

APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES - DISEÑO
Y EVALUACION MEDIANTE METODOS DIGITALES

MOLINA, MAX

PAUL, AYORA
PROF. E. P. N.

RESUMEN

Este trabajo proporciona un método simplificado, que posibilita optimizar el diseño del apantallamiento de subestaciones modernas, mediante el empleo de cables de guardia y/o mástiles, eliminando los errores de los métodos convencionales.

Este método permite apantallar subestaciones bajo diferentes requerimientos de confiabilidad y consideraciones de tipo estático y económico. Se emplea el modelo electrogeométrico tridimensional, para evaluar la efectividad del apantallamiento, mediante la técnica de simulación de Monte Carlo.

INTRODUCCION

Estudios recientes (1), relativos al apantallamiento de líneas de transmisión, revelan que existen limitaciones en la práctica convencional de diseño del apantallamiento, tanto en líneas de transmisión como en subestaciones, debido a que la relación ángulo de apantallamiento - exposición no ha sido definida adecuadamente. En este estudio se consideran los últimos avances en este campo y particularmente el trabajo del Sr. Linck (1), quien ha desarrollado una nueva técnica, la cual es particularmente adecuada para subestaciones grandes y con altos requerimientos de confiabilidad y que permite, además, una estimación razonablemente precisa del verdadero riesgo de falla del apantallamiento.

Es necesario, por lo tanto, que las salidas del sistema se reduzcan a un mínimo a un costo razonable y que además la reducción se haga durante la etapa de diseño, para lo cual se requiere aplicar un método que prediga el comportamiento del sistema en condiciones similares a las que se presentarán durante su operación, lo que posibilita a su vez, analizar diversas alternativas y encontrar aquellos parámetros del sistema que producen el mínimo de salidas.

1.- DISEÑO DEL SISTEMA DE APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES

1.1. MODELO ELECTROGEOMETRICO

Considérese la fig. 1, donde P (x, y, z) es un punto de un componente del sistema y Q (X_g, Y_g, Z) un punto sobre la trayectoria

ria de la descarga cuyas características - magnitud de corriente (I) y punto de incidencia a tierra $M(X_g, Y_g)$ son conocidas. Es posible, entonces, calcular la distancia crítica de arqueo, r_{sc} , al componente en referencia, la cual a su vez, corresponde a la distancia PQ , es decir:

$$d_{PQ} = r_{sc} \quad (1)$$

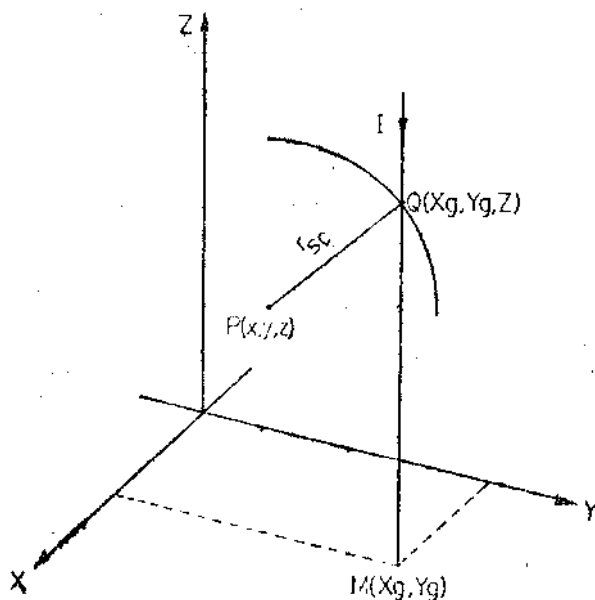


Fig. 1 Sistema de coordenadas cartesianas para el análisis del modelo electrogeométrico.

La región de atracción para el componente en consideración está dada por una esfera de centro P y radio r_{sc} , siendo Q el punto de intersección con la trayectoria de la descarga cuya coordenada Z define la altura sobre el plano $(X-Y)$ a la cual el líder será atraído al punto P .

Para determinar el punto donde terminará la descarga, es necesario calcular las alturas de intersección de todos los posibles puntos del sistema modelado. Se asume que la descarga terminará en aquel punto dado por la máxima altura de intersección.

1.2. FORMULACION DEL MODELO PARA EL DISEÑO DEL APANTALLAMIENTO.

En la referencia (2) se presenta un estudio sobre apantallamiento de subestaciones basado en la técnica del modelo electrogeométrico. Comparaciones con datos de campo demuestran la validez de las suposiciones básicas que se consideran en este nuevo método de apantallamiento.

(1), A continuación se presenta una descripción de los parámetros involucrados en esta nueva técnica:

1.2.1. DENSIDAD DE DESCARGA A TIERRA (No)

La densidad de descargas a tierra No está relacionada al nivel isoceraúnico NI por la relación: (1)

$$No = C \cdot NI \text{ descargas/Km}^2 \text{ por año} \quad (2)$$

donde C = constante para una región determinada; toma valores entre

$$0.1 \text{ y } 0.2 \quad (7)$$

1.2.2. ESTADISTICA DE DESCARGAS ATMOSFERICAS

Las amplitudes de las corrientes de las descargas inyectadas en varias estructuras han sido objeto de investigación por muchos años. Se han propuesto varias distribuciones alternativas(3), con marcadas desviaciones entre ellas. Una posible fuente para dichas diferencias es la variación de la altura y tipo de la estructura sobre la que realizan las mediciones.

La distribución de AIEE (fig. 2, curva 1), ha sido definida como resultado de mediciones de corriente en líneas de transmisión y torres y proporciona una correlación satisfactoria entre resultados analíticos y datos de campo para efectos de apantallamiento de subestaciones (2), por lo cual será empleada en el presente trabajo.

Toda vez que las corrientes de las descargas son magnitudes aleatorias obtenidas a lo largo del tiempo, se puede obtener una función densidad de probabilidad h(I): (10)

$$h(I) = K_1 e^{-I/I_1} + K_2 e^{-I/I_2} \quad (3)$$

Expresión que puede ser calibrada para la distribución de AIEE: (5)

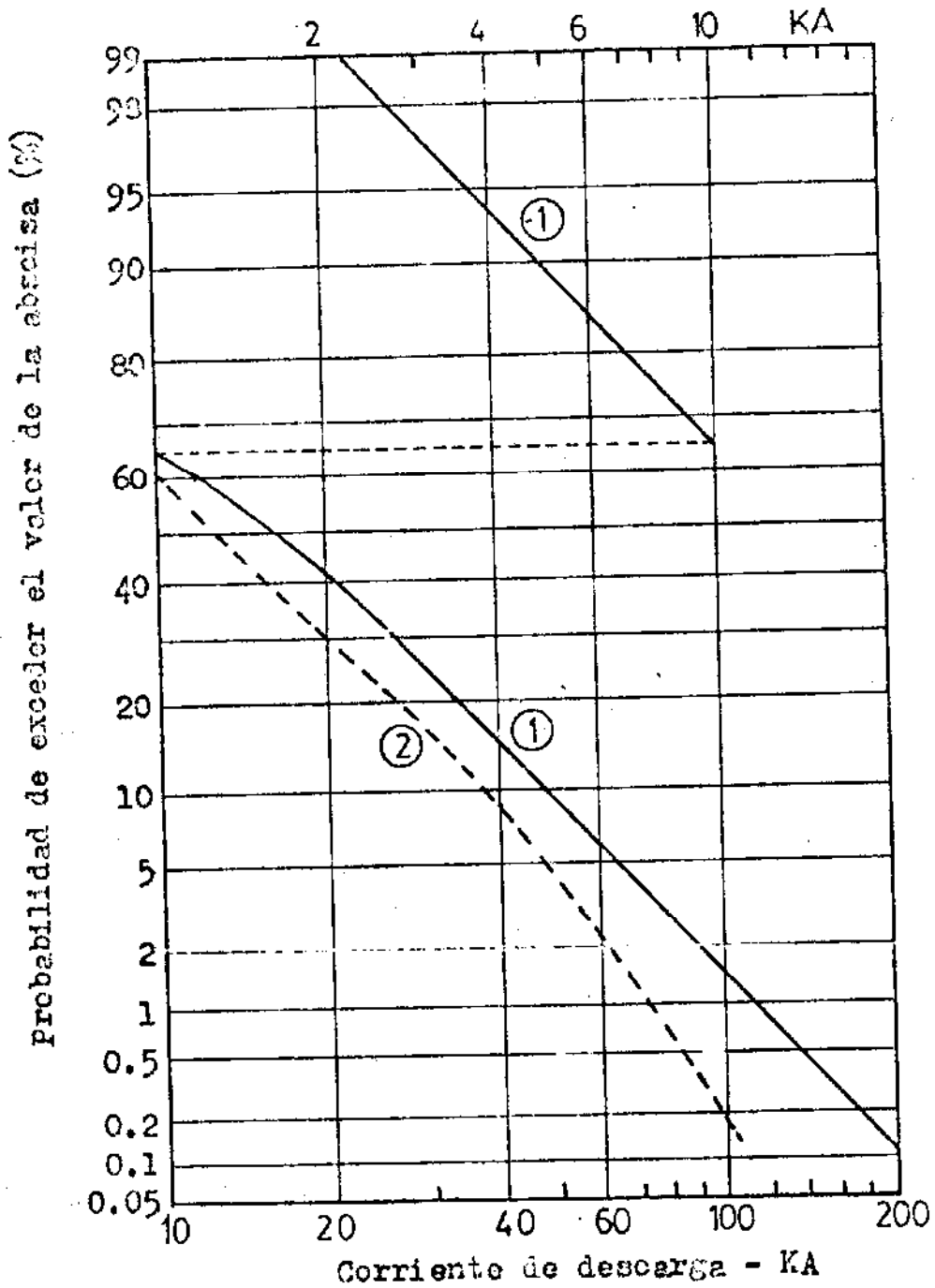
$$h(I) = 4.75e^{-I/20} + 0.10e^{-I/50} \quad (4)$$

1.2.3. DISTANCIA CRITICA DE ARQUEO A OBJETOS ELEVADOS

La distancia crítica de arqueo a un componente del sistema (r_{sc}) está relacionada a la magnitud probable de la corriente de descarga (I) como (3):

$$r_{sc} = K_{sc} \cdot K_1 \cdot (I)^b \quad (5)$$

Brown y Whitehead (8) han calibrado el modelo electrogeométri-



co con datos de campo y proponen las siguientes relaciones:

$$r_s = 7.1 \times I^{0.75} \text{ mt. (I en KA)} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} r_{sg} &= K_{sg} \cdot r_s \quad (\text{Distancia crítica de arqueo a -} \\ &\quad \text{tierra)} \\ &= r_s \end{aligned}$$

1.2.4. PUNTO FINAL DE LA DESCARGA.

Cuando una descarga se aproxima a una subestación apantallada, aquella terminará en la estructura de la estación que primero entre en su zona de atracción. El riesgo de falla del apantallamiento depende de la diferencia en altura (altura efectiva) entre los conductores de apantallamiento y el equipo, así como de su distancia horizontal. Según la práctica convencional, esta distancia y la altura efectiva definen el ángulo de apantallamiento. Con la introducción del nuevo método, la distancia protegida y, por tanto, el ángulo de apantallamiento, son funciones de la amplitud de corriente de la descarga y su distribución estadística (1).

1.3. CALCULO DEL RIESGO DE FALLA DEL APANTALLAMIENTO

Este cálculo se realiza según el método descrito por Linck (1). Considérese un área A sobre un plano horizontal, con un conductor de guardia colocado en su centro, siendo X la distancia entre la proyección del conductor sobre el plano y el borde del área.

El área efectivamente protegida por el componente T, fig. 3, - contra descargas atmosféricas, es proporcional a la cuerda AB, de longitud media XP. Por lo tanto, una descarga que descende sobre el área A, será atraída al componente T si se aproxima dentro de una distancia: (3)

$$XP = \sqrt{r_s^2 - (r_{sg} - h)^2}, \text{ si } r_{sg} > h; \quad (7)$$

$$\text{y } XP = r_s, \quad \text{si } r_{sg} \leq h$$

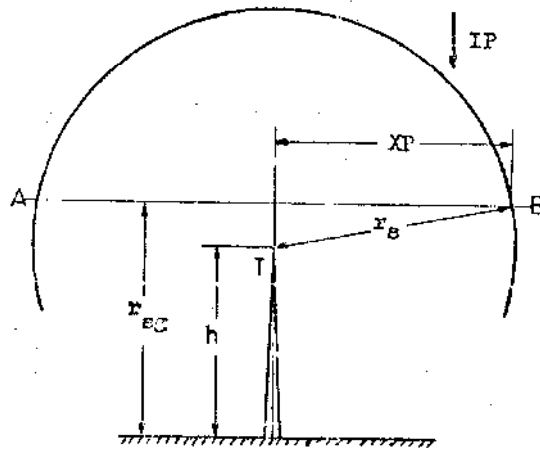


Fig. 3. Modelo analítico para el cálculo de la zona de protección.

El área apantallada por el punto T contra descargas de corriente IP es: (3)

$$AP = K_2 (XP)^{K_1} \quad (8)$$

Para una estructura vertical (torre, mástil), $K_2 = \pi$ y $K_1 = 2$; para un conductor horizontal (cable de guardia), $K_2 = 2L'$ (donde L' es la longitud del cable de guardia) y $K_1 = 1$.

Si $XP < X$, y por lo tanto $AP < A$, las descargas de corriente - IP, que descienden sobre el área $A - AP$, no serán atraídas al conductor de guardia y constituirán las fallas del apantallamiento en el área A.

Para una densidad de descargas a tierra No por área unitaria - A_o , el número de descargas por año sobre el área A es: (1)

$$NA = No (A/A_o) \quad (9)$$

El número de fallas del apantallamiento por año NS en el área A, como una función de la amplitud de la corriente, es:

$$NS = \frac{No}{A_o} A - \sum_{n=1}^{n=m} (A_n \cdot P_n)$$

fallas del apantallamiento por año (10)

El riesgo de falla del apantallamiento se define numéricamente por: (1)

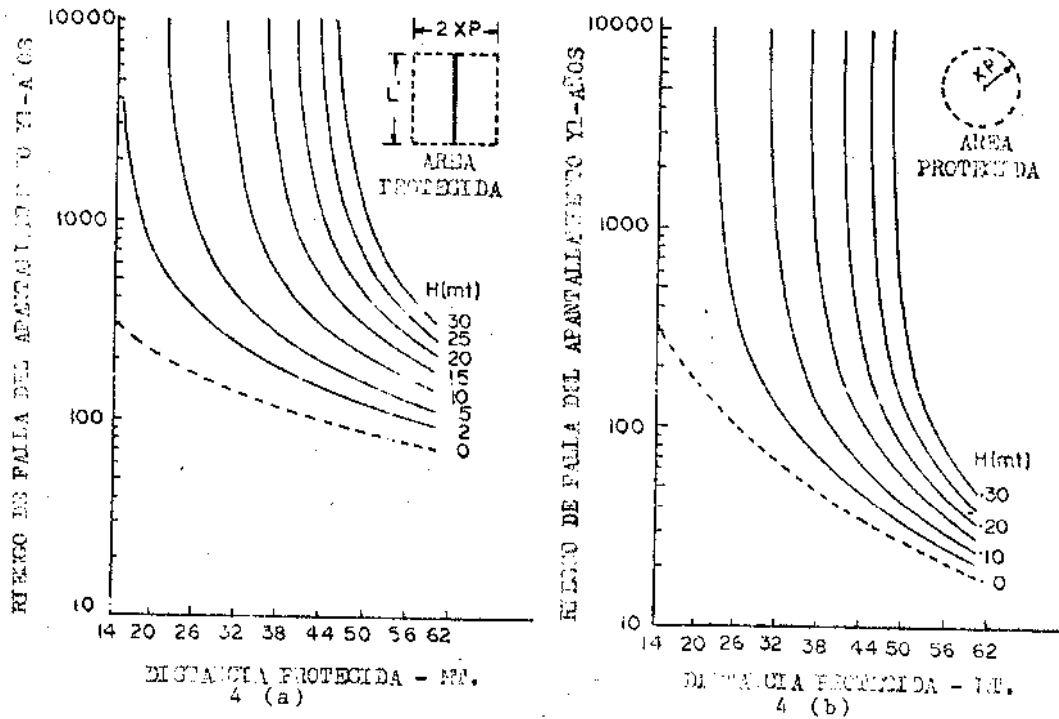
$$YA = \frac{1}{Ns}, \text{ años por falla del apantallamiento} \quad (11)$$

La exposición del área A a fallas del apantallamiento es:

$$EA = \frac{Ns}{NA} \times 100, \text{ por ciento} \quad (12)$$

Utilizando las relaciones anteriores, se desarrolla en el presente trabajo, un programa digital que permite diseñar el sistema de apantallamiento de subestaciones bajo diferentes exigencias de confiabilidad.

La fig. 4(a) corresponde a los resultados obtenidos para un cable de guardia horizontal de 30.48mt. (100 pies) de longitud, y la fig. 4(b) para un mástil vertical. En ambos casos se consideró un nivel isocerámico NI = 25. Para otros niveles isocerámicos T' en el rango de 25 a 55, el riesgo de falla del apantallamiento deberá ajustarse con la proporción 25/T'.



a) Para un cable de guardia de longitud $L'=30.5\text{mt.}$

$$A_1 = L' (2XP); K_2 = 2L' \quad \text{y} \quad K_1 = 1$$

b) Para un solo mástil vertical

$$A_1 = \pi(XP)^2; K_2 = \pi \quad \text{y} \quad K_1 = 2$$

H = altura efectiva

$$N_0 = 3.86 \text{ descargas/Km}^2 \text{ por año.}$$

En la fig. 5 se presentan las curvas de la altura efectiva como función de la distancia protegida para diferentes riesgos de falla del apantallamiento. Nótese que, para una misma altura efectiva, la distancia protegida aumenta a medida que aumenta el riesgo de falla.

1.4. PROCEDIMIENTO A SEGUIRSE PARA EL DISEÑO

La referencia (1) propone el siguiente procedimiento:

1. Especificar el área total de la subestación A, aproximada - mente por un rectángulo de longitud L, ancho W y riesgo de falla del apantallamiento Y.
2. Dividir el área A en n áreas iguales A_1 .
3. Determinar el riesgo de falla del apantallamiento para el - área A_1 , como:

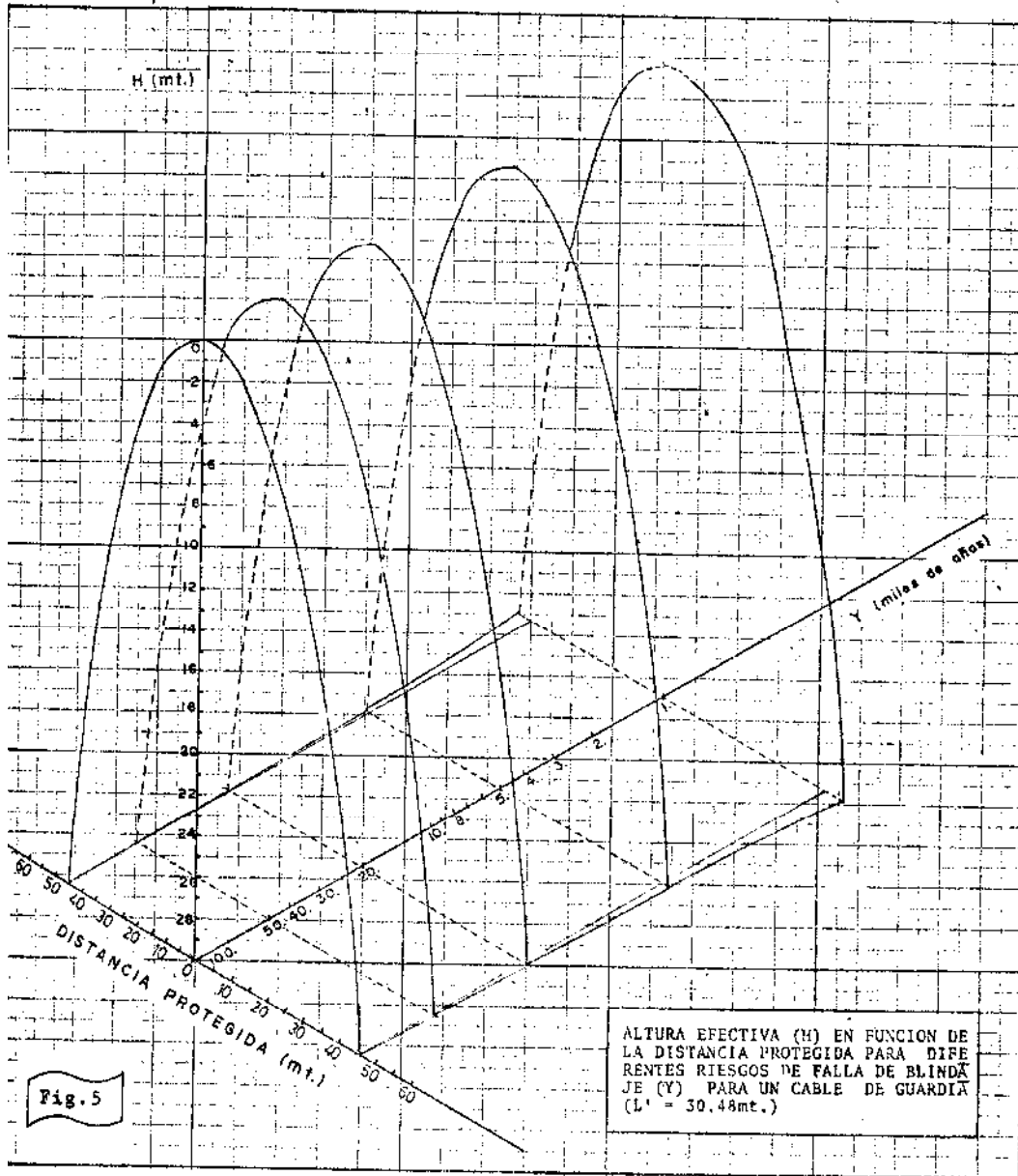
$$Y_1 = (A/A_1) Y = NY \text{ años.}$$

4. Asumir que cada área A_1 está protegida por un conductor de apantallamiento (fig. 4(a) para cables de guardia y fig. - 4(b) para mástiles).
5. Determinar la distancia protegida XP para el área A_1 de - acuerdo con las figuras 4(a) o 4(b).

$$\text{Para cables de guardia: } XP = A_1 / (2L') \quad (\text{mt}). \quad (13)$$

$$\text{Para mástiles: } XP = \sqrt{A_1 / \pi} \quad (\text{mt}). \quad (14)$$

6. Conocidos Y_1 y XP, la altura efectiva (H) del conductor de apantallamiento puede obtenerse de las figuras 4(a) o 4(b).
7. a) Para un cable de guardia de longitud unitaria 30.48mt. - (fig. 4(a), el número total de cables de guardia paralelos de longitud L (o W) es $30.5 n/L$ (o $30.5 n/W$). La distancia entre cables de guardia es $2XP$, y entre los cables de guardia exteriores y los bordes de la subestación la distancia protegida es XP.



b) Para conductores de apantallamiento verticales, (fig. 4(b)) el número total de mástiles es n.

Cuando se consideran diferentes grados de apantallamiento para áreas adyacentes A_1, A_2, \dots, A_n , los riesgos de falla del apantallamiento se calculan individualmente. El riesgo de falla del apantallamiento total para el área A, se calcula por medio de la expresión: (1)

$$Y = (1/Y_1 + 1/Y_2 + \dots + 1/Y_n)^{-1} \quad (15)$$

siendo $A = A_1 + A_2 + \dots + A_n$

2.- SIMULACION DIGITAL DEL COMPORTAMIENTO DE SUBESTACIONES MEDIANTE EL METODO DE MONTE CARLO

El problema planteado es de naturaleza aleatoria y las variables se modelan con sus distribuciones de probabilidad; el método que lo resuelva, debe manejar la combinación de las probabilidades que entran en juego, así como la interacción de las descargas y la subestación.

Las salidas del sistema nunca son deseables, aunque algunas son inevitables (9). Por lo tanto, debe especificarse un número aceptable de salidas durante la etapa de diseño, a fin de que todo tipo de evaluación se realice en base a esta especificación.

El modelo electrogeométrico ha sido desarrollado como una técnica mejorada para evaluar la efectividad del apantallamiento de líneas de transmisión y ha sido restringido a un planteamiento bidimensional (2). Esta técnica se aplica aquí al problema del apantallamiento de subestaciones, considerando un análisis tridimensional.

2.1. EL METODO DE MONTE CARLO APLICADO AL MODELO ELECTROGEOMETRICO

El método de Monte Carlo, se utiliza para seleccionar al azar los valores de las variables aleatorias que entran en juego de acuerdo con sus distribuciones de probabilidad. El conjunto de los parámetros escogidos al azar se aplican al modelo electrogeométrico. Este modelo determina en qué punto incidirá la descarga sobre la subestación. Además, se calcula el número de descargas a la subestación, evalúa la posición de los cables de guardia y/o mástiles al calcular las salidas por falla del apantallamiento (6).

2.2. SISTEMA MODELADO

El sistema modelado usando esta técnica, consiste de la subes-

tación y terreno circundante. Se asume que la subestación está localizada en la mitad de un plano horizontal de una milla-cuadrada (2). La subestación consiste de barras colectoras y equipo (transformadores, disyuntores, seccionadores, etc). Se presentan por un plano horizontal de altura y dimensiones apropiadas, cables de guardia, mástiles, alimentadores aéreos y torres.

A base de lo expuesto se desarrolló un programa digital (13), utilizando Fortran IV, que permite evaluar el riesgo de falla del apantallamiento y determinar los puntos del sistema modelado más solicitados por las descargas atmosféricas. Para 100 años de simulación tarda aproximadamente 6 minutos. Los diagramas de flujo, tanto del programa principal como de la simulación de Monte Carlo, se presentan en la figura (6).

CONCLUSIONES

- 1.- Se presenta un método simple, que permite evaluar varias alternativas de solución al problema del apantallamiento de subestaciones.
- 2.- Se considera la influencia de la altura y tipo de conductores de apantallamiento, sobre la distribución de magnitudes de corriente.
- 3.- La zona protegida es función de la altura de los conductores de apantallamiento, así como del riesgo de falla aceptado (13).
- 4.- Se han desarrollado curvas de la altura efectiva como función de la distancia protegida para varios riesgos de falla del apantallamiento, lo que permite apantallar los aparatos de la subestación con diferentes grados de confianza (13).
- 5.- Se presenta la técnica de Monte Carlo para simular condiciones de servicio, utilizando el modelo electrogeométrico tridimensional (13).

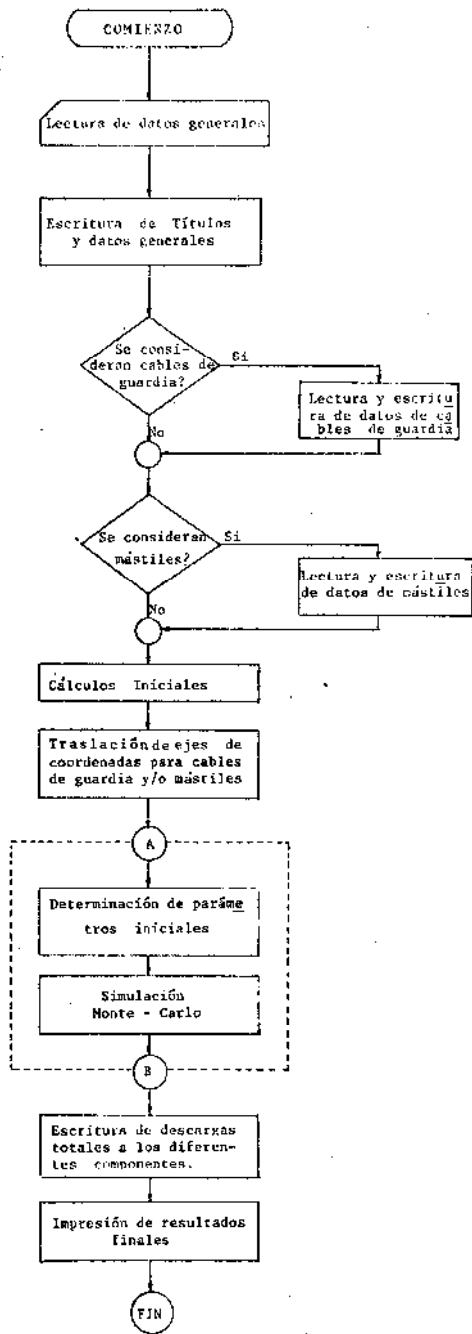


Fig. 6(a) Diagrama de flujo general para determinar el comportamiento de subestaciones frente a descargas atmosféricas directas.

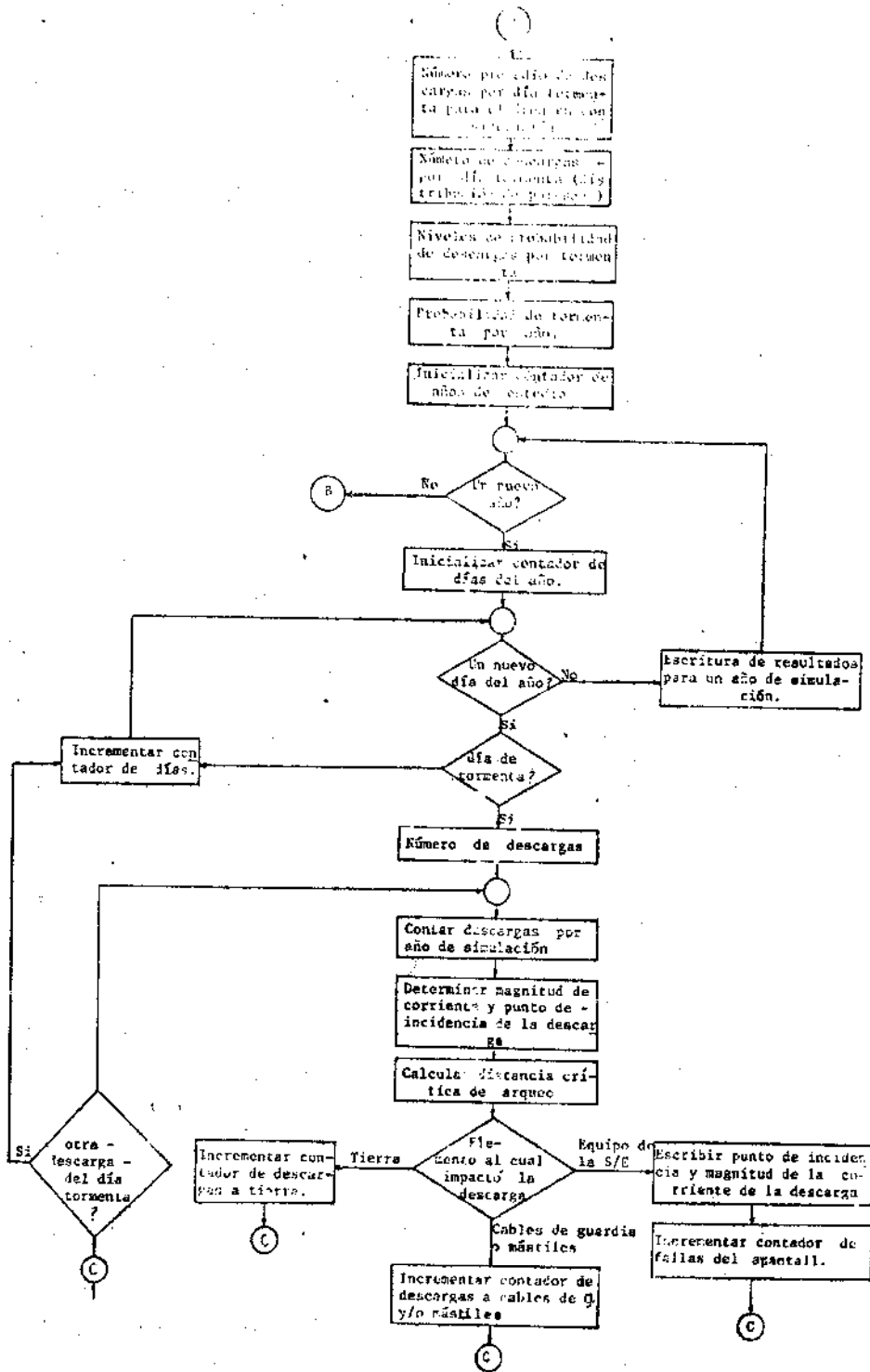


Fig. 6 (b) Diagrama de flujo de la simulación de Monte Carlo.

REFERENCIAS

- (1) H. Linck. Shielding of modern substations against direct lightning strokes. IEEE trans. PAS - 94, No. 5, Sept./ Oct. 1975, pp. 1674 - 1679.
- (2) M.A. Sargent. Monte Carlo simulation of the lightning - performance of overhead shielding networks of high voltage stations. IEEE trans., Vol. PAS - 91, NO. 4, Jul /- Aug. 1972, pp. 1651 - 1656.
- (3) M.A. Sargent. The frequency distribution of current magnitudes of lightning strokes to tall structures. IEEE trans. PAS - 91, No. 5, Sept./Oct. 1972, pp. 2224 - 2229.
- (4) A.M. Mousa. Shielding of high - voltage and extra high - voltage substations. IEEE Trans. PAS - 95, No. 4, Jul y Aug. 1976, pp. 1303 - 1310.
- (5) M. Moreno, R. Velásquez. Programa digital para determinar el comportamiento de líneas de transmisión a descargas - atmosféricas. Comisión Federal de Electricidad, México, Instituto de Investigaciones de la Industria Eléctrica, - 1975.
- (6) M. Moreno Barraza. Simulación digital del comportamiento de una línea de transmisión considerando el efecto de las descargas atmosféricas. Comisión Federal de Electricidad, México, Instituto de Investigaciones de la Industria Eléctrica, 1976.
- (7) C. Riofrío Reyes. Comportamiento de líneas de transmisión a descargas atmosféricas directas. Modelos de análisis. Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, - Quito - Ecuador, 1977.
- (8) G.W. Brown, E.R. Whitehead. Field and Analytical Studies of transmission line Shielding. Part II. Trans. IEEE, - Vol PAS - 88, May, 1969, pp. 617 - 626.
- (9) EHV Transmission Line Reference Book, Cap. 8, Edison Electric Institute, 1968.
- (10) H.R. Armstrong, E.R. Whitehead. Field and Analytical Studies of transmission Line Shielding. IEEE Trans. PAS-87, Jan. 1968, pp. 270 - 281.
- (11) C.F. Wagner, C.D. McCann, C.M. Lear. Shielding of substations. AIEE Trans., February 1942, Vol. 61, pp. 96-100.
- (12) J.R. Currie, L.A. Choy, M. Darveniza. Monte Carlo determination of the frequency of lightning strokes and Shielding failures on transmission lines. IEEE - T - PAS - 91, 1972, pp. 2305 - 2312.