualquier instalación o punto conectado a tierra, es conocida por regla general como distancia de aislamiento. La misma puede ser evaluada a partir de dos condiciones: la distancia por aire, relacionada con la tensión de trabajo y las sobretensiones temporales, y la distancia de fuga, relacionada con el nivel de contaminación del medio y definida a partir de la distancia de contorneamiento de la parte aislante del equipo.

En correspondencia con lo anterior, para definir el aislamiento necesario en cualquier instalación eléctrica es decisivo conocer dos aspectos: primero, el nivel de tensión de trabajo, y segundo, el nivel de contaminación de la zona donde se ubicará la instalación. Para ello es posible definir un procedimiento para el diseño del aislamiento, que siendo independiente del nivel de contaminación, tenga en cuenta la particularidad de cada caso.

Dicho procedimiento como tal tiene seis etapas:

- Caracterización de la zona desde el punto de vista climatológico, meteorológico y geomorfológico.
- Determinación de los niveles de contaminación y caracterización del proceso.
- Evaluación del aislamiento existente a utilizar.
- Cálculo del nivel de aislamiento requerido.
- Evaluación de las alternativas de solución.
- Selección definitiva del diseño.

Para la primera etapa es necesario utilizar una base informativa amplia como puede ser: datos y estudios climatológicos, estudios auxiliares sobre medio ambiente y datos sobre la ubicación de las instalaciones eléctricas (actuales o futuras) con respecto a posibles fuentes de contaminación.

Para la segunda etapa debe lograrse realizar un estudio sobre la experiencia de explotación, definir el tipo de contaminación, sus características y nivel.

En la tercera etapa es necesario consultar los estudios que sobre el comportamiento de los aisladores se han realizado, sus parámetros de diseño y los valores de los coeficientes de efectividad, para un análisis detallado de los mismos.

Durante la cuarta etapa se realizará el cálculo del nivel mínimo de aislamiento que se requiere en función del nivel de tensión de trabajo, los diferentes aisladores a evaluar para

Capítulo 4. Diseño y selección del aislamiento ante diferentes condiciones de contaminación.

su uso, el tipo de construcción aislante y otros criterios que permitirán incluir, al cálculo, la experiencia de explotación.

La quinta etapa será en la que se analizarán las diferentes construcciones aislantes que se utilizan, los diferentes métodos para limitar o solucionar los problemas de la contaminación y se utilizarán los últimos datos relacionados con los costos de los equipos y componentes a utilizar para evaluar económicamente las alternativas.

Por último, en la sexta etapa se seleccionará, de todas las variantes vistas, la más eficiente desde el punto de vista técnico - económico, teniendo en cuenta las condiciones reales de su ejecución y factibilidad de aplicación.

La selección del aislamiento para las líneas, instalaciones y equipos eléctricos se realizará en dependencia del nivel de contaminación de la atmósfera, establecido por el MAPA DE NIVELES DE CONTAMINACIÓN DEL AISLAMIENTO ELÉCTRICO EXTERNO DE LA REPUBLICA DE CUBA {69} y que se expresa, en su relación con el nivel de aislamiento mínimo requerido, a través del concepto de la longitud de fuga específica.

La longitud de fuga mínima requerida en las ristras, columnas o aislamiento de equipos, instalaciones o aparatos empleados en la construcción de las líneas y subestaciones del Sistema Electroenergético Nacional, será calculada por la siguiente expresión:

$$L \geq \lambda_e \cdot V \cdot K_e \cdot K$$

donde:

L.- longitud de fuga total, cm.

λ_e .- longitud de fuga específica efectiva de la región, (cm / kV).

V.- tensión máxima de operación entre fases, según la NC 9402, kV.

K_e .- coeficiente de efectividad del aislador evaluado.

K.- coeficiente que tiene en cuenta la construcción aislante.

El valor de K depende de la cantidad de ristras que se ubiquen por fase, según se presenta en la Tabla que se muestra más abajo y obtenido experimentalmente.

CANTIDAD DE RISTRAS POR FASE			
	1	2	3 - 5
K	1,0	1,05	1,10

Valores experimentales de K.

El número de aisladores en las cadenas o ristras se calculará, para líneas con estructuras de acero u hormigón, por la siguiente expresión:

$$m = L / L_f$$

donde:

7

Capítulo 4. Diseño y selección del aislamiento ante diferentes condiciones de contaminación.

Lf.- es la longitud geométrica del aislador a emplear, cm.

Cuando el valor de m no sea entero, se redondeará al inmediato superior. Para el caso de las subestaciones el requerimiento del aislamiento estará en función de la expresión que permite calcular L de forma que siempre se cumpla que L_f sea mayor que L .

En el caso de la utilización de estructuras de madera se admite disminuir en una unidad la cadena aislante, con respecto a las estructuras de acero u hormigón, siempre y cuando no se hayan detectado, en líneas similares, combustiones, chisporroteos y quemado de postes y crucetas.

Se recomienda utilizar aisladores de simple configuración en las ristas de tensión para estructuras remates o ángulos, determinándose su número por la expresión que permite calcular L .

Para los casos de regiones con contaminación industrial del tipo cemento, o regiones con suelos salinos, en caso de ser imperativo el uso de aisladores con configuración normal, deben ser utilizados aisladores lisos con líneas aerodinámicas.

Se recomienda el uso de aisladores con larga longitud de fuga o diseños especiales, como por ejemplo con nervaduras alargadas en la superficie inferior, para las regiones con contaminación industrial de cualquier tipo, así como en aquellas regiones con alta influencia de aerosoles marinos.

Se recomienda el uso de aisladores tipo barra en regiones donde haya dificultades en el acceso para la observación del estado del aislamiento o en regiones con contaminación del tipo cemento.

Se recomienda reforzar el aislamiento en las cadenas que se ubican en las subestaciones que por su importancia lo requieran en hasta un aislador para 110 kV y hasta dos aisladores para 220 kV.

Los esquemas que utilizan equipos con un aislamiento correspondiente a un IV nivel, hasta 2,6 cm / kV, pueden ser utilizados en niveles superiores, siempre y cuando se utilicen medidas profilácticas.

En las regiones con contaminación industrial o con posible alta influencia de aerosoles marinos, en caso de no tenerse con exactitud las características de la región o el nivel de contaminación, se recomienda considerarlas como regiones con un IV nivel de contaminación como mínimo.

En las regiones con niveles de contaminación extremos, VI nivel, se recomienda a la hora de proyectar tener en cuenta la necesidad de utilizar medidas profilácticas para su limpieza sistemática.

Referencias bibliográficas.

Capítulo 4. Diseño y selección del aislamiento ante diferentes condiciones de contaminación.

31. CEI Publicación 815: " Guía para la selección de aisladores en condiciones de contaminación ", 1986.
45. CIGRE SC 33, Working Group 04 " A critical comparison of artificial pollution test methods for H.V. insulators ", Electra No. 64, pp. 117 - 136.
11. Kohoutova, D. " Selection of insulators used in the CSSR for polluted areas ", report presented at the Colloquium of CIGRE SC No. 33, pp. A.1- A.4, London, June 1977.
13. Claverie, P. " The principles applied by Electricite de France for selecting insulators in polluted areas ", report presented at the Colloquium of CIGRE SC No. 33, pp. A.4 - A.8, London, June 1977.
17. Nakajima, Y. " Test methods and insulation criteria ", report presented at the Colloquium of CIGRE SC No. 33, pp. A.39 - A.41, London, June 1977.
60. Riubrugent, J. and et. al. " CIGRE 22 - 04, Symposium 22 - 81, Stockholm 1981
63. Ostle, B. " Estadística aplicada ", Editorial Científico - Técnica, Ministerio de Cultura, La Habana, Cuba, 1981.
69. Castro, M. et. al. : " Mapa de niveles de contaminación del aislamiento de la República de Cuba ", Informe de investigación terminada del PR - 585, CIPEL, ISPJAE, La Habana, Noviembre de 1989.