

# Sistemas de Puesta a Tierra y Protección Contra Descargas Atmosféricas

F. M. González-Longatt

**Resumen**—En este documento se presenta un resumen sencillo de los aspectos metodológicos-prácticos para consideraciones de sistemas de puesta a tierra y protección contra descargas atmosféricas en instalaciones de subestaciones eléctricas del tipo exterior. Es un breve resumen de aspectos que serán desarrollados a lo largo de un tutorial. En tal sentido, referencias formales documentales no son presentadas en forma explícita y se deja a la entrega de un documento en el transcurso del curso.

**Índice de Términos**—Sistemas de Puesta a Tierra, consideraciones simples de dimensionamiento, protección contra descargas atmosféricas.

## I. INTRODUCCIÓN

Los Sistemas de Puesta a Tierra (SPAT) se instalan con la finalidad de garantizar la conexión del potencial a tierra de los equipos que lo requieran (transformadores, motores, etc) y la integridad del personal y suscriptores de la empresa.

Este diseño tradicionalmente se ha realizado en función de la resistividad del terreno, donde será ubicado el SPAT, y el límite máximo establecido para el valor de la resistencia de la toma de tierra por las normas nacionales e internacionales, y los límites permisibles de voltajes para las personas y equipos.

Pero además el SPAT se utiliza, para drenar a tierra las sobretensiones, por la operación de los descargadores de sobretensiones, vulgarmente denominados *pararrayos*.

En el caso de tomas con resistencia de tierras muy elevadas, la operación de estos descargadores puede que no sea efectiva ocasionando la circulación de corrientes de fallas sobre las superficies aislantes de los elementos de la red, provocando posibles daños de los equipos, riesgo eléctrico en las personas e interrupciones del servicio eléctrico.

Especial importancia reviste el hecho de que al circular estas corrientes por las tomas de tierra, aparecen diferencias de potencial, las cuales podrían exceder el umbral de tolerable por los seres humanos, de ahí que estas condiciones transitorias puedan degenerar en riesgo eléctrico a las personas y que deben ser tomadas muy en cuenta para el diseño del sistema a utilizar.

En este artículo se muestran un breve bosquejo de los conceptos asociados a los sistemas de puesta a tierra además

de fundamentos del proceso de descarga atmosférica u los sistemas de protección asociados.

## II. SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA

La palabra *aterramiento* es comúnmente utilizada (de manera poco elegante) en sistemas eléctricos de potencia, para cubrir los *sistemas de puesta a tierra* y el aterramiento de equipos y del neutro.

La *puesta a tierra* comprende cualquier conexión metálica, sin fusible, ni protección alguna, de sección suficiente, entre una parte de una instalación y un electrodo o placa metálica, de dimensiones y situaciones tales que, en todo momento, se pueda asegurar que los elementos se encuentran al mismo potencial de tierra.

### A. Objetivo

Las razones que más frecuentemente se citan para tener una un SPAT son:

- Proporcionar una impedancia suficientemente baja para facilitar la operación satisfactoria de las protecciones en condiciones de falla.
- Asegurar que personas presentes en la estación, no queden expuestos a potenciales inseguros, en régimen permanente o en condiciones de falla.
- Mantener los voltajes del sistema dentro de límites razonables bajo condiciones de falla (tales como descarga atmosférica, ondas de maniobra o contacto inadvertido con sistemas de voltaje mayor), y asegurar que no se exceda el voltaje de ruptura dieléctrica del aislante.
- Limitar el voltaje a tierra sobre materiales conductivos que circundan conductores o equipos eléctricos.

Otras razones citadas menos frecuentemente, incluyen:

- Estabilizar los voltajes fase a tierra en líneas eléctricas bajo condiciones de régimen permanente, por ejemplo, disipando cargas electrostáticas que se han generado debido a nubes, polvo, agua, nieve.
- Proporcionar una trayectoria alternativa para las corrientes inducidas y de tal modo minimizar el ruido eléctrico en cables.
- Proporcionar una plataforma equipotencial sobre la cual pueda operar equipo electrónico.

Para desempeñarse adecuadamente cumpliendo cualquiera de las funciones anteriores, el SPAT debe generalmente tener una baja impedancia, de modo que ya sea dispersando o recogiendo corriente desde el terreno, no se produzca un aumento de voltaje excesivo.

F. M. Gonzalez-Longatt, F. Guillen, A. Hernandez, R. Teran, C. Peraza están en el departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada, Maracay, Venezuela, 2122, +58-243-5546954 (e-mail: fglongatt@ieee.org.).

III. DISEÑO DE SPAT

Para el diseño de un SPAT en general es necesario identificar los distintos elementos que lo conforman y los factores que de una u otra podrían afectarlo, para así determinar cual es el camino más fiable en la implementación del mismo, garantizando un sistema confiable, seguro y de larga duración.

1) Resistividad del Terreno

Esta es la magnitud característica de toda materia, que expresa su aptitud para la conducción de corrientes eléctricas. representa la resistencia de una materia considerada, cuyas dimensiones son la unidad, por ejemplo un cubo de un metro de lado la resistividad será expresada en (Ohm-m).

Las medidas de resistividad de la tierra tienen un triple propósito

1. Este tipo de datos es usado para realizar *reconocimientos geofísicos debajo de la superficie* como ayuda para identificar zonas de mineral, profundidades de roca y otros fenómenos geológicos.
2. La resistividad posee un impacto directo sobre el *grado de corrosión en tuberías bajo tierra*. Una baja resistividad, tiene relación con un aumento en actividad corrosiva y así dicta el tratamiento protectorio a usar.
3. La resistividad de la tierra afecta directamente el diseño de un sistema de toma de tierra y a este último propósito es el que será explicado en el presente trabajo.

Al diseñar un SPAT extenso, es recomendable localizar el área de menor resistividad de la tierra para conseguir la instalación de puesta a tierra más económica.

La resistividad del terreno varía ampliamente y afectada por varios aspectos: Naturaleza del terreno, humedad, temperatura, salinidad, estratigrafía, variaciones estacionales, factores de naturaleza eléctrica, compactación.

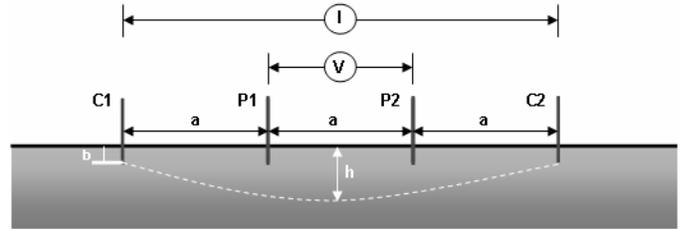
a) Métodos Tradicionales para la Medición de Resistividad de Tierra

La resistividad del terreno se mide fundamentalmente para encontrar la profundidad de la roca, así como para encontrar los puntos óptimos para localizar el conjunto de electrodos que conformaran el SPAT.

(1) Método de los cuatro electrodos o método de Wenner

Este método fue desarrollado por Frank Wenner del U.S. Bureau Of Standards en 1915, F. Wenner, *A Method of Measuring Earth Resistivity*; Bull, National Bureau of Standards, Bull.

Este método consiste en introducir cuatro electrodos de prueba en línea recta y separados a distancias iguales (a), enterrados a una profundidad (b) que es igual a la vigésima parte de la separación de los electrodos de prueba (b= a/20) y van conectados al equipo de medición, el cual introduce una intensidad de corriente entre los electrodos C1 y C2, generando una diferencia de potencial entre los electrodos P1 y P2 (VP1 ,P2), que será medida por el equipo, a su vez en la pantalla tendremos el resultado de la relación (V/I) que por ley de Ohm es R.

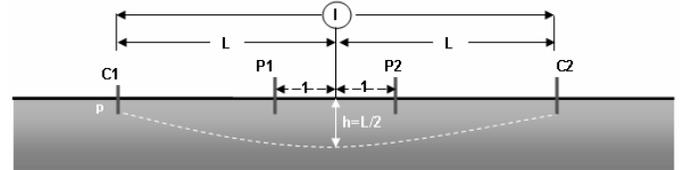


La separación entre los electrodos dará la medida de resistencia a un estrato de espesor de terreno que es igual a: h = a, con este valor de resistencia se calculará la resistividad aparente del terreno mediante la ecuación:

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \tag{1}$$

(2) Sistema Simétrico

Es una variante del método de Wenner que se utiliza cuando los electrodos de prueba no pueden introducirse a intervalos regulares. Para aplicar este método se utilizan dos electrodos de corriente y dos de potencial que se conectan al equipo de medición.



Los cuatro electrodos de prueba se colocan simétricos con respecto a un punto O que se sitúa en el centro de la medición. El valor de la resistividad será la del estrato de terreno que esta debajo del punto O. La relación entre la distancia de los electrodos de corriente y la profundidad o estrato de terreno a la cual se esta midiendo la resistividad aparente es:

$$h = \frac{L}{2} \tag{2}$$

Al igual que en el método de los cuatro electrodos, se irán separando los electrodos de corriente, y por lo tanto aumentando la distancia L y así se conocerá el valor de la resistividad a una profundidad h mayor

El valor de la resistividad aparente se obtiene por medio de la siguiente ecuación:

$$\rho_a = \frac{\pi(L^2 - l^2)}{2l^2} R \tag{3}$$

El valor de R se obtiene igual que en el método de los cuatro electrodos.

b) Métodos de Cálculo de Resistividad en Terrenos Bi-Estratificados.

Uno de los usos más importantes de las medidas de resistividad en suelos bi-estratificados, es que mediante ellas se pueden determinar la profundidad de la superficie de la primera capa, su densidad real, y su factor de reflexión, así como también características de la capa siguiente, de esta forma es posible modelar los suelos de acuerdo a sus características eléctricas. Como resultado, se ha prestado una atención considerable a la interpretación de lo que es conocido como las curvas de profundidad.

Si es usada la configuración de Wenner, cuatro electrodos igualmente espaciados, y mediante estas se realizan diferentes medidas variando la separación de los electrodos para cada caso, es posible graficar las resistividades resultantes vs la separación de los electrodos, teniendo como consecuencia una curva de profundidad.

Desde la primera aparición de la inspección de la resistividad la interpretación de tales curvas ha sido una cuestión de gran preocupación y controversia para algunos investigadores, lo que hace este estudio un problema de gran envergadura.

Los métodos de interpretación que han sido desarrollados pueden ser aproximadamente divididos en dos clases. El primero de estos es *netamente empírico* y basado en la experiencia. El segundo consiste en un número de *métodos que son basados en las teorías y cálculos de varios autores*.

(1) Método Empírico

Debido a que el estudio de los suelos puede tornarse bastante complejo, representando una meta de gran envergadura para los profesionales del campo, muchos expertos prefieren *basarse en la experiencia*; por tanto han desarrollado técnicas no muy precisas, con la salvedad de que en muchos casos sobredimensionan dichos SPAT y por ende llegan a resultados favorables, que se ven contrarrestados por la inversión económica que se debe realizar. La experiencia de campo tiene muchos métodos, que se basan en las medidas de resistividad del terreno donde se va a ubicar el sistema.

El primero de los métodos a mencionar consiste en tomar las medidas de campo del terreno en estudio, y llevarlas a una grafica, la cual se denomina curva de resistividad aparente o curva de profundidad. Dado a que el método de medida de resistividad comúnmente usado es el método de Wenner, se requiere graficar las medidas de resistividad obtenidas vs la separación de los electrodos a la cual corresponde cada una ver figura N° 7.

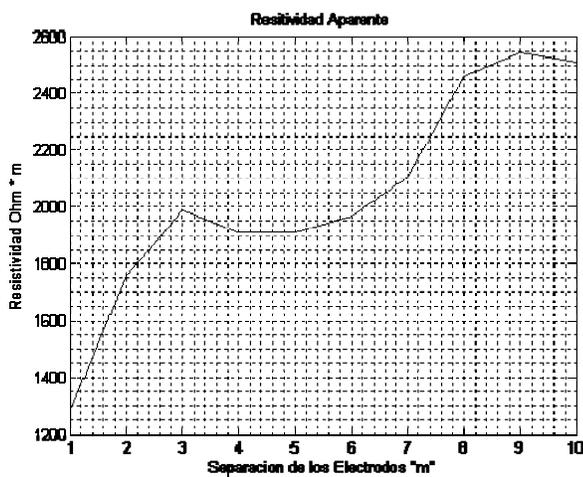


Fig 1. Curva Ejemplo de Resistividad Aparente

El primer criterio que se tiene es evaluar la variación entre las medidas adyacentes. Si se cumple que la variación entre medidas es mayor o igual al 10%, se tiene asume que el suelo es heterogéneo, y que puede estar compuesto por varios estratos, en donde el valor de resistividad al primer estrato

corresponde a la medida patrón, es decir la medida con la cual se esta comparando.

Asimismo se menciona otro método de cálculo un poco más radical, el método aplicado consiste en observar la curva punto a punto de manera que se pueda leer el primer punto de inflexión presentado, en este caso casualmente corresponde al mismo valor arrojado por el primer método.

El método que mayormente se usa en la práctica, es el de realizar un promedio de las medidas tomadas en el terreno, y asumir que el suelo es homogéneo, aunque los resultados generalmente sean favorables, no conllevan a la mejor solución económica ya que cuando se aplica este método, el diseñador se ve obligado a sobredimensionar el sistema de manera tal de que se cumpla con los objetivos propuestos.

Cuando los estudios del suelo, arrojan valores altamente críticos, es decir valores de resistividad mayores a 3000 Ω-m la práctica conlleva a introducir barras a libre albedrío hasta que se tenga una resistencia de puesta a tierra favorable para el cliente.

(2) Métodos Directos basados en teorías y cálculos

Son más confiables con respecto a los métodos anteriormente presentados. La mayor dificultad que presentan es que la teoría supone condiciones ideales, tales como, suelos con capas isotrópicas uniformes con interfaces paralelas a la superficie. Sin embargo tales condiciones ideales son raramente encontradas en la práctica y pueda que algunos errores e inconsistencias pueden aparecer en las deducciones, no obstante es posible obtener resultados útiles para las diferentes aplicaciones.

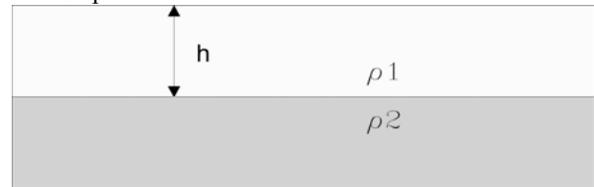


Fig. 2. Problema de las dos Capas.

Si los resultados obtenidos con la aplicación de los siguientes métodos, no dan una respuesta sensata, entonces esto puede ser tomado como una indicación de que las condiciones difieren ampliamente de las asumidas en la teoría suelos anisotrópicos, estratificación inclinada.

TAGG, aplica un estudio vigoroso de los suelos bi-estratificados y llega a la siguiente ecuación:

$$V = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[ \frac{1}{r} + 2 \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{k^n}{(r^2 + (2nh)^2)^2} \right] \tag{4}$$

La cual considera las capas homogéneas y representa el potencial de cualquier punto de la superficie a una distancia  $r$  de un punto donde se inyecta una corriente  $I$ :

A partir de (5) realiza un estudio para la aplicación de la misma, utilizando el método de Wenner.

La Figura 3 muestra la configuración de Wenner, la corriente  $I$  entra por el punto A y sale por el punto B, produciendo un potencial en B y C. La fuente de corriente A esta a una distancia  $a$  de B.

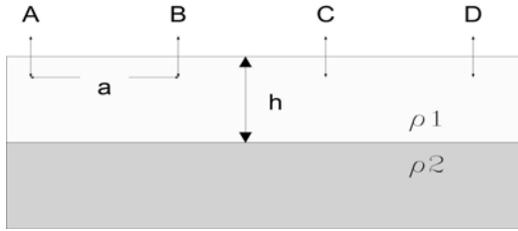


Fig. 3. Configuración de Wenner y el Problema de las dos Capas.

Si se sustituye en (4), ( $r = a$ ) el resultado es el siguiente:

$$\frac{I\rho_1}{2\pi} \left[ \frac{1}{a} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n}{(a^2 + (2nh)^2)^2} \right] \quad (4.1)$$

Asimismo, la corriente que sale en D a una distancia  $2a$  de B, refleja un potencial en B como se muestra a continuación.

$$\frac{I\rho_1}{2\pi} \left[ \frac{1}{2a} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n}{(4a^2 + (2nh)^2)^2} \right] \quad (4.2)$$

Consecuentemente el potencial en B es el siguiente:

$$V_B = V_{AB} - V_{BD}$$

$$V_B = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[ \frac{1}{2a} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{k^n}{(a^2 + (2nh)^2)^{1/2}} - \frac{k^n}{(4a^2 + (2nh)^2)^{1/2}} \right) \right] \quad (4.3)$$

Por simetría el  $V_C = -V_B$ , entonces se puede deducir que:

$$V_{BC} = V_B - V_C$$

$$V_{BC} = 2V_B$$

$$V_{BC} = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[ \frac{1}{a} + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{k^n}{(a^2 + (2nh)^2)^{1/2}} - \frac{k^n}{(4a^2 + (2nh)^2)^{1/2}} \right) \right] \quad (4.4)$$

Dicha expresión se puede escribir de la siguiente manera:

$$\frac{2\pi V_{BC}}{I} = \rho_1 \left[ \frac{1}{a} + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{k^n}{(a^2 + (2nh)^2)^{1/2}} - \frac{k^n}{(4a^2 + (2nh)^2)^{1/2}} \right) \right] \quad (4.5)$$

Si se verifica que la separación entre los electrodos mediante el método de Wenner es mucho mayor que la profundidad de los mismos, se cumple la (2) y la expresión anterior se puede representar de la siguiente manera

$$\rho_a = \rho_1 \left[ \frac{1}{a} + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{k^n}{\left(1 + \left(\frac{2nh}{a}\right)^2\right)^{1/2}} - \frac{k^n}{\left(4 + \left(\frac{2nh}{a}\right)^2\right)^{1/2}} \right) \right] \quad (5.6)$$

La cual puede ser rescrita como:

$$\frac{\rho_a}{\rho_1} = 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{k^n}{\left(1 + \left(\frac{2nh}{a}\right)^2\right)^{1/2}} - \frac{k^n}{\left(4 + \left(\frac{2nh}{a}\right)^2\right)^{1/2}} \right) \quad (5)$$

(5) es conocida como *la ecuación de TAGG*, mediante ésta, TAGG determinó unas curvas maestras que consisten simplemente en darle valores a las variables  $k$ ,  $h$ , y  $a$ , obteniendo unos valores de  $\rho_a/\rho_1$  para cada caso.

La variable  $K$  representa el *coeficiente de reflexión* de la primera capa, es preciso recordar que  $K$ , varía entre  $-1$  y  $1$ , es decir que para valores de  $K$  entre  $-1$  y  $0$  se obtienen resultados de  $\rho_a/\rho_1$  mayores que  $0$  y menores que  $1$ , analíticamente el caso corresponde a que la primera capa posee una resistividad mayor que la segunda. Asimismo para valores de  $K$  entre  $0$  y  $1$ , los valores de  $\rho_a/\rho_1$  serán mayores a  $1$ , ya que la resistividad de la segunda capa es mayor que la de la primera, en este caso es viable trabajar con la relación de conductividad, obligando a la relación  $\sigma_1/\sigma_2$ , a variar entre  $0$  y  $1$ .

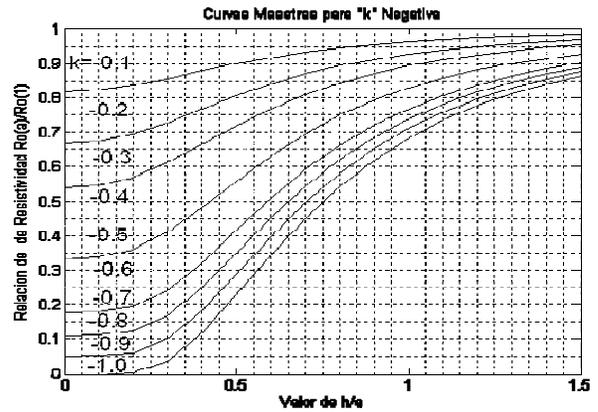


Fig. 4. Curvas Maestras para  $k$  Negativa. Suelo Biestratificado

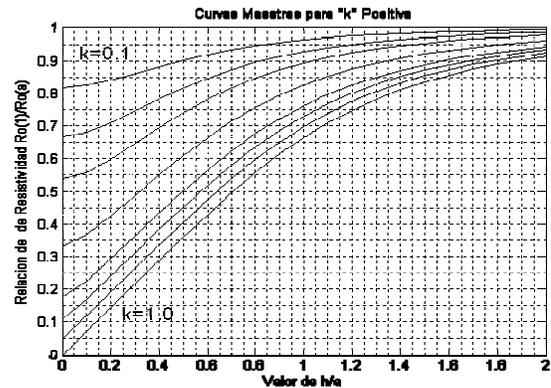


Fig. 5 Curvas Maestras para  $k$  Positiva. Suelo Biestratificado

### (3) Método Gráfico de Sunde's

El Método de Sunde's utiliza la Figura 6 para modelar el suelo en dos estratos, el cual se basa en las medidas obtenidas por el método de Wenner. Los parámetros  $\rho_1$  y  $\rho_2$  son tomados de la figura de resistividad obtenida por el método Wenner;  $\rho_1$  corresponde al primer valor medido, asimismo  $\rho_2$  representa el último de la figura. Es preciso decir que, aplicando el método de Sunde's solo se puede obtener el valor de la profundidad del primer estrato, ya que los valores  $\rho_1$ , y  $\rho_2$  son escogidos a simple vista de la figura de resistividad aparente, lo que hace que este método sea impreciso y arroje resultados desfavorables con respecto a otros. A continuación se explica el esquema de cálculo.

1. Graficar la curva obtenida de resistividad aparente vs la separación de los electrodos.
2. Estimar los valores de  $\rho_1$  y  $\rho_2$ ,  $\rho_1$  corresponde a valores pequeños de separación de los electrodos para los cuales fue medido, asimismo  $\rho_2$  corresponde a valores de separación grande para los cuales fue medido.
3. Determinar  $\rho_2/\rho_1$ , y seleccione una curva de Sunde's (Figura N6) que se aproxime al valor calculado.
4. Sobre la Figura 6, Seleccione el valor de  $\rho_d/\rho_1$  que se aproxime a la curva obtenida por  $\rho_2/\rho_1$
5. Leer el valor de  $a/h$  sobre el eje de las abscisas.
6. Multiplicar el valor obtenido  $\rho_d/\rho_1$  por el valor de  $\rho_1$  escogido al principio.
7. Leer  $a$  sobre la figura de resistividad aparente, el valor de  $a$  obtenido.
8. Mediante la relación  $a/h$ , calcular  $h$  con el valor de  $a$  conocido.

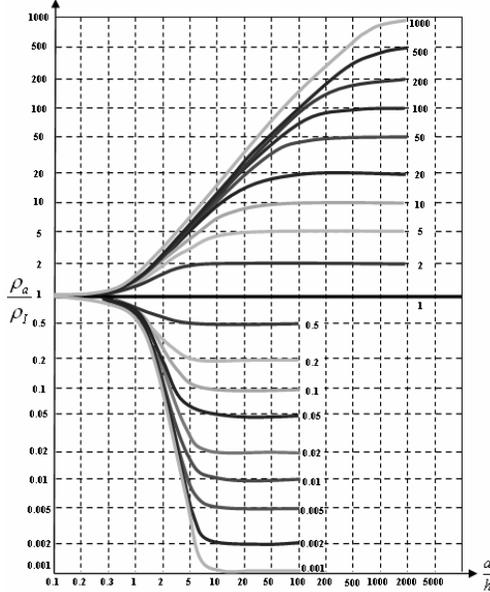


Fig. 6. Curvas de Sunde's

### 2) Resistencia de Puesta a Tierra de una Malla

Para el calculo de la resistencia de la malla a tierra existen diversos métodos que dependiendo de ciertas condiciones pueden dar de una manera aproximada un valor cercano al real de la malla de tierra de una subestación eléctrica.

Un método simple empleado por Laurent y Nieman, el cual es recomendado por el estándar 80 de la IEEE, utiliza para este calculo una modificación de la ecuación del electrodo en forma de plato circular, sumándole un segundo termino, quedando la expresión de la resistencia de la malla de la siguiente manera:

$$R = \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{L} \quad (6)$$

Donde:

$R$  = Resistencia de la malla, en  $\Omega$ .

$\rho$  = Resistividad promedio del suelo, en  $\Omega$ -m.

$L$  = Longitud total del conductor enterrado, en m.

$r$  = Radio de un circulo con igual área que es ocupada por la instalación de puesta a tierra

El segundo término de la expresión indica que la resistencia de una malla es mayor que la de un plato sólido, y que esta diferencia decrece cuando la longitud del conductor aumenta.

Sin embargo, la resistencia de la malla de tierra determinada mediante (6) es una aproximación bastante general puesto que no toma en cuenta factores como por ejemplo la longitud efectiva del conductor de la malla de tierra que esta en existencia actualmente, por tanto para la determinación de la resistencia de la malla de tierra de una subestación cuando no se conoce de la existencia de electrodos o varillas de tierra y para mallas enterradas a una profundidad de entre 0,25 y 2,5 m; es necesario que se tome en cuenta un factor por la profundidad de enterramiento de la malla lo cual influirá directamente en su resistencia de tierra, la utilización de este factor y de otros parámetros que influyen directamente sobre la resistencia de la malla lleva a la utilización de la *aproximación de Sverak's* para la determinación de la resistencia de la malla de tierra de una subestación (recomendada por la IEEE) y la ecuación a utilizar es entonces la que sigue a continuación:

$$R_G = \rho \left[ \frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20} A} \left( 1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right] \quad (7)$$

Donde:

$R_G$  = Resistencia de la malla de tierra del área de la S/E, en  $\Omega$ .

$\rho$  = Resistencia aparente del terreno de la subestación, en  $\Omega$ .m.

$L$  = Longitud efectiva del conductor de la malla de la subestación (medido directamente en el plano de la malla de tierra existente actualmente que se desea medir, en m.).

$A$  = Área cubierta por la malla de tierra que se desea medir, en  $m^2$ .

$h$  = Profundidad de la malla de tierra, en m.

Otro método para determinar y evaluar el estado de una malla de tierra, cuando se conoce la presencia de electrodos o varillas de tierra es empleando el *método de Schwarz*, que se basa en la expresión siguiente:

$$R = \frac{R_{11} R_{22} - R_{12}^2}{R_{11} + R_{22} - 2 R_{12}} \quad (8)$$

Donde:

$R$  = Resistencia de la malla de tierra.

$R_{11}$  = Resistencia de los conductores de la malla de tierra.

$R_{22}$  = Resistencia de todas las barras enterradas.

$R_{12}$  = Resistencia mutua entre el grupo de electrodos y los conductores de la malla.

De la ecuación anterior se tiene que cada uno de los parámetros involucrados se calculan de la siguiente manera:

$$R_{11} = \frac{\rho}{\pi \times L_{cond.}} \left[ \text{Ln} \left( 2 \frac{L_{cond}}{\sqrt{d \times h}} \right) + \left( K_1 \frac{L_{cond}}{\sqrt{A}} \right) - (K_2) \right]$$

$$R_{22} = \frac{\rho}{2\pi b L b} \left[ \text{Ln} \left( 8 \frac{Lb}{db} \right) - 1 + \left( \frac{2K_1 Lb}{\sqrt{A}} \right) (\sqrt{nb} - 1)^2 \right]$$

$$R_{12} = \frac{\rho}{\pi L_{\text{cond}}} \left[ \text{Ln} \left( 2 \frac{L_{\text{cond}}}{Lb} \right) + \left( K_1 \frac{L_{\text{cond}}}{\sqrt{A}} \right) - (K_2) + 1 \right]$$

Donde:

Lb = Longitud de las barras

L<sub>cond</sub> = Longitud de los conductores de la malla.

d = Diámetro de los conductores.

db = Diámetro de las barras.

h = Profundidad de la malla

nb = Número de barras.

A = Área cubierta por la malla.

K<sub>1</sub> y K<sub>2</sub> = Son constantes que dependen de la relación largo y ancho de la malla, de la profundidad h, y en general puede asumirse que sus valores son aproximadamente K<sub>1</sub>= 1.4 y K<sub>2</sub> = 5.6.

### 3) Cálculo para la Sección del Conductor de la Malla de Tierra

Los conductores de la malla de tierra deben diseñarse de manera que:

- Resistan la fusión y el deterioro de las juntas eléctricas bajo las más adversas combinaciones de magnitud y duración de las corrientes de falla.
- Sean mecánicamente resistentes, especialmente en aquellos sitios expuestos a grandes esfuerzos físicos.
- Tengan suficiente conductividad, de manera que no contribuyan substancialmente a diferencias locales de potenciales peligrosos.

El conductor de cobre adecuado para la malla de tierra, puede ser obtenido de la siguiente ecuación desarrollada por Onderdonk y recomendada por la IEEE en su publicación Std. 80 de 1986:

$$A = \frac{I}{\sqrt{\left(\frac{1}{33S}\right) \log_{10} \left(1 + \frac{T_m - T_a}{234 + T_a}\right)}} \quad (9)$$

Donde:

A = Sección del conductor, en circular mil.

I = Corriente RMS de cortocircuito, en amperios.

S = Tiempo en segundos, durante el cual la corriente I es aplicada. Es el mismo tiempo de despeje de la falla.

T<sub>a</sub> = Temperatura ambiente en grados centígrados (usualmente se usa 40 °C).

T<sub>m</sub> = Temperatura máxima permisible, en grados centígrados (usualmente se usa 450 °C para uniones de fusión y 250 °C para uniones apernadas)

En donde:

$$S = T_{\text{or}} + T_{\text{oi}} \quad (10)$$

Donde:

T<sub>or</sub> = Tiempo de operación del relé de tierra, en seg.

T<sub>oi</sub> = Tiempo de operación del interruptor en seg.

Generalmente, la resistencia mecánica fija una sección mínima para los usos prácticos, utilizándose un conductor 4/0 de cobre como mínimo para la malla de tierra y un conductor 2/0 AWG de cobre como mínimo para la puesta a tierra de los equipos y estructuras a la malla a tierra.

### 4) Cálculo de las Tensiones de Toque y Paso Tolerables

En primer lugar se da las definiciones de tensión de toque tolerable y tensión de paso tolerable:

#### a) Voltaje de Toque Tolerable:

Es la máxima diferencia de potencial que puede experimentar una persona en contacto con un equipo aterrado, en el momento de ocurrir una falla. La distancia máxima para tocar un equipo supone que es máximo alcance horizontal, la cual se asume a un (1) metro

#### b) Voltaje de Paso Tolerable:

Es la máxima diferencia de potencial que puede experimentar una persona caminando en la superficie de la subestación en sus alrededores al momento de ocurrir una falla, esta diferencia de potencial se toma entre dos puntos separados a una distancia de un (1) metro.

Los estudios referidos en la IEEE-80 Capítulo 4, realizados en animales cuyo tamaño del cuerpo y peso del corazón son comparables a los del cuerpo de una persona normal, revelan que el 99,5 % de las personas saludables pueden tolerar una corriente a través de la zona del corazón definida por Dalziel como:

$$I_C = K/\sqrt{t} \quad (11)$$

donde:

I<sub>C</sub> = Corriente Máxima RMS (A).

K = Constante (0,116 ó 0,157 para una persona de 50 ó Kg. respectivamente).

t = Duración de la Corriente (seg.).

La norma recomienda el uso de K = 0.157, asumiendo un peso promedio de 70 kilogramos y un tiempo máximo de eliminación de fallas de 3 segundos. En todo caso, prevalece el juicio del evaluador para determinar el valor correcto a utilizar dependiendo de las características del sitio de ubicación de la subestación o el uso de dispositivos de protección de alta velocidad. Adicionalmente, las pruebas indican que el corazón requiere unos 5 minutos para retornar a su condición normal después de experimentar un choque severo. Esto indica que aquellos sistemas de potencia con mecanismos de cierre automático tendrán un efecto acumulativo sobre la operación inadecuada del corazón. Se considera usualmente que para dos cierres consecutivos, el tiempo a considerar será el equivalente al de un choque eléctrico cuya duración sea la suma de los intervalos de choque individuales.

Considerando los valores definidos por la ecuación 52 los valores de voltaje V<sub>TT</sub> y V<sub>PT</sub> son:

$$V_{TT} = \left( R_C + \frac{R_T}{2} \right) I_C \quad (12)$$

$$V_{TT} = [1000 + (1.5 C_S \rho_S)] \frac{K}{\sqrt{t}} \quad (13)$$

$$V_{PT} = (R_C + 2R_T) I_C \quad (14)$$

$$V_{PT} = [1000 + (6 C_S \rho_S)] \frac{K}{\sqrt{t}} \quad (15)$$

Donde:

t = Tiempo total de ocurrencia de falla, incluyendo efectos

acumulativos por recierres. Este tiempo debe ser menor a 0,5 segundo, según la Norma de C.A.D.A.F.E, NS-P-360 "Especificaciones Técnicas para el Sistema de Puesta a Tierra".

$K$  = Constante basada en el peso del cuerpo (0,116 ó 0,157).

$R_C$  = Resistencia típica del cuerpo en ohms (1000).

$R_T/2 = 1.5 C_S \rho_S$  = Resistencia de contacto de dos pies en paralelo.

$2R_T = 6 C_S \rho_S$  = Resistencia de contacto de dos pies en serie.

En los valores de resistencia de contacto definidos arriba  $\rho_S$  es el valor de resistividad del material superficial en la subestación. Según la Norma de C.A.D.A.F.E, NS-P-360 define  $\rho_S$  como el valor de la piedra picada que se encuentra en la superficie de la subestación el cual es de 3000  $\Omega$ -m. Y  $C_S$  es el factor de reducción que variara según el tipo de material de la superficie referida. En el estándar IEEE-80, se presenta la ecuación detallada para definir los valores de  $C_S$ , la cual es:

$$C_S = \frac{1}{0,96} \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(\frac{2nh}{0.08}\right)^2}} \right] \quad (15)$$

Donde:

$h$  = Profundidad de la capa superficial de la piedra picada.

$K$  = Factor de reflexión.

$$K = \frac{\rho - \rho_S}{\rho + \rho_S} \quad (16)$$

Donde  $\rho$  = Resistividad del suelo, en  $\Omega$ .m.

(13) y (14) permiten el cálculo de los voltajes  $V_{TT}$  y  $V_{PT}$  los cuales deben ser realizados dentro de la subestación y fuera de la misma.

#### IV. PROTECCIÓN CONTRA LAS SOBRETENSIONES DE ORIGEN ATMOSFÉRICO.

Para determinar la protección más adecuada contra este tipo de sobretensiones es necesario tener un conocimiento de la severidad o de la frecuencia de los rayos y la información de la que normalmente se dispone es el correspondiente al nivel isocerámico, que da el número de días en el año en que se escuchan tormentas, aunque no indica el número de descargas ni la intensidad de la descarga para cada día tormentoso.

El nivel isocerámico es en general mas bajo a medida que se acerca al polo y más alto en los trópicos; así por ejemplo, en Suecia es de alrededor de 10, en Inglaterra es del orden de 15, en Canadá es inferior a 30, En EE.UU. varia entre 10 y 90 y en Venezuela es de aproximadamente 60.

En este artículo solo se considerara la protección contra descargas atmosféricas en instalación de subestaciones.

##### 1) Cables de Guardia

Para proteger la subestación contra las descargas directas de los rayos se utilizan hilos de guardia de la misma sección de los que se usan en las líneas de transmisión cuando el nivel

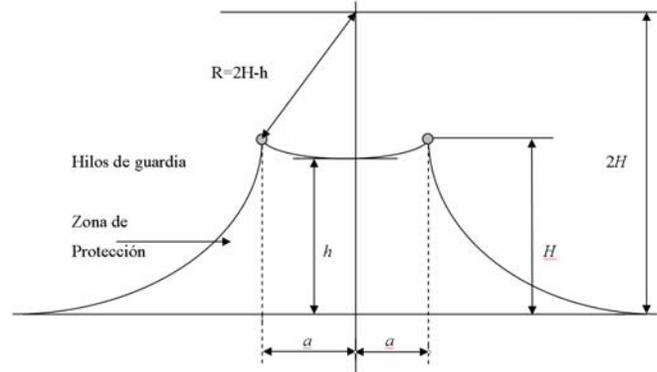
isocerámico es medianamente alto, o simples astas sobre los soportes cuando la probabilidad de rayos es muy reducida, aspecto este que puede bien ser tomado como norma en las subestaciones a muy altas tensiones con el objeto de reducir la altura de los soportes en zonas poco tormentosas.

Los hilos de guardia en las subestaciones deben instalarse a una altura adecuada para proteger eficazmente los conductores y equipos bajo tensión. El ángulo efectivo de protección es de 45° para un hilo de guardia y de 60° cuando se utiliza más de un cable de tierra.

Para determinar la altura mínima de los hilos de tierra, a fin de asegurar una protección eficaz de los equipos, se utiliza el método ideado por Langrehr que supone que cuando el rayo se descarga hacia tierra y se encuentra a una altura igual al doble de la del hilo de guardia, la descarga se efectuara sobre estos o el suelo, por ser estos los puntos mas cercanos al rayo.

La zona de protección queda entonces determinada de la siguiente manera:

Sea  $h$  la altura de los conductores o del equipo a protegerse.  $2a$  el ancho de la celda y  $H$  la altura mínima de los hilos de guardia o de los mástiles o astas de protección.



Se tiene que:

$$H = \frac{4h \pm \sqrt{16h^2 - 12(h^2 - a^2)}}{6} \quad (16)$$

El valor  $H$  representa la altura mínima de los hilos de guardia para obtener una zona de protección adecuada.

Cuando no se instalan en la subestación pararrayos ni cuernos de arqueo, debe adoptarse para el equipo un nivel de aislamiento superior al correspondiente a plena aislación, para que este pueda resistir las ondas de impulso sin que sufra ningún daño o deterioro. Esta práctica muy poco usual se justifica en lugares de muy bajo nivel isocerámico, menor de 10, siempre y cuando las líneas de transmisión presenten baja resistencia de toma de tierra. Por otra parte, en subestaciones que tienen permanentemente conectadas a las barras colectoras un numero elevado de líneas de transmisión el efecto de la sobretensión disminuye apreciablemente debido a que encuentra varios caminos para distribuirse, y la atenuación de la sobretensión será mas importante cuanto mayor es el número de líneas conectadas a las barras. Aunque esta comprobado experimentalmente que las subestaciones a las cuales llegan 3 o 4 líneas quedan autoprotegidas contra las sobretensiones de origen atmosférico, no es recomendable utilizar este recurso como único medio de protección a

excepción de aquellas instalaciones de tensiones no muy elevadas, y en zonas donde las descargas eléctricas no son severas.

### 2) Explosores o cuernos de arco:

La segunda medida de defensa contra la incidencia de los rayos consiste en instalar explosores del tipo asta-asta o cuernos de arco. Estos dispositivos tienen bastante aceptación y campo de aplicación en regiones con moderados niveles isocerámicos o en instalaciones en las que no se justifica económicamente adoptar otros medios de protección más completos y costosos.

El explosor o estallador de arco está constituido por dos varillas o electrodos metálicos, uno de ellos bajo tensión y el otro conectado a tierra, manteniendo en el aire una distancia de separación adecuada para evitar los reencendidos o cebados demasiado frecuentes por sobretensiones internas. Los explosores o cuernos de arco como dispositivos de seguridad de las subestaciones presentan algunas desventajas entre las que se destacan las siguientes:

La tensión de descarga no es definida sino errática o dispersa debido a que depende de la configuración de los electrodos (asta-asta, esfera-esfera, etc.), de las condiciones climáticas (variaciones de la temperatura, de la presión atmosférica y humedad del ambiente), grado de polución, etc.

Cuando el explosor entra en arco, la corriente de fuga no se extingue naturalmente desarrollándose un cortocircuito franco de fases a tierra, debiendo operar los interruptores para despejar la falla, y sometiendo a estos, cuando son del tipo de pequeño volumen de aceite de cámara única de extinción, a elevados efectos por la aparición del defecto evolutivo.

Una disminución de la distancia de separación entre las varillas del explosor puede dar lugar a frecuentes interrupciones del servicio por causa de Sobretensiones atmosféricas de larga duración, o por Sobretensiones de origen interno suficientemente altas.

Cuando el arco se desarrolla entre los electrodos, la tensión de impulso decae bruscamente y somete a las espiras y bobinas de los transformadores de potencia a solicitaciones muy severas.

Cuando se utilizan explosores para la protección de los transformadores de potencia, la práctica más corriente consiste en instalarlos sobre o cerca de ellos o entre los aisladores pasatapas. La distancia disruptiva de esta clase de equipos se calibra para una tensión de descarga variable de entre el 70 y el 80% del nivel de aislamiento del aparato a proteger. Por otra parte, si los transformadores se protegen con pararrayos y se utilizan además explosores como defensa secundaria o de reserva, las distancias de ajuste deberán ser superiores para evitar que los electrodos se ceben por sobretensiones de origen interno.

Aunque los valores de ajuste de las distancias de separación de los explosores varían de acuerdo a las estipulaciones en los diferentes países y a las condiciones particulares de la instalación, las distancias comúnmente utilizadas para la protección de los transformadores de potencia y demás aparatos, en función de la tensión de

servicio y del nivel de aislamiento se indican en la siguiente tabla.

TABLA 1. DISTANCIAS DE SEPARACIÓN DE LOS EXPLOSORES, EN CMS.

$U_m$ [kV eficaz]	Nivel de Aislamiento [kV cresta]	Transformadores		Otros equipos [cm]
		$d$ [cm] F	$d$ [cm] I	
36	170	12	18	15
	200			20
52	250	15 a 18	20	22
72,5	325	28 a 24	30	34
100	450	35 a 40	43	48
	450		43	48
123	550		56	68
145	550		56	68
	650			86
170	750	55 a 66	66	108
	900			120
245	1050	75 a 90		130
275 / 300	1050		114	130
	1300			167
420	1425			180

F: Práctica Francesa

I: Práctica Inglesa

### 3) Protección mediante Descargadores de Sobretensión

La protección más completa y segura para limitar las Sobretensiones de origen atmosférico a valores no peligrosos para la aislación se obtiene con la instalación de pararrayos. Estos equipos son de una utilidad casi universal en las instalaciones en altas y muy altas tensiones y ellos son especialmente empleados en:

- En subestaciones donde los explosores entran en funcionamiento con demasiada frecuencia por ser instalaciones muy expuestas a las Sobretensiones
- Para la protección de los transformadores de potencia y bobinas de inductancia, especialmente cuando tienen un aislamiento reducido.
- Para la protección del neutro de los transformadores de potencia cuando operan con el punto neutro aislado y los arrollamientos tienen un aislamiento gradual.
- En instalaciones en extra altas tensiones para reducir el nivel de aislamiento de los interruptores.

El pararrayo fija el nivel de protección de la instalación que se define como la tensión máxima que aparece entre sus bornes de línea a tierra en las condiciones de ensayos con ondas de impulso especificadas y representativas de las condiciones reales de servicio. El nivel de protección a la onda de impulso determinado por el pararrayo queda caracterizado por el valor más elevado de las siguientes tensiones:

- Tensión de cebado para la onda plena de impulso normalizada
- Tensión residual al poder de descarga nominal
- Tensión de cebado para el frente de la onda de impulso dividido por 1.2.

El cociente entre el nivel resistente del aislamiento del material y el nivel de protección define la relación de protección, cuyo valor mínimo es de 1.20

$$C_i = \frac{N_a}{N_p} \geq 1,20$$

Para realizar una instalación efectiva de los equipos de los cuales se trata debe tenerse especial cuidado en dos aspectos que son esenciales para que los pararrayos funcionen de una manera efectiva como lo son el hecho de que las conexiones entre el punto de unión del pararrayos y tierra sean suficientemente cortas y se disponga de una baja resistencia de tierra, lo cual es fundamental en instalaciones de media tensión debido a que las caídas de tensión originadas por efecto ohmico e inductivo en las conexiones pueden alcanzar valores importantes en relación a la tensión residual del pararrayos, y otro aspecto a tomar en cuenta es el hecho de que la distancia entre el pararrayos y el equipo a proteger se mantenga dentro de un valor adecuado debido a que cuando la onda de tensión penetra en la estación, su amplitud se reduce al descargarse a tierra a través del pararrayos. En ese punto de discontinuidad se originan un par de ondas, una de las cuales se refleja y la otra que se transmite al aparato también se refleja al llegar a ese (al transformador de potencia por ejemplo) produciéndose una oscilación estacionaria de alta frecuencia entre el pararrayos y el transformador.

Esta oscilación se amortigua muy rápidamente de manera que la solicitación de la tensión sobre la instalación tienen influencia solamente en los primeros periodos y es muy breve debido a que la frecuencia de la oscilación es directamente proporcional a la velocidad de propagación de la onda e inversamente proporcional a la distancia de separación entre el pararrayos y el equipo a proteger, siendo  $f = v / 4l$ , donde:

$v$  = Velocidad de propagación

$l$  = distancia del objeto a proteger.

$f$  = Frecuencia de oscilación de la onda de tensión.

La amplitud de la oscilación propia queda determinada por la ecuación que sigue a continuación:

$$u = \frac{2sl}{v} \quad (17)$$

donde:

$s$  = gradiente de la onda de tensión en kV/ $\mu$ s

$l$  = distancia protectora en mts.

$v$  = velocidad de propagación de la onda en mts /  $\mu$ s.

La tensión máxima que pueda aparecer entre el pararrayos y el equipo a proteger no deberá ser superior al nivel de la onda cortada de impulso del material, dado que, en caso contrario, se podría producir algún arco en la instalación antes de que la onda de tensión alcance nuevamente el valor de la tensión residual.

La zona protectora o alcance de protección del pararrayos queda entonces limitada a una distancia de separación relativamente corta, de acuerdo a lo que se deduce de la ecuación correspondiente.

$$U_a = U_{res} + \frac{2sl}{v} \quad (18)$$

de donde:

$$1 = \frac{(U_a - U_{res})v}{2s} \quad (19)$$

donde:

$U_a$  = Tensión resistente de la aislación en kV max.

$U_{res}$  = Tensión residual del pararrayos en kV max.

$v$  = velocidad de propagación de la onda en mts /  $\mu$ s.

$s$  = gradiente de la onda de tensión incidente en kV/ $\mu$ s.

$l$  = distancia máxima de protección del pararrayos.

Los valores normalmente adoptados para el gradiente de la onda de tensión son:

Instalaciones con hilo de guardia 500 kV/ $\mu$ s.

Instalaciones sin hilo de guardia 1000 a 1200 kV/ $\mu$ s.

## V. CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado un compendio elemental de sistemas de puesta a tierra y protección contra sobre tensiones de origen atmosférico en instalaciones de subestaciones eléctricas. Este documento solo corresponde a un resumen de aspectos tratados en mayor profundidad a lo largo del tutorial.

## VI. REFERENCIAS

- [1] DAWALIBI, Mukhedkar. Earth Resistivity Measurements in a Two Layer Earth Structure. IEEE Paper C 74 1996.
- [2] Comisión Permanente del Código Eléctrico Nacional, (1991). Código Eléctrico Nacional. Venezuela. Comité de Electricidad (CODELECTRA)
- [3] IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding , ANSI/IEEE Standard 80, 1983
- [4] IEEE Std 81 1993 Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System.
- [5] IEEE Std 142-1991. Grounding of Industrial and Commercial Power Systems. Green Book
- [6] IEEE Std. 1100 - IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Sensitive Electronic Equipment, IEEE Emerald Book.
- [7] MANRIQUE O. (2004). Modelo de mantenimiento Centrado en Confiabilidad en los SPAT de las Estaciones de Digitel C.A. Tesis de Post-Grado no publicada, Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada Nacional. Maracay
- [8] MARTÍNEZ M. (2001). Diseño de Sistemas de Puesta a Tierra. [Documento en línea]. Disponible: <http://prof.usb.ve/mmlozano> (Consulta: 2005, febrero 4)
- [9] PORTA J. (1999). Electrodo de Puesta a Tierra. Valencia – Venezuela: Lightning Eliminators & Consultants de Venezuela, C.A
- [10] PORTA J. (2001). Protección Contra Descargas Atmosféricas. Valencia –
- [11] Venezuela: Lightning Eliminators & Consultants de Venezuela, C.A.
- [12] RE, V. (1979). Instalaciones de Puesta a Tierra. Barcelona, España: Ediciones Marcombo S.A.
- [13] TAGG G. (1964). Earth Resistance. New York – U.S.A.: Pitman Publishing Corporation.

## VII. BIOGRAFIA

**Francisco Gonzalez-Longatt.** Obtuvo el título de ingeniero electricista del Instituto Universitario Politécnico de la Fuerza Armada, Venezuela (1994). Master en Administración de Empresas de Universidad Bicentenario de Aragua, Venezuela (1999). Es profesor a dedicación exclusiva, categoría asistente, en pre-grado y postgrado, fue Jefe del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Experimental Politécnica de la Fuerza Armada. Investigó durante un año, sobre la enseñanza de las ciencias técnicas en el Doctorado en Ciencias de la Educación, de la Universidad Pedagógica El Libertador. Actualmente es Candidato a Doctor en Ciencias de la Ingeniería en la Universidad Central de Venezuela, trabajando en el impacto de la generación distribuida en la estabilidad dinámica de sistemas de potencia. Autor de textos de ecuación superior, más de una decena de artículos en revistas y congresos a nivel internacional. Es miembro del Institute of Electrical Engineers (IEE), y miembro de varias sociedades entre ellas la Power Engineering Society del IEEE.