

ANALISIS DE SENSITIVIDAD DEL APANTALLAMIENTO CONTRA RAYOS EN SUBESTACIONES DE POTENCIA

Ing. Freud M. Paredes M.
Escuela Politécnica Nacional, 1998

Ing. Paúl Ayora González M. Sc.
Profesor Principal E.P.N.

ABSTRACT:

The subject of this paper is the implementation of a digital program for modeling a power station shielding (aerial), against atmospheric lightning. The purpose is to assess the performance of the shielding scheme. The program is a user-friendly tool which is complemented with a guide of parameters based on sensitivity analysis of all the relations and related factors in order to simulate the formation process of the discharge until it finishes its path at earth.

RESUMEN:

El objeto de este trabajo es implementar un programa digital que permita modelar el apantallamiento de una subestación de potencia (aérea), bajo la influencia de las descargas atmosféricas. El propósito es evaluar la efectividad que pueda tener un determinado esquema de apantallamiento. Por otro lado se ha tratado de desarrollar una herramienta de fácil manejo, complementada por una guía de parámetros basados en un análisis de sensibilidad sobre los factores y relaciones que se ven involucrados en el proceso de formación de una descarga hasta que ésta termina su trayectoria en tierra.

1. INTRODUCCION

El desarrollo del presente trabajo está fundamentado exclusivamente en la modelación de un sistema que permita diseñar un esquema de apantallamiento frente a las descargas atmosféricas que puedan terminar directamente sobre una subestación determinada, de tal manera que se pueda optimizar los requerimientos de confiabilidad y servicio de una manera económica y segura. La base fundamental que se debe seguir para el desarrollo de un sistema de apantallamiento, depende de la descripción objetiva que se pueda tener del comportamiento de las descargas atmosféricas, y se ha demostrado que el modelo electrogeométrico describe este fenómeno de una manera muy acertada. Por esto que se ha escogido esta técnica para los análisis subsiguientes del presente trabajo.

El modelo planteado para determinar la altura a la que se deben colocar los elementos de guardia, ha sido desarrollado sobre la base de los criterios de Linck [*1], sin embargo ha sido necesario realizar ciertas modificaciones, de tal manera, que el modelo final pueda acoplarse a las condiciones y requerimientos que las subestaciones, de hoy en día, así lo exigen.

Es necesario mencionar que el programa digital implementado permite la modelación de subestaciones cuya forma puede ser representada no necesariamente como

Correspondencia a: Freud M. Paredes M.

Oficina: Asea Brown Boveri S.A. teléf: 593 2 500645/6/7/8

Celular: 593 9 460191 / casa: telefax: 593 2 403074

Email: freud.paredes@ec.abb.com / freud@uio.satnet.net

Quito-Ecuador

un polígono regular de 4 lados, donde además es posible evaluar el efecto de la eventual presencia de diferentes patios dentro de la subestación los cuales pueden encontrarse a diferentes niveles de altura. Por otro lado será posible también considerar el efecto de la presencia de ciertos conductores horizontales y/o estructuras verticales que no formen parte de la instalación (y que se encuentren en las cercanías de la estación), cuya presencia puede incidir en los resultados de efectividad que arroje un determinado esquema de apantallamiento.

2. FORMULACION DEL MODELO:

El modelo planteado, está basado en los criterios que inicialmente fueron propuestos por Linck [*1], pero que, como ya se mencionó, han sido interpretados de tal manera que todos los parámetros involucrados estén sujetos a las últimas investigaciones realizadas en este campo.

2.1. Estadística de las descargas atmosféricas:

La intensidad de corriente de los rayos ha sido estimada de muchas maneras, sin embargo la distribución de corriente para las descargas atmosféricas se puede determinar empleando un modelo de propagación del campo magnético radiado entre las nubes y tierra, y un eficiente algoritmo de localización de las descargas [*10]. Varios modelos para la propagación de campos están siendo, y han sido investigados, pero los mejores resultados se han obtenido considerando una relación exponencialmente inversa con la distancia, lo cual ha permitido reducir la incertidumbre, en la estimación de la amplitud de corriente de una descarga, del 25% al 10% [*10].

A continuación se presentan 3 curvas, entre las cuales se encuentra aquella que fue el resultado de un estudio realizado por Herodotou (y otros), los cuales emplearon un sistema LLP (Lightning Location and Protection), instalado en Ontario-Canadá, y que emplea un modelo de propagación del campo magnético que varía en forma exponencialmente inversa con la distancia (de ahí el nombre que se le ha dado: curva exponencial) [*10]. Por otro lado se presenta la curva de Uman, cuyo modelo del campo varía en forma inversamente proporcional con la distancia, y finalmente se indica la curva de la CIGRÉ (Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques á haute tension). Como se puede notar el valor medio de probabilidad para cada una de estas curvas varía notablemente de una a otra, por esto se ha presentado la posibilidad (dentro del programa) de que sus usuarios puedan optar por realizar la simulación bajo el efecto de cualquiera de ellas. Además como parte del análisis de sensibilidad propuesto en este trabajo se ha realizado un análisis comparativo de los resultados que se presentan cuando se emplea cada una de las curvas mencionadas. Finalmente se ha dejado

abierta la posibilidad de que el usuario pueda editar una curva totalmente nueva, y por tanto diferente a las ya propuestas.

CURVAS DE DISTRIBUCION DE PROBABILIDAD ACUMULADA PARA LA CORRIENTE DE RAYOS ATIERRA

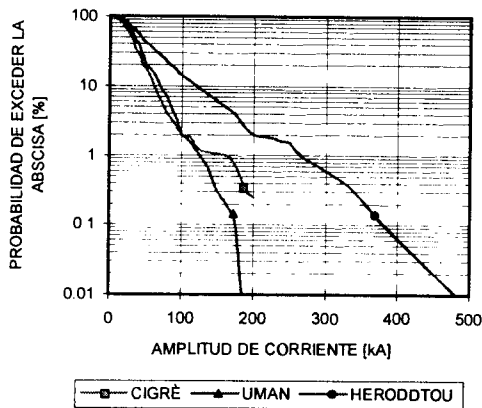


FIG. 1

2.2. Modelo Electrogeométrico:

Para efectos del presente trabajo, el modelo electrogeométrico planteado por Whitehead, y extendido a un análisis tridimensional [*2] es totalmente aplicable, ya que éste en su concepción básica no ha sido modificado, sin embargo se presenta las modificaciones debidamente fundamentadas sobre aquellos parámetros que necesariamente deben ser considerados en el desarrollo del modelo.

2.2.1. Sistema de coordenadas cartesianas para el análisis del modelo electrogeométrico.

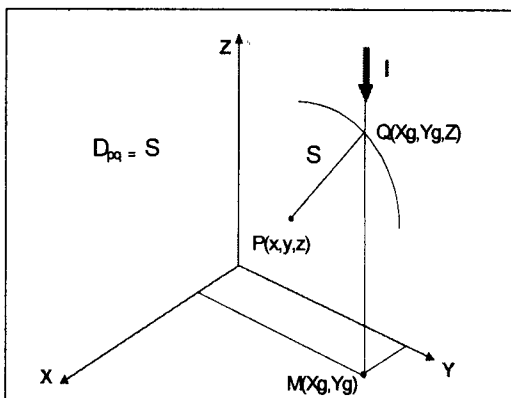


FIG. 2

De acuerdo a la fig. 2, donde $P(x,y,z)$ puede considerarse como un punto de cualquier componente del sistema en análisis, y $Q(Xg,Yg,Z)$ es un punto sobre la trayectoria de la descarga cuyas características: magnitud de corriente "I", y posible punto de impacto $M(Xg,Yg)$ son conocidas, es posible entonces determinar y calcular la distancia crítica de arco S , respecto del componente en referencia y que a su vez corresponde a la distancia de P a Q [*2].

La superficie interceptora(escudo), para el componente en análisis, se puede representar por el lugar geométrico de una semiesfera de centro P , y radio S , donde Q representa el punto de intersección con la trayectoria de la descarga, y cuya coordenada en Z , además define la altura sobre el plano $(X-Y)$ a la cual el líder será atraído por el canal ascendente de contacto hacia el mencionado punto P [*2].

2.3. Modelo analítico

Para complementar el modelo electrogeométrico, cuya técnica resulta por demás apropiada para evaluar el punto final de una descarga atmosférica, es necesario definir ciertos parámetros matemáticos obtenidos mediante observación y experiencias en laboratorios, que ayudarán notablemente a explicar la mecánica de una descarga atmosférica, cuantificando de alguna manera sus influencias y efectos [*3].

2.3.1. Distancia crítica de arco

Examinando los registros fotográficos obtenidos mediante cámaras rotativas especiales, se ha comprobado que la naturaleza de los canales descendentes se desarrolla en un zig zag aleatorio que no se ve afectado por la existencia de los objetos en tierra, hasta que la punta del líder está lo suficientemente cerca como para generar un canal ascendente desde cualquier objeto ubicado sobre la tierra. Cuando esto ocurre, la condición para el "salto final" ha sido alcanzada y la distancia a la que se produce es llamada "distancia crítica de arco o distancia de choque (S)". El campo eléctrico a lo largo de esta distancia se ve gobernado por la carga del líder (q) y por lo tanto, la distancia crítica de arco es también una función de dicha carga. Cuando toma lugar la primera descarga de retorno, su trabajo es neutralizar el campo eléctrico originado, por lo que su amplitud de corriente "I" será de igual forma una función de la carga del líder (q). De esto se puede concluir que la distancia de choque dependerá entonces de la magnitud de corriente "I" de la primera descarga de retorno. Como puede notarse, el lugar geométrico del apantallamiento es una "geometría de parámetros" los cuales son funciones de una cantidad eléctrica: la amplitud de la descarga. De ahí el nombre: "Modelo Electrogeométrico" [*7].

La relación que define a la distancia crítica de arco a sido objeto de muchos estudios y calibraciones, sin embargo muchos investigadores continúan buscando los mayores refinamientos para la ecuación que evalúe esta distancia. De acuerdo al análisis que se acaba de mencionar se puede definir en forma general la siguiente ecuación:

$$S = B * I^b \quad (1)$$

Donde B y b son constantes que dependen del objeto analizado, y que se determinan mediante calibraciones empíricas. "I" es la magnitud de la corriente de la descarga en [kA]. Para efectos del presente trabajo se utilizará cualquiera de las ecuaciones que permita cal-

cular el valor de "S". Como primera tentativa se tomará la versión aceptada por la IEEE en 1993 [*10]:

$$S = 10 * (1)^{0.65} \quad (2)$$

Usando (2), para una determinada descarga de magnitud de corriente "I", se puede calcular las distancias de arqueo a cualquier objeto (plano de tierra, cables, mástiles, torres, edificios, etc.). Lo importante en este modelo es poder diferenciar claramente entre la distancia crítica de arqueo a tierra, a conductores horizontales, y a estructuras verticales. Estas ecuaciones se pueden obtener fácilmente aplicando los siguientes coeficientes, que han sido obtenidos bajo calibraciones empíricas [*7]:

Distancia crítica de arqueo a tierra:
 $Se = Ke * S \quad (2.1)$
 $Ke = 1$

Distancia crítica de arqueo a conductores horizontales (cables de guardia, bordes y eventualmente los vértices del del plano expuesto, ver sección 2.3.5)
 $Ss = Ks * S \quad (2.2)$
 $Ks = Ke = 1$

Distancia crítica de arqueo a estructuras verticales:
 $St = Kt * S \quad (2.3)$
 Donde :
 $Kt = 1.2$ para el caso de mástiles
 $1 \leq Kt \leq 1.1$ para torres (extremos de los cables de guardia), y
 $Kt = 1$ para cualquier otra estructura vertical.

2.3.2. Magnitud de la corriente de las descargas

El análisis de la distancia crítica de arqueo planteado en la sección anterior, está basado en una supuesta descarga de magnitud de corriente "I", sin embargo, el diseño de un sistema de apantallamiento requiere que se cubra un amplio rango de estas posibles corrientes, ya que la posibilidad de falla del blindaje en gran parte dependerá de estos valores [*7].

La probabilidad de que una descarga con cierta magnitud de corriente "I", ocurra, puede ser expresada en forma de una distribución estadística. Para los propósitos del presente trabajo, se va a considerar la utilización de cualquiera de las curvas presentadas en la figura 1.

2.3.3. Angulo de aproximación de las descargas atmosféricas

Las observaciones muestran que muchos de los rayos que se acercan hacia tierra no siguen un camino estrictamente vertical. Esta característica se representó en el modelo electrogeométrico original presentado por Sargent en 1972, asumiendo un ángulo de distribución tridimensional para el líder. Estudios posteriores indicaron que para el diseño del apantallamiento de una subestación en términos generales, el efecto promedio, del ángulo de acercamiento es de naturaleza secundaria

[*1], por lo tanto en el presente modelo el acercamiento del líder se asume únicamente en forma vertical.

2.3.4. Densidad de descargas a tierra

El porcentaje de tormentas eléctricas generadas en una zona determinada, resulta ser un parámetro determinante en los diseños para sistemas de apantallamiento. La frecuencia con que ocurran las descargas atmosféricas sobre el área de una subestación, se asume que está gobernada por el número de descargas que se originen en aquellas nubes que estén directamente encima dicha área y que además descendan verticalmente sobre ésta. Es necesario aclarar que algunos de los rayos originados en zonas cercanas al área analizada pueden ser atraídos hacia la subestación una vez que estén lo suficientemente cerca, por esto, para el diseño del apantallamiento se considerará un factor adicional que lo llamaremos **radio de influencia sobre la subestación** [*1] y que estará definido como el perímetro en cuyo centro se va a ubicar a la subestación analizada. Además se debe considerar cierta área de menor proporción alrededor de la subestación sobre la cual todas aquellas descargas que terminen su trayectoria serán consideradas como salidas del sistema ya que éstas pueden provocar sobrevoltajes, respecto del potencial de la malla de tierra del sistema, los cuales no son deseables para el buen funcionamiento de los equipos que se encuentran dentro de la instalación; dicha área será definida como **área marginal de riesgo**.

El grado de actividad de las tormentas eléctricas sobre cierta área, está determinada por el NIVEL CERAUNICO, que se define como el número de días por año en los que por lo menos se escucha una descarga. El problema de esta medición es que no se puede distinguir entre las descargas generadas entre nubes y las que se producen entre nube y tierra [*3].

La densidad de descargas a tierra (No), está relacionada con el nivel ceraúnico (NC), a través de la siguiente expresión [*1]:

$$No = C * NC \quad (3)$$

Donde :

No : Densidad de descargas a tierra
 [descargas / Km²*año]

C : Constante calibrada de acuerdo a la región analizada, generalmente toma valores entre 0.1 y 0.2

NC : Nivel ceraúnico

Resulta importante aclarar que la densidad de descargas a tierra, o en su defecto el nivel ceraúnico, son parámetros definidos sobre áreas descubiertas, es decir, sin considerar las posibles influencias y cambios a presentarse cuando se evalúa el efecto de estructuras u objetos ubicados sobre una determinada área. En el caso específico de una subestación este valor sufrirá ciertos cambios debido a la presencia del equipo que forma parte de la instalación, y como es de esperarse la densidad de descargas a tierra sobre el área de dicha estación se verá

notablemente incrementada, por esta razón se hace necesario hablar de una “densidad de descargas a tierra relativa” que relacione la diferencia que se presenta entre estos dos valores, y la cual se podrá obtener cuando contemos con datos reales obtenidos en nuestro medio.

En nuestro medio puede resultar más conveniente realizar los cálculos a través de la densidad de descargas a tierra, en lugar del nivel cerámico, ya que éste puede tener variaciones altas en áreas consideradas relativamente pequeñas como puede ser el tamaño de nuestras ciudades [*4].

2.3.5. Intercepción del rayo, punto de incidencia de la descarga

Cuando una descarga se aproxima hacia una subestación apantallada, ya sea por conductores aéreos o por medio de mástiles, ésta terminará su trayectoria en aquel componente del sistema cuyo canal ascendente sea el primero en entrar a la zona de atracción generada por el líder. Este proceso se desarrolla de una manera aleatoria y la mayor probabilidad de unión se dará con aquel canal que parta de la estructura u objeto más elevado sobre tierra. Como se puede notar, la descarga será interceptada por los elementos de protección o proseguirá hacia el equipo de la subestación, dependiendo de la posición relativa que tengan los elementos de protección (cables de guardia y/o mástiles) respecto del equipo de la subestación [*1].

El riesgo de una posible falla del blindaje dependerá entonces de la diferencia, en altura, entre los elementos de protección y el equipo de la subestación, a este valor lo denominaremos “altura efectiva de los elementos de guardia: H”, y estará asociado, según el modelo electrogeométrico, a una distancia horizontal que se espera apantallar y que se definirá como “distancia protegida: XP” [*2] (ver fig. 5,6).

Será necesario entonces definir un plano imaginario según lo propuesto por Linck [*1] que represente al equipo de la subestación, y cuyo modelo será una aproximación (gruesa) de los elementos y equipo más altos de la subestación, que por lo general resultan ser cables desnudos en posición horizontal, y cuyo conjunto puede ser aproximado a un plano (conductor) expuesto, de ahí que en lo posterior se hará referencia simplemente como el “plano expuesto de la subestación”. A partir de este plano se colocarán los elementos protectores sean éstos cables de guardia y/o mástiles.

Las siguientes figuras (3,4) indican en forma general el posible esquema geométrico que se presentará al analizar el probable punto de intersección de una descarga, donde se puede apreciar claramente lo que se definirá como **superficies de exposición**. Las zonas definidas por la presencia de los elementos de protección se entenderán como **superficies interceptoras(escudos)**, mientras que el resto de superficies formarán parte de lo

que se ha llamado el plano expuesto de la subestación ubicado imaginariamente a una altura H_0 sobre el área que se desea proteger. Para el caso de cables de guardia, o bordes del plano expuesto(fig. 4) se ha considerado que el lugar geométrico de las superficies interceptoras o de exposición, respectivamente, representa un semicilindro de radio S_s , y para el caso de estructuras verticales(fig. 3): mástiles, vértices del plano y extremos de los cable de guardia es una semiesfera de radio S_t , cuyo valor se puede evaluar e acuerdo a las ecuaciones 2.1, 2.2, o 2.3.

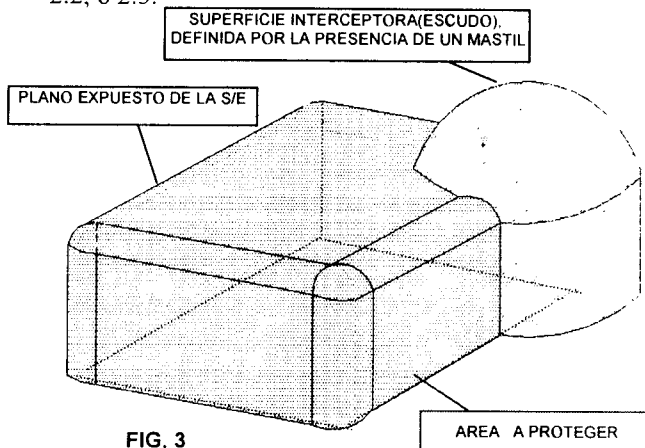


FIG. 3

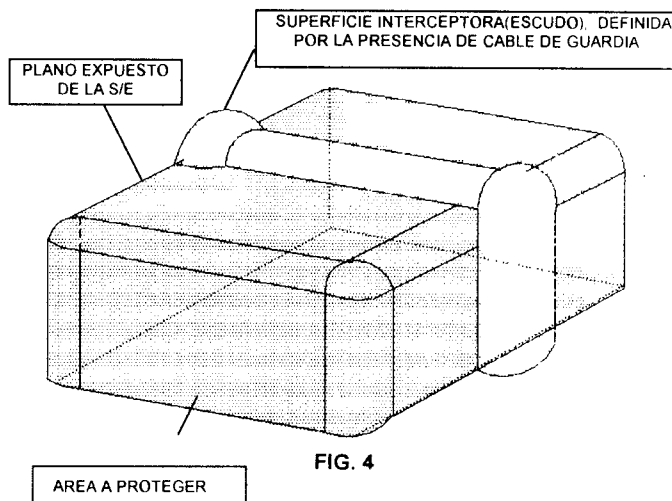


FIG. 4

2.3.6. Período de protección del apantallamiento

A lo largo del presente trabajo se va a reconsiderar el término dado por H. Linck para determinar lo que él llamaba: “Riesgo de falla del Apantallamiento”, y se lo definirá de una manera más objetiva, entendiendo que lo que se pretende, es determinar el período de tiempo que nos garantice un blindaje confiable y, durante el cual, obviamente se va a esperar según lo propuesto por Linck[*1] que pueda ocurrir una perforación del apantallamiento. En lo posterior se hablará entonces del: **Período de Protección del Apantallamiento** [*4].

Como se acaba de mencionar según la propuesta de Linck [*1], la definición del “período de protección del apantallamiento”, le da la oportunidad al ingeniero de diseño para considerar el hecho de que pueda ocurrir una falla del blindaje en un intervalo de tiempo previamente determinado por él. De ahí que debe aceptar la

posibilidad de un riesgo razonable, ya que el considerar una altura excesiva de los elementos de protección sobre el plano expuesto de la S/E, con el afán de evitar posibles fallas, involucraría un excesivo costo del apantallamiento.

El período de protección del apantallamiento debe determinarse tomando como base la importancia de la instalación a proteger. En sistemas eléctricos de potencia puede tomarse éste valor igual al período de vida útil de la instalación multiplicado por un cierto factor de seguridad. En el caso de una subestación por ejemplo el factor de seguridad puede variar entre 2, 3 ó incluso valores mayores [*4].

Cuando se requiera comprobar la efectividad de un esquema de apantallamiento mediante la simulación digital del sistema modelado en condiciones ciertamente reales, uno de los factores más importantes que se debe tener en cuenta es el **PERÍODO DE ESTUDIO**, que debe superar ampliamente (2 á 4 veces) el período de protección del apantallamiento esperado.

3. EL PROGRAMA COMPUTACIONAL INTEGRADO

3.1. Simulación digital, mediante la cual se determina la altura de los elementos de guardia

Una premisa fundamental que se pretende mantener es el hecho de que el usuario pueda acceder tantas veces como crea conveniente al manejo del programa digital y evaluar la altura de los elementos de protección sin ningún tipo de restricciones y teniendo además la posibilidad de manipular, en lo posible, las variables que considere pertinente.

3.1.2. El método de Linck

El primer artículo descrito para el apantallamiento de subestaciones a través del modelo electrogeométrico fue publicado por de Sargent en 1972, incorporando los últimos conocimientos de la época referentes al efecto de los conductores de apantallamiento contra rayos, una comparación con datos de campo demostró la validez de las suposiciones fundamentales consideradas en este método alternativo. Adicionalmente se llegó a la conclusión de que el complejo análisis computacional empleado en el trabajo original puede ser usado para lograr una simplificación en el procedimiento de diseño aplicable a una gran variedad problemas de apantallamiento en subestaciones y de esta manera proporcionar una gran mejora en la precisión de la estimación de fallas en los esquemas de blindaje. Es ahí entonces donde surge la propuesta de Linck cuya técnica está basada en un modelo analítico muy similar al descrito en la sección 2, y así como ha tenido sus detractores, ha encontrado muchos investigadores que la consideran propicia para el diseño del apantallamiento de una subestación de potencia con altos requerimientos de confiabilidad y seguridad [*1][*6][*9].

3.1.2.1. Cálculo del período de protección del apantallamiento

A continuación se presenta el modelo matemático de ciertas ecuaciones que permitirán evaluar el período de protección de una subestación, de una manera sencilla, rápida y especialmente fundamentada en el lugar geométrico que representan todos a aquellos puntos susceptibles de ser interceptados por una descarga.

Considerar un área "A", que se desea proteger, ubicada sobre un plano horizontal (plano expuesto), y un punto "T", localizado a una altura "H" (fig. 5, fig. 6) sobre el centro de dicha área, donde además este punto podría representar el extremo superior del elemento o torre más elevado (mástil), o en su defecto el punto de un conductor horizontal dentro del sistema modelado (cable de guardia). "X" representa la distancia entre la proyección sobre el plano horizontal del punto T y el borde del área analizada, y por otro lado "I" será la corriente de una descarga vertical que desciende sobre el área en mención. Entonces será posible calcular las distancias críticas de arqueo a tierra (S_e), y al punto T (S_s en el caso de cables horizontales, y S_t en el caso de una estructura vertical: torres ó mástiles) [*1].

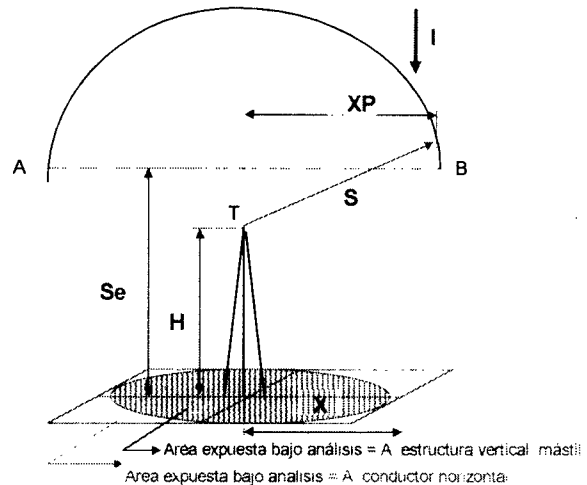


FIG. 5 Modelo analítico para el cálculo de la distancia protegida XP ; para mástiles ó cables de guardia.
Considerando : $H < S_e$, $XP > X$ y $AP > A$

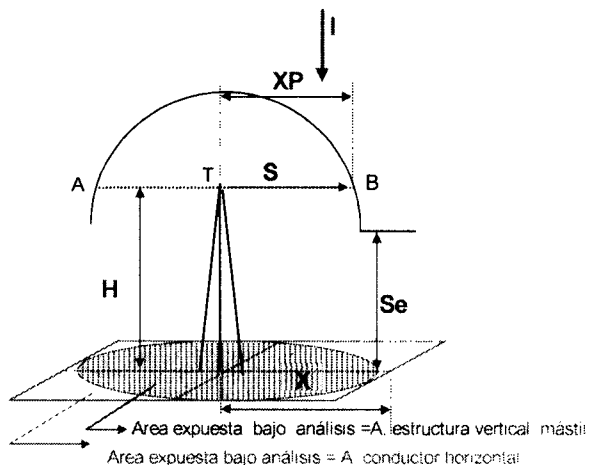


FIG. 6 Modelo analítico para el cálculo de la distancia protegida XP ; para mástiles ó cables de guardia.
Considerando : $H > S_e$, $XP < X$ y $AP < A$

El área efectivamente protegida (AP) por el componente ubicado sobre el punto T, sea éste un cable de guardia o un mástil, será proporcional a la cuerda AB, cuya longitud media es XP. Por lo tanto una descarga que descienda verticalmente podrá ser atraída por el componente, si ésta se aproxima dentro de una distancia definida así [*1]:

PARA CABLES DE GUARDIA: (4)

$$XP = \sqrt{Ss^2 - (Se - H)^2}, \text{ si : } H < Se$$

$$XP = Ss, \text{ si : } H \geq Se$$

PARA MASTILES: (5)

$$XP = \sqrt{St^2 - (Se - H)^2}, \text{ si : } H < Se$$

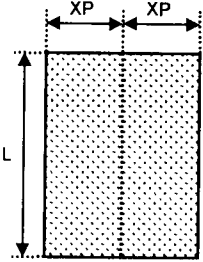
$$XP = St, \text{ si : } H \geq Se$$

El área protegida o apantallada por el elemento ubicado sobre el punto T, frente a las descargas atmosféricas de corriente "I" será [*1]:

$$AP = K2 * (XP)^{K1} \quad (6)$$

Donde K2, y K1 son constantes que dependen de la forma que tome el área protegida, es decir dependen del elemento de protección:

ANÁLISIS PARA UN CONDUCTOR HORIZONTAL:
K2 = 2 * L Y K1 = 1



ANÁLISIS PARA UNA ESTRUCTURA VERTICAL TORRES O MASTILES:
K2 = π Y K1 = 2

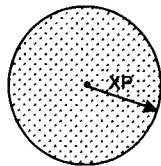


FIG. 7

Si la distancia protegida, evaluada con las ecuaciones dadas para "XP" (4 ó 5) es menor que la distancia obtenida por la proyección del punto (T) sobre el plano horizontal: "X" (figs. 5,6), de hecho involucra que el área protegida (AP) por el elemento de guardia sea menor que el área en consideración y que se desea proteger (A), entonces las descargas con una corriente "I" que desciendan sobre el área (A - AP) no serán interceptadas por el elemento de guardia y se constituirán en las posibles fallas del apantallamiento.

La magnitud de corriente de las descargas atmosféricas puede variar en un rango muy amplio, tal es el caso de las curvas de distribución acumulada presentadas por Uman, la CIGRÉ, y la curva exponencial presentada por Herodotou y su grupo de trabajo [*10], por tanto para descargas con corrientes de magnitudes I1, I2, I3, ..., Im, distancias críticas de arqueo S1, S2, S3, ..., Sm, y probabilidades de ocurrencia P1, P2, P3, ..., Pm; existirán máximas distancias X1, X2, X3, ..., Xm proyectadas

desde el elemento protector al plano horizontal (figs.5,6) más allá de las cuales dichas descargas sobrepasarán la protección. La suma de estas descargas que obviamente no han sido interceptadas por los elementos de protección constituyen el número total de salidas por falla del apantallamiento sobre el área "A" que se desea proteger [*1].

Por otro lado, el número de fallas del apantallamiento por año, es una función del número total de descargas anuales incidentes sobre el área "A", así como de la frecuencia de distribución para la magnitud de corriente de las descargas atmosféricas. Para una densidad de descargas a tierra No por área unitaria Ao, el número total de descargas por año sobre el área "A" estará dado por [*1]:

$$NA = No * (A / Ao) \quad (7)$$

Y por tanto el número de fallas del apantallamiento por año "Ns" sobre el área "A", como una función de la magnitud de corrientes será:

$$Ns = No / Ao \left[A - \int_{I_{min}}^I K2(S)^{K1} * h(I) dI - \int_I^{I_{max}} K2 \left(\sqrt{S^2 - (Se - H)^2} \right)^{K1} * h(I) dI \right] * 10^{-6} \quad (8)$$

Donde :

S, K1, K2: dependen del elemento de protección que se considere [m].

No: La densidad de descargas a tierra:

[descargas * Km² * año]

A y H: definidos según las figuras(5,6) en [m²] y [m], respectivamente

h(I): es la función de densidad de probabilidad definida por (12), y además :

XP = S, para el intervalo de "Imin" a "I"

$$XP = \sqrt{S^2 - (Se - H)^2}, \text{ de } [I, I_{max}]$$

(El valor de "Imin", dependerá del punto donde las ecuaciones 4 ó 5 dadas para evaluar XP, cambien de valor).

Finalmente el período de protección del apantallamiento (TA) se definirá numéricamente por [*1]:

$$TA = 1 / Ns, \text{ [años]} \quad (9)$$

Donde Ns: Es el número de fallas del apantallamiento para un determinado período de estudio, y que para el caso del programa descrito en esta sección se determinará por año.

Si se requiere además evaluar la efectividad del esquema de apantallamiento sobre el área "A" (que se desea proteger) durante un período de estudio establecido, se puede emplear la ecuación:

$$EA = Ns / NA * 100 \text{ [%]} \quad (10)$$

Donde :

Ns : Es el número de fallas del apantallamiento durante el período de análisis.

NA : Es el número de total de descargas incidentes sobre el área (A) durante el mismo período.
Se podrá por último hablar de la efectividad de los elementos de protección, empleando la ecuación:

$$EP = NDI / NAp * 100 \quad [\%] \quad (11)$$

Donde :

NDI :Es el número de descargas interceptadas por el elemento protector

NAp : Es el número total de descargas incidentes sobre el área que deberá ser protegida por el elemento de guardia que se esté analizando.

3.1.2.2. Función de densidad de probabilidad para la corriente de rayos a tierra

Las probabilidades de ocurrencia de las descargas atmosféricas, cuyas curvas se presentan en la sección 2.1, serán representadas por una FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD de magnitudes de corriente que se ha obtenido considerando la aleatoriedad de dichas corrientes a lo largo del tiempo, a través de la siguiente ecuación [*1]:

$$h(I) = K1 * e^{-I/I1} + K2 * e^{-I/I2} \quad (12)$$

Esta expresión ha sido calibrada para cada una de las curvas de frecuencia de distribución de corrientes presentadas en la sección 2.1, que como ya se mencionó, es con el propósito de presentar un análisis de resultados comparativos entre la utilización de cada una de ellas.

3.1.3. Procedimiento a seguirse para realizar el diseño del apantallamiento de subestaciones

El primer paso es determinar un adecuado período de protección "TA", así como la mayor altura sobre tierra del equipo a protegerse (**altura del plano expuesto de la S/E: H0**), punto sobre el cual se asumirá la ubicación imaginaria del plano expuesto de la subestación. Una vez determinados estos valores se procederá a plantear tentativamente la solución o soluciones que definan el sistema de apantallamiento más apropiado para la subestación analizada, así como las dimensiones de los elementos de protección y sus posibles ubicaciones, de acuerdo al siguiente procedimiento:

1.- Definir el área de la subestación: "A", aproximándola a un rectángulo de longitud L, y ancho W.

Esta aproximación que define el área "A" de la estación, como un polígono regular de 4 lados, es con fines exclusivamente de fijar un punto de referencia que posteriormente servirá para realizar la traslación de toda el área de la subestación hacia el centro del radio de influencia (que puede estar en el orden de una milla).

2.- El área "A" de la subestación deberá ser dividida en varias unidades "An", cada una de las cuales será particularmente protegida por un elemento de guardia (cable o mástil). La división se la realizará considerando los

elementos propios de la sustentación, tal es el caso de las torres sobre las estructuras de soporte, o sus vigas. El tamaño y número de las subáreas estará vinculado exclusivamente con el esquema físico que presente la subestación analizada. Otro factor importante es el hecho de guardar siempre la homogeneidad propia del sistema, como por ejemplo los niveles de voltaje.

Este criterio permite considerar la posible presencia de patios dentro de la estación que eventualmente se encuentren a diferente nivel, los cuales obviamente deberán ser protegidos por dos o más elementos de protección dependiendo, entre otras cosas, del número de patios existentes.

3.- Determinar el período de protección "Tn" para cada una de las subáreas "An", siguiendo la metodología descrita a continuación:

$$Tn_i = (A / An_i) * TA \quad (13)$$

Donde "TA" es el período de protección previamente fijado para todo el sistema [años].

Tn_i, es el período de protección [años], para el área An_i [m²].

4.- Determinar la posible distancia protegida XP (ver fig. 5,6), por cada uno de los elementos de guardia ubicados sobre las subáreas An (según la fig. 7).

5.- Con los valores de Tn y XP, obtenidos para cada subárea (elemento protector) se puede determinar, mediante la ayuda del programa digital desarrollado en el presente trabajo, el valor de la altura efectiva "H" sobre el plano expuesto de la S/E, a la que se deben colocar los elementos de guardia. Para el caso el programa presenta resultados numéricos en forma tabulada y/o gráfica, relacionando diferentes períodos de protección (resultado de la simulación) con su respectivas distancias protegidas y las eventuales alturas "H", sobre el plano que representa al equipo de la S/E (plano expuesto). Con esta información el usuario puede fácilmente, y de acuerdo a sus requerimientos, presumir este valor de "H" que le permita garantizar un blindaje efectivo.

De esta forma se pueden obtener como ya se mencionó varias soluciones de acuerdo a las diferentes posibilidades analizadas. En cualquiera de los casos deberá darse como resultado final un período de protección igual al planteado inicialmente "TA" más allá de que cada solución involucre diferentes alturas para los elementos de protección.

La relación que garantice que el período de protección no cambie se plantea como sigue:

$$TA = 1 / (1/T1 + 1/T2 + 1/T3 + \dots + 1/Tn) \quad (14)$$

(Conexión en paralelo)

Siendo: A = A1 + A2 + A3 + ... + An (Conexión en serie), el área total de la subestación,

Donde: A1, A2, ... , An: son las diferentes subáreas que serán protegidas, y

T1, T2, ... , Tn: Los períodos de protección para cada subárea analizada.

3.2. Programa digital para determinar en forma probabilística las posibles salidas por falla del apantallamiento y el potencial punto de incidencia de las descargas que las provocaron.

Una vez obtenidas las posibles soluciones para los esquemas de apantallamiento, determinadas según el modelo descrito en la sección anterior, lo más importante es desarrollar un mecanismo que nos permita predecir el comportamiento de la subestación bajo condiciones ciertamente reales y determinadas según la influencia que sobre esta puedan tener las descargas atmosféricas, es decir un método mediante el cual se pueda implementar en una etapa complementaria al diseño cada una de las posibilidades que se puedan presentar para un blindaje efectivo, simulando para el efecto un conjunto de rayos de diferentes magnitudes de corriente, obtenidas de su curva de distribución de probabilidades, y que inicialmente puedan descender en forma vertical y directa sobre el área de la subestación. Para esto se debe considerar un período de estudio, que como se ha dicho, debe ser mayor al período de protección esperado, y que finalmente será el producto de una evaluación de acuerdo a la ecuación (14). Los resultados nos indicaran todos los puntos de incidencia de cada una de las descargas simuladas incluyendo aquellas que fueron interceptadas por los elementos de guardia.

El método planteado puede ser resuelto a través de un programa digital cuyos resultados le permitan al diseñador conocer en forma preliminar aquellas zonas donde se pueda detectar un exceso de descargas incidentes a causa de zonas no apantalladas o posiblemente sobrepantalladas, permitiendo de esta manera la posibilidad de realizar correcciones y modificaciones a los esquemas de apantallamiento e incluso practicar nuevos diseños.

Para proponer un método que permita realizar la simulación digital que cumpla con los requerimientos deseados, se va a emplear el modelo analítico propuesto en la sección 2, lo que indudablemente va a introducir el término aleatorio, ya que el mismo hecho que explica la formación de una descarga y su posible punto de incidencia sobre tierra involucra un fenómeno probabilístico.

Existen algunas variables muy importantes que deben considerarse en el fenómeno que tiene que ver con la predicción del comportamiento de un esquema de apantallamiento instalado sobre una subestación y sometido a la influencia de descargas atmosféricas, que indiscutiblemente son de naturaleza aleatoria. Debemos mencionar principalmente la corriente de las descargas que puede variar aleatoriamente tanto en su magnitud como en sus tiempos de frente; el punto de incidencia de la descarga es otro factor que se puede considerar

aleatorio. El número de días de tormenta al año no es un valor constante sino más bien puede cambiar de un año a otro, etc. [*2]. Debido al comportamiento de los parámetros mencionados, el método que lo resuelva debe ser capaz de manejar una combinación adecuada de las probabilidades que entran en juego, así como la interacción de las descargas y la subestación.

La técnica empleada para determinar el punto de incidencia de una descarga está basada en el modelo electrogeométrico tridimensional [*2], sin embargo los resultados finales siempre requieren ser correlacionados con datos de campo que entre otras cosas permitan demostrar la validez del método empleado. Desafortunadamente en nuestro medio no se cuenta con suficiente información que pueda proporcionar una calibración adecuado del mecanismo empleado.

Para cada una de las descargas, los parámetros involucrados serán tomados como datos de entrada del modelo electrogeométrico, y tomando en cuenta cada una de las siguientes suposiciones:

- La localización del líder de una descarga es independiente de posibles influencias de los elementos ubicados en tierra, hasta llegar a cierta distancia definida como distancia crítica de arqueo.
- Las descargas serán consideradas como que descienden en forma vertical.
- Se considerará como datos conocidos el número de rayos con cierta magnitud de corriente y que se producirán de acuerdo a su probabilidad de ocurrencia durante el intervalo de tiempo analizado. Este parámetro será obtenido a través de la curva de distribución de probabilidad para la corriente de los rayos según lo descrito en la sección 3.2.1
- La distancia crítica de arqueo está relacionada directamente con la magnitud de corriente de la descarga según la expresión (2.), o su equivalente, y será determinada a través de las ecuaciones (2.1)(2.2)(2.3), según el componente o estructura del sistema que se esté analizando.
- El punto final de la descarga M(Xg, Yg) (ver fig. 2.) se determina cuando el líder de la descarga alcanza alguna de las superficies interceptoras o de exposición (según sea el caso), definidas por los componentes del sistema modelado.
- La densidad de descargas a tierra (No), está relacionada con el nivel ceraúnico (NC), según la expresión(3).

El número total de las descargas simuladas dependerá del nivel ceraúnico, o en su defecto de la densidad de descargas a tierra de la región analizada, del tiempo que

sea estipulado para la simulación, y del área de influencia que se considere sobre la instalación.

El procedimiento que debe seguirse en forma general para el análisis planteado, se desarrolla como sigue:

1.- Elegir el punto $M(Xg, Yg)$, (ver fig.2) en forma aleatoria, como posible punto de impacto de la descarga
 2.- Determinar la magnitud de corriente media que tendrán cada uno de los intervalos mostrados en las curvas dadas en la sección 3.2.1

3.- Para este valor de corriente evaluar el número de rayos que se producirán durante el período de tiempo en análisis, de acuerdo a su probabilidad de ocurrencia.

4.- Para cada uno de los rayos obtenidos en el numeral 2, y en forma independiente, calcular la distancia crítica de arqueo.

5.- Finalmente se determina geoméricamente sobre qué elemento del sistema incidirá la descarga.

El procedimiento descrito debe repetirse para cada uno de los rayos que tenga una cierta magnitud de corriente, y de igual forma se determinará para los siguientes valores de corriente que deban ser analizados, y el grupo de rayos que posean según los intervalos de probabilidad mostrados en las curvas descritas en la sección 3.2.1.

3.2.1. Función de distribución de probabilidades para la magnitud de corriente de las descargas atmosféricas

Las curvas que se describen a continuación han sido obtenidas de aquellas que se presentaron en la sección 2.1, a través de un proceso matemático que conlleva a obtener la derivada de cada una de ellas, de tal manera que se pueda obtener una representación discreta. Los intervalos escogidos para la derivación han sido obtenidos de tal manera que la probabilidad de ocurrencia en dicho intervalo no cambie bruscamente, tratando así de expresar en la forma más real posible las curvas originales presentadas en la fig. 1.

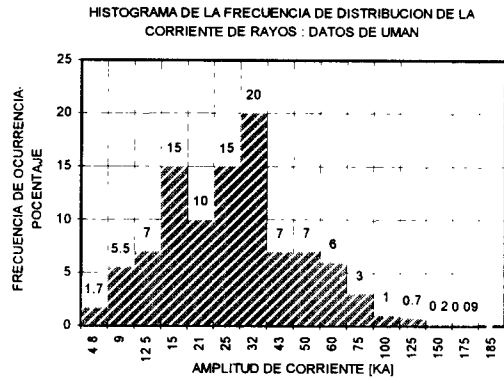
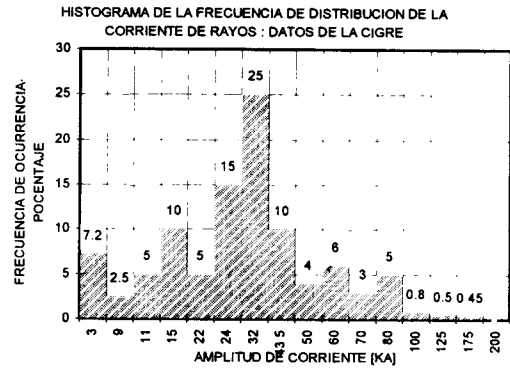
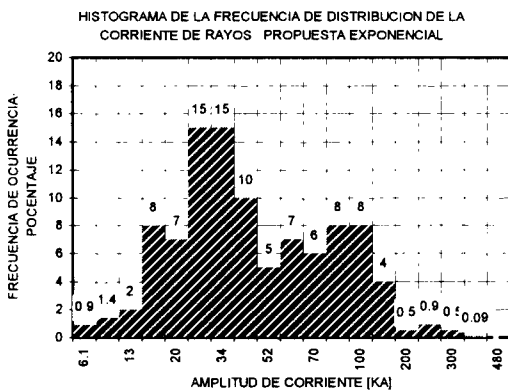


FIG. 8

Los datos para las curvas, fueron obtenidos de la referencia (*10)

RESTRICCIONES :

La parte del programa desarrollado en esta sección, no considera la influencia de todos los componentes pequeños de la subestación, como lo son transformadores, disyuntores, seccionadores, etc. Este inconveniente tiene que ver con la complejidad, a la que estará sujeto el modelo, y que se lo ha pasado por alto debido a que el plano expuesto, se lo ha considerado ubicado, imaginariamente, a la mayor altura de los elementos de la instalación (con excepción de los cables de guardia y/o mástiles) para simular la influencia conjunta de todos los componentes pequeños (los que se acaban de mencionar, y otros), tomando como justificativo de esta modelación el efecto homogenizador del campo eléctrico del conjunto de dichos elementos, y cuyo envolvente superior es justamente el denominado "plano expuesto de la subestación".

4. ANALISIS DE SENSITIVIDAD

El programa digital desarrollado en este trabajo permite mucha versatilidad en cuanto al uso de las ecuaciones para la distancia crítica de arqueo, y las curvas de distribución de probabilidad para la corriente de rayos, de tal manera que el usuario pueda manipular a su conveniencia estos parámetros, sin embargo el análisis de sensibilidad presentado en esta sección pretende formular una guía que sirva como base para iniciar el dise-

ño de un esquema de apantallamiento en una subestación de potencia.

Lo que se pretende es determinar detalladamente la influencia de aquellos parámetros involucrados en el proceso de formación de una descarga (hasta que ésta termina su trayectoria) sobre el período de protección que pueda resultar de la colocación de un esquema de apantallamiento en una determinada subestación. Es necesario mencionar que el programa digital implementado ha sido sujeto a un sinnúmero de pruebas con el fin de garantizar la congruencia de sus resultados, estas pruebas se realizaron tratando en lo posible de analizar la mayor parte circunstancias que puedan presentarse al momento de practicar el diseño de un sistema de apantallamiento. El diseño para el apantallamiento de una subestación de potencia está conformado por etapa en la que se determinará la altura de los elementos de protección y una fase en la cual se podrá evaluar la efectividad del esquema propuesto mediante la ayuda simulaciones digitales, razón por la cual los análisis se desarrollarán tomando en consideración estas dos etapas en forma conjunta. Existen algunos factores determinantes que se ven involucrados en todo el proceso mencionado tal es el caso de la densidad de descargas a tierra que puede ser expresada a través del nivel ceraúnico y que obviamente influirá notablemente en los resultados obtenidos. Para efectos del análisis se considero un valor de 3.86 [descargas/Km² * año], una cantidad superior simplemente representará un mayor riesgo de posibles perforaciones del blindaje por lo cual la altura de colocación de los elementos de protección deberá ser incrementada, esto ha sido, y puede ser comprobado mediante la ayuda del programa digital.

Por otro lado el programa presenta una alternativa, en la cual se podrá optar por cualquiera de las ecuaciones para la distancia crítica de arqueo que se mencionan a continuación. Además será posible permitir al usuario que edite sus propias ecuaciones, siempre y cuando mantenga el mismo formato de las que se han planteado como alternativas.

ECUACIONES DE WHITEHEAD [*2]:

$$S = 7.1 * I^{0.75} = S_s = S_t = S_e \quad (15)$$

ECUACIONES DE A. MOUSA [*7]:

$$S = 8 * I^{0.65} = S_s = S_e \quad (16)$$

$S_t = 1.2 * S$, para mástiles

$S_t = Kt1 * S$, donde $1 < Kt1 < 1.1$ (para torres, y extremos de los cables de guardia).

En atención a los resultados obtenidos, surge la idea de proponer una nueva opción, que es resultado de una combinación de las ecuaciones planteadas. En primer plano se ha optado por admitir el valor propuesto por la IEEE para definir a la distancia crítica de arqueo en forma general, ya que dentro de la literatura resulta ser la versión más actualizada que se ha aceptado como válida para definir dicho parámetro; por otro lado re-

sulta interesante considerar un efecto adicional para dicha ecuación cuando es aplicada en estructuras verticales tal como lo propone Mousa, ya que además dicho efecto está debidamente justificado en la referencia [*7].

Es importante aclarar el hecho de que el empleo de un factor adicional para definir la distancia crítica de arqueo de un mástil, presenta un resultado curioso, cuando se trata de evaluar la distancia protegida (a través de las ecuaciones 4, ó 5), y que matemáticamente se expresa como la presencia de una área protegida pese a que la altura del elemento de guardia sea considerada como un valor extremadamente pequeño, lo cual implica que para ciertos valores de distancias protegidas por un determinado mástil, se podrá garantizar la efectividad del apantallamiento sin importar la altura a la que dicho elemento se coloque. Se recomienda en estos casos, emplear una altura para el mástil que no sea menor a la altura de aislamiento, es decir se hablará de una mínima altura de aislamiento (llamada así, ya que esta definida por el nivel de aislamiento de la subestación). Además, pese a que valores muy pequeños de (H) pueden dar un resultado matemático favorable para la protección, en la práctica ésta no esta garantizada, porque las ecuaciones son válidas cuando el mástil emerge sobre un plano de grandes dimensiones, situación que no es real para el caso de una subestación. Finalmente debe quedar claro que para una altura $H = 0$, el elemento de guardia(mástil) no puede proteger ninguna área, ya que la distancia crítica de arqueo del elemento en mención se convierte en la distancia crítica de arqueo a tierra, con lo cual las ecuaciones (4, ó 5), en forma directa se igualan a cero. Como se ha dicho para estos casos, se recomienda que la altura del elemento de protección sea definida como una altura mínima de aislamiento.

Finalmente en la tesis, de la cual se obtuvo este artículo, se presentan una serie de ejemplos(casos muy particulares), para los cuales se corrió el programa. Fue necesario exagerar en cierta forma las condiciones para cada caso, de tal manera que se pueda analizar gráficamente los resultados. Se recomienda revisar dicho documento, ya que se podrá notar claramente la relación que tienen cada una de las ecuaciones (15,16) así como las curvas presentadas en la sección 2.1, sobre el período de protección del apantallamiento.

5. CONCLUSIONES

5.1. La técnica empleada en este trabajo, ha permitido formular un modelo analítico complementado con simulaciones digitales que sin duda conducen y permiten desarrollar el sistema de apantallamiento para una subestación de potencia con altos requerimientos de confiabilidad, y que obviamente está fundamentado en criterios y trabajos que se ha venido implementando durante los últimos años, con lo cual se ha conseguido recopilar la mayor parte de información relacionada con esta temática de manera que cuando se pretenda practicar el diseño de un esquema de apantallamiento se pue-

da contar con una herramienta de fácil manejo y sobre todo que permita a sus usuarios el poder de manipular la mayor parte de variables que se manejan cuando se analiza un fenómeno relacionado con la protección de una determinada instalación bajo la influencia de las descargas atmosféricas.

5.2. Es necesario mencionar que el presente programa ha sido sujeto a un sinnúmero de pruebas y simulaciones con el fin de garantizar la congruencia de sus resultados, sin embargo no se puede dejar de lado el hecho de que cualquier modelo analítico requiere necesariamente una verificación bajo circunstancias reales. Desgraciadamente en nuestro medio no se cuenta con esta información local, imprescindible para confirmar la certeza de los resultados obtenidos mediante los modelos aquí propuestos, como puede ser el caso, de la corriente de los rayos, que permita determinar una curva de probabilidad de frecuencia de dichas corrientes, o datos sobre la densidad de densidad de descargas a tierra relativa, definida en la sección 2.3.4., etc. En todo caso, no es menos cierto que la base de los modelos aquí planteados son el resultado de varios años de investigación que muchos científicos han venido desarrollando con el fin de entender y conseguir los esquemas mas efectivos para el apantallamiento de instalaciones eléctricas.

5.3. Algo importante que no se puede dejar de mencionar, y que complementa la idea de la conclusión anterior, es el hecho de que cualquier modelo que se plantee para realizar el diseño de un sistema de apantallamiento en una subestación de potencia siempre tendrá un carácter probabilístico introducido por el fenómeno mismo que analiza el comportamiento de la formación de una descarga y el proceso que la conducirá a terminar su trayectoria sobre algún objeto en tierra, razón por la cual los resultados que se obtengan mediante el empleo del programa digital implementado en este trabajo deberán estar sujetos a un margen de error, y que obviamente se podrá cuantificar cuando se cuente con datos obtenidos bajo circunstancias totalmente reales.

5.4. Como ya se ha mencionado, este trabajo ha tratado en lo posible de considerar el efecto de la mayor parte de variables que se involucran en el proceso de análisis que conducirá al desarrollo de un esquema de apantallamiento, permitiendo además que las mismas puedan ser manipuladas por quien se interese en practicar un diseño que permita proteger a una subestación contra las descargas atmosféricas, sin embargo todavía queda planteado la alternativa de complementar el estudio de este fenómeno ya que es indudable que el punto de incidencia de una descarga una vez que ésta haya avanzado lo suficiente, va ha estar influenciado por todos los objetos que se encuentren en tierra bajo un determinado radio de atracción dado por el elemento de mayor altura, y que pueden resultar ser todos los componentes de una subestación de potencia como por ejemplo barras, transformadores, seccionadores, y todo aquel objeto que se encuentre en las cercanías de la instalación. El moti-

vo por el cual estos factores no han sido tomados en cuenta se debe exclusivamente a la complejidad que se generaría en el análisis, y que finalmente es muy probable que no conduzca resultados muy alejados de los obtenidos bajo el modelo aquí planteado. Obviamente queda sugerida la posibilidad de que en posteriores trabajos se pueda globalizar el fenómeno y de hecho conocer con más exactitud el comportamiento de una descarga y su posible punto de impacto.

5.5. Entre los objetivos fundamentales planteados en este trabajo está la posibilidad de generar una guía de parámetros que permitan a la persona que desea iniciar un diseño para el apantallamiento de una subestación tener un variado grupo de recomendaciones que le ayuden a conocer de antemano el comportamiento de los elementos de protección bajo la influencia de varios factores como la corriente de la descarga, la distancia crítica de arqueo, o las posibles configuraciones tentativas para un esquema de apantallamiento; a continuación se resumirán algunos de los resultados que se obtuvieron al realizar el análisis de sensibilidad descrito en la sección cuatro del trabajo original.

Uno de los parámetros que son determinantes en el análisis, es la curva de probabilidad de frecuencia para la corriente de las descargas atmosféricas. Los resultados muestran que la utilización de la curva exponencial permite que la altura sobre el plano de protección a la que se deben colocar los elementos de guardia sea mucho menor respecto de la obtenida mediante el empleo de las curvas de Uman o la de CIGRÉ, a parte de que con dicha curva se permite la manipulación de corrientes mucho más elevadas lo cual implica situaciones que ciertamente pueden estar más próximas a la realidad, razones éstas por las que nos permitimos recomendar su utilización para futuros análisis.

En cuanto a la distribución de los elementos de protección es indudable que desde el punto de vista práctico y económico no resulta conveniente que los mismos se coloquen a alturas demasiado grandes por lo que se recomienda que se trate de optimizar su uso, lo que implica que cada uno de ellos cumpla la función de apantallar áreas cuya distancia de protección no sea excesivamente grande sin escatimar el hecho de puedan existir varios cables y/o mástiles, es decir lo que se trata es de dividir a la subestación en el mayor número de áreas posibles, sobre cada una de las cuales se colocará uno de estos elementos.

Por otro lado se ha logrado determinar que la efectividad de un esquema de apantallamiento no depende exclusivamente de la altura a la que se colocarán los elementos de protección, sino que además existen configuraciones en cuanto a la ubicación de estos elementos que ciertamente pueden presentar zonas en las que el riesgo de posibles perforaciones del blindaje resulta ser mucho más sensible que otras, tal es el caso del perímetro fijado por cada una de las áreas protegidas ya sea mediante el empleo de cables de guardia y/o mástiles.

Se ha comprobado que este tipo de inconvenientes puede ser solucionado a través de configuraciones que, si cabe el término, sobreprotejan estas zonas, lo que en definitiva conduce a generar una especie de malla imaginaria ubicada sobre el plano que representa al equipo de la subestación(plano expuesto).

Como conclusión final se debe recalcar el hecho de cualquier solución o alternativa planteada de una manera tentativa puede resultar conveniente para el esquema de apantallamiento de una subestación, siempre y cuando se trate de evitar en lo posible el dejar zonas eventualmente sin protección ya que estos lugares son potenciales puntos de incidencia para cualquier descarga. Este tipo de situaciones se presentan por lo general cuando se emplean mástiles o cables diagonales, pero en definitiva es posible corregir estas falencias, al igual que las mencionadas anteriormente, ya que dependen de la sensibilidad que se pueda detectar en los perímetros de las áreas que se desean proteger.

Por otra parte siempre se recomienda que los períodos de estudio para la verificación de los diseños sean lo suficientemente mayores al período de protección que se desea esperar, de tal manera que se pueda admitir algunas salidas del sistema sin que este valor se vea disminuido en forma drástica. Además deberá tratarse en lo posible de realizar varias simulaciones para un mismo diseño ya que como se ha dicho los datos finales siempre tendrán un cierto rasgo aleatorio por lo cual será necesario contar con varios resultados que obviamente no deberán divergir en demasía uno de otro.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [*1] LINCK H., "Shielding of modern substations against direct lightning strokes", IEEE Trans., Vol. PAS-94, N° 5, Sept. / Oct. 1975, pp. 1674-1679.
- [*2] MOLINA M., " Apantallamiento de subestaciones. Diseño y evaluación mediante métodos digitales ", E. P. N., 1979.
- [*3] RIOFRIO C., " Comportamiento de líneas de transmisión a descargas atmosféricas directas.- Modelos de análisis ", E.P.N., 1977, pp. 1-11,25-26,61-66.
- [*4] AYORA P., " Sistema de apantallamiento contra descargas atmosféricas ", E.P.N., 1996, pp. 35-46.
- [*5] MOUSA A. , and SRIVASTAVA, K., "A revised electrogeometric model for the termination of lightning strokes on ground objects", IEEE Transactions on Power Delivery, april 1988b, pp. 342-352.
- [*6] MOUSA A., and SRIVASTAVA, K., "The implications of the electrogeometric model regarding effect of height of structure on the median amplitude of collected lightning strokes", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 4, N° 2, april 1989, pp. 1450-1460.
- [*7] MOUSA A., "A computer program for designing the lightning shielding systems of substations", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 6, N° 1, january 1991, pp 143-152.
- [*8] MOUSA A., " Survey of industry practices regarding shielding substations against direct lightning strokes, IEEE, 92 WM Transactions on Power Delivery, january 1993, pp. 224-236.
- [*9] IEEE Working Group Report, "Estimating lightning performance of transmission lines II - updates to analytical models", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 8, N°3, july 1993, pp. 1254-1267.
- [*10] HERODOTOU N., CHISHOLM W., JANISCHEWSKYJ W., " Distribution of lightning peak stroke currents in Ontario using an LLP system ", IEEE, 92 SM, Transactions on Power Delivery, july 1993, pp. 452-463.
- [*11] ERIKSSON A. , " An improved electrogeometric model for transmission line shielding analysis ", Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-2, N°3, july 1987, pp. 871-877

BIOGRAFIAS:

Ing. Freud M. Paredes M.-



Nació en Riobamba, el 27 de junio de 1971, obtuvo el título de Bachiller en Humanidades Modernas, especialidad Físico-Matemáticas, en el colegio "La Salle" de Quito. Sus estudios superiores los realizó en la Escuela

Politécnica Nacional, en la que obtuvo el título de Ingeniero en Sistemas Eléctricos de Potencia en el año 1998.

Participó en el Proyecto para el Control y Reducción de Pérdidas de Energía en las Empresas Eléctricas, Convenio establecido entre el Ex-INECEL y la EPN. Quito 1998.

Actualmente presta sus servicios en la División de Transmisión y Distribución de la Compañía ASEA BROWN BOVERI S.A. - ABB Ecuador.

Ing. Paúl Ayora (*) .-

(*) Ver anales de XVII Jornadas en Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica. Quito 23, 24 y 25 de julio de 1997.