

1311

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

**ANALISIS DE SENSITIVIDAD DEL  
APANTALLAMIENTO CONTRA RAYOS  
EN SUBESTACIONES DE POTENCIA**

Tesis previa a la obtención del Título de Ingeniero en Sistemas  
Eléctricos de Potencia

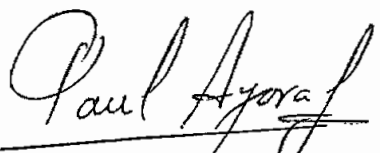


**FREUD MAURICIO PAREDES MONTEROS**

Quito, Julio 1998

12-09-58 Págs. 21 E. 845. 9.º

Certifico que la presente tesis de grado  
ha sido realizada en su totalidad por el  
Sr. Freud Mauricio Paredes Monteros

  
Ing. Paúl Ayora G.

## **DEDICATORIA**

A mis padres, mi abuelita y mis hermanos que siempre supieron alentarme, y en especial a mi madre por su paciencia y apoyo incondicional.

## **AGRADECIMIENTO**

Mi agradecimiento a la Escuela Politécnica Nacional, y a todo su personal docente que permitió la culminación de mi carrera, en especial al Ing. Paúl Ayora por su acertada dirección en el desarrollo de este trabajo. Al Ing. Carlos Riofrío por su incondicional colaboración, a mis amigos y a todos quienes de una u otra manera siempre estuvieron prestos a ayudarme.

**ANALISIS DE SENSITIVIDAD DEL APANTALLAMIENTO CONTRA  
RAYOS EN SUBESTACIONES DE POTENCIA**

**CONTENIDO**

*Página*

**CAPITULO I**

**INTRODUCCION**

1.1.	Generalidades.....	1
1.2.	Importancia y objetivo del apantallamiento contra descargas atmosféricas en una subestación de potencia.....	2
1.3.	Análisis de las propuestas que se ha presentado para el apantallamiento de subestaciones de potencia.....	3
1.3.1.	Métodos convencionales.....	4
1.3.2.	Propuesta de A. Mousa.....	6
1.3.3.	Método aplicado por Máx Molina.....	10
1.4.	Conceptualización actualizada del problema.....	14

**CAPITULO II**

**FORMULACION DE UN MODELO PARA EL  
APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES DE POTENCIA**

2.1.	Consideraciones Generalidades.....	20
2.2.	Naturaleza de las descargas atmosféricas.....	21
2.2.1.	Características de las descargas atmosféricas.....	24
2.2.2.	Estadística de las descargas atmosféricas.....	25
2.2.2.1.	Propuesta de Uman.....	27
2.2.2.2.	Propuesta de Herodotou (Exponencial).....	28

	<i>Página</i>
2.2.2.3. Propuesta de la CIGRÉ.....	29
2.3. Modelo Electrogeométrico.....	31
2.3.1. Sistema de coordenadas cartesianas para el análisis del modelo electrogeométrico.....	32
2.4. Modelo analítico.....	33
2.4.1. Distancia crítica de arqueo.....	33
2.4.2. Magnitud de la corriente de las descargas.....	36
2.4.3. Angulo de aproximación de las descargas.....	36
2.4.4. Densidad de descargas a tierra. Nivel cerámico.....	37
2.4.5. Intercepción del rayo, punto de incidencia de la descarga.	39
2.4.6. Periodo de protección del apantallamiento.....	42

## **CAPITULO III**

### ***EL PROGRAMA COMPUTACIONAL INTEGRADO***

3.1. Programa digital para complementar el diseño del apantallamiento de subestaciones de potencia aéreas.....	44
3.1.1. Generalidades.....	44
3.1.2. El método de Linck.....	44
3.1.2.1 Cálculo del período de protección del apantallamiento.....	45
3.1.2.2 Función de densidad de probabilidad para la corriente de rayos a tierra.....	52
3.1.2.3 Análisis de la distancia protegida.....	55
3.1.3. Procedimiento a seguirse para realizar el diseño del apantallamiento de subestaciones.....	57
3.1.4. Algoritmo de solución, diagrama de bloques.....	62
3.1.5. Programa digital.....	66
3.1.6. Evaluación y análisis de resultados.....	66
3.1.7. Restricciones.....	66

	<i>Página</i>
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.....	67
3.2.1. Generalidades.....	67
3.2.2. Un juicio crítico sobre la posible aplicación y relación del método de Monte-Carlo con el modelo electrogeométrico..	69
3.2.3. Formulación del modelo.....	71
3.2.4. Función de distribución de probabilidades para la magnitud de la corriente de las descargas atmosféricas...	74
3.2.4.1. Propuesta de Uman.....	75
3.2.4.2. Propuesta de Herodotou((exponencial).....	76
3.2.4.3. Propuesta de la CIGRÉ.....	77
3.2.5 Desarrollo matemático de las ecuaciones para determinar el punto final de la descarga.....	78
3.2.6. Algoritmo de solución, diagrama de bloques.....	89
3.2.7. Programa digital.....	94
3.2.8. Evaluación de resultados.....	94
3.2.9. Restricciones.....	94

## **CAPITULO IV**

### ***ANALISIS DE SENSITIVIDAD***

4.1. Comparación y análisis de resultados globales.....	96
4.2. Influencia y relación de la magnitud de corriente de la descarga sobre el período de protección del apantallamiento, y la altura efectiva de los elementos de guardia.....	101

4.3.	Influencia y relación de las posibles ecuaciones a emplearse para la distancia crítica de arqueo, sobre el período de protección del apantallamiento, y la altura de los elementos de guardia.....	104
4.4.	Influencia de la ubicación y número de cables de guardia a emplearse en un esquema de apantallamiento sobre el período de protección resultante.....	107
4.4.1.	Influencia de la longitud de los cables de guardia a emplearse para diseñar un sistema de apantallamiento y su posible altura de colocación sobre el plano expuesto de la subestación.....	114
4.4.2.	Influencia y relación de la altura del plano expuesto de la subestación sobre la posible colocación de cables de guardia en estructuras de menor altura que éste, y su repercusión sobre el período de protección del apantallamiento.....	116
4.5.	Influencia de la ubicación y número de mástiles a emplearse en un esquema de apantallamiento sobre el período de protección resultante.....	121
4.5.1.	Influencia y relación de la altura del plano expuesto de la subestación, sobre la posible colocación de mástiles en estructuras de menor altura que éste, y su repercusión sobre el período de protección del apantallamiento.....	125
4.6.	Influencia de la combinación de cables de guardia y mástiles a emplearse en un esquema de apantallamiento sobre el período de protección resultante.....	127

## **CAPITULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	133
-------------------------------------	-----



## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....

138

### ANEXOS :

- 1.- EJEMPLO DE APLICACION
- 2.- MANUAL DE USUARIO
- 3.- GLOSARIO
- 4.- DIAGRAMAS DE FLUJO

# CAPITULO I

## INTRODUCCION

### 1.1. GENERALIDADES

Es indudable la importancia que desde hace muchos años, ha venido representando el control sobre el número de salidas parciales o totales a las que se pueda ver expuesto un sistema eléctrico de potencia por efecto de las descargas atmosféricas. Esto ha permitido el desarrollo de varios trabajos a través de los cuales se ha logrado implementar programas digitales que han conseguido predecir el comportamiento de dichos sistemas, y que por otro lado han facilitado notablemente la realización de diseños para el apantallamiento cuyo objetivo final ha sido minimizar el número de salidas que se puedan provocar debido a este tipo de descargas.

El objeto del presente trabajo es reunir la información más relevante que existe sobre ésta temática, con el afán de implementar un nuevo programa digital que permita modelar un determinado sistema y que este basado obviamente en mecanismos que se consideren totalmente aplicables a nuestro medio, enfocándolo además a desarrollar un análisis de sensibilidad sobre el apantallamiento de subestaciones de potencia, de tal manera que se pueda optimizar los requerimientos de confiabilidad y servicio de una manera económica y segura.

Cabe recalcar, que en lo posible se ha tratado de hacer un programa digital versátil y confiable. Se pretende además que en la etapa de diseño se cuente con una herramienta de fácil manejo, complementada por una guía de parámetros que permiten al ingeniero diseñador conocer previamente (entre otras cosas) el comportamiento de los elementos de protección bajo la influencia y configuración de ciertos factores determinantes en el éxito del apantallamiento. Así como las relaciones e influencia de todas aquellas

variables que entran en juego cuando se está analizando el proceso de formación de una descarga atmosférica hasta que ésta termina su trayectoria sobre algún objeto en tierra. Este es el caso de la magnitud de corriente de la descarga, la distancia a la que se producirá el desenlace final del fenómeno, y algunos otros parámetros detallados más adelante.

## **1.2. IMPORTANCIA Y OBJETIVO DEL APANTALLAMIENTO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN UNA SUBESTACIÓN DE POTENCIA.**

La protección de subestaciones contra rayos se desarrolla basada en los siguientes puntos (\*7) :

- a.- La prevención de las posibles descargas que puedan terminar sobre el equipo de una subestación. Esto se consigue proporcionando un adecuado esquema de apantallamiento.
- b.- Proteger el equipo frente a las ondas de sobre voltaje que podrían entrar a la subestación a través de las líneas de transmisión conectadas a ella. Esto se puede realizar mediante una configuración y coordinación adecuada de los niveles de aislamiento, el uso de pararrayos y cables de guardia colocados sobre la líneas conectadas en las cercanías de la subestación.

El desarrollo del presente trabajo estará fundamentado exclusivamente en la modelación de un sistema que permita diseñar un esquema de apantallamiento frente a las descargas que puedan terminar directamente sobre una subestación determinada.

Como se puede ver la importancia de apantallar una subestación es prevenir las posibles salidas a las que se pueda ver expuesta por efecto de las descargas atmosféricas y que ocasionarían grandes pérdidas económicas y discontinuidades en el servicio de energía eléctrica. Por otro lado el objetivo

de los elementos de apantallamiento (cables de guardia y mástiles) es interceptar en lo posible los rayos que desciendan directamente sobre la subestación y apartarlos de los conductores vivos y equipo en general, para posteriormente descargarlos sobre tierra. Dejando así claro el hecho de que estos elementos de protección deberán estar sólidamente conectados a la malla de puesta a tierra del sistema.

El problema se reduce entonces a tratar de predecir el comportamiento de una subestación frente a la influencia de las descargas atmosféricas, más conocidas como rayos, de tal manera que en la etapa de diseño se pueda optar por conseguir la disposición y ubicación más apropiada que deberán tener los elementos de protección. Todo esto se puede lograr a través de un programa digital que ayude a modelar el sistema bajo análisis, sin embargo es posible además, definir ciertos parámetros que en algo permitan al ingeniero de diseño conocer de antemano los resultados que puedan presentarse empleando ciertas configuraciones respecto de los cables de guardia y mástiles. Es ahí entonces donde se genera la necesidad de realizar un análisis de sensibilidad del apantallamiento de una subestación, cuyo objetivo será además evaluar la influencia que se pueda presentar entre las variables que intervienen en el proceso de formación de una descarga, hasta que ésta termina su trayectoria sobre algún objeto de tierra.

### **1.3. ANALISIS DE LAS PROPUESTAS QUE SE HAN PRESENTADO PARA EL APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES DE POTENCIA.**

Según un proyecto realizado por un grupo de trabajo del Comité de Subestaciones de la IEEE en 1991 (\*8), y que consistió de una encuesta dentro y fuera de Norte América, existen 4 métodos para el diseño del apantallamiento de subestaciones que están siendo ampliamente usados :

- El método para establecer el ángulo del apantallamiento
- El programa digital desarrollado por Abdul Mousa
- El método de la esfera rodante de Lee
- El método presentado en 1942 por Wagner.

Según los resultados de este proyecto, aproximadamente el 50% de los encuestados están usando aún métodos geométricos como el ángulo del apantallamiento, y el método de Wagner. El otro 50% usa modelos electrogeométricos (MEG) que han sido actualizados desde 1963 año en que Young , Clayton , y Hileman desarrollaron el primero de estos modelos (\*8).

Notándose además que los modelos electrogeométricos (MEG) están siendo ampliamente usados para el diseño del apantallamiento en líneas de transmisión, y que la conversión de los métodos geométricos al MEG, para el apantallamiento en subestaciones, se puede facilitar notablemente a través de herramientas computacionales. Recalcando que en el pasado se rehuía la aplicación de la electrogeometría por la complejidad que esta involucraba (\*8).

### 1.3.1. METODOS CONVENCIONALES

A principios de 1940, Wagner desarrolló un método para el apantallamiento de líneas de transmisión y subestaciones, basado en la aplicación de descargas de impulso sobre modelos reducidos a escala. Poco tiempo después Golde probó la invalidez del método de Wagner desde el punto de vista teórico (\*7).

Sin embargo, fue el método de Wagner el que se aplicó para trabajar sobre los niveles de voltaje de aquel tiempo, y no otros métodos alternativos que se encontraban ya disponibles. Como resultado, el método de Wagner estuvo vigente durante varias décadas. La invalidez del método de Wagner fue demostrada experimentalmente cuando éste se aplicó en el sistema de transmisión norte americano de 345 kV construido a mediados de 1950 (\*7).

Desde entonces el método de Wagner ha tenido que ser abandonado y el M.E.G. se desarrolló como la alternativa (\*7).

La cantidad de información sobre la eficiencia del apantallamiento en términos de las salidas del sistema, expuestas como una función del ángulo del apantallamiento, ha sido obtenida previamente de experimentos de laboratorio sobre modelos en miniatura en subestaciones y líneas de transmisión. La aplicación de esta información en sistemas de extra alto voltaje ha dado como resultado un exceso de salidas por falla del apantallamiento. De ahí que se ha descartado por completo la práctica de confiar en la mala relación definida entre el ángulo de apantallamiento y la exposición del área a protegerse (\*1).

De otro lado es importante recalcar como el incremento en la capacidad de generación y transmisión en los sistemas de potencia, así como el tamaño físico en las subestaciones de alto y extra alto voltaje está aumentando progresivamente. Siendo esta otra de las razones, por las que surge la duda de si son o no todavía aplicables los métodos convencionales en el diseño del apantallamiento para las subestaciones grandes. Considerando además que el número de descargas sobre una área es proporcional a su tamaño por lo que el riesgo de falla del apantallamiento incrementaría en la misma proporción, y por otra parte las condiciones de poco perfil estético a las que se ven sujetas este tipo de subestaciones involucra en gran parte un grado una dificultad para determinar el correcto ángulo de apantallamiento (\*1).

Por lo tanto, el problema se reduce a plantear una estimación real de la colocación eficiente del esquema de apantallamiento, no conformándose con la práctica convencional. En resumen, se presenta la necesidad de un método que permita una razonable precisión en la evaluación del verdadero riesgo de falla del apantallamiento en las subestaciones, donde esquemas con áreas desprotegidas podría interferir seriamente con los resultados esperados, además es indispensable que los requerimientos del

apantallamiento, para conseguir una alta seguridad de la subestación, se determinen con el suficiente grado de confianza (\*1).

### 1.3.2. PROPUESTA DE ABDUL M. MOUSA

Mousa (\*7) desarrolló un programa digital para el diseño del apantallamiento de subestaciones, basado en su publicación para el modelo electrogeométrico (\*5). A continuación se presenta en forma general el procedimiento propuesto :

#### ANALISIS DEL MODELO ELECTROGEOMETRICO:

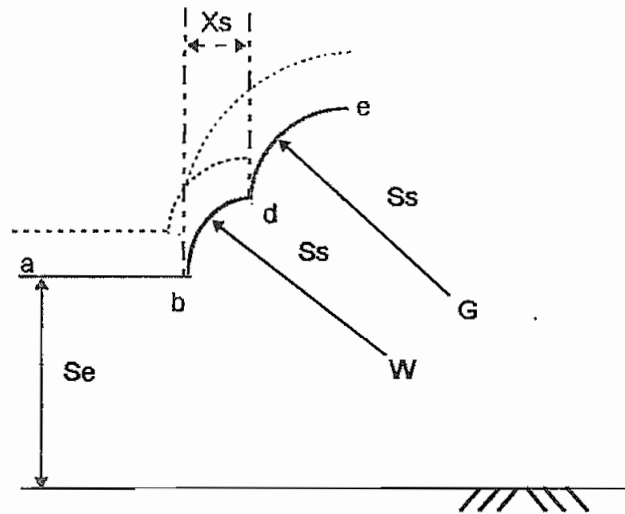


FIG. 1.1 LUGAR GEOMETRICO DEL APANTALLAMIENTO PARA EL CASO DE 2 CABLES. PROPUESTO POR A. MOUSA

Mousa realiza una clara diferencia entre las distancias críticas de arqueo (distancias de arqueo o simplemente de choque, véase numeral 2.2), dependiendo del elemento analizado, y cuyos factores que las relacionan se determinan bajo calibraciones empíricas :

$S = B * (I^b)$  : Ecuación general para la distancia de arqueo

B, b constantes determinadas experimentalmente

$Se = Ke * S$  : Distancia de arqueo a tierra

$Ss = Ks * S$  : Distancia de arqueo a cables

$St = Kt * S$  : Distancia de arqueo a estructuras verticales(mástiles)

Se propone una configuración como la mostrada en la figura(1.1), en la que el cable W será apantallado por el cable G, excepto por las descargas que lleguen sobre la superficie bd. Asumiendo que las descargas descienden en forma vertical, la exposición del cable W a las descargas de amplitud "I" puede ser proporcional a la distancia  $X_s$ .

Una característica geométrica importante de la fig(1.1) es que disminuyendo la distancia de arqueo del cable de protección ( $S_s$ ), aumenta la superficie expuesta  $X_s$ , y por otro lado incrementando gradualmente esta distancia se reduce la superficie de exposición  $X_s$  hasta que esta se hace cero, estado para el cual surge el concepto de una descarga de amplitud " $I_c$ " (llamado corriente crítica). Este efecto se muestra por las líneas segmentadas de la figura en mención.

Para descargas de amplitudes mayores a  $I_c$ , el cable W será "apantallado", por lo tanto, lo dicho muestra que el apantallamiento puede ser garantizado, solamente frente a descargas que excedan a un cierto valor crítico de corriente  $I_c$ . Las descargas más débiles serán las que pueden causar fallas en el apantallamiento. El nivel de aislamiento de la subestación debe ser capaz de tolerar los sobrevoltajes originados por todas aquellas corrientes de magnitudes menores o iguales a la corriente crítica  $I_c$ .

Basado en el concepto de la corriente crítica " $I_c$ " Mousa propone :

$$S_c = 7.2 * I_c^{0.65} \quad (1.1)$$

Donde :  $S_c$  es la distancia crítica de arqueo general dada para la corriente crítica  $I_c$ .

La altura a la que se colocarán los cables de guardia la determina con la siguiente ecuación :

$$b = S_c - \sqrt{S_c^2 - d^2} \quad (1.2)$$



Donde  $d$  : es la mitad de la distancia que existe entre los cables de guardia ( $2d$ ), mostrada en la figura(1.2) .

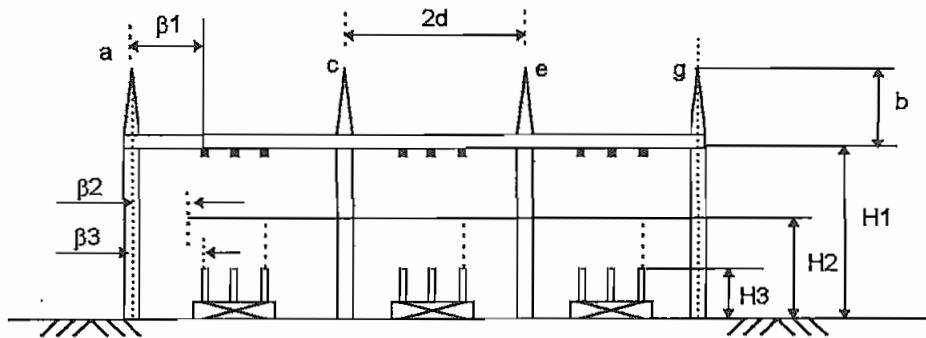


FIG. 1.2 DIAGRAMA DE UNA SUBESTACION TIPICA PARA PROPOSITOS DEL PROGRAMA DE A. MOUSA

Para determinar el límite práctico de la separación entre cables de guardia adyacentes, Mousa dice:

$$2d_{\max} = 1.5 S_c \quad (1.3)$$

Si se usan mástiles para apantallar la subestación, entonces se tiene(\*7)

$$b = K_t \cdot S_c - \sqrt{(K_t \cdot S_c)^2 - d^2} \quad (1.4)$$

Donde :  $1 \leq K_t \leq 1.2$ ,  $K_t = 1.2$  para mástiles

$K_t = 1.1$  para torres verticales

$K_t = 1$  para cualquier otra estructura vertical

$$y, \quad d = \sqrt{d_1^2 + d_2^2} \quad (1.5)$$

$2d_1$  y  $2d_2$  son las dimensiones del rectángulo que define el área de la subestación, y en cuyas esquinas se debe colocar los mástiles.

## EXPOSICION DE LAS DESCARGAS QUE LLEGAN SOBRE LOS LADOS DE LA SUBESTACION.

La figura(1.3) está basada en la geometría del apantallamiento crítico mostrado por las líneas punteadas de la figura(1.1). Conociendo la

altura de los cables de guardia (determinada en base a la estructura de mayor tamaño de la subestación) y el valor de la distancia crítica de arqueo "Sc", el punto C en la figura(1.3) queda determinado. Usando este punto (C) como centro se dibuja un círculo de radio Sc.

El cable G proporcionará un apantallamiento efectivo para cualquier punto localizado fuera del círculo trazado y la condición para dicho apantallamiento estará dada por :

$$\beta \leq \psi \quad (1.6)$$

Seleccionando adecuadamente la localización de los ejes X y Y como se muestra en la figura(1.3), tenemos:

$$\psi = X_g - X_z \quad (1.7)$$

Aplicando la ecuación del círculo se obtiene :

$$\psi = \sqrt{Sc^2 - (Sc - H_g)^2} - \sqrt{Sc^2 - (Sc - H_w)^2} \quad (1.8)$$

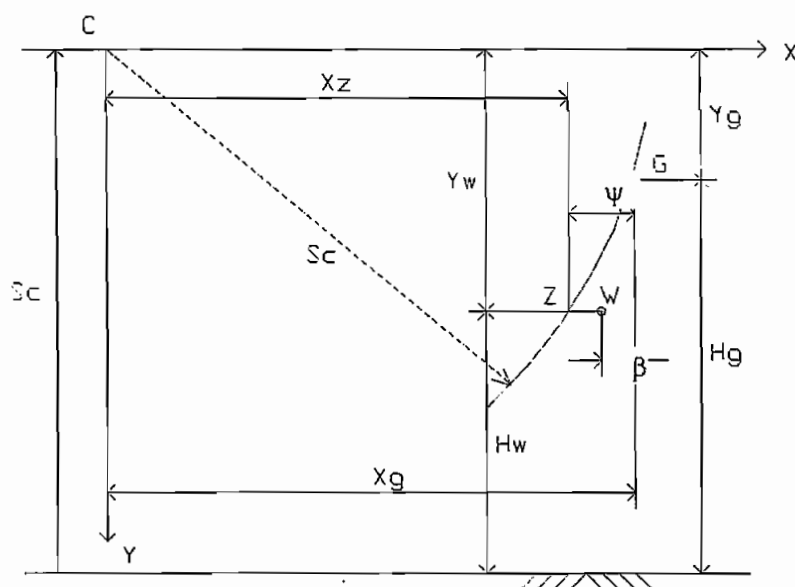


FIG.1.3 ANALISIS DE LAS DESCARGAS QUE DESCENDAN SOBRE LOS LADOS DE LA SUBESTACION . ESQUEMA PROPUESTO POR A. MOUSA.

Se puede ver que los requerimientos para el apantallamiento efectivo frente a las descargas que arriben directamente sobre la subestación son independientes de la altura del objeto a proteger según las expresiones (1.2,1.4). Pero por otro lado, la exposición para las descargas que arriben sobre los lados de la subestación se incrementa cuando la altura del elemento que se desea proteger también lo hace (fig 1.3, ec.1.8).

Para el caso de mástiles, la expresión 1.8 es equivalente a :

$$\psi = \sqrt{Kt^2 * Sc^2 - D_3^2 (Sc - Hm)^2} - \sqrt{Kt^2 * Sc^2 - (Sc - Hw)^2} \quad (1.9)$$

Donde:  $D_3$  = La distancia entre  $d_1$  y  $d_2$  definidos en el pie de la ecuación 1.5

$Hm$  = La altura del mástil o  $Sc$  si resulta ser menor.

Si los resultados revelan que existe alguna exposición, y  $Hg$  (altura del cable de guardia, fig. 1.3) es menor que  $Sc$ , se puede resolver el problema incrementando el valor de  $Hg$ , hasta conseguir un apantallamiento efectivo y  $Hg$  alcance el valor de  $Sc$ .

Un juicio crítico sobre la aplicación de este procedimiento se presenta en la sección 1.4.

### 1.3.3. METODO APLICADO POR MAX MOLINA

En el trabajo realizado por Max Molina : "Apantallamiento de subestaciones. Diseño y evaluación mediante métodos digitales" (\*2) se han empleado fundamentalmente los criterios dados por H. Linck (\*1); y en base a estos se desarrolló un programa digital mediante la ayuda del método de Monte-Carlo y la técnica del modelo electrogeométrico propuesto por Whitehead.

Es importante aclarar que ciertos parámetros, empleados en este trabajo, deben indudablemente ser actualizados, tal es el caso de la curva de probabilidad de corriente para las descargas a tierra, ya que la empleada por Máx Molina no expresa probabilidades reales para corrientes que hoy en día se consideran totalmente factibles de ocurrir, y además el valor medio de dicha curva no sobrepasa los 15 kA. (ver fig. 1.4) (\*2)

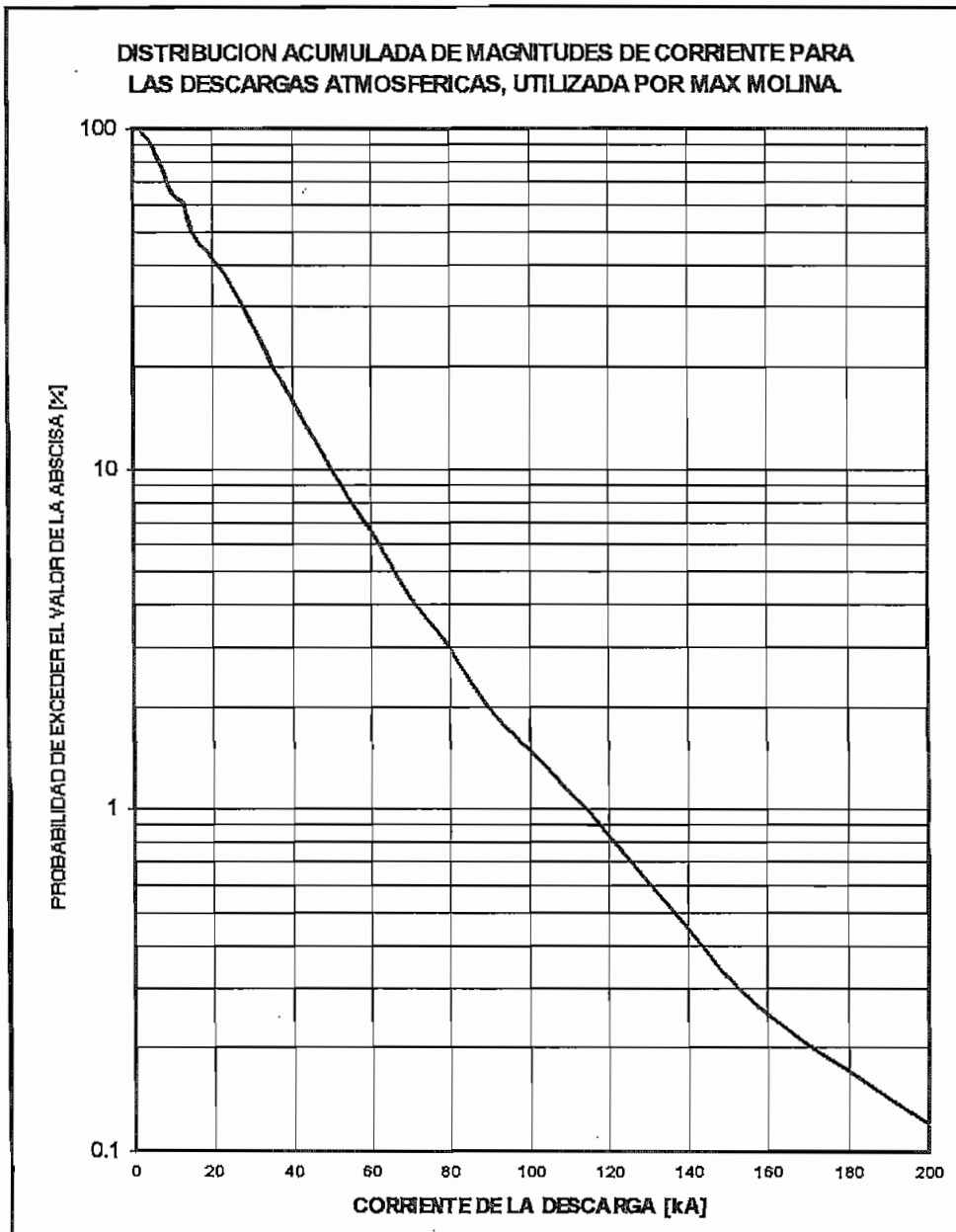


FIG. 1.4 CURVA DE DISTRIBUCION DE PROBABILIDADES PARA LA CORRIENTE DE RAYOS PROPUESTA POR LA AIEE Y EMPLEADA EN EL TRABAJO DE MAX MOLINA.

Otro de los parámetros que debe ser analizado más detalladamente es la determinación de la distancia crítica de arqueo, base fundamental en la aplicación del modelo electrogeométrico. Es necesario mencionar que esta ecuación ha sido objeto de muchos estudios y calibraciones y que hoy en día se cuenta con un gran número de expresiones que fundamentalmente lo que han pretendido es discriminar entre la distancia crítica de arqueo a tierra, y las que se puedan presentar dependiendo del componente analizado dentro de un sistema determinado, tal es el caso de los cables horizontales (cables de guardia), y estructuras verticales (mástiles). En el trabajo realizado por Máx Molina (\*2), no se considera este efecto dentro del cálculo del área efectiva de protección ni en la determinación del posible punto de incidencia de las descargas atmosféricas.

Por otra parte el diseño para el apantallamiento de una subestación, como ya se mencionó, se realiza fundamentado en los criterios de Linck (\*1), pero que se ven limitados al momento de pretender determinar la altura de los elementos de apantallamiento, sobre lo que él llamaba "plano de protección", y específicamente en el caso de los cables de guardia ya que se cuenta solamente con ciertos resultados expresados en forma gráfica producto de la simulación digital para la determinación del "riesgo de falla del apantallamiento", llamado así por Linck(\*1), y que relacionan dicho riesgo con la distancia protegida. Estos resultados fueron determinados únicamente para la utilización de cables de guardia de una longitud de 30.48 m. Los justificativos dados por Linck (\*1), tienen que ver con el procedimiento que él recomienda seguir en la etapa de diseño del apantallamiento, en la que sugiere se divida el área de la subestación previamente aproximada a un rectángulo, en "n" subáreas iguales, para sobre éstas asumir la colocación de los elementos de protección. Contando únicamente con datos para un cable de guardia de 30.48 m.(100 pies) debe procurarse que las áreas en las que se dividió a la subestación tengan uno de sus lados múltiplo de ésta longitud. Desde un punto de vista más objetivo debemos tener claro que al momento de dividir el área de una subestación difícilmente conseguiremos hacerlo en

proporciones iguales, y por el contrario podrían presentarse diversas situaciones en las que éstas no tengan uno de sus lados múltiplo de 30.48 m.

Un evento adicional que es necesario tomar en cuenta, y que se analizará de una manera crítica en las secciones 1.4 y 3.2.2, es la aplicación del método de Monte-Carlo utilizado para el programa digital (\*2) en el que se permite realizar una comprobación de los esquemas de apantallamiento mediante la simulación aleatoria de las descargas atmosféricas en un período de tiempo previamente establecido. En el caso que aquí se estudiará, puede reducirse en gran parte la aleatoriedad del fenómeno introduciendo una concepción diferente para las curvas de distribución de frecuencia de la corriente a rayos a tierra. La utilización de combinaciones estadísticas para la simulación de eventos, tales como la probabilidad de que una tormenta eléctrica ocurra sobre el sistema modelado, o la probabilidad de que una descarga de dicha tormenta descienda sobre la subestación, entre otros; han sido concebidos de una manera distinta, evitando la utilización de muchas variables con carácter aleatorio, y tomando en cuenta únicamente el hecho de que ciertas descargas con un valor determinado de corriente (tomado de su curva de probabilidad), ocurrirán dentro del período de análisis que se desee estudiar.

En cuanto a las limitaciones del programa digital implementado por Molina(\*2), se puede mencionar que no se permite analizar comparativamente los resultados que puedan presentarse considerando que dos o más elementos de protección se han colocado sobre estructuras de diferente altura, además la forma general de la subestación que será apantallada puede ser solamente aproximada al área de un rectángulo. Por lo que se puede concluir que aquellas subestaciones que poseen dos o más patios a diferente nivel y cuya forma no sea rectangular difícilmente pueden ser evaluadas con la ayuda de este programa.

No se debe por último dejar de mencionar que mas allá de todos los factores que ciertamente deben ser actualizados o interpretados de otra

manera, la tesis de Max Molina (\*2) ha sido base fundamental en el desarrollo del presente trabajo.

#### 1.4. CONCEPTUALIZACION ACTUALIZADA DEL PROBLEMA

La idea de un análisis de sensibilidad se presenta con el afán de poder evaluar la influencia que ciertas variables y parámetros, que necesariamente se ven involucrados en el proceso que se desarrolla desde la formación de una descarga, hasta que ésta termina su trayectoria sobre un algún objeto ubicado en tierra. Por otro lado también pretende proporcionar al diseñador una guía de recomendaciones en cuanto a las posibles configuraciones que puedan tener los elementos de protección, para que de este modo no se incurra en esquemas de apantallamiento que puedan resultar desfavorables en los resultados a esperarse.

El programa digital implementado en el presente trabajo tiene como premisa fundamental el permitir que sus usuarios puedan manipular muchos de los factores que intervienen en los diseños del apantallamiento de una subestación, de tal manera que se puedan obtener resultados lo suficientemente confiables y seguros.

La base fundamental que se debe seguir para el desarrollo de un sistema de apantallamiento, tiene que ver exclusivamente con la descripción objetiva que se pueda tener respecto del comportamiento de las descargas atmosféricas; y, se ha demostrado que el modelo electrogeométrico describe este fenómeno de una manera muy acertada. Por esto se ha escogido esta técnica para los análisis subsiguientes del presente trabajo.

En la aplicación del modelo electrogeométrico (M.E.G.) para subestaciones dos propuestas aparecen en la literatura (\*7) :

- Diseño de un esquema de apantallamiento que no involucre un riesgo de posibles perforaciones del blindaje. Esta es la propuesta de A. Mousa (\*7) presentada en la sección 1.3.2

- Diseño de un apantallamiento que permite la posibilidad de una falla del blindaje durante un período de análisis previamente establecido. Este es el mecanismo propuesto por Linck (\*1).

Aparentemente la propuesta planteada por Mousa (\*7), resulta ser la más conveniente, pero si se trata de entender el proceso de formación de una descarga y su posible punto de incidencia, explicados detalladamente en la sección 2.4.5, se puede comprender que un supuesto apantallamiento efectivo podría involucrar que los elementos de protección sean ubicados en niveles extremadamente altos, lo que no puede ser permitido desde el punto de vista de ingeniería, ya que además incrementaría en forma excesiva los costos del blindaje (\*4). Por otro lado el admitir un riesgo de falla del apantallamiento ha sido ratificado como aceptable por un grupo de trabajo de la IEEE en los reportes presentados en su artículo publicado en 1993 (\*9).

Sin embargo se debe dejar claro que la propuesta de Linck (\*1), se fundamenta en procesos estadísticos, y por tanto se requiere que los sistemas analizados sean lo suficientemente grandes. En el caso de una línea de transmisión esto no involucra un problema, ya que por lo general éstas se extienden sobre grandes longitudes; pero en el caso de subestaciones se deberá tener muy en cuenta esta situación. Una solución a esta incertidumbre se puede dar considerando que los períodos de estudio que se requieren al diseñar un apantallamiento según lo propuesto por Linck (\*1) deberán ser considerablemente mayores a los que se podrían plantear en una línea de transmisión.

Hablando del modelo que se ha planteado para el diseño del apantallamiento, se debe mencionar uno de los aspectos importantes que se seguirá manteniendo según lo propuesto por Linck (\*1), y es la consideración



de un "plano horizontal imaginario", ubicado a una altura igual a la del elemento más elevado de la subestación. Este plano horizontal imaginario es un modelo (grueso) de los elementos y equipo más altos de la subestación, que por lo general resultan ser cables desnudos en posición horizontal cuyo conjunto puede ser aproximado a un plano (conductor) expuesto. En lo posterior se hará referencia simplemente como el "plano expuesto de la subestación", ubicado imaginariamente a una altura  $H_0$ , sobre el área que se desea proteger (ver sección 2.4.5). A partir de este plano se colocarán los elementos protectores sean éstos cables de guardia y/o mástiles, las justificaciones más objetivas que se puedan presentar para este análisis, son las siguientes (\*7):

- El nivel de la estructura o elemento de mayor altura por lo general apantalla los elementos que se encuentran bajo él.
- Los elementos de mayor altura están proporcionalmente más expuestos a los rayos.

En lo referente al diseño mismo del apantallamiento, el procedimiento a seguirse será similar al planteado por Linck (\*1), y que posteriormente fue aplicado por Max Molina (\*2). Pero se introducirá una cierta modificación en cuanto a su real aplicación, ya que inicialmente Linck (\*1) proponía que el área de la subestación previamente aproximada a un rectángulo, sea dividida en "n" subáreas iguales, sobre las que se asumiría la colocación de los elementos de protección (cables de guardia y/o mástiles). El paso final consistía en determinar la altura a la que serían ubicados dichos elementos, para esto Linck(\*1) proponía el uso de ciertas curvas que relacionan lo que él llamaba riesgo de falla del apantallamiento, y que en lo posterior se definirá de mejor forma como "período de protección del apantallamiento" (ver sección 2.4.6) con la distancia protegida por cada elemento de guardia, sin embargo éstas curvas en el caso de los cables, están limitadas al empleo de un conductor de apantallamiento de 30.48m (100pies) de longitud, por lo que

se hacía necesario que las subáreas mencionadas sean protegidas por conductores cuya medida sea múltiplo de este valor. Lo que se pretende en el presente trabajo es aplicar todos estos criterios, pero permitir que el diseñador pueda subdividir el área de la subestación a su conveniencia y no necesariamente en partes iguales. Para esto se le presenta la oportunidad de utilizar resultados tabulados numéricamente o en forma gráfica, y que se podrán obtener de una simulación digital que evalúa el período de protección del apantallamiento relacionándolo con la distancia protegida por el elemento en análisis y que para el caso específico de cables de guardia pueden ser obtenidos utilizando la longitud de estos conductores que se considere más apropiada. Una descripción más completa del procedimiento a seguirse se detalla en la sección (3.1.3).

En cuanto al modelo electrogeométrico, y la definición de las expresiones que determinan la distancia y el área protegida por un cierto elemento de guardia, en el presente trabajo se mantendrá en forma general las propuestas presentadas por Whitehead y Linck respectivamente, y que posteriormente fueron implementadas en el trabajo de Máx Molina (\*2). Sin dejar de lado el hecho de que actualmente la distancia crítica de arqueo (distancia de choque) - base fundamental del modelo electrogeométrico - ya no se la considerará como una única expresión, sino que mas bien depende del objeto o estructura que se esté analizando, tal es el caso de la distancia crítica de arqueo a tierra, cables, o mástiles (\*7). Por otro lado se debe mencionar que el modelo planteado resulta ser muy objetivo y sus fundamentos básicos han sido ratificados por un grupo de trabajo de la IEEE(\*9), e incluso en algún momento por el mismo Mousa(\*6).

Para la verificación del diseño del apantallamiento se ha propuesto la implementación de un programa digital, según lo planteado en la referencia(\*2), que permita simular durante un determinado período de análisis, un variado grupo de descargas atmosféricas cuyas magnitudes de corriente serán definidas según su curva de distribución de frecuencia. Este procedimiento resulta ser de gran ayuda para detectar posibles zonas

desprotegidas, o en su defecto sobreapantalladas, de tal manera que el ingeniero de diseño pueda tomar las precauciones del caso, o incluso practicar nuevos diseños. Además en forma complementaria al trabajo presentado en la referencia(\*2) se permitirá la modelación de una subestación que no necesariamente se pueda definir con un rectángulo de área conocida, donde incluso se podrá considerar la presencia de patios dentro de la estación ubicados a diferentes niveles. Por último se ha dejado la posibilidad de simular el efecto e influencia que puedan tener ciertos elementos (cables y/o estructuras verticales, que no formen parte de la instalación) sobre el período de protección del apantallamiento.

En contraparte al procedimiento seguido por Max Molina y que se basa en la aplicación del método de Monte-Carlo para la realización del programa digital que se acaba de mencionar, en el presente trabajo lo que se ha pretendido es evitar en lo posible el empleo de variables aleatorias, de ahí la no utilización del método de Monte-Carlo. En definitiva lo que se ha tratado es de darle un carácter mas objetivo al análisis, de tal manera que no interese el momento en el que se produzca una descarga de corriente previamente conocida en forma aleatoria, o en qué año pudo haberse dado una falla del esquema de apantallamiento, si no más el hecho de que conociendo (en base a la densidad de descargas a tierra, o en su defecto del nivel cerámico) el número total de rayos que se producirán sobre la subestación en un determinado período de tiempo, se pueda determinar según la curva de distribución de probabilidad de corrientes expresada en forma discreta tal como se muestra en la figura (1.5)(\*1), la cantidad de descargas de un cierto valor de corriente, fijadas por intervalos de acuerdo a su probabilidad de ocurrencia, que descenderán sobre la instalación. Para de esta manera y para cada uno de estos grupos evaluar la efectividad del apantallamiento.

Para determinar el punto de corte entre la trayectoria de una descarga y lo que denominaremos superficies de exposición (cuando se trate del plano expuesto de la subestación, áreas a proteger), o superficies interceptoras (escudos) cuando se trate de los elementos de guardia, se seguirá el

procedimiento desarrollado en la referencia(\*2), ya que resulta ser muy loable de acuerdo a los requerimientos planteados como objetivo de este trabajo.

### CARACTERISTICAS DE LA CORRIENTE A TIERRA DE LAS DESCARGAS

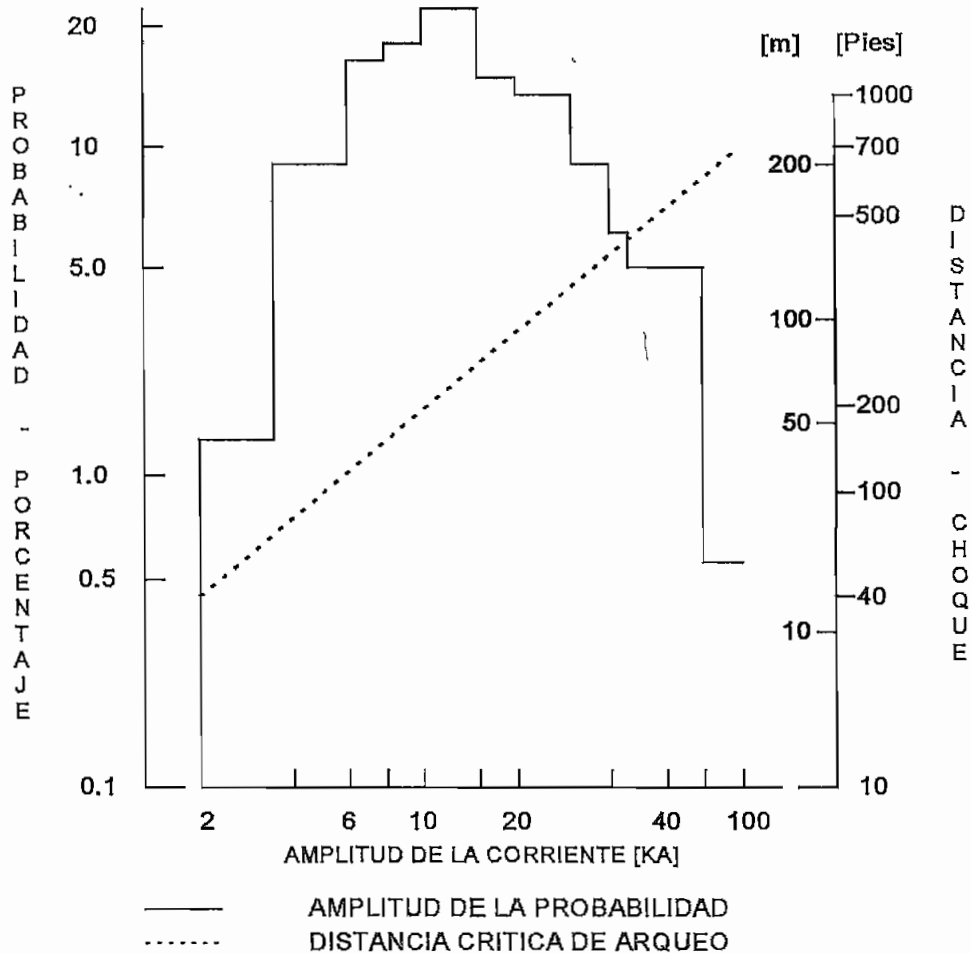


FIG. 1.5 CARACTERISTICAS DE LAS DESCARGAS ATMOSFERICAS. ESQUEMA PROPUESTO POR LINCK (\*1)

El modelo analítico en su totalidad será descrito en forma más detallada en el siguiente capítulo.

## CAPITULO II

### *FORMULACION DE UN MODELO PARA EL APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES DE POTENCIA*

#### 2.1. CONSIDERACIONES GENERALES

Como se mencionó en el Capítulo I, las limitaciones de la práctica convencional en el diseño del apantallamiento aplicado a líneas de transmisión y subestaciones de alto y extra alto voltaje, ha obligado a los investigadores a formular modelos alternativos entre los que ha sobresalido notablemente el modelo electrogeométrico (\*7).

La técnica desarrollada por Linck (\*1) para el diseño del apantallamiento de subestaciones ha sido una de aquellas, que ha tratado de reemplazar las propuestas convencionales que pretendían confiar en una mala relación definida entre el ángulo de apantallamiento y el área expuesta de una subestación. El modelo aquí planteado está basado en gran parte en la propuesta de Linck (\*1), que posteriormente fue complementada por Max Molina (\*2) a través del modelo electrogeométrico de Whitehead.

El método de Linck (\*1) es particularmente adecuado para evaluar sistemas de apantallamiento en subestaciones grandes, con altos requerimientos de seguridad. El número de descargas sobre una subestación de mediano tamaño es por lo menos de un orden de magnitud menor que el número de descargas a una línea de transmisión de longitud media, por lo tanto, el período de observación para una subestación tendrá que ser considerablemente mayor, de tal manera que se pueda acumular datos lo suficientemente confiables sobre las fallas de apantallamiento. Por ejemplo si una subestación apantallada es impactada por un rayo una vez cada año, y si una de cada cien descargas causa la salida por falla del apantallamiento, siendo la exposición del 1 % , entonces puede decirse que una falla del

apantallamiento podría ocurrir en cien años. Por otro lado si cada milla de una línea de transmisión intercepta una descarga cada año, y si la exposición es también del 1%, entonces una línea de 100 millas podría experimentar una falla del apantallamiento cada año (\*1).

## 2.2. NATURALEZA DE LAS DESCARGAS ATMOSFERICAS

Las descargas atmosféricas fueron identificadas como de origen eléctrico, ya se hace mucho tiempo por Benjamín Franklin, sin embargo es a raíz de los efectos destructivos que han provocado sobre muchas instalaciones y de hecho sobre los sistemas eléctricos de potencia construidos a la intemperie, que se les prestado un notable interés (\*3).

Se entiende como descarga atmosférica aquel sobrevoltaje de origen externo, es decir independiente del voltaje de servicio de un sistema determinado, que se produce por la transferencia súbita de la carga eléctrica acumulada entre una nube y otra nube, o entre una nube y tierra (\*4).

Para propósitos del presente estudio se analizará solamente a las descargas directas que se producen entre una nube y tierra, y se las tratará simplemente como rayos.

Por otro lado se define a un rayo como un gigantesco arco eléctrico resultante de una diferencia de potencial de millones de voltios producido por la separación de cargas positivas y negativas (\*3).

La acumulación de carga en las nubes se origina por el roce de éstas con las corrientes de aire circundantes en el medio, que por lo general son de muy variadas temperaturas. La distribución más probable de la carga dentro de la nube consiste en la acumulación de cargas positivas en la parte superior y cargas negativas en la parte inferior, a manera de un condensador en el cual el dieléctrico está constituido por la parte central de la nube. Este efecto capacitivo se produce en iguales circunstancias y características entre

la parte inferior de la nube y tierra en la que se genera una acumulación de cargas positivas, conforme lo indicado en la figura(2.1) (\*4)

Cuando el gradiente de potencial generado en la nube por la acumulación de cargas es lo suficientemente alto, aproximadamente la tercera parte del gradiente de disrupción del aire seco a nivel del mar (30 kV/cm), la repulsión entre cargas de igual signo origina un desplazamiento de las cargas negativas hacia abajo, a través de lo que llamaremos canales descendentes, los mismos que a la vez crecen o avanzan verticalmente y se despliegan lateralmente en forma aleatoria, debido a efectos electrostáticos y del viento, prolongándose unas veces y cortándose muchas otras (\*3)(\*4).

El primer desprendimiento de cargas negativas que se origina desde la nube pierde rápidamente su energía porque en su descenso va depositando cargas negativas a lo largo de su camino lo que significa una reducción en su voltaje, pero al mismo tiempo va dejando un canal altamente ionizado por el cual van produciéndose descargas sucesivas que llegan cada vez más lejos, en pasos de aproximadamente 50 m. La velocidad promedio de propagación es alrededor de 150 Km/s. Si la distancia entre una nube y tierra es de 3000 m. la descarga demorará unos 20 ms en llegar al suelo (\*3).

Entre todos los canales descendentes hay uno que prevalece sobre el resto, acercándose cada vez más a la tierra. A éste se le conoce como LIDER, y en su máximo crecimiento llega hasta unos cientos de metros desde la tierra (\*4).

Como contraparte a los canales descendentes, desde tierra y con bastante posterioridad a su aparición, se forman los llamados canales ascendentes que se originan en todos aquellos objetos o estructuras situados sobre el suelo, debido en ciertas ocasiones al elevado gradiente de potencial generado por el EFECTO DE PUNTA de las mencionadas estructuras y que de hecho tiene que ver con la proximidad a la que se encuentra el LIDER que

indudablemente va a inducir alrededor de su zona de influencia cargas positivas (fig. 2.1) (\*4).

El LIDER en su descenso actúa básicamente solo, es decir inadvertido de la influencia de los objetos de tierra, impulsado únicamente por la repulsión de las cargas acumuladas en la nube, hasta alcanzar cierta distancia respecto de los canales ascendentes y a través de la que se produce una fuerte interacción que llega a su punto crítico cuando dicha distancia bordea las decenas y hasta centenas de metros, momento en el cual se produce la disrupción o descarga ya que se ha superado la rigidez dieléctrica del aire. La distancia final a la que se produjo la descarga se llama DISTANCIA CRITICA DE ARQUEO y se considera que ocurrió entre el LIDER y un canal ascendente que se lo llamará de CONTACTO (\*4).

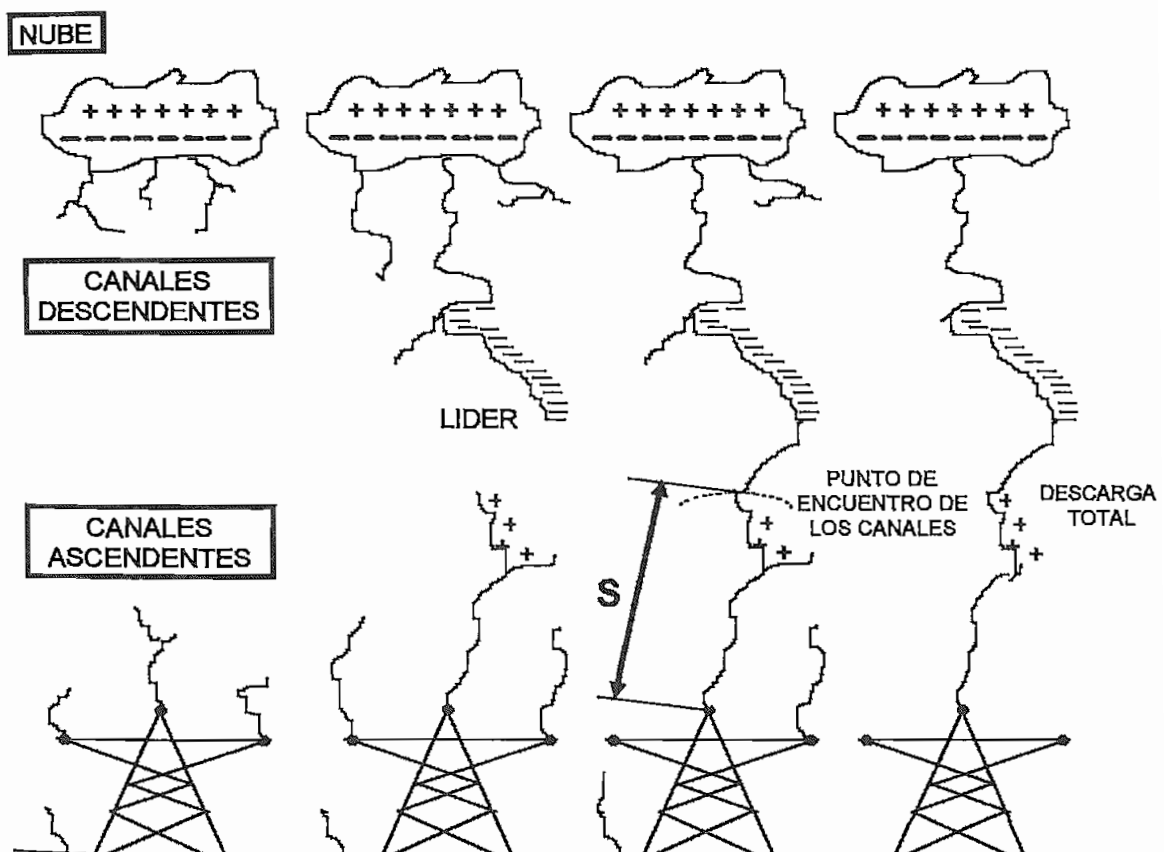


FIG. 2.1 PROCESO DE FORMACION Y PUNTO DE INCIDENCIA DE UNA DESCARGA ATMOSFERICA. SOBRE UNA ESTRUCTURA EN TIERRA (\*3).

El proceso final que se acaba de describir se desarrolla de una manera probabilística, ya que cualquier canal ascendente puede alcanzar la distancia



crítica de arqueo (\*4). Por otro lado el LIDER durante este evento puede sufrir cambios bruscos en su trayectoria y continuar el camino marcado por el canal de contacto, sin embargo se ha observado que la continuación de la trayectoria del líder, en el momento del contacto, en casos extremos llega a ser casi horizontal o aún retornar hacia las nubes donde finalmente se reabsorbe. En cuanto al canal ascendente de contacto este obviamente continuará el camino trazado por el LIDER (\*4).

Una descarga a tierra usualmente se presenta al ojo humano como un solo haz luminoso que algunas veces puede presentar variaciones en su intensidad. Fotografías obtenidas con cámaras especiales han revelado que estas descargas por lo general se ven seguidas por otras que viajan a lo largo del camino establecido por la primera de ellas a intervalos de 0.5 a 500 ms, este proceso puede repetirse muchas veces, ya que se ha comprobado que la coexistencia de cargas de ambos signos en el canal dejado por la primera descarga se convierte en un plasma eléctrico con propiedades conductivas. La presencia de este plasma entre nube y tierra puede llegar a persistir hasta por varios segundos. El desequilibrio electrostático presente en todo este proceso, podría incluso permitir que las cargas de otras nubes viajen a tierra a través del canal mencionado. Se ha observado que de un 30 a 80 % de las descargas tienen al menos dos componentes y cerca del 20 % de tres a cinco, pero se ha llegado a apreciar hasta 40 componentes en una misma descarga (\*3)(\*4).

### **2.2.1. CARACTERISTICAS DE LAS DESCARGAS ATMOSFERICAS**

Muchas investigaciones y estudios realizados en los últimos años han permitido tener ciertos conocimientos sobre las características y efectos de las descargas atmosféricas. Oscilogramas obtenidos de la corriente de los rayos han mostrado que ésta alcanza su valor máximo en unos pocos microsegundos (frente de onda), decrece a un valor medio en un tiempo de hasta 100 us. (amplitud media) y llega a cero en tiempos de hasta 400 us.(fig 2.2)(\*3).

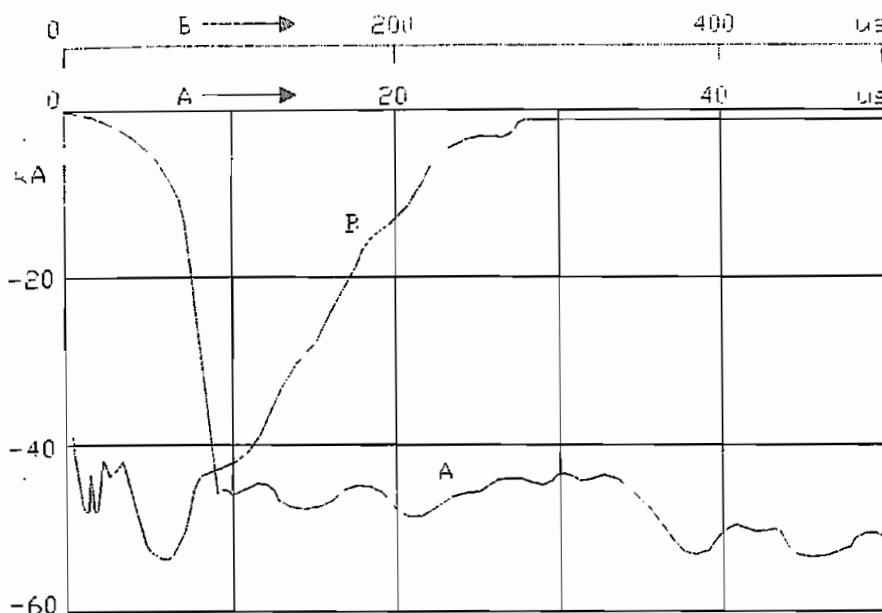


FIG.2.2 OSCILOGRAMA TÍPICO PARA LA CORRIENTE DE UNA DESCARGA ATMOSFERICA (\*3)

## 2.2.2. ESTADÍSTICA DE LAS DESCARGAS ATMOSFERICAS

La magnitud y período de una descarga son cantidades estadísticas que dependen de varios factores, entre ellos de la energía almacenada en la nube, y la diferencia de potencial entre nube y tierra al momento de producirse la descarga (\*3).

Por otro lado la intensidad de la corriente de los rayos es un factor fundamental en la salidas que se puedan producir por efecto de éstos en los sistemas eléctricos de potencia. Estas corrientes han sido estimadas mediante técnicas hasta cierto punto remotas. El sistema LLP(Lightning Location and Protection) para la protección y localización de los rayos que fue instalado en Ontario-Canadá con el objeto de proteger a los bosques, ha sido empleado con el propósito de determinar estas corrientes (\*10).

Este sistema registra remotamente los campos magnéticos radiados por las descargas producidas entre las nubes y tierra. La Distribución de corriente de las descargas atmosféricas se puede determinar usando estos campos, un eficiente algoritmo de localización de las descargas y un adecuado modelo de propagación del campo (\*10).

En el sistema LLP, el campo magnético se despliega en unidades LLP en lugar de Amperios/metro [A/m]. Por lo tanto debe hacerse una calibración de unidades mediante el uso de un factor de conversión apropiado, que será función de la forma de onda de los campos magnéticos registrados y su modelo de propagación. La calibración de este factor debe seleccionarse de tal manera que permita minimizarse los errores sobre el conjunto de datos obtenidos (\*10).

El mecanismo de localización de las descargas atmosféricas empleado en el sistema LLP ha permitido desarrollar un algoritmo computacional estructurado consiguiéndose así una mejor precisión sobre los resultados. Por último la determinación de la corriente de las descargas, se realizó usando un modelo actualizado para el análisis de la propagación del campo (\*10).

El modelo que ha sido empleado desde hace mucho tiempo hasta la actualidad asume que el campo magnético generado varía inversamente con la distancia, pero dicho modelo no toma en consideración los campos intermedios, las posibles variaciones de la conductividad de la tierra, y la ionósfera; donde el factor más significativo resulta ser la atenuación en la conductividad de la tierra. Todas estas limitantes pueden provocar que señal del rayo se atenúe alrededor del 65 % (\*10).

Varios modelos para propagación de campos están siendo investigados, sin embargo los mejores resultados se han obtenido considerando una relación exponencialmente inversa con la distancia. La mejora en estos modelos ha reducido la incertidumbre en la estimación de la amplitud de la corriente de las descargas atmosféricas del 25 % al 10 % (\*10). A continuación se presentan las curvas de distribución de frecuencia de la corriente de rayos que se obtuvieron en Ontario-Canadá usando los dos modelos de propagación del campo a los que se han hecho referencia, así como la curva propuesta por la CIGRÉ.

### 2.2.2.1. PROPUESTA DE UMAN

En la siguiente figura se muestran los datos registrados para la determinación de la curva de distribución acumulativa asumiendo el método de propagación del campo magnético generado entre las nubes y tierra, que varía inversamente con la distancia (\*10).

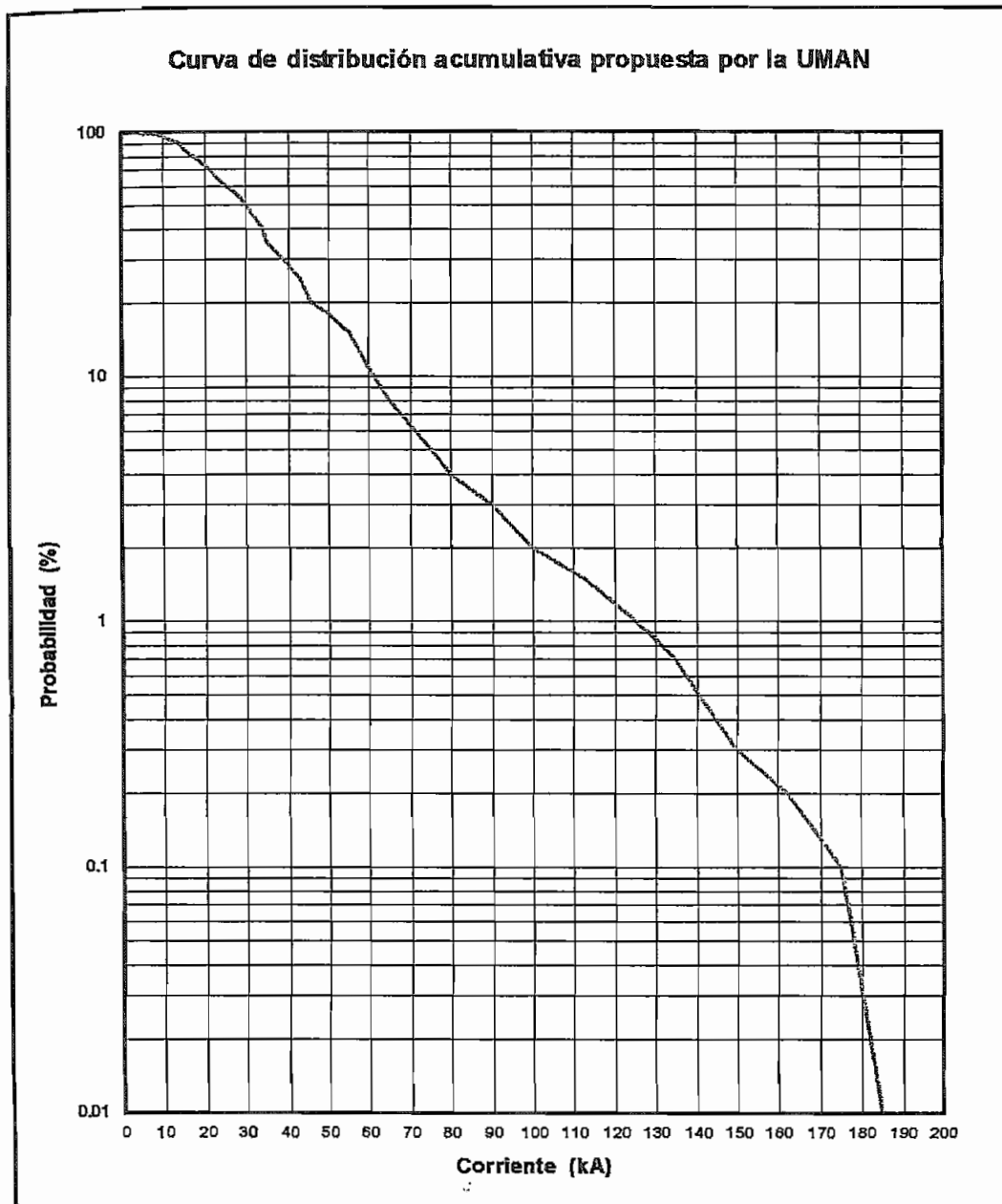


FIG. 2.3  
REFERENCIA (\*10)

### 2.2.2.2. PROPUESTA EXPONENCIAL DE : HERODOTOU, CHISHOLM Y JANISCHEWSKYJ

La siguiente figura muestra los datos para la determinación de la curva de distribución acumulada de la corriente de rayos, registrados en Ontario-Canadá por los autores mencionados con la ayuda del sistema LLP, y establecida bajo el método de la propagación del campo magnético que varía de una manera exponencialmente inversa con la distancia (\*10).

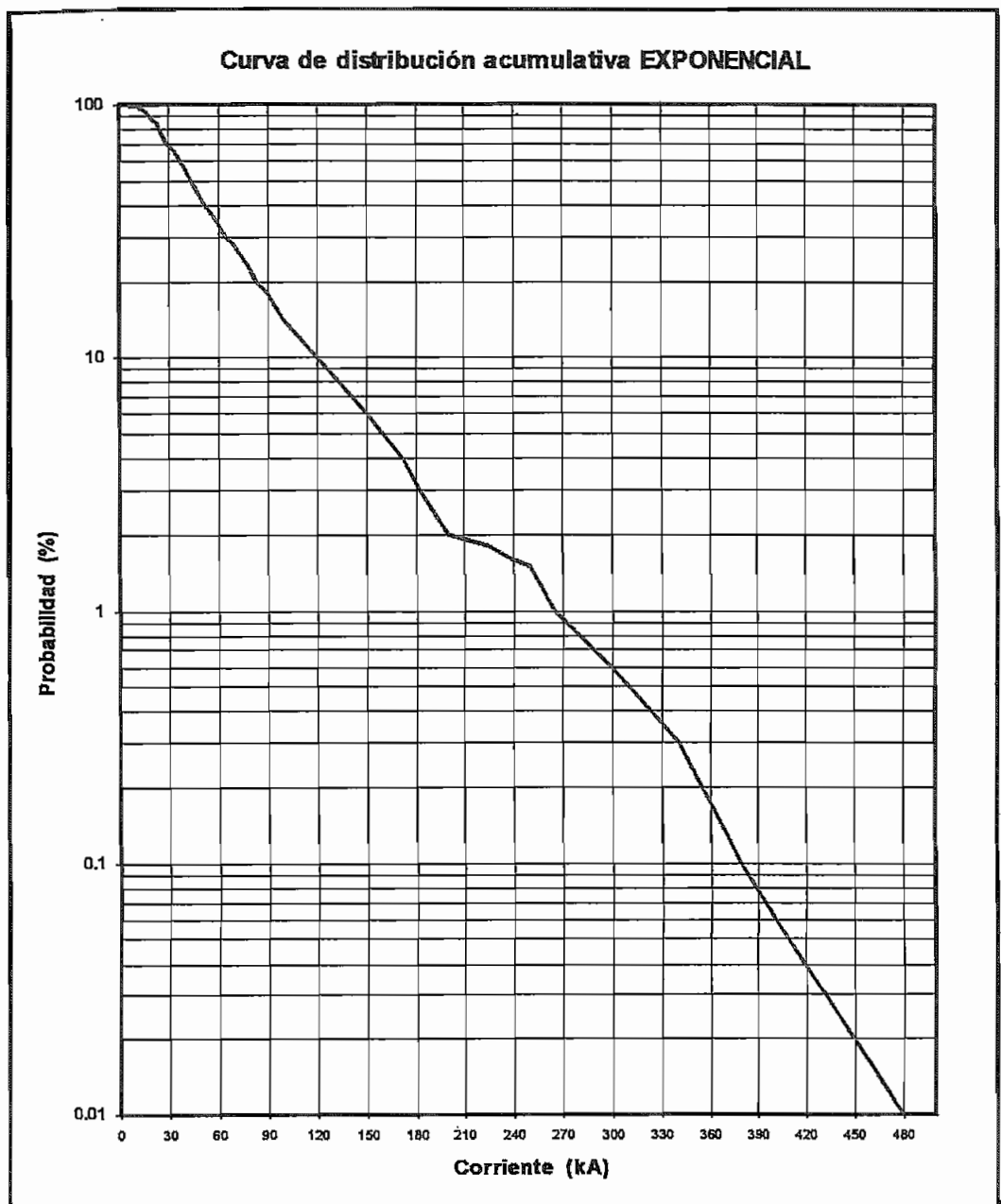


FIG. 2.4  
REFERENCIA (\*10)

### 2.2.2.3. PROPUESTA DE LA CIGRÉ

(Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques à haute tension)

Con el objeto de realizar un análisis comparativo entre las curvas más empleadas, introducimos la curva de distribución acumulada de la corriente de rayos a tierra propuesta por la CIGRÉ (\*10).

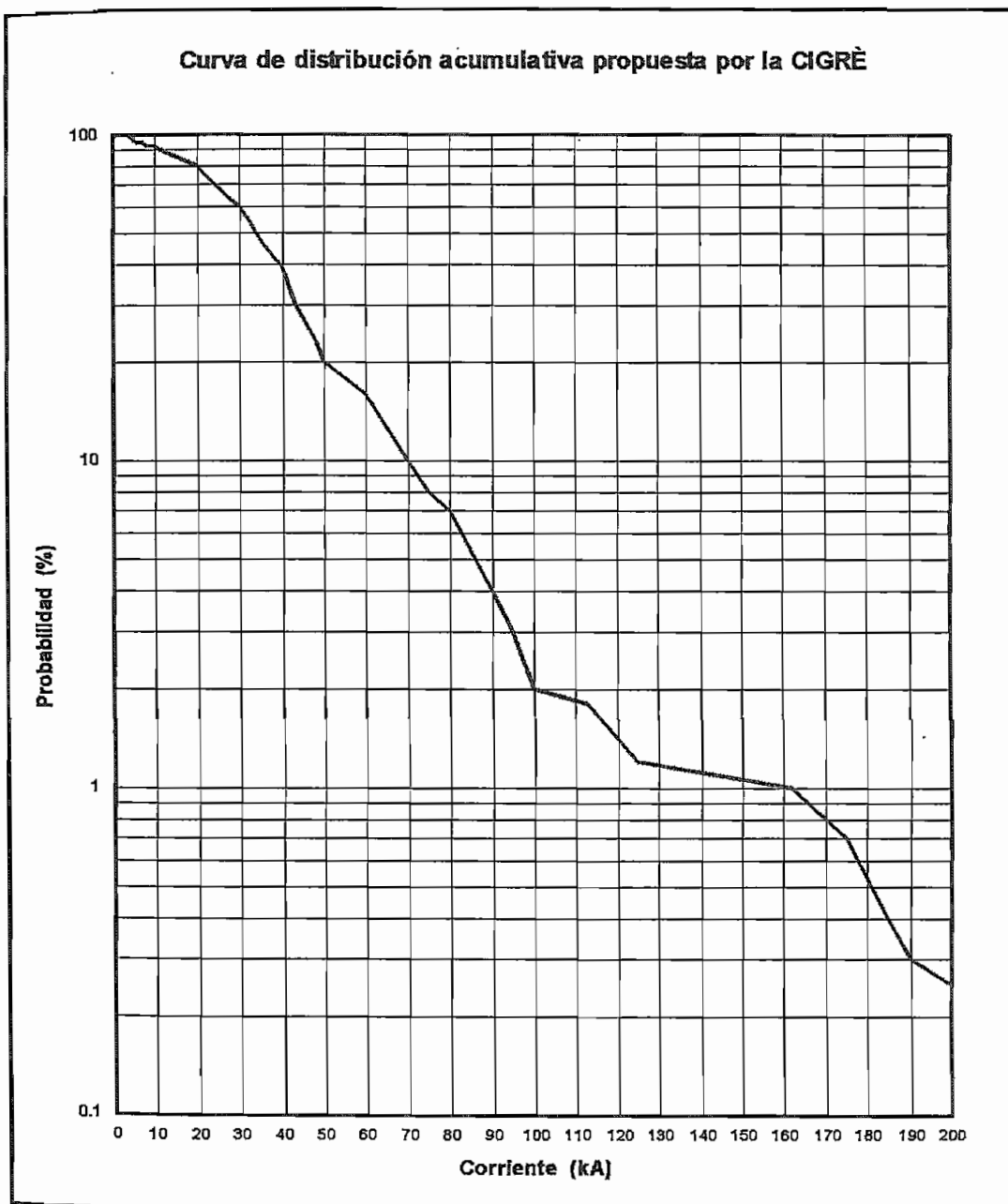
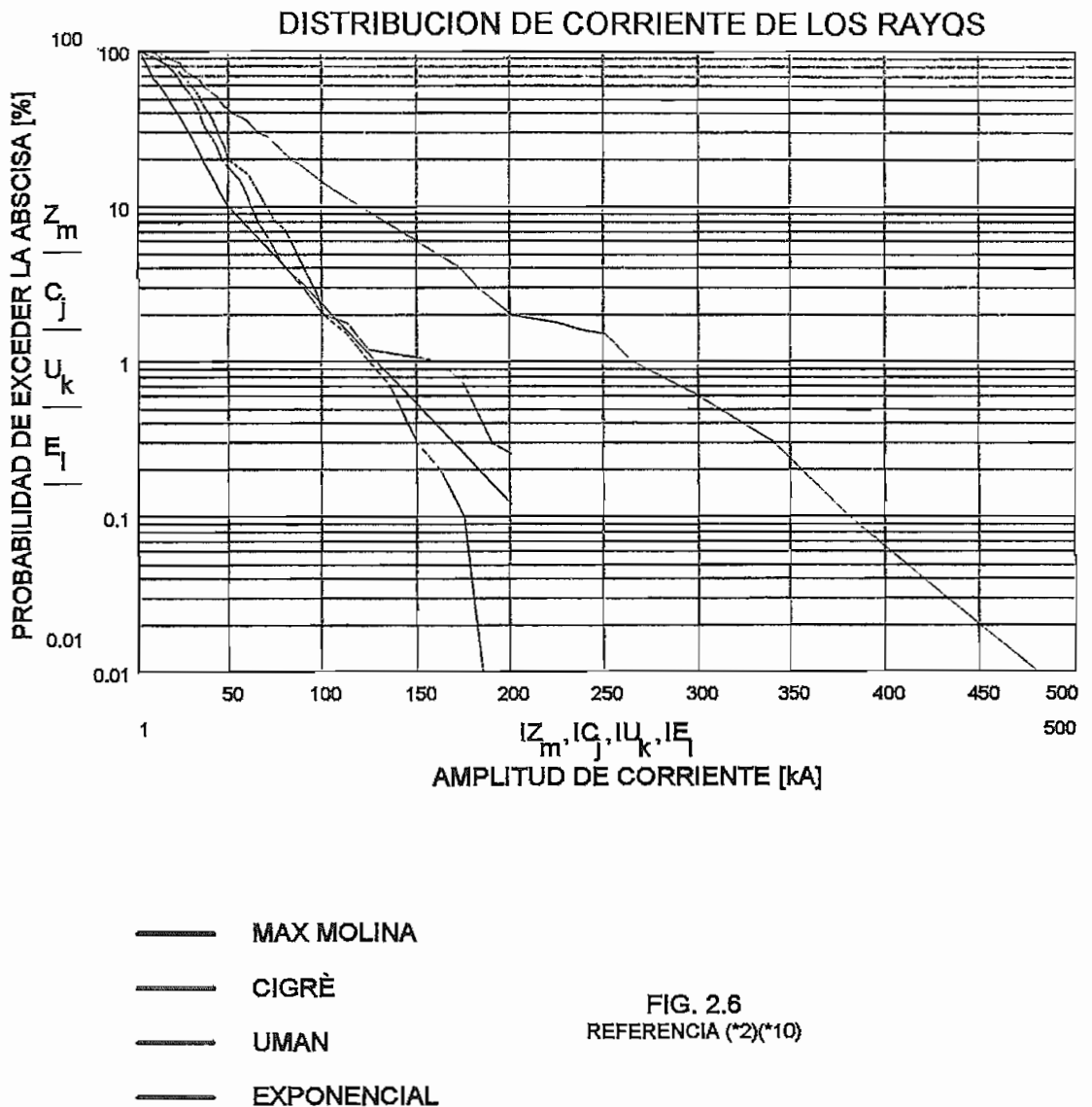


FIG. 2.5  
REFERENCIA (\*10)

En la próxima figura(2.2.6) se indican las curvas de distribución acumulativa para la corrientes de las descargas atmosféricas usando el modelo exponencial sobre los datos registrados en Ontario-Canadá, los resultados de Uman usando el modelo convencional, la curva presentada por la CIGRE y aquella que fue usada por Max Molina (\*2)(\*10).



Valor Medio de Probabilidad : CURVA EXPONENCIAL : 44 kA

Valor Medio de Probabilidad : CURVA DE UMAN : 30 kA

Valor Medio de Probabilidad : CURVA DE LA CIGRÈ : 34 kA

Valor Medio de Probabilidad : CURVA MAX MOLINA(AIEE) : 15 kA

Un aspecto muy importante respecto de todas las curvas presentadas, constituye la probabilidad media (valor medio) que éstas involucran, ya que como se ha mencionado la corriente de una descarga es un aspecto fundamental en el análisis del apantallamiento, de ahí que se hace necesario el hecho de considerar el comportamiento que pueda tener el modelo planteado en este trabajo con cada una de estas curvas.

### 2.3. MODELO ELECTROGEOMETRICO

En 1945 Golde desarrolló la primera versión del modelo electrogeométrico para calcular el número de descargas recibidas por los objetos en tierra, pero desafortunadamente nunca fue aplicado para el diseño de sistemas de apantallamiento. No es sino hasta 1963, en que Young implementó un modelo preliminar para analizar la efectividad de los cables de guardia ubicados sobre las líneas de transmisión (\*7).

Sin embargo fue Whitehead y otros investigadores quienes se comprometieron a desarrollar un programa para registrar las fallas del apantallamiento provocadas sobre las líneas de transmisión, y gracias a cuya información presentaron una versión final del modelo electrogeométrico en 1973 seguida de una pocas versiones intermedias. Poco después se levantaron serias dudas sobre la validez de este modelo, principalmente por las implicaciones que resultaban al considerar el efecto de la corriente media de las descargas atmosféricas sobre la altura de una estructura determinada. Varias versiones alternativas fueron sugeridas por algunos investigadores, que presentaban únicamente modelos más complejos pero que no resolvían el problema antes mencionado y que hasta ahora sigue siendo objeto de muchas investigaciones (\*7).

Para efectos del presente trabajo, se debe mencionar que 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 presentará las modificaciones debidamente fundamentadas sobre aquellos parámetros que necesariamente deben ser considerados en el desarrollo del modelo, tal es el caso de la distancia crítica de arqueo, y las curvas de distribución de frecuencia para la corriente de los rayos a tierra.

### 2.3.1. SISTEMA DE COORDENADAS CARTESIANAS PARA EL ANALISIS DEL MODELO ELECTROGEOMETRICO

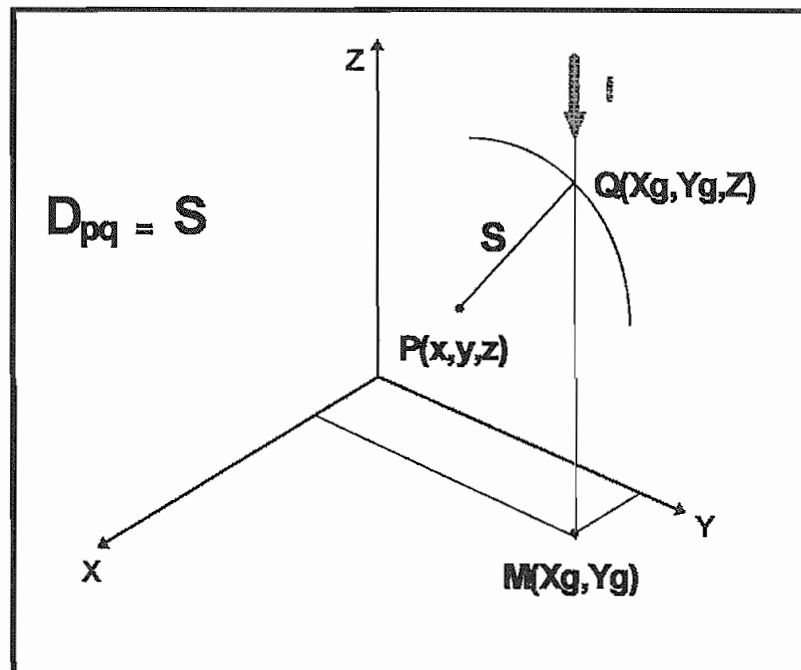


FIG.2.7 SISTEMA DE COORDENADAS CARTESIANAS PARA EL ANALISIS DEL MODELO ELECTROGEOMETRICO (\*2).

De acuerdo a la figura (2.7), donde  $P(x,y,z)$  puede considerarse como un punto de cualquier componente del sistema en análisis, y  $Q(Xg,Yg,Z)$  el 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 arqueo S, respecto del componente en referencia y que a su vez corresponde a la distancia de "P" a "Q" (\*2).

La superficie de exposición para el componente en análisis, se puede representar por el lugar geométrico de una semiesfera (para el caso de

estructuras verticales) y un semicilindro (para conductores horizontales) de centro P, y radio S, donde Q representa el punto de intersección con la trayectoria de la descarga, y cuya coordenada Z define la altura sobre el plano (X-Y) a la cual el líder será atraído por el canal ascendente de contacto (\*2).

Para determinar de manera precisa el lugar donde terminará la descarga, será necesario evaluar la altura de todos aquellos componentes del sistema modelado (superficies de exposición) y que eventualmente pudiesen atraer al líder, considerando además que la mayor altura de intersección que se presente nos definirá exactamente el sitio donde dicha descarga culminará su trayectoria (\*2).

## 2.4. MODELO ANALITICO

Debe estar claro que el mecanismo más adecuado para realizar el diseño del apantallamiento de una subestación es el Modelo Electrogeométrico, que en definitiva representa una técnica por demás apropiada para analizar el punto final de las descargas atmosféricas sobre los objetos localizados en tierra, sean éstos conductores, mástiles, o cualquier estructura en general.

Para complementar este modelo es necesario definir ciertos parámetros matemáticos obtenidos mediante observación y experiencias en laboratorio, y que ayudarán notablemente a explicar la mecánica de las descargas atmosféricas, cuantificando de alguna manera sus influencias y efectos (\*3).

### 2.4.1. DISTANCIA CRITICA DE ARQUEO

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 arqueo (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 arqueo 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 arqueo 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 :

$$S = B * I^b \quad (2.1)$$

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 calcular el valor de " $S$ ". Como primera tentativa se tomará la versión aceptada por la IEEE en 1993 (\*10) :

$$S = 10 * (I)^{0.65} \quad (2.2)$$

Usando (2.2) , para una determinada descarga de magnitud de corriente "I", se puede calcular las distancias críticas 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 experimentales (\*7) :

Distancia crítica de arqueo a tierra :

$$S_e = K_e * S \quad (2.3)$$

$$K_e = 1$$

Distancia crítica de arqueo para conductores horizontales(cables de guardia, bordes y vértices del plano expuesto, ver sección 2.4.5)

$$S_s = K_s * S \quad (2.4)$$

$$K_s = K_e = 1$$

Distancia crítica de arqueo para estructuras verticales :

$$S_t = K_t * S \quad (2.5)$$

Donde :

$K_t = 1.2$  para el caso de mástiles

$1 < K_t < 1.1$  para torres y extremos de los cables de guardia, y

$K_t = 1$  para cualquier otra estructura vertical.

Estas distancias pueden ser usadas para construir el lugar geométrico de todos los posibles puntos que puedan atraer un canal descendente (líder), formando así lo que se ha definido como superficies de exposición (cuyo conjunto representa el llamado plano expuesto de la subestación). Estas superficies tomarán el nombre de superficies interceptoras o escudos cuando se hable de los elementos de guardia (ver sección 2.4.5). Por ejemplo en la figura (2.8) se muestra el lugar geométrico de un cable "G" ubicado sobre el plano de tierra, donde se puede diferenciar, las descargas que terminarán sobre el cable y aquellas que terminarán sobre el plano de tierra. Las que

arriben sobre la superficie curva "cef" (superficie expuesta), es decir dentro del radio dado por " $S_s$ " acabarán sobre el cable, mientras que el resto de descargas se dirigirán al plano de tierra.

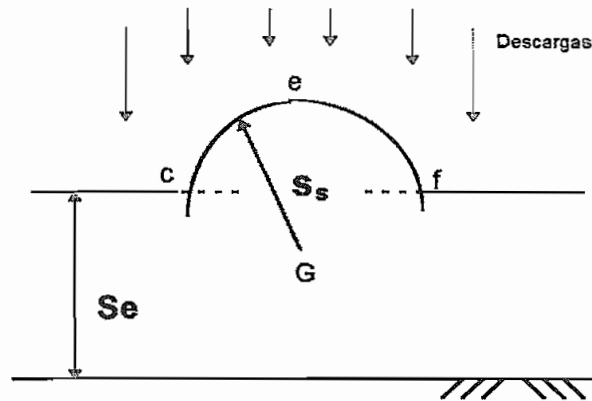


FIG. 2.8 LUGAR GEOMETRICO DEL APANTALLAMIENTO PARA UN CABLE "G" (\*7)

## 2.4.2. MAGNITUD DE CORRIENTE DE LAS DESCARGAS ATMOSFERICAS

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 ocurra, puede ser expresada en forma de una distribución estadística. Para los propósitos del presente trabajo, vamos a considerar la utilización de cualquiera de las curvas presentadas en la sección 2.2.2.

## 2.4.3. ANGULO DE APROXIMACION DE LAS DESCARGAS ATMOSFERICAS

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 que es solamente en forma vertical.

#### **2.4.4. DENSIDAD DE LAS DESCARGAS ATMOSFERICAS A TIERRA, NIVEL CERAUNICO**

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 desciendan 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 llamado **"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 periférica 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 que no son deseables para el buen funcionamiento de la instalación, dicha área será definida como **"área marginal de riesgo"** (véase figura 3.14), cuyo ancho según las normas alemanas, y la tesis "Estudio del potencial de acoplamiento entre electrodos de puesta a tierra cercanos" desarrollada por Javier Iñiguez, determinan que para mantener la independencia de las puestas a tierra es recomendable que dicho valor sea al menos 10 metros.

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):

$$No = C * NC \quad (2.6)$$

Donde :

$No$  : Densidad de descargas a tierra [ descargas /  $Km^2$ \*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 vera notablemente incrementada, por esto se hace necesario hablar de una "densidad de descargas a tierra relativa" que relacione la diferencia que se presenta entre estos dos valores.

En nuestro medio puede resultar mas conveniente realizar los cálculos a través de la densidad de descargas a tierra, en lugar del nivel ceraúnico, ya que este último puede tener variaciones altas en áreas consideradas relativamente pequeñas como pueden ser el tamaño de nuestras ciudades (\*4).

## 2.4.5. INTERCEPCION 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).

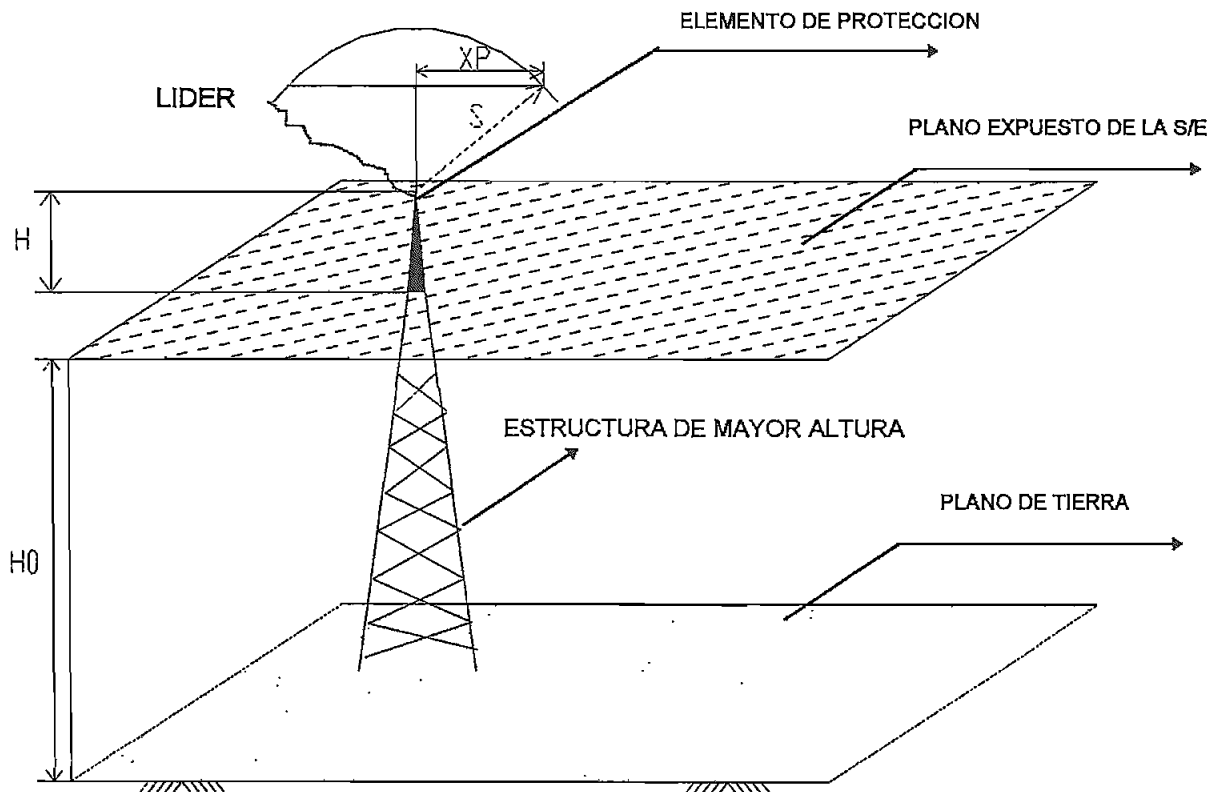


FIG. 2.9 ANALISIS DE LA ALTURA EFECTIVA Y LA DISTANCIA PROTEGIDA POR LOS ELEMENTOS DE APANTALLAMIENTO



El riesgo de una posible falla del blindaje dependerá entonces de la diferencia en altura entre los elementos de apantallamiento y el equipo de la subestación, valor que se denominará **“altura efectiva de los elementos de guardia : H”**, además dependerá también de la distancia horizontal de los elementos de guardia, conocida también como **“Distancia protegida : XP ”** (\*2).

El “plano horizontal imaginario”, ubicado a una altura igual a la del elemento más elevado de la subestación ( $H_0$ ), como ya se mencionó, representa un modelo (grueso) de los elementos y equipo más altos de la subestación, que por lo general resultan ser cables desnudos en posición horizontal por lo que en conjunto representan un “plano conductor”, que se ha definido 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 (2.10,2.11) 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(de exposición), en conjunto, 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. 2.11) se ha considerado que el lugar geométrico de las superficies interceptoras o de exposición, respectivamente, representan un semicilindro de radio  $S_s$ , y para el caso de estructuras verticales(fig. 2.10): mástiles, vértices del plano y extremos de los cables de guardia es una semiesfera de radio  $S_t$ ,  $S_s$ , y  $S_{t1}$  respectivamente.(ver ecuaciones 2.2, 2.3, 2.4, y 2.5).

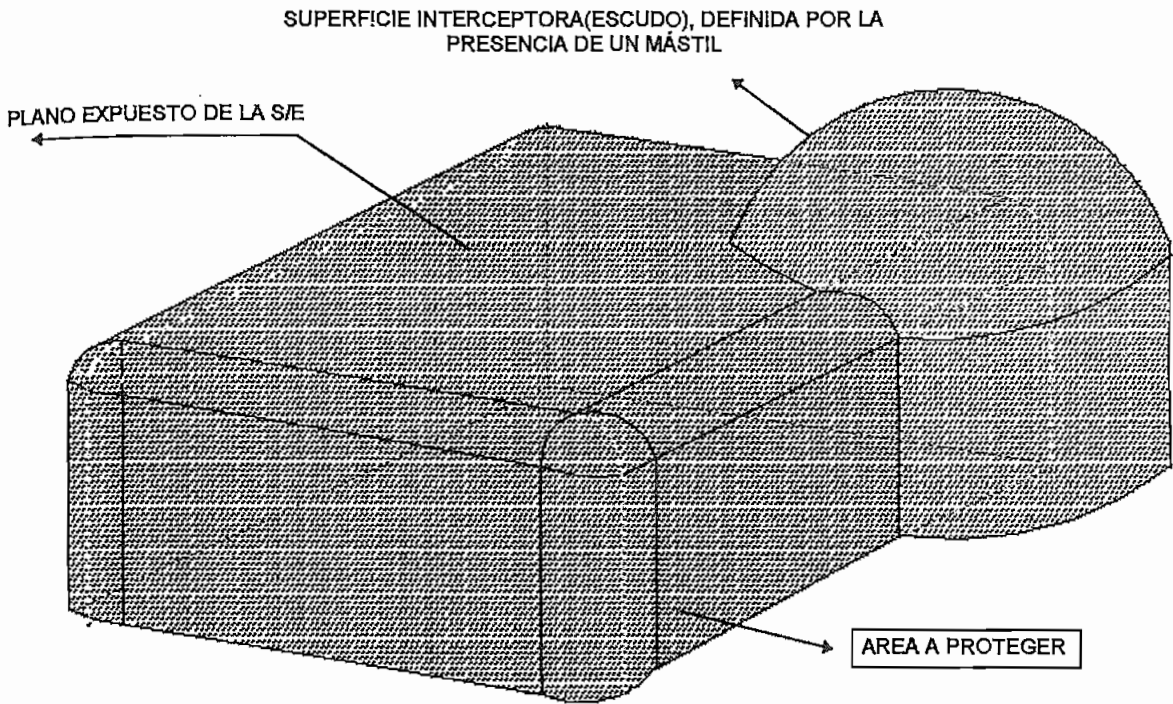


FIG. 2.10 LUGAR GEOMETRICO DE LAS SUPERFICIES DE EXPOSICION Y ESCUDOS. PRESENTES EN UN ANALISIS DE APANTALLAMIENTO (ANALISIS PARA UN MÁSTIL)

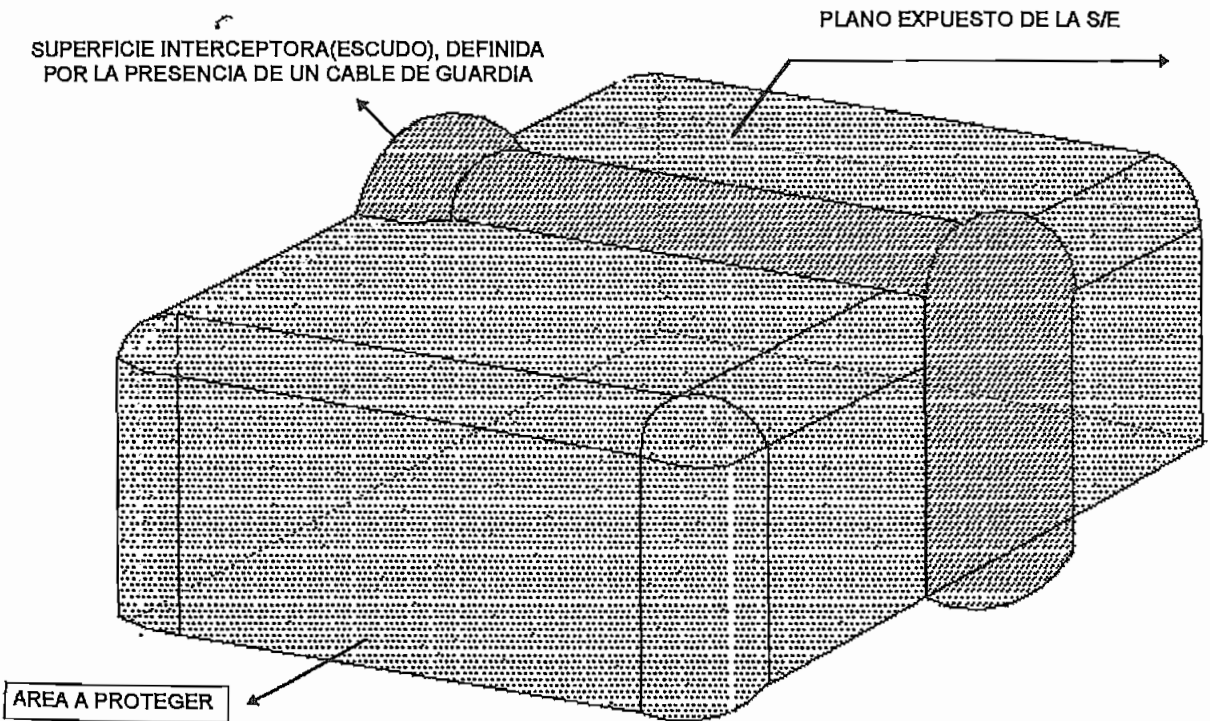


FIG. 2.11 LUGAR GEOMETRICO DE LAS SUPERFICIES DE EXPOSICION Y ESCUDOS. PRESENTES EN UN ANALISIS DE APANTALLAMIENTO (ANALISIS PARA UN CABLE DE GUARDIA)

Un análisis matemático para determinar la mayor altura de corte entre la trayectoria de la descarga y las superficies de exposición ó inteceptotas se detalla en la sección 3.2.4.

#### **2.4.6. PERIODO DE PROTECCION 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), el término "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 como se mencionó en la sección 1.4 una elevación excesiva de los elementos de protección, con el propósito 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 este 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, tratando siempre en lo posible de conseguir un apantallamiento efectivo según lo expuesto en la

sección 2.1. Para cualquier otro tipo de instalación en un sistema de potencia se podría hacer referencia al caso de una subestación cuyo factor de seguridad se acaba de mencionar (\*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 que tener en cuenta es el período de estudio, que no necesariamente será igual al período de protección del apantallamiento esperado, ya que por la definición misma de este último término se deberá esperar que se produzca una falla del blindaje durante éste tiempo, lo que involucra el hecho de que si se quiere garantizar un determinado período de protección necesariamente el tiempo de análisis tendrá que ser mucho mayor.

Por otro lado la técnica mencionada resulta ser muy apropiada, ya que el modelo presentado permite considerar un ángulo de apantallamiento constante, es decir independiente del tamaño de la subestación, lo cual según la práctica convencional no es así, ya que si se considera por ejemplo el riesgo de una falla cada cien años, este período involucraría que las estaciones grandes requieren un blindaje más efectivo que las pequeñas, lo que a su vez implica que el ángulo de exposición debe reducirse conforme se incrementa el área de la subestación analizada (\*1).

# CAPITULO III

## EL PROGRAMA COMPUTACIONAL INTEGRADO

### 3.1. PROGRAMA DIGITAL PARA COMPLEMENTAR EL DISEÑO DEL APANTALLAMIENTO DE ESTACIONES DE POTENCIA AEREAS

#### 3.1.1. GENERALIDADES

Como se mencionó en la sección 1.4, el diseño del apantallamiento de una estación requiere un desarrollo conjunto del procedimiento descrito en la sección 3.1.3 con un programa digital que permita determinar la altura a la que serán colocados los elementos de protección y cuyos resultados sean además expresados en forma tabulada o gráfica, de tal manera que el usuario pueda implementar un esquema de apantallamiento lo suficientemente confiable y económico.

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 METODO 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 de 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 el capítulo anterior 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. CALCULO DEL PERIODO DE PROTECCION DEL APANTALLAMIENTO

A continuación se presenta el desarrollo 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, y un punto "T", localizado a una altura "H" (fig. 2.9 y 3.1) sobre el centro de dicha área, donde además este punto podría representar el extremo superior del elemento o torre más elevado, o en su defecto el punto de un conductor horizontal dentro del sistema modelado. "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).

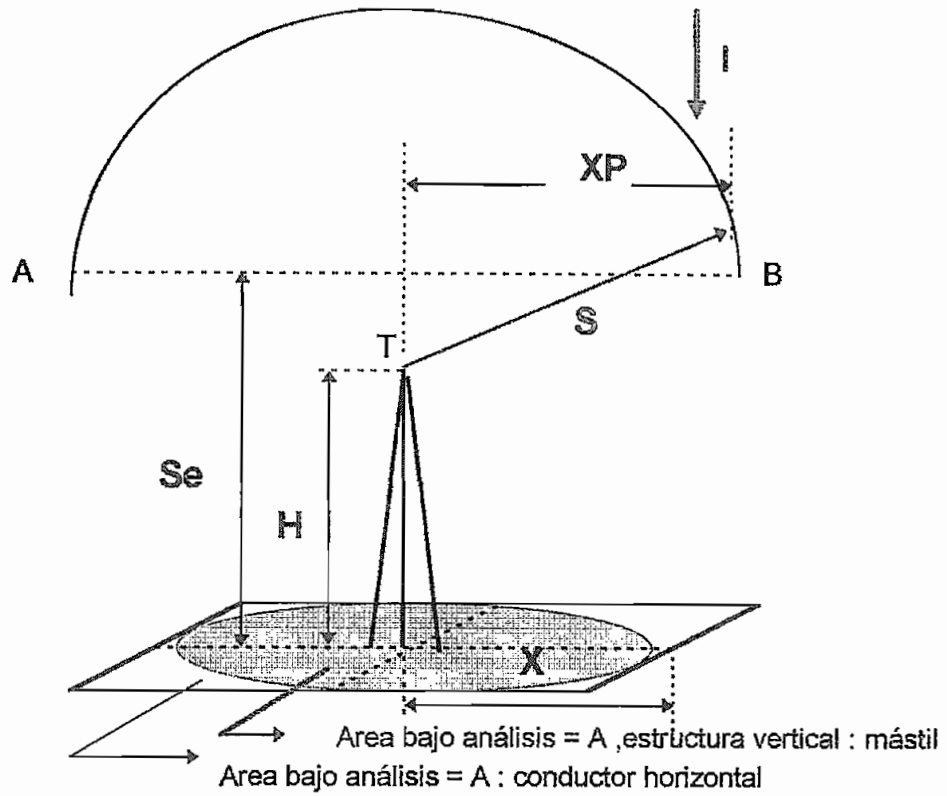


FIG. 3.1a Modelo analítico para el cálculo de la distancia protegida :  $XP$  ; para mástiles ó cables de guardia. **Considerando :  $H < Se$  ,  $XP > X$  y  $AP > A$**

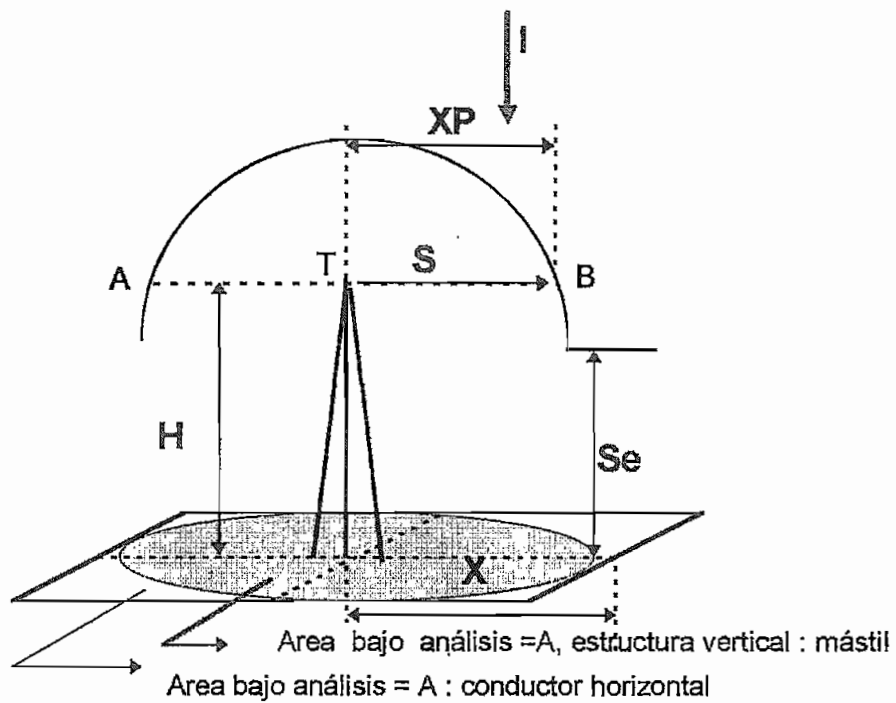


FIG. 3.1b Modelo analítico para el cálculo de la distancia protegida :  $XP$  ; para mástiles ó cables de guardia. **Considerando :  $H > Se$  ,  $XP < X$  y  $AP < A$**

El área efectivamente protegida (AP) por el componente ubicado sobre el punto T, sea este 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 dicho componente, si ésta se aproxima dentro de una distancia definida así (\*1):

PARA CABLES DE GUARDIA :

$$\begin{array}{l} XP = \sqrt{Ss^2 - (Se - H)^2} \quad \text{si : } H < Se \\ \hline XP = Ss \quad \text{si : } H \geq Se \end{array} \quad (3.1)$$

PARA MASTILES :

$$\begin{array}{l} XP = \sqrt{St^2 - (Se - H)^2} \quad \text{si : } H < Se \\ \hline XP = St \quad \text{si : } H \geq Se \end{array} \quad (3.2)$$

Es importante recalcar la influencia que de acuerdo a las ecuaciones anteriores, van a representar sobre XP los parámetros H, Se y (Ss ó St), es decir se puede ver claramente que  $XP = f(Se, (Ss \text{ ó } St), H)$ . Donde además se puede suponer que(\*7)(\*9):

Distancia crítica de arqueo para conductores horizontales :

$$Se = Ss = S = 10 * (l)^{0.65} \quad (3.3)$$

Distancia crítica de arqueo para estructuras verticales :

$$St = Kt * S = Kt * [ 10 * (l)^{0.65} ] \quad (3.4)$$

Donde :  $Kt = 1.2$  para mástiles

$1 < Kt < 1.1$  para torres (extremos cables de guardia)

$Kt = 1$  para cualquier otra estructura vertical



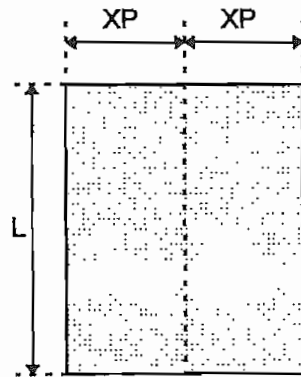
Como lo demuestran las expresiones (3.3) y (3.4), las distancias críticas de arqueo están relacionadas con la probable magnitud de la corriente de una determinada descarga. Por lo tanto la distancia protegida  $XP$  siendo una función de estos factores será también función de la corriente de la descarga en análisis, es decir  $XP = f(I, H)$ .

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

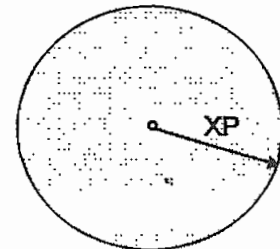
$$AP = K2 * (XP)^{K1} \quad (3.5)$$

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

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



**ANALISIS PARA UNA  
ESTRUCTURA VERTICAL  
TORRES O MASTILES:**  
 $K2 = \pi$  Y  $K1 = 2$



Por lo tanto :

Para cables de guardia :

$$AP = 2 * L (XP) \quad (3.6)$$

Para mástiles :

$$AP = \pi * (XP)^2 \quad (3.7)$$

Si la distancia protegida, evaluada con las ecuaciones dadas para "XP" (3.1 ó 3.2) es menor que la distancia obtenida por la proyección del punto (T) sobre el plano horizontal "X" (fig. 3.1), de hecho involucra que el área protegida (AP) (3.6 ó 3.7) 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 descendan 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 CIGRÈ, y la curva que llamaremos exponencial presentada por Herodotou y su grupo de trabajo (\*10). Para descargas con corrientes de magnitudes  $I_1, I_2, I_3, \dots, I_m$ , distancias críticas de arqueo  $S_1, S_2, S_3, \dots, S_m$ , y probabilidades de ocurrencia  $P_1, P_2, P_3, \dots, P_m$ ; existirán máximas distancias  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_m$  proyectadas desde el elemento protector al plano horizontal (fig.3.1) más allá de las cuales dichas descargas sobrepasarán la protección. La suma de éstas 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  $N_0$  por área unitaria  $A_0$ , el número total de descargas por año sobre el área "A" estará dado por (\*1) :

$$N_A = N_0 * ( A / A_0 ) \quad (3.8)$$

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

$$N_s = N_o / A_o * [(A - (A P_1 * P_1)) + (A - (A P_2 * P_2)) + (A - (A P_3 * P_3)) + \dots + (A - (A P_m * P_m))] \quad (3.9)$$

Donde  $P_1, P_2, P_3, \dots, P_m$  son las diferentes probabilidades de ocurrencia de la descargas de magnitudes de corriente  $I_1, I_2, I_3, \dots, I_m$ , y  $A P_1, A P_2, A P_3, \dots, A P_m$  son las áreas protegidas por los elementos de apantallamiento para cada una de estas descargas.

Reemplazando la ecuación (3.5) se obtiene :

$$N_s = N_o / A_o * [(A - K_2 (X P_1)^{K_1} * P_1) + (A - K_2 (X P_2)^{K_1} * P_2) + (A - K_2 (X P_3)^{K_1} * P_3) + \dots + (A - K_2 (X P_m)^{K_1} * P_m)] \quad (3.10)$$

Agrupando:

$$N_s = N_o / A_o * [A - \sum_{n=1}^{n=m} K_2 (X P_n)^{K_1} * P_n] \quad (3.11)$$

Como se demostró en las ecuaciones (3.1 y 3.2) el valor de  $XP$  dependerá del tipo de elemento que se asuma como punto de incidencia de la descarga (cables ó mástiles) y su valor se verá modificado cuando la altura "H" mostrada en las figuras (3.1) sea igual a el valor de "Se". Entonces la ecuación anterior (3.11) podrá ser resuelta reemplazando las probabilidades de ocurrencia ( $P_n$ ) de las descargas atmosféricas (con un determinado rango de corrientes), por medio de una **función de densidad de probabilidad** que se obtendrá considerando la aleatoriedad de dichas descargas, y cuya expresión se definirá en la sección 3.1.2.2, luego de lo cual será necesario integrar la expresión (ecuación 3.12) entre un valor mínimo obtenido de la curva de distribución de corrientes, el valor que permite que "Se" sea igual a "H" y que se obtiene de la ecuación (2.3) o su equivalente, y un valor máximo que también será obtenido de la curva de frecuencia de distribución de corrientes (\*2).

Por lo tanto la ecuación que evalúe el número de fallas del apantallamiento por año, es (\*2) :

$$N_s = N_o / A_o \left[ A - \int_{I_{min}}^I K_2(S)^{K_1} * h(I) dI - \int_I^{I_{max}} K_2 \left( \sqrt{S^2 - (S_e - H)^2} \right)^{K_1} * h(I) dI \right] * 10^{-6}$$

(3.12)

Donde :

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

No : La densidad de descargas a tierra : [descargas\*Km<sup>2</sup>\*año]

A y H : definidos según el gráfico(3.1) en [m<sup>2</sup>] y [m], respectivamente

h(I) : es la función de densidad de probabilidad definida por (3.16) , y

Además :

$$XP = S \quad \text{para el intervalo de "Imin" a "I"}$$

$$XP = \sqrt{S^2 - (S_e - H)^2} \quad \text{para el intervalo de "I" a Imax}$$

Donde de igual forma S depende del elemento protector :Ss para cables de guardia y St para mástiles

De la expresión (3.12) se desprende que e área protegida por el elemento de guardia en [m<sup>2</sup>] es :

$$AP = \left[ \int_{I_{min}}^I K_2(S)^{K_1} * h(I) dI + \int_I^{I_{max}} K_2 \left( \sqrt{S^2 - (S_e - H)^2} \right)^{K_1} * h(I) dI \right] \quad (3.13)$$

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

$$TA = 1 / N_s : \quad [\text{años}] \quad (3.14)$$

Donde  $N_s$  : 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 :

$$EA = N_s / NA * 100 \quad [\%] \quad (3.15)$$

Donde :

$N_s$  : 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 :

$$EP = NDI / NAp * 100 \quad [\%] \quad (3.15a)$$

Doñde :

$NDI$  :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 este analizando.

### 3.1.2.2. FUNCION 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 2.2.2, serán representadas por una FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD de magnitudes de corriente



El valor intermedio para la integración de la ecuación 3.12, como ya se mencionó estará dado por :

$$S_e = K_e * S = S = B * (I^b)$$

En donde si :  $S_e = S = H$  (fig. 3.1), se tiene :

$$I = (H / B)^{1/b} \quad (3.20)$$

El programa digital desarrollado en este trabajo, presenta como una alternativa durante la simulación el empleo de cualquier ecuación equivalente a las expresiones (2.2,2.3,2.4,2.5) que permitan evaluar la distancia crítica de arqueo, así como el uso de cualquiera de las curvas de frecuencia de distribución de la corriente de rayos mostradas en el capítulo anterior, donde además se plantea la opción de editar una curva totalmente nueva, para lo cual será necesario ingresar durante la ejecución del programa los valores de  $K_1$  y  $K_2$  que calibren dicha curva a la función de densidad de probabilidad dada por (3.16), así como los límites de integración (valores de corriente máximo y mínimo) que presente la curva que se desea editar.

Si no se cuenta con los valores de  $K_1$  y  $K_2$  se recomienda la utilización del programa estadístico STATGRAPHICS en cualquiera de sus versiones que presente la opción de resolver una regresión no lineal mediante el ingreso de un variado número de puntos que definan lo más próximo y real la curva que se desea editar. Información más detallada respecto de la obtención de éstos parámetros se muestra en el manual para el usuario presentado en los anexos.

### 3.1.2.3. ANALISIS DE LA DISTANCIA PROTEGIDA

En la figura (3.2), se puede apreciar el lugar geométrico de los posibles puntos que interceptarían una descarga, representado como una área de exposición a manera de semicírculo, por otro lado la ecuación (3.14) deducida en la sección anterior en base a la misma figura, nos prueba que el período de protección depende de la diferencia en altura efectiva entre los elementos para el apantallamiento ubicados sobre el punto T y el equipo susceptible de ser interceptado por una descarga (H), así como de la distancia horizontal (distancia protegida XP) de dichos elementos de guardia. Según la practica convencional estos parámetros (H y XP), deberían definir el ángulo de apantallamiento.

De lo expuesto se puede concluir que tanto el ángulo del apantallamiento, (interpretado como se acaba de mencionar) como la distancia protegida son indudablemente funciones de la magnitud de corriente de una descarga y de hecho de su distribución estadística, situación que convencionalmente no era considerada así.

Lo que se pretende entonces es probar que con la incursión del modelo electrogeométrico, lo que implica definir una relación para la distancia crítica de arqueo, la distancia protegida puede también entenderse como una función del período de protección del apantallamiento lo que puede determinar que para una misma altura de los elementos de guardia dicha distancia, varíe a medida que el período de protección aumente o disminuya.

En la referencia(\*2) se presenta un análisis más detallado y demostrativo de las posibles variaciones que pueda tener la distancia protegida, tomando en cuenta la variación de los períodos de protección y considerando varias alturas efectivas (H) sobre el equipo a las que se podrían colocar los elementos de guardia.





### **3.1.3. PROCEDIMIENTO A SEGUIRSE PARA REALIZAR EL DISEÑO DEL APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES.**

La selección de un esquema de apantallamiento debe estar íntimamente ligada a la confiabilidad del sistema de potencia en análisis, debiéndose considerar además un balance de tipo económico entre el costo del sistema de protección y las posibles pérdidas provocadas por la falla de éste (\*1).

Como se mencionó en el numeral 2.4.5 del capítulo anterior, el líder se encontrará con un canal ascendente de una manera aleatoria, dándose la mayor probabilidad de unión con aquel canal que parta de la estructura o elemento más elevado sobre tierra. Con el objeto de controlar a los rayos se aprovecha este comportamiento de la descarga, colocando expresamente a los elementos de protección debidamente conectados a tierra, a una altura más elevada que el equipo a ser protegido (\*2).

De acuerdo al análisis mencionado podemos concluir que mientras más alto esté el elemento protector sobre el equipo de la subestación, mayor será la probabilidad de intersección de una descarga, incrementando así el grado de protección, sin embargo va a subsistir el hecho de que el rayo no sea interceptado provocándose de esta manera la perforación del blindaje o falla del apantallamiento (\*1).

El primer paso a seguir es entonces determinar un adecuado período de protección "TA", de acuerdo a lo estipulado en el numeral 2.4.6. Una vez determinado este valor 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.

Esta decisión deberá estar influenciada por los siguientes factores (\*1):

- Selección de los elementos de protección sean éstos conductores horizontales (cables de guardia), estructuras verticales (mástiles), o ambos. Y determinación de los requisitos eléctricos, mecánicos, estéticos, y ordenanzas legales.
- Determinar la mayor altura sobre tierra del equipo a protegerse "H0" (fig. 2.9), para esto se tendrá en cuenta aquella estructura o componente del sistema que determine el punto más elevado respecto del resto de elementos, y sobre el cual se asumirá el plano expuesto de la subestación a partir del cual serán colocados los elementos de guardia. Dicha altura deberá ser siempre mayor que la necesaria para aislamiento o para situaciones de mantenimiento.
- Número y localización adecuada de los elementos de apantallamiento, incluyendo sus soportes.

Toda vez que estos factores se encuentran mutuamente relacionados (lo que involucra el hecho de que se pueda tomar ciertamente difícil el conseguir una solución óptima) será necesario recurrir a varios intentos que permitan conseguir la solución esperada.

En la referencia (\*1), se plantea un procedimiento similar al siguiente :

- 1.- Definir al 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 (no necesariamente un rectángulo) hacia el centro del radio de influencia.

- 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 siguiente metodología:

$$T_{n_i} = ( A / A_{n_i} ) * TA \quad (3.21)$$

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

T<sub>n<sub>i</sub></sub>, es el período de protección [años], para el área A<sub>n<sub>i</sub></sub> [m<sup>2</sup>].

- 4.- Determinar la posible distancia protegida XP (fig. 3.3), por cada uno de los elementos de guardia ubicados sobre las subáreas An :

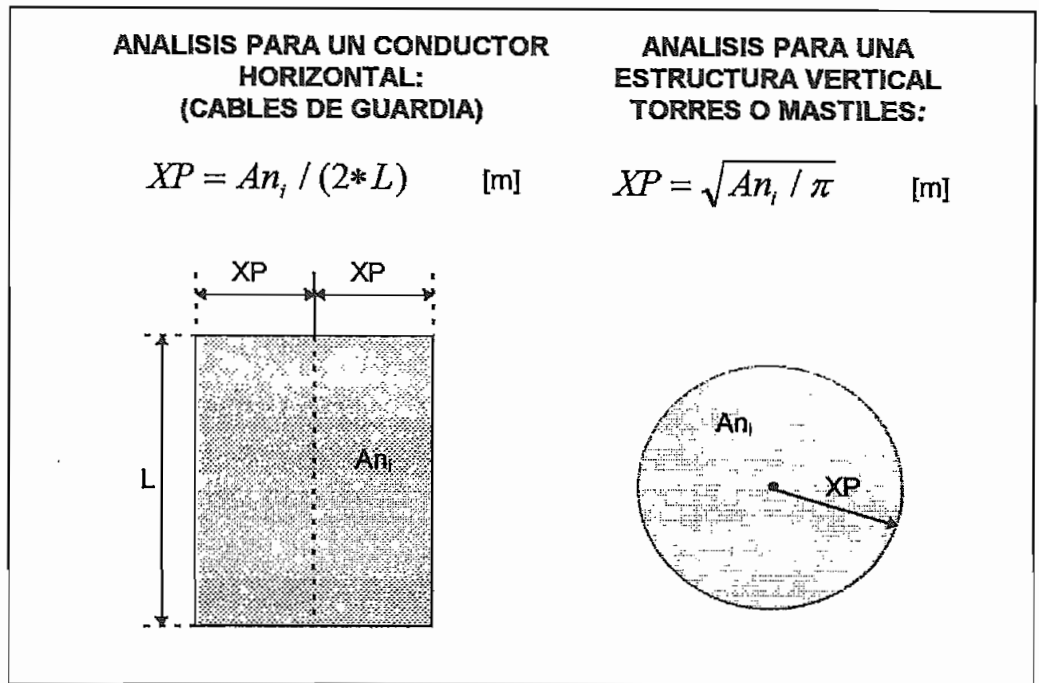


FIG. 3.3 DETERMINACION DE LA DISTANCIA PROTEGIDA, PARA CABLES DE GUARDIA O MASTILES

- 5.- Con los valores de  $T_n$  y  $XP$ , obtenidos para cada subárea (elemento protector) se puede determinar el valor de la altura efectiva "H", dado en las figuras 3.1a y 3.1b. Este valor (H), si se considera una análisis similar al propuesto en la sección 3.1.2.1, pero suponiendo ahora que el área a la que se hace referencia en dicha sección, se encuentra desplazada una altura  $H_0$  igual a la del plano expuesto de la subestación, viene a representar la altura a la que se deben colocar los elementos de guardia, por lo tanto el análisis matemático presentado en 3.1.2.1 puede ser resuelto mediante la ayuda del programa digital desarrollado en el presente trabajo, y que para este caso arroja resultados numéricos en forma tabulada o gráfica, relacionando diferentes períodos de protección (resultado de la simulación) con distancias protegidas y eventuales alturas sobre el plano que representa al equipo de la S/E (plano expuesto) que pueden ser ingresados convenientemente por el usuario.

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 deberá cambiar se plantea como sigue:

$$TA = 1 / (1/T1 + 1/T2 + 1/T3 + \dots + 1/Tn) \quad (\text{Conexión en paralelo}) \quad (3.22)$$

Siendo :  $A = A1 + A2 + A3 + \dots + An$  (Conexión en serie)

El área total de la subestación

Donde :  $A1, A2, \dots, An$  : Son las diferentes subáreas que serán protegidas, y

$T1, T2, \dots, Tn$  : Los períodos de protección para cada subárea.

### 3.1.4. ALGORITMO DE SOLUCION, DIAGRAMA DE BLOQUES

El algoritmo de solución que permitió desarrollar el programa digital, que entre otras cosas permita la evaluación del período de protección del apantallamiento en una subestación de potencia, está fundamentado para dicha parte del programa exclusivamente en el proceso presentado en la sección 3.1.2.

Se debe dejar claro que el objetivo fundamental de esta parte del programa está relacionada únicamente con el propósito de presentar una variedad de resultados numéricos que tienen la posibilidad de ser representados de manera gráfica, y que permiten relacionar el período de protección con la distancia protegida por elementos de apantallamiento (que podrán estar ubicados a diferentes alturas). Todo esto para que en el proceso previo en el cual se fijará los esquemas de apantallamiento, el diseñador tenga la oportunidad de manipular las subáreas descritas en la sección 3.1.3 en cuanto se refiere al período de protección, distancia protegida y longitud del cable de guardia(en el caso de ser utilizado), y ya en el proceso final cuando tenga que determinar la altura, sobre el plano expuesto de la subestación, a la que se colocarán los elementos de guardia recurra a la información antes mencionada.

El desarrollo algorítmico se presenta de la siguiente manera:

#### 1.- Lectura de datos generales:

El usuario deberá ingresar un conjunto de datos de acuerdo a la variación de las distancias protegidas y alturas efectivas sobre el plano expuesto de la subestación, que a su conveniencia le serán útiles durante la etapa de diseño. Por otro lado deberá ingresar la densidad de descargas a tierra, o en su defecto el nivel ceraúnico que desee considerar, por último esto solo en el caso de que requiera el uso de cables de guardia, la longitud

de dicho conductor de acuerdo a la subárea (sección 3.1.3) que esté analizando.

2.- Cálculo del área protegida, para cada una de las alturas ingresadas de acuerdo a la ecuación (3.13) :

$$AP = \left[ \int_{I_{\min}}^I K2(S)^{K1} * h(I) dI + \int_I^{I_{\max}} K2 \left( \sqrt{S^2 - (Se - H)^2} \right)^{K1} * h(I) dI \right] \text{ [m}^2\text{]}$$

Los parámetros involucrados en esta ecuación ya fueron definidos en la sección 3.1.2.1.

Para efectos de facilitar el algoritmo de solución, (integración de la ecuación 3.13 que se acaba de mostrar) y su codificación, se ha dividido en dos secciones a la ecuación en mención:

$$AP = (AP1 + AP2) \text{ [m}^2\text{]} \quad (3.23)$$

Donde :

$$AP1 = \left[ \int_{I_{\min}}^I K2(S)^{K1} * h(I) dI \right] \quad (3.24a)$$

y,

$$AP2 = \left[ \int_I^{I_{\max}} K2 \left( \sqrt{S^2 - (Se - H)^2} \right)^{K1} * h(I) dI \right] \quad (3.24b)$$

3.- Evaluación del número de salidas provocadas por la falla del apantallamiento, en base al número de descargas incidentes sobre el área analizada y de acuerdo al elemento de protección empleado :

$$Ns = No (A - AP) * 10^{-6} \text{ [descargas/año]} \quad (3.25)$$



Donde:

A : área que se desea proteger e igual a :  $2L*XP$  para cables de guardia, y  $\pi*(XP)^2$  para mástiles.

AP : área protegida [ $m^2$ ], de acuerdo a la ecuación (3.23)

XP: distancia protegida por los elementos de apantallamiento [m]

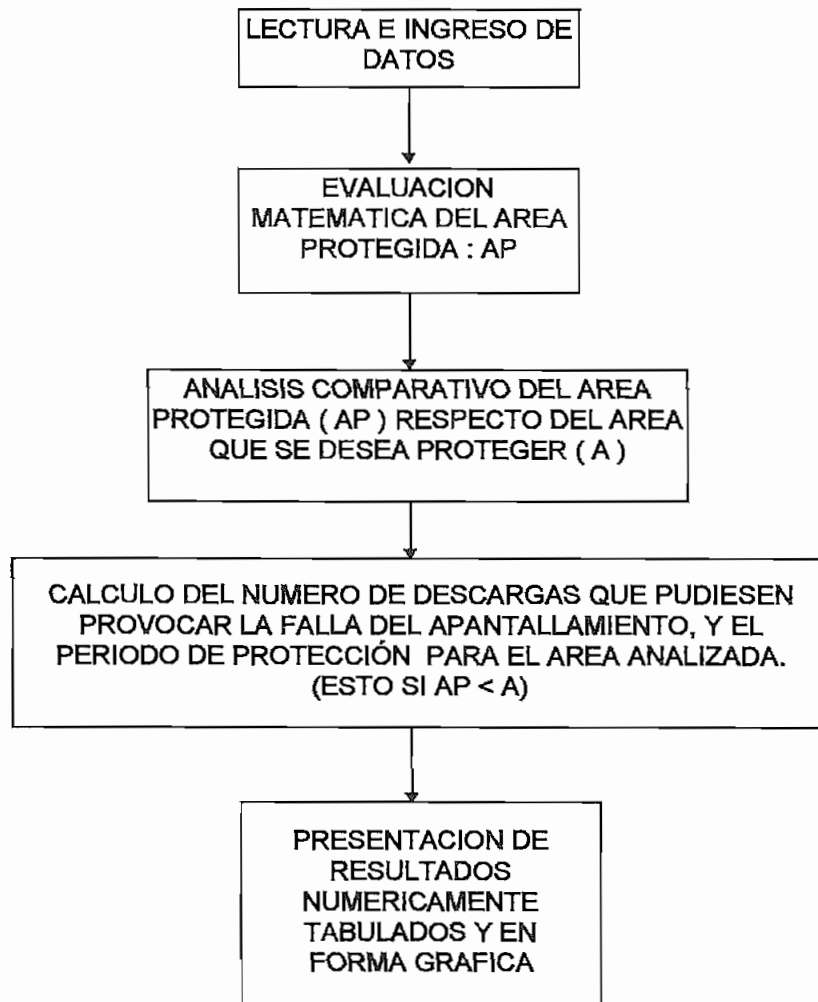
No : densidad de descargas a tierra [descargas / ( $Km^2*año$ )], y

$(A - AP) < 0$  , para considerar que se produjeron perforaciones del blindaje en [ $m^2$ ].

- 4.- Finalmente se determina el período de protección del apantallamiento y la efectividad del mismo sobre el área analizada, expresiones (3.14 y 3.15) respectivamente.

$$T = 1 / N_s \text{ [años]}$$

$$EA = N_s / N_a * 100 \text{ [%]}$$

**DIAGRAMA DE BLOQUES**

### **3.1.5. PROGRAMA DIGITAL**

El programa digital se ha implementado siguiendo los procedimientos indicados en las secciones anteriores, y tratando siempre de que el usuario cuente con una herramienta de fácil manejo, que le permita complementar su diseño para el apantallamiento de subestaciones de una manera versátil y rápida.

### **3.1.6. EVALUACION Y ANALISIS DE RESULTADOS**

En el capítulo cuarto se presentan un conjunto de resultados que se obtuvieron mediante la simulación digital que se acaba de describir y mediante la cual se determinaron las posibles alturas de colocación de los elementos de protección para diferentes condiciones y características de dichos elementos, de igual manera se presenta una evaluación y análisis de los datos resultantes.

### **3.1.7. RESTRICCIONES**

Debido al simple desarrollo matemático que se presenta en el algoritmo, esta parte del programa no cuenta con ninguna restricción.

## **3.2. PROGRAMA DIGITAL PARA DETERMINAR EN FORMA PROBABILISTICA LAS POSIBLES SALIDAS POR FALLA DEL APANTALLAMIENTO, Y EL POTENCIAL PUNTO DE INCIDENCIA DE LAS DESCARGAS QUE LAS PROVOCARON**

### **3.2.1. GENERALIDADES**

Una vez obtenidas las posibles soluciones para los esquemas de apantallamiento, determinadas según el modelo descrito en el capítulo anterior lo más importante es desarrollar un mecanismo que permita predecir el comportamiento de la subestación bajo condiciones ciertamente reales, y determinadas según la influencia que ésta pueda tener respecto de 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 conseguir un blindaje efectivo. Esta etapa del diseño lo que pretende entonces es simular 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, considerando un período de estudio preestablecido y los posibles puntos donde resulte factible la colocación de los elementos de protección. El resultado final será el poder determinar en donde incidieron el conjunto de descargas simuladas, tomando en cuenta la influencia de los elementos de apantallamiento.

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 haya detectado un exceso de descargas incidentes o por el contrario demuestren estar sobreapantalladas, en definitiva lo que se trata es de predecir el punto donde una descarga pueda culminar su trayectoria para que de esta forma se puedan facilitar posibles correcciones y

modificaciones a los esquemas de apantallamiento e incluso practicar nuevos diseños.

La solución más conveniente será aquella que después de haber sido sometida a una gran cantidad de rayos (que responden a su curva de probabilidad de ocurrencia, durante un intervalo de tiempo que necesariamente tiene que ser mayor al período de protección planteado inicialmente) presente como resultado cuando más una descarga sobre el equipo, en un tiempo no menor al período de protección del apantallamiento. Por otro lado la solución debe cumplir con las exigencias de tipo económico que el diseñador considere apropiadas.

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 el segundo capítulo, 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.

### **3.2.2. UN JUICIO CRITICO SOBRE LA POSIBLE APLICACIÓN Y RELACION DEL METODO DE MONTE-CARLO CON EL MODELO ELECTROGEOMETRICO**

Tomando en cuenta la aleatoriedad del fenómeno que se desea analizar, una solución tentativa para resolver el problema resulta ser la aplicación del método de Monte-Carlo, que permitiría seleccionar al azar los valores de las variables aleatorias que entran en juego de acuerdo a sus distribuciones de probabilidad de ocurrencia y procesando de manera independiente a cada una de las descargas a través de una secuencia de números pseudo-aleatorios.

Siguiendo éste procedimiento la simulación de una descarga se vería gobernada por algunos eventos muy aleatorios que deberían encausarse bajo el siguiente procedimiento (\*2) :

- La probabilidad de que una tormenta eléctrica ocurra sobre el sistema modelado, en un día cualquiera, proceso evaluado a través de un número aleatorio .
- La probabilidad de que una descarga de la tormenta eléctrica ocurra sobre la subestación.

- La probabilidad de que la descarga tenga una magnitud de corriente, obtenida aleatoriamente de su distribución de probabilidad acumulada.
- La probabilidad de que la descarga impacte en un punto particular del sistema modelado, esto es cables de guardia, mástiles, o cualquier estructura u objeto perteneciente al equipo de la subestación.

Por otro lado se debe asumir que el número de descargas en un día de tormenta responda a una determinada distribución de probabilidad, como puede ser la distribución de Poisson.

Para completar el análisis y de manera fundamental se deberá tener en cuenta ciertas suposiciones básicas que servirán como datos de entrada para la aplicación del modelo electrogeométrico, de tal manera que se pueda determinar el probable punto de impacto de la descarga. Estas suposiciones están asumidas implícitamente en dicho modelo, y tiene que ver con la independencia que presenta la trayectoria del líder de una descarga sobre cualquier objeto ubicado en tierra hasta alcanzar la llamada distancia crítica de arqueo, la ecuación que permita evaluar dicha distancia, el número total de descargas que serán simuladas, y por último la determinación de una función de probabilidades acumuladas para la corriente de los rayos.

Como se puede ver los parámetros mencionados demuestran claramente la naturaleza aleatoria del fenómeno, justificando de esta manera el empleo del método de Monte-Carlo, sin embargo más allá de que el método resulte ser inapropiado para el análisis en mención, existe la posibilidad de eliminar un grupo de variables aleatorias introduciendo una interpretación diferente a la curva de distribución de probabilidades acumuladas para la corriente de los rayos, y que se puede expresar en cierta forma discreta, de tal manera que la simulación se desarrolle enfocada desde un punto de vista más global, es decir que para un determinado período de tiempo en análisis lo que en realidad interesaría es determinar, conociendo previamente la densidad de descargas a tierra de una determinada región, el número total de

rayos que potencialmente podrían incurrir sobre dicha zona. Por otro lado, en base a la nueva interpretación de la curva de distribución de probabilidad de las descargas, evaluar el número de rayos con una cierta magnitud de corriente que se producirán durante el tiempo de estudio que se analiza, considerando todas aquellas magnitudes que resulten ser las más probables de presentarse.

En todo caso en el presente trabajo se deja la posibilidad de alternar cualquiera de las dos soluciones, permitiendo así que se pueda realizar un análisis comparativo de los resultados, pero se le dará más énfasis a aquella alternativa que nos permita interpretar la curva de distribución de probabilidades para la corriente de los rayos de una manera discreta tal como se describe en la sección 3.2.4, y va implicar el hecho de que ya no interesa en que día o año se produjo una determinada descarga, eliminando así algo la aleatoriedad del fenómeno.

### **3.2.3. FORMULACION DEL MODELO**

El modelo que se presenta a continuación busca exclusivamente poder determinar el punto de incidencia de una descarga atmosférica, tomando como referencia ciertos parámetros involucrados en el fenómeno de formación de un rayo hasta el punto en donde éste terminará su trayectoria, y que ciertamente fueron ya descritos en el segundo capítulo. Las suposiciones básicas que se tendrán en consideración están implícitas en el modelo electrogeométrico, que será la herramienta fundamental que se utilice para conseguir el objetivo planteado. El desarrollo del procedimiento debe tener en cuenta la influencia que pueden representar los elementos de protección, de tal manera que los resultados garanticen el éxito o fracaso de un esquema de apantallamiento.



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 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 3.2.4
- La distancia crítica de arqueo está relacionada directamente con la magnitud de corriente de la descarga según la expresión (2.2), o su equivalente, y será determinada a través de las ecuaciones (2.3)(2.4)(2.5), según el componente o estructura del sistema que se esté analizando.
- El punto final de la descarga  $M(X_g, Y_g)$  (ver fig. 2.7) se determina cuando el líder alcanza alguna de las superficies interceptotas o de exposición (según sea el caso), definidas por los componentes del sistema modelado.
- La densidad de descargas a tierra ( $N_0$ ), está relacionada con el nivel ceraúnico (NC), según la expresión(2.6).

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 radio de influencia que se considere sobre la instalación, que a propósito tiene

necesariamente que ser mayor al área de la subestación según lo expuesto en la sección 2.4.4. Para la aplicación de la técnica descrita, sobre el sistema modelado se debe asumir a la subestación localizada en el centro del radio de influencia, cuyo valor podrá ser manipulado por el usuario. Por otro lado también se podrá manipular el área marginal de riesgo definida como aquella área sobre la cual todas las descargas provocarían la salida del sistema.

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.2.7) 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 3.2.4
- 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 geoméricamente se determina sobre qué elemento del sistema incidirá la descarga, según lo mostrado en la sección 3.2.5.

El procedimiento descrito debe repetirse para cada uno de los rayos que tengan 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 3.2.4.

### **3.2.4. FUNCION DE DISTRIBUCION DE PROBABILIDADES PARA LA MAGNITUD DE CORRIENTE DE LAS DESCARGAS ATMOSFERICAS**

Las curvas que se describen a continuación han sido obtenidas de aquellas que se presentaron en la sección 2.2.2, a través de un proceso matemático que conlleva a obtener la derivada de cada una de ellas para representarla en cierta forma 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 sección mencionada anteriormente.

Para la aplicación del modelo descrito en la sección anterior se plantea la alternativa de escoger el valor medio de corriente para cada uno de los intervalos que se presentan en las curvas, y de acuerdo a la probabilidad de ocurrencia de este grupo de rayos se evalúa el número de descargas que estarán presentes durante la simulación, tomando en cuenta que el 100 % de los rayos equivale al número total de descargas que se deben simular y que serán obtenidos por medio de la densidad de descargas a tierra propia de la región en análisis, el área de influencia que se desee considerar y el tiempo que se tomará para realizar la simulación.

Por otro lado resulta muy importante, como ya se aclaró en la sección 2.2.2, tener en cuenta los porcentajes de probabilidad que tendrán ciertos grupos de rayos con determinada magnitud de corriente, para que de esta manera durante la simulación se pueda escoger con un juicio crítico cuál de las alternativas se desea emplear, o en su defecto aplicar los diseños bajo la influencia de cada una de ellas.

Es fundamental dejar claro la importancia que va a representar la densidad de descargas a tierra para la aplicación de cualquiera de las curvas que se escoja como alternativa de solución.

3.2.4.1. PROPUESTA DE UMAN

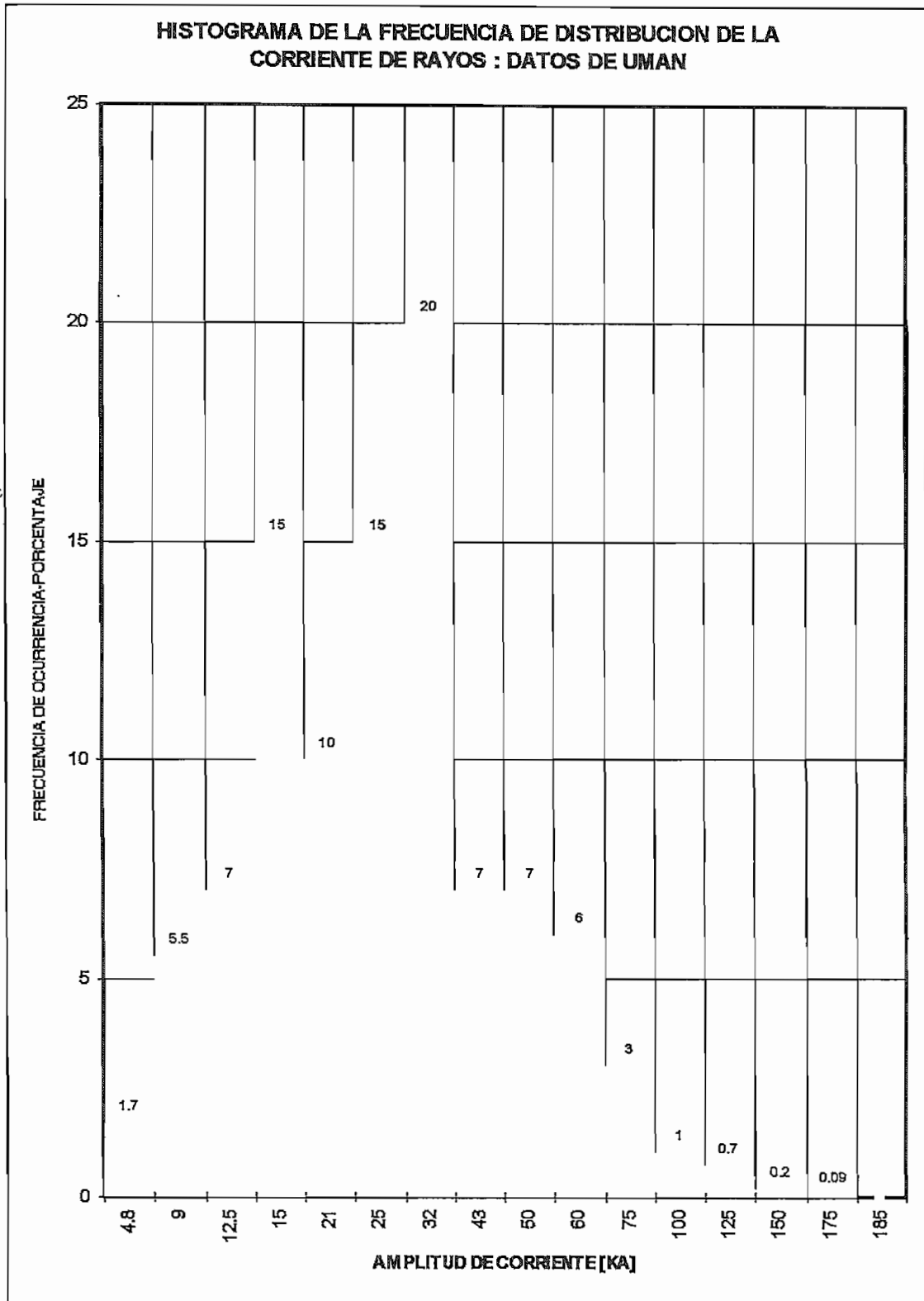
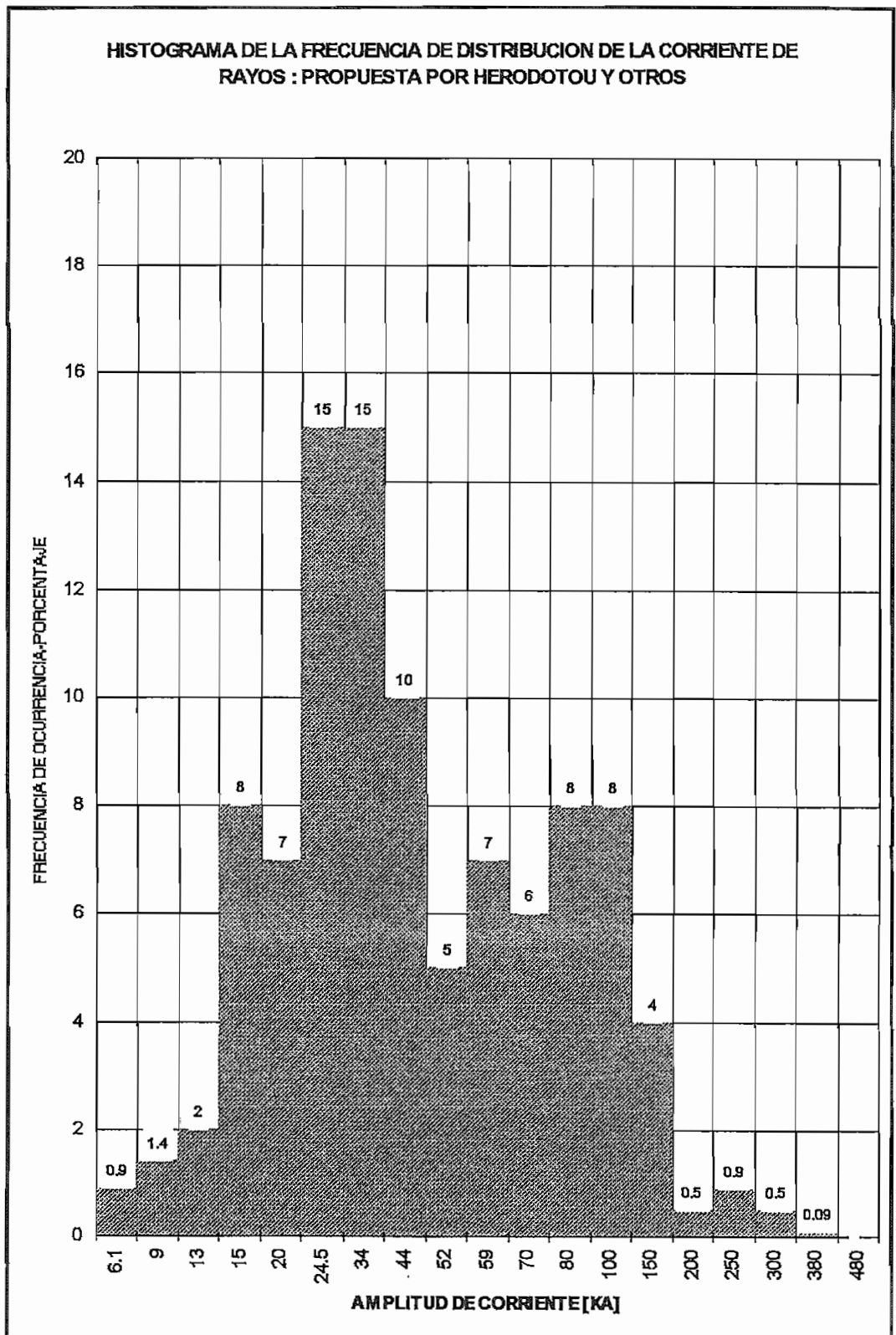


FIG. 3.4  
DATOS DE LA REFERENCIA (\*10)

## 3.2.4.2. PROPUESTA EXPONENCIAL



**FIG. 3.5**  
DATOS DE LA REFERENCIA (\*10)

## 3.2.4.3. PROPUESTA DE LA CIGRÈ

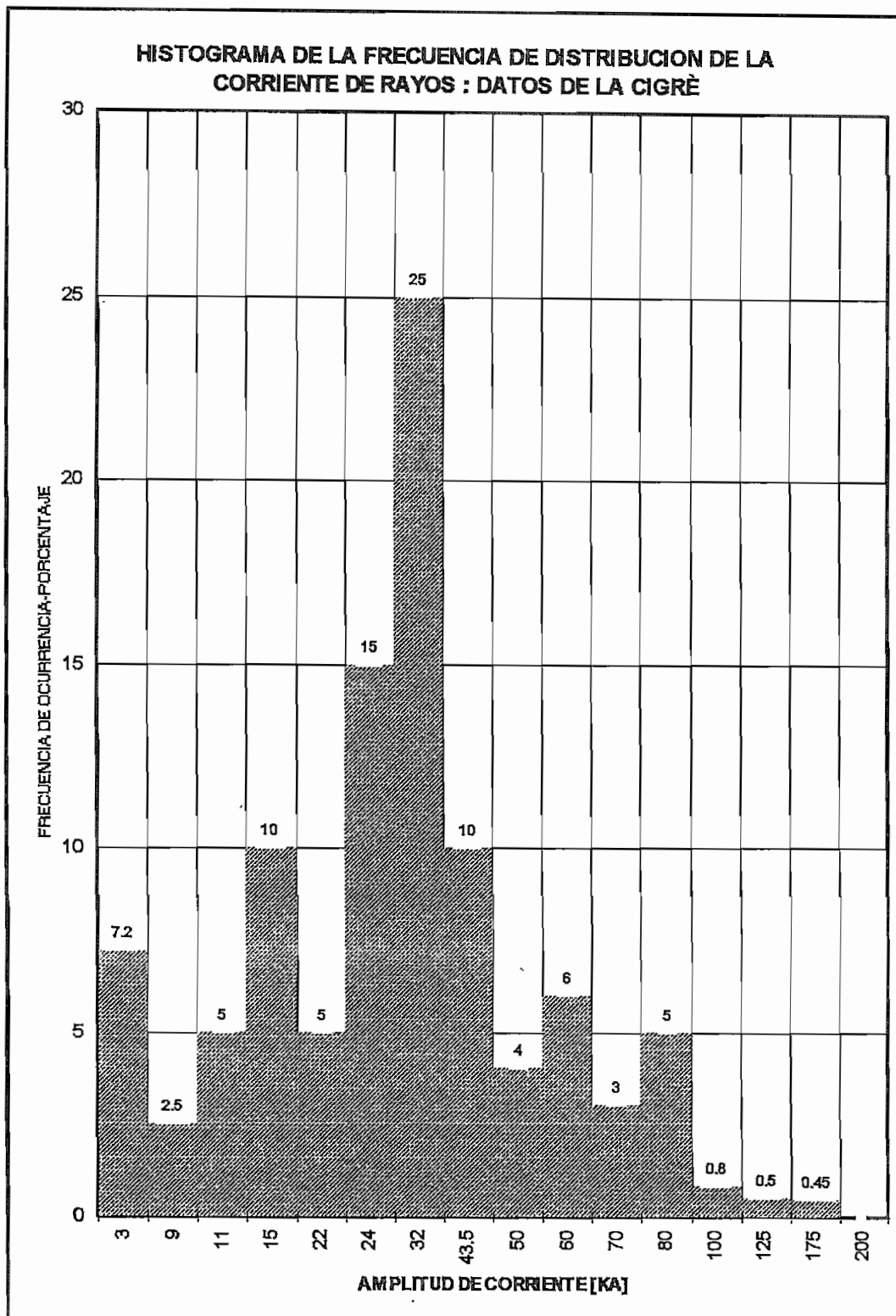


FIG. 3.6  
DATOS DE LA REFERENCIA (\*10)

### **3.2.5 DESARROLLO MATEMATICO DE LAS ECUACIONES PARA DETERMINAR EL PUNTO FINAL DE LA DESCARGA**

A continuación se presenta un grupo de ecuaciones cuya evaluación permitirá determinar el punto de corte entre la trayectoria de la descarga y las superficies de exposición o escudos dadas por los componentes del modelo en consideración, un procedimiento similar se emplea en la referencia (\*2) :

Es importante partir de un punto referencial que permita plantear el problema de una manera objetiva y confiable, para esto se va a dividir el análisis en los siguientes casos:

- Determinación de la mayor altura de corte que pueda presentarse entre la trayectoria de la descarga y las líneas superficies interceptoras(escudos) de los cables de guarda, sin considerar los extremos de cada uno de éstos.
- Determinación de la mayor altura de corte entre la trayectoria de la descarga y las superficies interceptoras de cada extremo de los cables de guarda.
- Determinación de la mayor altura de corte entre la trayectoria de la descarga y las superficies de exposición de los bordes del plano expuesto de la subestación(excluyendo sus vértices).
- Determinación de la mayor altura de corte entre la trayectoria de la descarga y las superficies de exposición de los vértices del plano expuesto de la subestación.
- Determinación de la mayor altura de corte entre la trayectoria de la descarga, el plano expuesto de la subestación y el plano de tierra.
- Determinación de la mayor altura de corte entre la trayectoria de la descarga y las superficies interceptoras (escudos) de los mástiles.

De acuerdo a lo planteado, es importante mencionar que el análisis a desarrollarse se puede simplificar considerando solamente tres casos ya que las ecuaciones que se utilizarán para determinar el punto de corte entre la

trayectoria de la descarga y las superficies (de exposición o interceptoras) de los vértices del plano expuesto, extremos de los cables de guarda y mástiles son prácticamente las mismas, igual sucede con las ecuaciones que tomen en cuenta los cables de guarda y los bordes del plano expuesto, y por último se puede considerar el caso del plano expuesto y el plano de tierra propiamente dichos. Algo que no se debe pasar por alto es que la distancia crítica de arqueo se discriminará según el caso analizado.

### PRIMER CASO:

Determinación del punto de corte entre las superficies interceptoras de los cables de guarda (excluyendo sus extremos), superficies de exposición de los bordes del plano expuesto(excluyendo sus vértices) y la trayectoria de la descarga. Partiendo de un principio general que asume al conductor orientado hacia cualquier posición del espacio. Se utilizará el siguiente sistema de coordenadas:

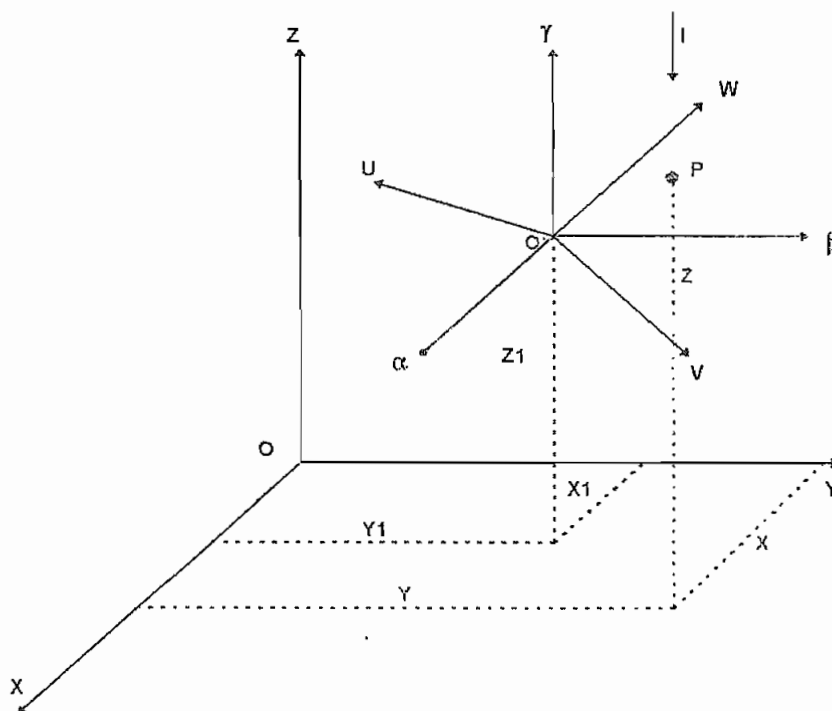


Fig. 3.7 SISTEMA DE COORDENADAS A EMPLEARSE PARA EL ANÁLISIS PREVISTO



Se va a suponer que el punto P, representa la posible intersección de la descarga y las superficies de exposición ó escudos, dependiendo del elemento considerado.

Como se puede observar en la fig. 3.7 y teniendo en cuenta a un cable orientado según el eje W, el lugar geométrico de la superficie interceptora de dicho cable excluyendo sus extremos se puede representar bajo la ecuación de un cilindro, cuya expresión es :

$$\boxed{U^2 + V^2 = S^2} \quad (3.26)$$

$$0 \leq W \leq b \quad (3.26a)$$

Donde :

S, es la distancia crítica de arqueo que depende del elemento analizado  
b, es un parámetro que se definirá más adelante

El paso a seguir es, la rotación del sistema de ejes (U,V,W) hacia los ejes (  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  ), y de estos una traslación hacia el sistema de coordenadas rectangulares representados por (X,Y,Z). Con esto se consigue que todas las variables a utilizarse en la modelacion del sistema se encuentran bajo un mismo sistema de referencia.

### ROTACION DEL SISTEMA DE EJES (U,V,W) HACIA LOS EJES ( $\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$ )

Este proceso se realiza a través de una matriz de paso, que para este caso se denominará (A), usando la siguiente relación:

$$\boxed{(\alpha, \beta, \gamma) = (U, V, W) * A} \quad (3.27)$$

Donde :

A, se define como una matriz de 3x3, de la siguiente forma:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}$$

Para el caso del sistema de coordenadas rectangulares (X,Y,Z,) o el sistema  $(\alpha, \beta, \gamma)$ , los vectores unitarios se definen así:

$$\vec{i} = (1,0,0)$$

$$\vec{j} = (0,1,0)$$

$$\vec{k} = (0,0,1)$$

Por tanto los correspondientes vectores unitarios ortonormales, en el sistema de ejes (U,V,W) serán los siguientes:

$$\vec{i} = \left[ (-l \cdot m / a \cdot b), \left( (l^2 + n^2) / a \cdot b \right), (-n \cdot m / a \cdot b) \right]$$

$$\vec{j} = \left[ (-n / a), 0, (l / a) \right]$$

$$\vec{k} = \left[ (l / b), (m / b), (n / b) \right]$$

Donde :  $a = (l^2 + n^2)^{1/2}$

$$b = (l^2 + m^2 + n^2)^{1/2}$$

$l, m, n$  : son las números directrices de la recta, definida por el elemento en análisis, en el sistema de coordenadas rectangulares (X,Y,Z) ó  $(\alpha, \beta, \gamma)$ , y determinados de la siguiente manera:

Sean los puntos P1(X1,Y1,Z1) y P2(X2,Y2,Z2) que definen la ubicación de un determinado conductor, entonces :

$$l = X_2 - X_1$$

$$m = Y_2 - Y_1$$

$$n = Z_2 - Z_1$$

De las ecuaciones planteadas se deduce que la matriz A, adopta la siguiente forma :

$$A = \begin{pmatrix} (-l \cdot m / a \cdot b) & ((l^2 + n^2) / a \cdot b) & (-n \cdot m / a \cdot b) \\ (-n / a) & 0 & (l / a) \\ (l / b) & m / b & n / b \end{pmatrix} \quad (3.28)$$

Volviendo a la ecuación :  $(\alpha, \beta, \gamma) = (U, V, W) * A$ , se tiene que :

$$\alpha = [ (-l \cdot m / a \cdot b) * U + (-n / a) * V + (l / b) * W ] \quad (3.29)$$

$$\beta = [ ((l^2 + n^2) / a \cdot b) * U + 0 * V + (m / b) * W ] \quad (3.30)$$

$$\gamma = [ (-n \cdot m / a \cdot b) * U + (l / a) * V + (n / b) * W ] \quad (3.31)$$

En forma similar :

$$(U, V, W) = (\alpha, \beta, \gamma) * A^{-1} \quad (3.32)$$

Como :

$$A^{-1} = A^t$$

Entonces :

$$U = [ (-l \cdot m / a \cdot b) * \alpha + ((l^2 + n^2) / a \cdot b) * \beta + (-n \cdot m / a \cdot b) * \gamma ] \quad (3.33)$$

$$V = [ (-n / a) * \alpha + 0 * \beta + (l / a) * \gamma ] \quad (3.34)$$

$$W = [ (l / b) * \alpha + (m / b) * \beta + (n / b) * \gamma ] \quad (3.35)$$

Aplicando (3.33 y 3.34) en (3.26) :  $U^2 + V^2 = S^2$  , se tiene :

$$[(-l^*m / a^*b)^* \alpha + ((l^2 + n^2)/a^*b)^* \beta + (-n^*m/a^*b)^* \gamma]^2 + [(-n / a)^* \alpha + (l / a)^* \gamma]^2 = S^2 \quad (3.36)$$

Desarrollando esta ecuación, se obtiene :

$$\begin{aligned} & \frac{l^2 m^2 \alpha^2}{a^2 b^2} - \frac{lm(l^2+n^2) \alpha \beta}{a^2 b^2} + \frac{lm^2 n \alpha \gamma}{a^2 b^2} - \frac{lm(l^2+n^2) \alpha \beta}{a^2 b^2} + \frac{(l^2+n^2)^2 \beta^2}{a^2 b^2} - \frac{nm(l^2+n^2) \beta \gamma}{a^2 b^2} \\ & + \frac{lm^2 n \alpha \gamma}{a^2 b^2} - \frac{nm(l^2+n^2) \beta \gamma}{a^2 b^2} + \frac{n^2 m^2 \gamma^2}{a^2 b^2} + \frac{l^2 \gamma^2}{a^2} - \frac{2ln \alpha \gamma}{a^2} + \frac{n^2 \alpha^2}{a^2} = S^2 \quad (3.37) \end{aligned}$$

Para resolver la ecuación anterior se debe tener claro que la idea es determinar el punto de corte entre la trayectoria de la descarga y las superficies de exposición ó escudos, y que, como ya se ha mencionado, dicho punto estará gobernado por aquella superficie que primero entre en la zona de atracción de la descarga en análisis. Es así como la expresión anterior se puede simplificar a una ecuación cuadrática en función de la variable "γ", y será justamente la solución de esta ecuación la que determine si existe o no un punto de intersección entre las superficies mencionadas y la trayectoria de la descarga.

Agrupando y simplificando la ecuación (3.37) se tiene:

$$A * \gamma^2 + B * \gamma + C = 0 \quad (3.38)$$

Donde:

$$A = \frac{n^2 \cdot m^2}{a^2 \cdot b^2} + \frac{l^2}{a^2} \quad (3.39)$$

$$B = \left[ \frac{2lm^2n}{a^2b^2} - \frac{2ln}{a^2} \right] * \alpha - \left[ \frac{2nm}{b^2} \right] * \beta \quad (3.40)$$

$$C = \left[ \frac{l^2 m^2}{a^2 b^2} + \frac{n^2}{a^2} \right] \alpha^2 + \left[ \frac{l^2 + n^2}{b^2} \right] \beta^2 - \left[ \frac{2lm}{b^2} \right] \alpha \beta - S^2 \quad (3.41)$$

La solución de la ecuación cuadrática en mención, como ya se dijo, determinará si se ha producido o no un corte en la trayectoria del rayo, es decir si las superficies de exposición ó escudos, dependiendo del elemento en análisis, interceptaron la descarga. Esto se puede observar claramente si esta ecuación tiene una solución real, lo que implicaría que su discriminante sea mayor o igual que cero.

### TRASLACION DEL SISTEMA DE EJES ( $\alpha, \beta, \gamma$ ) HACIA LOS EJES (X, Y, Z)

Este proceso es mucho más sencillo, y se puede desarrollar de la siguiente manera :

$$X = \alpha + X_1, \quad \text{o} \quad \alpha = X - X_1 \quad (3.42)$$

$$Y = \beta + Y_1, \quad \text{o} \quad \beta = Y - Y_1 \quad (3.43)$$

$$Z = \gamma + Z_1, \quad \text{o} \quad \gamma = Z - Z_1 \quad (3.44)$$

Donde:

X, Y : Representan las coordenadas del posible punto de impacto de la descarga (sistema de coordenadas X, Y, Z).

Z : La altura a la que se produjo la intersección de la descarga, si el discriminante de la ecuación cuadrática es mayor que cero (sistema de coordenadas X, Y, Z).

Restaría entonces por definir, si el valor de W cumple con la condición planteada inicialmente (expresión 3.26a), es decir :

$$0 \leq W \leq [b = (l^2 + m^2 + n^2)^{1/2}] \quad (3.45)$$

En forma general W se expresará bajo la siguiente ecuación:

$$W = [ 1 / b * (l^2 + n^2) * (\alpha / l) + (m / b) * \beta ] \tag{3.45a}$$

Para solucionar el problema se debe considerar en forma particular las ecuaciones (3.38) y (3.45), de tal manera que se considere las diferentes ubicaciones que pueden tomar los cables de guardia o bordes del plano expuesto de la subestación, dentro el esquema de apantallamiento :

- Cable de guardia paralelo al plano X-Y, y perpendicular al plano X-Z.  
( $l=0, n=0$  y  $m \neq 0$ )

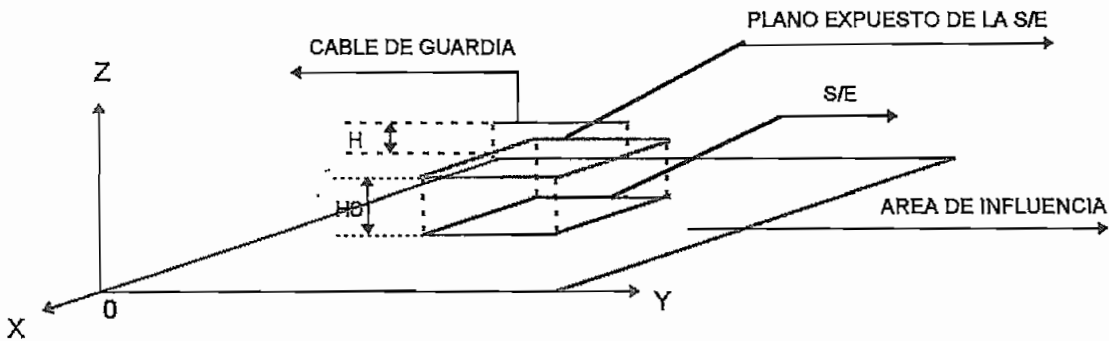


FIG. 3.8

$$\begin{aligned} \gamma^2 + \alpha^2 - S^2 &= 0 \\ W &= (m / b) * \beta \end{aligned} \tag{3.46}$$

- Cable de guardia paralelo al plano X-Y, y perpendicular al plano Y-Z  
( $l \neq 0, m=0$  y  $n=0$ )

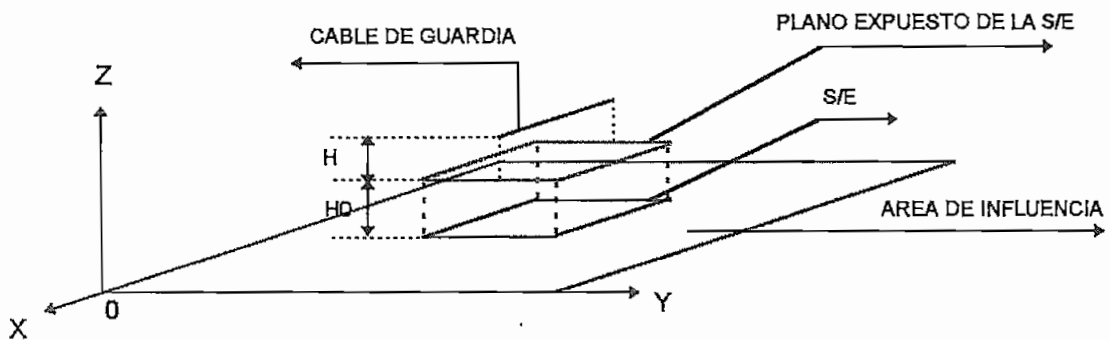


FIG. 3.9

$$\begin{aligned} \gamma^2 + \beta^2 - S^2 &= 0 \\ W &= (l / b) * \alpha \end{aligned} \tag{3.47}$$

- Cable de guardia bajo la siguiente condición :

$$(l=0, m \neq 0 \text{ y } n \neq 0)$$

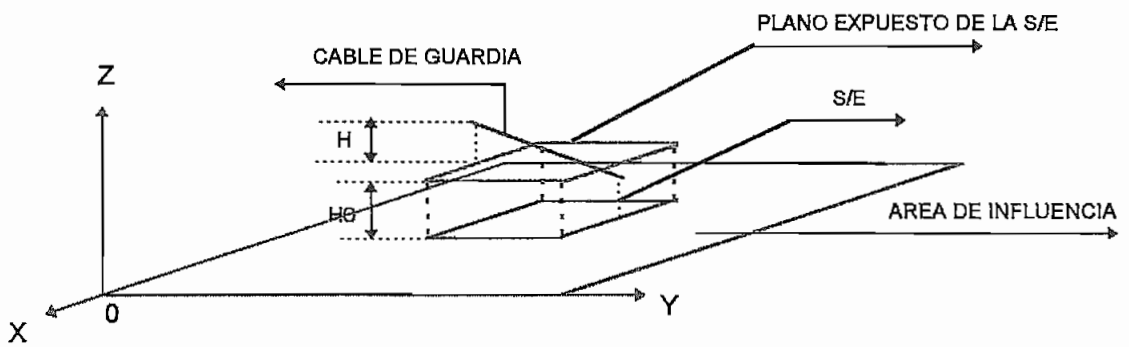


FIG. 3.10

$$A * \gamma^2 + B * \gamma + C = 0 \quad (3.48)$$

$$W = (m^2 + n^2)^{1/2} * \beta / m$$

- Cable de guardia bajo la siguiente condición :

$$(l \neq 0, m=0 \text{ y } n \neq 0)$$

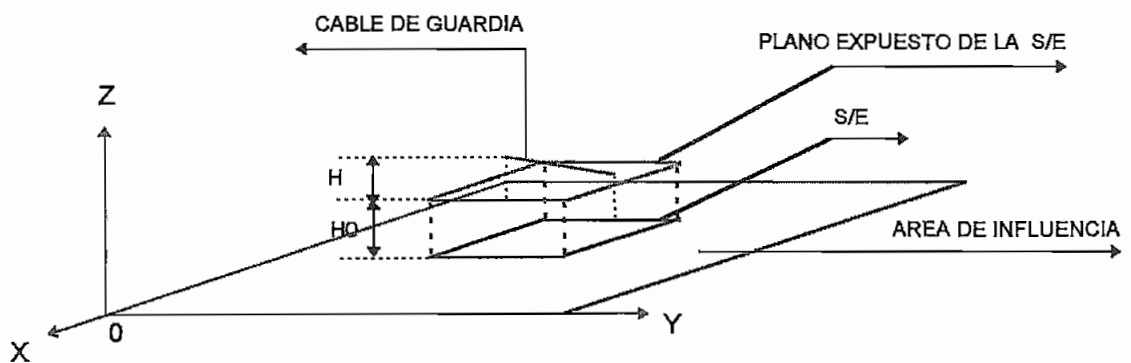


FIG. 3.11

$$A * \gamma^2 + B * \gamma + C = 0 \quad (3.49)$$

$$W = [((a^2 / l) * \alpha) + m * \beta] / b$$

- Cable de guardia bajo la siguiente condición :

$$(l \neq 0, m \neq 0, \text{ y } n = 0)$$

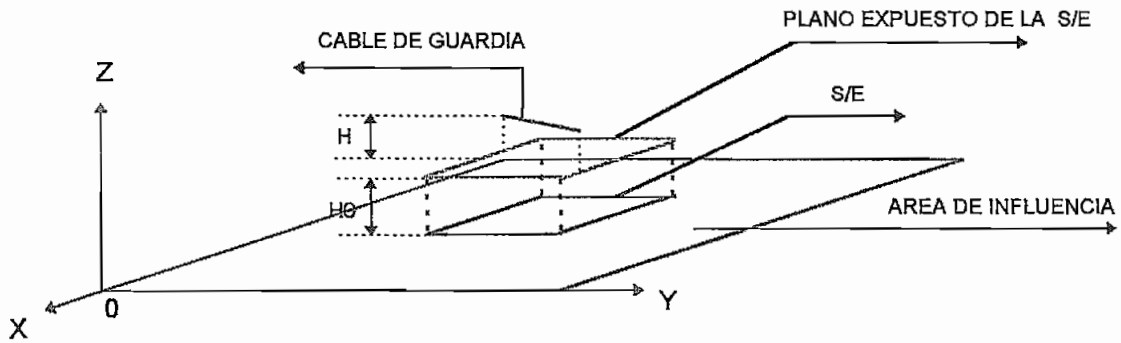


FIG. 3.12

$$A * \gamma^2 + B * \gamma + C = 0 \tag{3.50}$$

$$W = [((a^2 / l) * \alpha) + m * \beta] / b$$

- Cable de guardia bajo la siguiente condición :

$$(l \neq 0, m \neq 0, \text{ y } n \neq 0)$$

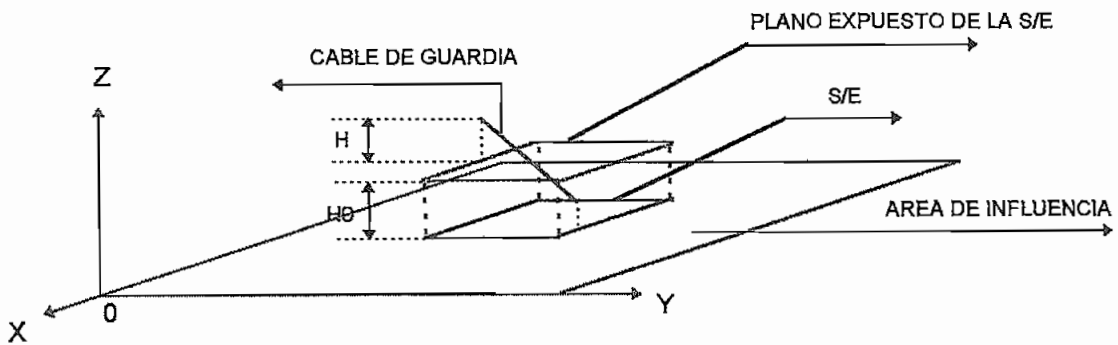


FIG. 3.13

$$A * \gamma^2 + B * \gamma + C = 0 \tag{3.51}$$

$$W = [((a^2 / l) * \alpha) + m * \beta] / b$$



**SEGUNDO CASO :**

Determinación del punto de corte entre las superficies de exposición (vértices del plano expuesto) ó escudos (extremos de los cables de guardia y mástiles) y la trayectoria de la descarga.

El lugar geométrico de las superficies mencionadas, se puede representar por una esfera, cuya ecuación se expresa así :

$$\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2 = S^2 \quad (3.52)$$

Para un componente de coordenadas P1(X1, Y1, Z1), la solución viene dada por :

$$Z = \gamma + Z1 = \sqrt{S^2 - (X - X1)^2 - (Y - Y1)^2} + Z1 \quad (3.53)$$

Donde :

(X,Y) : Es el probable punto de impacto de la descarga sobre tierra.

No se considera el signo negativo de la cantidad radical ya que lo importante es determinar la mayor altura de corte, y por otro lado si la cantidad subradical es negativa esto probaría, como en el caso anterior, que no existe punto de intersección entre la descarga y las superficies de exposición ó escudos (según el componente analizado).

**TERCER CASO :**

Determinación del punto de corte entre las superficies de exposición que conforman el plano expuesto (sin considerar sus bordes y vértices), y la trayectoria de la descarga :

El lugar geométrico de éstas superficies puede definirse como un plano, cuya ecuación es:

$$Z = H_0 + S \quad (3.54)$$

Donde:

$H_0$  : es la altura del plano expuesto de la subestación [m]

$S$  : es la distancia crítica de arqueo  $S_s$  [m]

**PLANO DE TIERRA :**

Al igual que para el plano expuesto, las superficies de exposición del plano de tierra se pueden considerar como el lugar geométrico de un plano cuya ecuación es :

$$Z = K_e * S = S_e \quad (3.55)$$

Donde :

$S_e$  : es la distancia crítica de arqueo a tierra [m], definida a través del parámetro  $K_e$  mencionado en la sección 2.3.2.

### 3.2.6. ALGORITMO DE SOLUCION, DIAGRAMA DE BLOQUES

El algoritmo de solución para el programa digital que permite evaluar aleatoriamente el punto de incidencia de una descarga, mediante la aplicación del modelo electrogeométrico tridimensional, está basado en el siguiente procedimiento :

1. Lectura y asignación de los datos generales.

El usuario deberá ingresar un conjunto de datos que serán necesarios conocer para iniciar la simulación. Como primer punto se deberá escoger las ecuaciones que definan a la distancia crítica de arqueo, o en su defecto

determinar las que considere sean las apropiadas, luego de esto será necesario que se defina o edite la curva de distribución de probabilidad para la corriente de los rayos a tierra, y por último se requiere proporcionar información sobre las características de la subestación y otros parámetros fundamentales como los siguientes:

- Geometría de la subestación (punto de referencia para trasladar cada una de las áreas que serán protegidas por los elementos de guardia).
- El número de años para la simulación
- La densidad de descargas tierra, o en su defecto nivel ceraúnico

En el caso de usar cables de guardia y/o mástiles para el apantallamiento será necesario ingresar las coordenadas que definan exactamente la ubicación de cada uno de estos elementos, así como las coordenadas de las respectivas áreas que éstos deberán proteger, adicionalmente será necesario conocer la altura de las superficies de exposición (plano expuesto de la subestación).

**El sistema de coordenadas a emplearse es el siguiente :**

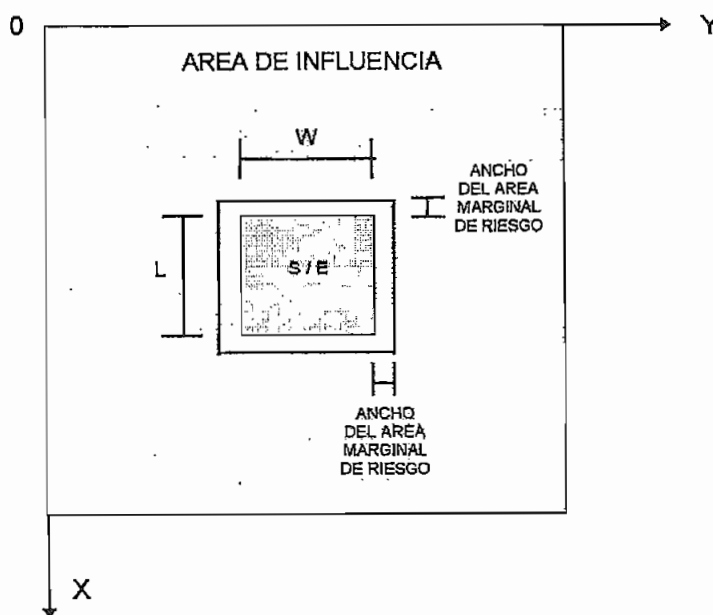


FIG. 3.14 SISTEMA DE COORDENADAS A EMPLEARSE PARA EL INGRESO DE DATOS

2. Definir los cuatro vértices de cada una de las áreas que serán protegidas por los elementos de guardia, y realizar la traslación de éstas hacia el centro del radio de influencia.
3. Ubicar las coordenadas de cada uno de los elementos de protección de tal manera que se encuentren referidas al plano dado por el área de influencia, y de hecho sobre cada una de las áreas que deberán proteger.
4. En base a la curva de distribución de probabilidad de corriente escogida, se podrá evaluar todos los posibles valores de corriente con los que ocurrirá un determinado número de descargas, de acuerdo al período de tiempo que se desee analizar. Se inician un grupo de contadores que permitan tener en consideración todo el rango de corrientes que involucre la curva que se está estudiando y se empieza a evaluar con el primer grupo que tenga una cierta corriente " I " .
5. Se inicializan los contadores que se usarán para llevar la cuenta de todos los eventos.
6. Se genera dos números aleatorios para considerar el posible punto de impacto de la descarga con sus coordenadas  $X_g$  y  $Y_g$ .
7. Se evalúa la distancia crítica de arqueo para cada descarga involucrada en la simulación, dentro del grupo considerado con una cierta corriente I
8. Se determinar el punto de corte entre la trayectoria de la descarga y las superficies de exposición ó interceptoras para todos los posibles elementos del sistema modelado de acuerdo a lo estipulado en la sección 3.2.5.
9. Se determina la mayor altura de corte de todos los componentes analizados, para así evaluar sobre que elemento terminó la trayectoria de la

descarga. En base a este resultado se actualizan los contadores que llevarán la cuenta de las descargas a tierra, aquellas que terminen sobre los elementos de protección y las que pudiesen provocar la salida de la subestación.

10. Si se han analizado todo el grupo de rayos con una cierta corriente "I", se actualiza el valor de dicha corriente tomando como base el siguiente grupo que corresponda según la curva de distribución utilizada y se repite el proceso desde el paso 4. En caso contrario el proceso retorna al numeral 6 pero para considerar un nuevo rayo del grupo en análisis y que posee cierta corriente "I"

11. El proceso anterior se repite hasta cubrir todo el rango de posibles corrientes establecidas en la curva de distribución empleada, luego de lo cual se procede a determinar, tomando en cuenta el número de salidas que se produjeron, el período de protección del apantallamiento de la subestación así como la efectividad del esquema del apantallamiento, en base a las siguientes expresiones :

$$\begin{aligned} T &= 1 / (Ns / \text{años}) \\ EA &= (Ns / NDS) \cdot 100 \end{aligned} \quad (3.56)$$

Donde :

T : Período de protección del apantallamiento [años]

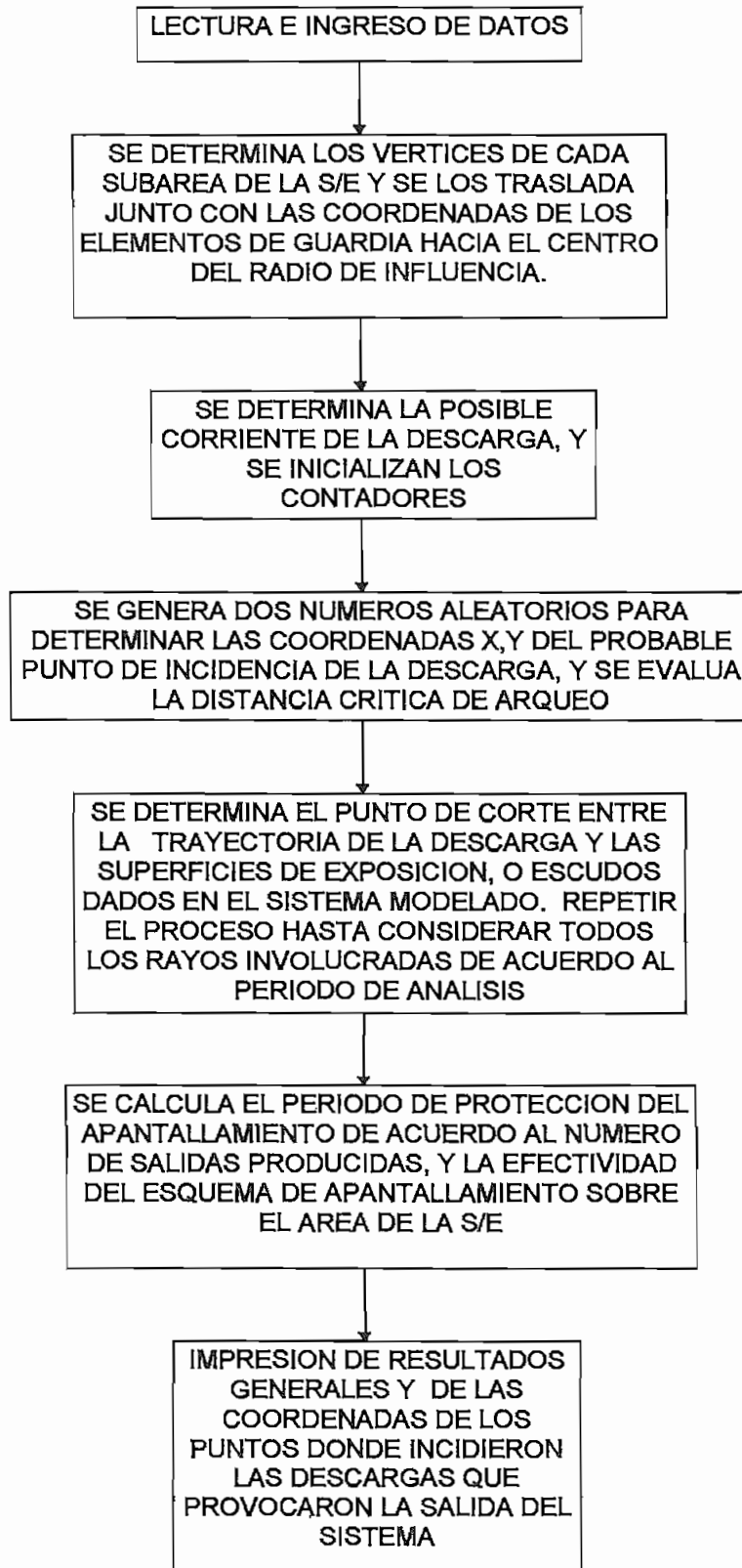
Ns: Número de salidas producidas por falla del apantallamiento.

años : Son los años de simulación [años]

EA : Efectividad del esquema de apantallamiento [%], y

NDS : Número de salidas más el número de descargas interceptadas sobre el área de la subestación

12. Impresión de resultados en forma tabulada sobre las descargas y sus puntos de impacto, así como de las coordenadas de aquellas que produjeron la salida del sistema.

**DIAGRAMA DE BLOQUES**

### **3.2.7. PROGRAMA DIGITAL**

Para completar el programa digital planteado en la sección 3.1, se ha implementado otra parte a dicho programa siguiendo los procedimientos indicados en esta sección (3.2), y de igual forma se ha tratado en lo posible de que el usuario cuente con una herramienta de fácil manejo, que le permita verificar sus diseños para el apantallamiento de subestaciones de una manera rápida, de tal manera que tenga la posibilidad de realizar las modificaciones pertinentes o en su defecto probar nuevos diseños.

### **3.2.8. EVALUACION DE RESULTADOS**

En el capítulo cuarto se presenta una serie de resultados que se obtuvieron mediante la aplicación de posibles esquemas de apantallamiento los cuales fueron probados simulando el comportamiento de una subestación bajo condiciones sujetas a la influencia de las descargas atmosféricas, y de igual manera se realiza una evaluación de los datos arrojados por el programa.

### **3.2.9. RESTRICCIONES**

La parte del programa desarrollada en esta sección, no considera la influencia de todos los componentes pequeños de la subestación, como son transformadores, disyuntores, seccionadores, etc. Este inconveniente tiene que ver con la complejidad, a la que estaría 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".

Otro factor muy importante y que ciertamente restringe la confiabilidad del los resultados es el hecho de que todo modelo analítico debe ser ratificado desde un punto de vista práctico, es decir mediante datos de campo. Lamentablemente en nuestro medio no se cuenta con esta información por lo que necesariamente se tendrá que confiar en las experiencias obtenidas en otros lugares donde se han realizado varias pruebas que en algo pueden garantizar la confiabilidad de los modelos implementados en este trabajo y que serán utilizados bajo las condiciones de nuestro medio.



# CAPITULO IV

## *ANALISIS DE SENSITIVIDAD*

### 4.1. COMPARACION Y ANALISIS DE RESULTADOS GLOBALES

Como se mencionó en los capítulos anteriores el programa digital desarrollado en este trabajo permite mucha versatilidad en cuanto al uso de las ecuaciones que evalúan la distancia crítica de arqueo y las curvas de distribución de probabilidad para la corriente de las descargas atmosféricas, de tal manera que el usuario puede manipular a su conveniencia estos parámetros. Sin embargo, el análisis de sensibilidad presentado en este capítulo pretende formular una guía que sirva como base para iniciar el diseño de un esquema de apantallamiento en una subestación de potencia, considerando la influencia que se presenta bajo el empleo de cada una de las ecuaciones y curvas presentadas como posibles alternativas.

En las siguientes secciones se presenta detalladamente el efecto que resulta, del empleo de las ecuaciones y curvas mencionadas, en el período de protección que puede 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 de circunstancias que puedan presentarse al momento de practicar el diseño de un sistema de apantallamiento. Estos diseños están conformados por una etapa en la que se determina 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. Por esto los próximos análisis se desarrollarán tomando en consideración las dos etapas mencionadas 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 a obtenerse. Para efectos del presente capítulo se ha considerado un valor de 3.86 [descargas / Km<sup>2</sup> \* año], una cantidad superior 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.

A continuación se presenta un análisis comparativo de los resultados que se presentan sobre la altura efectiva de los elementos de protección (H), en función de la densidad de descargas a tierra. Algunos resultados numéricos sobrepasan los valores usualmente empleados en la práctica, pero este estudio los incluye para deducir y demostrar las tendencias que presentan dichos resultados.

Se considera el empleo de las curvas presentadas en la sección 2.2.2 , y las siguientes ecuaciones :

#### **ECUACIONES DE BROWN Y WHITEHEAD :**

$$S = 7.1 * I^{0.75} = S_s = S_t = S_e \quad (4.1)$$

#### **ECUACIONES DE A. MOUSA :**

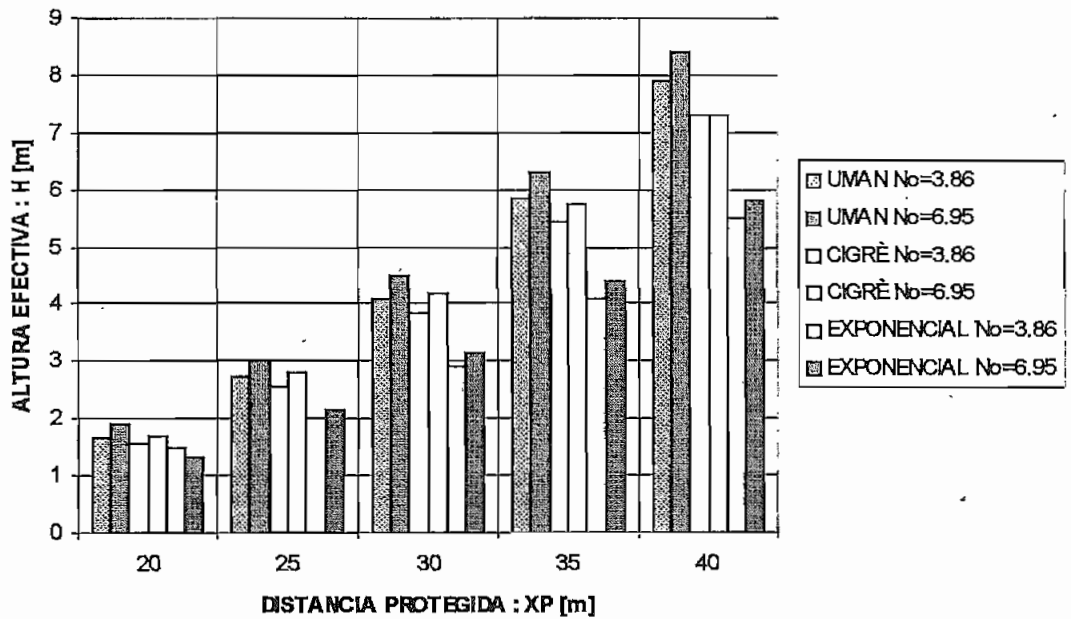
$$S = 8 * I^{0.65} = S_s = S_e$$

$$S_t = 1.2 * S, \text{ para mástiles} \quad (4.2)$$

$$S_{t1} = K_{t1} * S,$$

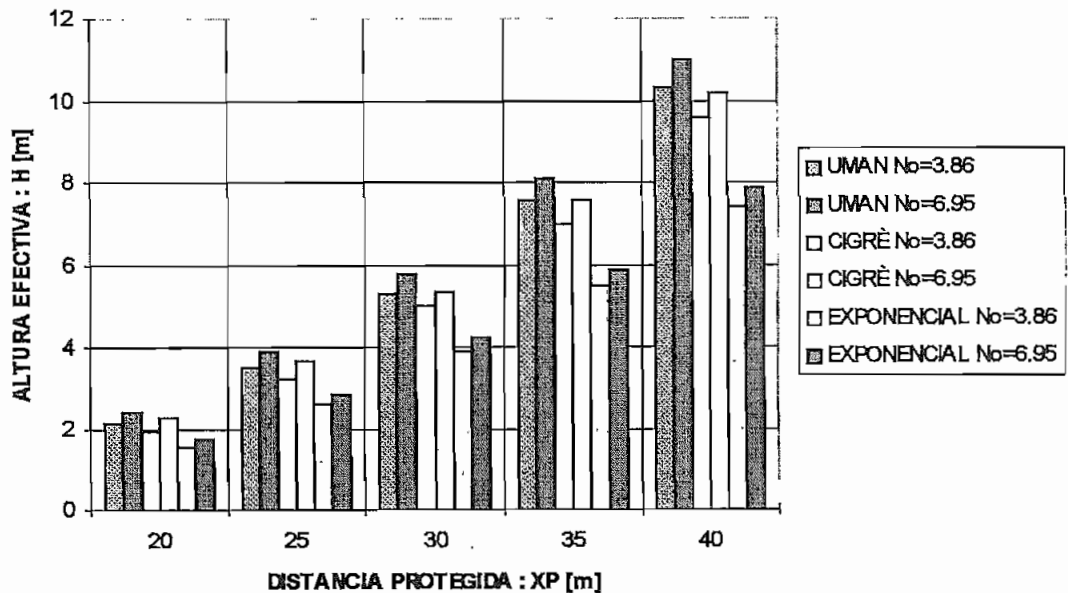
donde  $1 \leq K_{t1} \leq 1.1$ , para torres y extremos de los cables horizontales.

**ANÁLISIS DE LA ALTURA EFECTIVA :  $H$  [m], EN FUNCIÓN DE LA DENSIDAD DE DESCARGAS A TIERRA. PARA UN CABLE DE GUARDIA DE 50 [m], Y UN PERIODO DE PROTECCIÓN DE 1000 [años]. ECUACIONES WHITEHEAD**



**FIG. 4.1 ANÁLISIS PARA UN CABLE DE GUARDIA, BAJO LAS ECUACIONES DE WHITEHEAD**

**ANÁLISIS DE LA ALTURA EFECTIVA :  $H$  [m], EN FUNCIÓN DE LA DENSIDAD DE DESCARGAS A TIERRA. PARA UN CABLE DE GUARDIA DE 50 [m], Y UN PERIODO DE PROTECCIÓN DE 1000 [años]. ECUACIONES DE A. MOUSA**



**FIG. 4.2 ANÁLISIS PARA UN CABLE DE GUARDIA, BAJO LAS ECUACIONES DE A. MOUSA**

ANÁLISIS DE LA ALTURA EFECTIVA : H [m], EN FUNCIÓN DE LA DENSIDAD DE DESCARGAS A TIERRA. DATOS PARA UN MÁSTIL, Y UN PERIODO DE PROTECCIÓN DE 1000 [años]. ECUACIONES WHITEHEAD

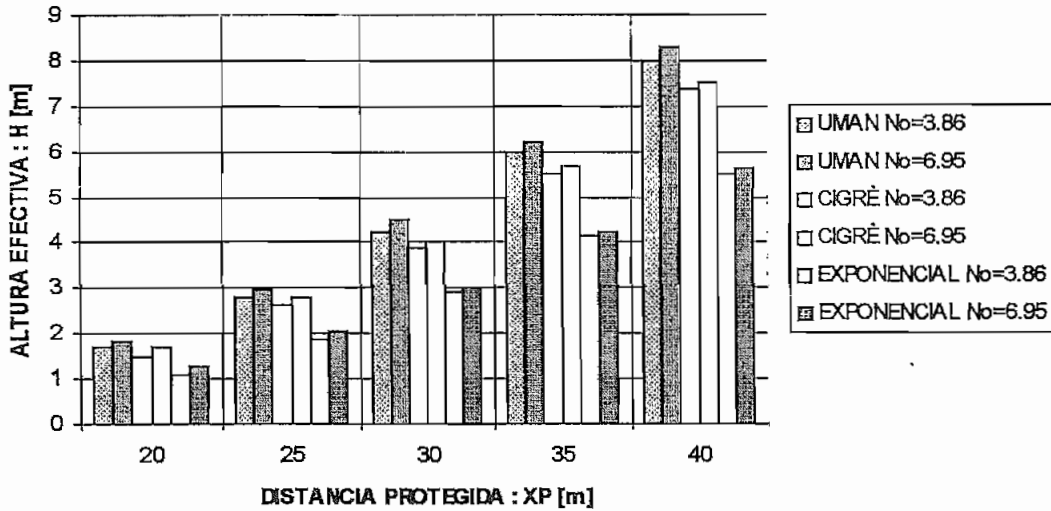


FIG. 4.3 ANÁLISIS PARA UN MÁSTIL, BAJO LAS ECUACIONES DE WHITEHEAD

Para el caso de un mástil, mediante la aplicación de la ecuaciones de Mousa, se ha podido ratificar el hecho de que debido al factor adicional que se considera en la distancia crítica de arqueo, es decir  $St = 1.2 \cdot S$ , para alturas sobre el plano expuesto de la subestación muy cercanas a cero siempre existirá un área protegida por el componente vertical, lo cual implica que para ciertas distancias de protección los mástiles podrán garantizar la efectividad del apantallamiento sin importar la altura a la que éstos se coloquen ( $H \approx 0$ ). Matemáticamente esto tiene una explicación, a través de la ecuación 3.2, es decir :

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

Para  $H = 0$

$$XP = \sqrt{St^2 - Se^2} = \sqrt{(1.2 \cdot S)^2 - S^2} = \sqrt{S^2(1.44 - 1)} = S \cdot \sqrt{0.44}$$

Sin embargo físicamente debe entenderse que para  $H=0$ , no puede existir una área protegida por el elemento, esto se justifica ya que para dicho valor de H, la distancia crítica de arqueo de un mástil se convierte en la distancia de arqueo a tierra, por lo tanto :

$$XP = \sqrt{Se^2 - (Se - 0)^2} = 0$$

Debido a esto, no se ha mostrado los resultados bajo la aplicación de las ecuaciones de Mousa para el caso de un mástil, ya que para los valores de XP, propuestos en la (fig.4.3), se encontró que el período de protección del apantallamiento puede ser garantizado sin importar la altura de ubicación del mástil a emplearse. Debe comprenderse que valores muy pequeños de H, si bien dan un resultado matemáticamente favorable para la protección, en la práctica ésta no está garantizada, porque las ecuaciones solo son válidas cuando el mástil emerge sobre un plano de grandes dimensiones (mayor o igual a 1 Km<sup>2</sup>), que no es el caso real de una subestación. En consecuencia cuando se presente este tipo de situaciones se recomienda hablar de una altura mínima sobre el plano expuesto, y que se la definirá como "Hmín" de aislamiento, ya que su valor estará expresado de acuerdo al nivel de aislamiento de la subestación.

Por otra parte las figuras (4.1 a 4.3) muestran como una densidad de descargas mayor, requiere una altura efectiva (H) más grande, para otorgar un mismo nivel de protección. También puede observarse en estas figuras el efecto sobre "H" de las curvas de probabilidad de corriente que se han empleado (Uman, Cigrè, Exponencial). Nótese en este caso que la mayor variación se presenta al comparar entre la curva de Uman y la Exponencial, estando esta variación en el orden del 35% al 45%, es decir la altura efectiva (H), según la curva exponencial será 35% a 45% veces menor que la resultante de la curva de Uman. De igual manera, para el caso del cable de guardia, empleado en las figuras(4.1 y 4.2), las ecuaciones de Mousa arrojan requerimientos mayores de H respecto de las ecuaciones de Whitehead, cuyo incremento está en el orden del 25 al 35%, esto puede entenderse debido a los factores (B,b) a los que está sujeta la corriente de una descarga (según la expresión 2.1), y que para el caso de Mousa afectan a la distancia crítica de arqueo (expresión 4.2) dando un valor menor que el que se presentaría aplicando las ecuaciones de Whitehead (expresión 4.1) .

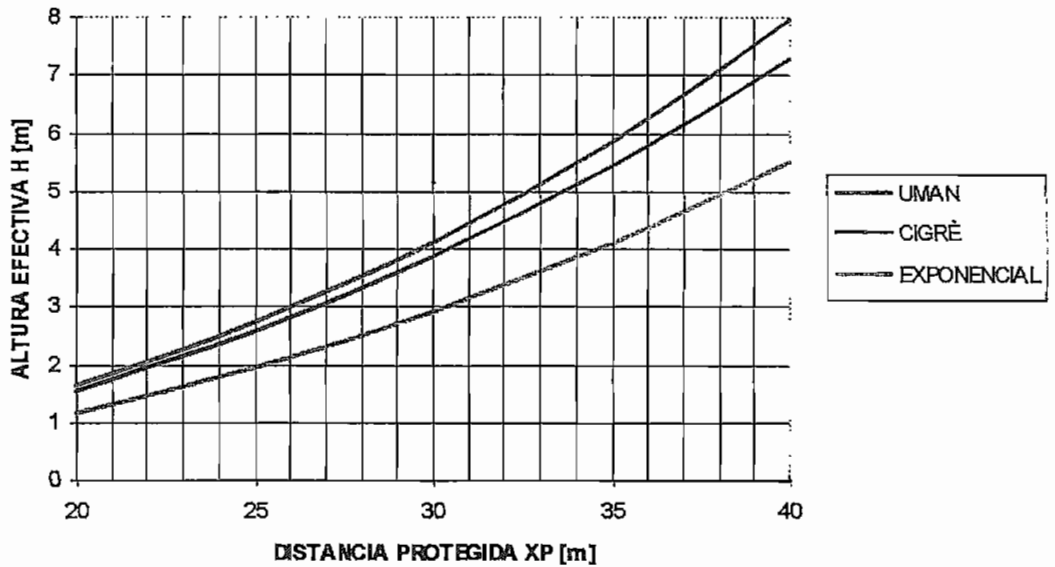
#### 4.2. INFLUENCIA Y RELACION DE LA MAGNITUD DE CORRIENTE DE LA DESCARGA SOBRE EL PERIODO DE PROTECCION DEL APANTALLAMIENTO Y LA ALTURA EFECTIVA DE LOS ELEMENTOS DE GUARDIA.

Uno de los factores principales para la efectividad de un esquema de apantallamiento indudablemente es la altura a la que se colocarán los elementos de protección, sin embargo el modelo electrogeométrico cuya base fundamental es la distancia crítica de arqueo (que como ya se ha demostrado está directamente relacionada con la magnitud de corriente de las descargas atmosféricas) involucra que dicha corriente juegue también un papel protagonista en el éxito de un sistema de apantallamiento.

Como punto de partida se tendrá la posibilidad de trabajar con las curvas de distribución de frecuencia para la corriente de las descargas, propuestas en la sección 2.2.2, a través de una función de densidad de probabilidad (expresión 3.16) que representará a cada una de ellas. Se debe notar que la principal diferencia entre estas curvas es el intervalo de corrientes que admiten como factibles para el análisis de una descarga, y obviamente en el valor medio que éstas representan. Por ejemplo, para determinar la altura de los elementos de protección, el principio de evaluación depende del área que se desea proteger y que está relacionada con la distancia crítica de arqueo(S) (según las expresiones 3.1 y 3.2), donde además dicha distancia (S) se ve incrementada a medida que la magnitud de corriente aumente (expresión 2.1). Entonces, en el caso de la curva exponencial la distancia protegida será mucho mayor, lo que implica una disminución en el riesgo de posibles fallas del apantallamiento, conduciendo finalmente a que los resultados muestren que la altura H a la que se deberán colocar los elementos de guardia disminuya notoriamente. Lo mencionado ratifica los resultados indicados en las figuras (4.1 a 4.3), de ahí que se puede concluir que :

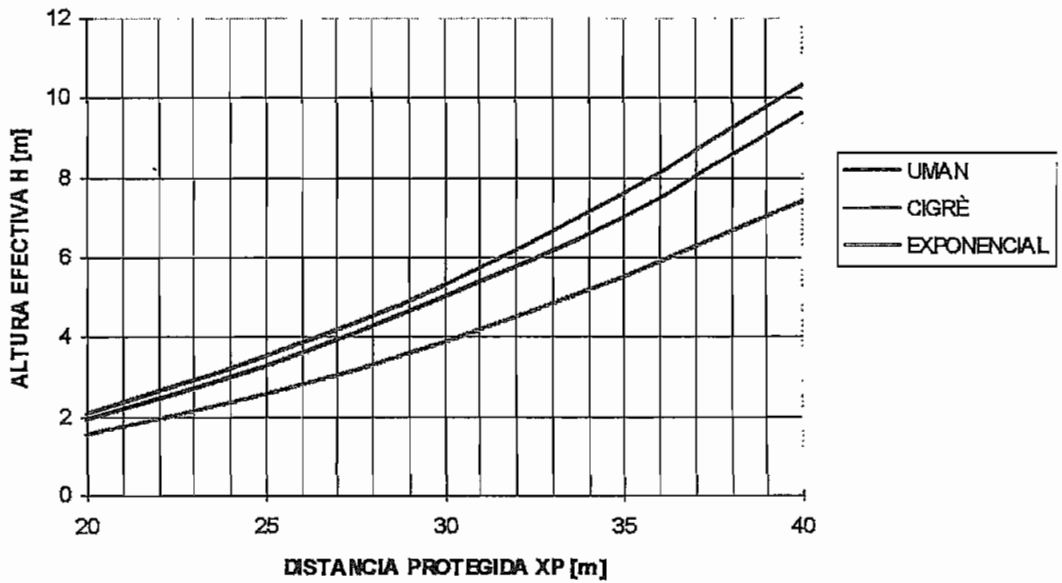
$$H_{(EXPONENCIAL)} < H_{(CIGRE)} < H_{(UMAN)}$$

**ANALISIS DE LA ALTURA EFECTIVA H, PARA UNA CABLE DE GUARDIA DE 50 [m],  
UN PERIODO DE PROTECCION DE 1000 [años], Y UNA  $No=3.86$  [desc./ Km<sup>2</sup>año]  
ECUACIONES DE WHITEHEAD:**



**FIG. 4.4** ANALISIS PARA UN CABLE DE GUARDIA, BAJO LAS ECUACIONES DE WHITEHEAD

**ANALISIS DE LA ALTURA EFECTIVA H, PARA UNA CABLE DE GUARDIA DE 50 [m],  
UN PERIODO DE PROTECCION DE 1000 [años], Y UNA  $No=3.86$  [desc./ Km<sup>2</sup>año]  
ECUACIONES DE A. MOUSA :**



**FIG. 4.5** ANALISIS PARA UN CABLE DE GUARDIA, BAJO LAS ECUACIONES DE A. MOUSA

ANÁLISIS DE LA ALTURA EFECTIVA H, PARA UN MÁSTIL, UN PERÍODO DE PROTECCIÓN DE 1000 [años], Y UNA  $No=3.86$  [desc./ Km<sup>2</sup>\*año]  
ECUACIONES DE WHITEHEAD:

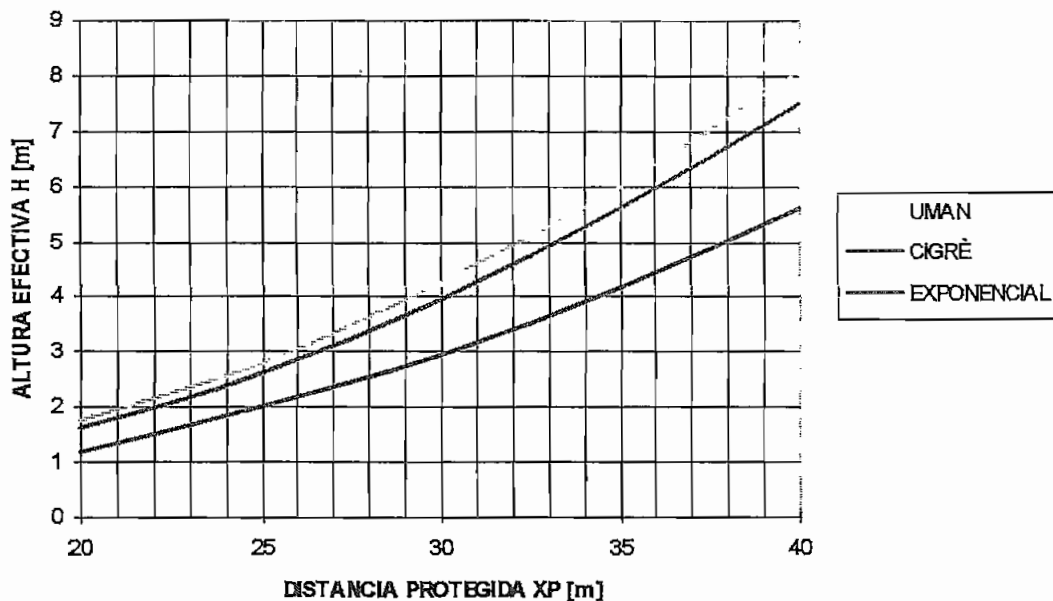


FIG. 4.6 ANÁLISIS PARA UN MÁSTIL, BAJO LAS ECUACIONES DE WHITEHEAD.

Para el empleo de las ecuaciones de Mousa, como se mencionó en la sección 4.1, se presenta una supuesta protección efectiva cuando se utiliza un mástil, sin importar la altura a la que éste se coloque (por más pequeño que resulte el valor de H), tomando obviamente las distancias protegidas en un rango de 20 a 40 metros y un período de protección de 1000 años tal como lo muestra el ejemplo de la figura 4.6. Esto se justificó en la misma sección 4.1, donde además se menciona que para estas circunstancias se debe ubicar a los mástiles (elemento de guardia) a una altura no menor a la dada por el nivel de aislamiento de la subestación (H mínima de aislamiento). A manera de ensayo se realizó unas pruebas para encontrar la mínima distancia de protección, bajo la cual el empleo de las ecuaciones de Mousa arrojará resultados que muestren un cierto valor de H, al que se debiera colocar el mástil analizado de tal manera que se garantice el apantallamiento, encontrándose que dicho valor ésta en el orden de los 60 metros para el caso de las curvas de Uman y la Cígre, y de 75 metros para la curva de Herodotou (exponencial). Debe quedar claro que estos valores son solamente un indicativo del efecto resultante en el análisis, y particularmente para una caso



en el que se requiera obtener un período de protección de 1000 años, tal como lo indica el ejemplo de la figura 4.6.

De las figuras (4.4 a 4.6) se puede concluir que los valores de  $H$ , a los que se supone serán colocados los elementos de protección, marcan una notoria diferencia cuando las distancias a proteger por los elementos de guardia se va incrementando, es decir a medida que los valores de  $XP$  aumentan, la diferencia en altura entre las curvas propuestas (Uman, Cigrè, y exponencial) se alarga, y por el contrario para valores de  $XP$  relativamente pequeños (en el caso del ejemplo 20 metros), se puede observar como la altura  $H$ , dada por cada una de las curvas se asemeja en gran medida una con otra. De hecho para este valor de  $XP$  (20 m) dicha altura esta en el orden de 1 a 2 metros, lo cual resulta ser un valor bastante pequeño, tomando en cuenta el período de protección que se desea obtener (1000 años), por lo tanto es de esperarse que exista un punto de coincidencia entre las 3 curvas empleadas, y que obviamente estará dado para valores pequeños de  $XP$ , lo que implicaría que " $H$ " se esté acercando a cero.

#### **4.3. INFLUENCIA Y RELACION DE LAS POSIBLES ECUACIONES A EMPLEARSE PARA LA DISTANCIA CRITICA DE ARQUEO, SOBRE EL PERIODO DE PROTECCION DEL APANTALLAMIENTO, Y LA ALTURA EFECTIVA DE LOS ELEMENTOS DE GUARDIA**

Este análisis se basa en las opciones que el programa presenta como alternativas para evaluar la distancia crítica de arqueo, y que son las expresiones propuestas por A. Mousa(\*7), y aquellas sugeridas por Whitehead(\*2). Se debe mencionar que luego de evaluar los resultados presentados mediante la aplicación de estas ecuaciones se ha dejado propuesta una alternativa adicional, de tal manera que el usuario pueda probar sus esquemas de apantallamiento considerando dicha opción, y que se la ha definido como una alternativa recomendada, ya que las ecuaciones

se han planteado tomando en cuenta el valor propuesto por la IEEE(\*9) para la distancia crítica de arqueo en forma general, y que dentro de la literatura resulta ser la versión más actualizada que se aceptado como válida para definir dicho parámetro, donde además resulta interesante considerar el efecto adicional sobre dicha expresión, cuando es aplicada a estructuras verticales, tal como lo propone Mousa, y que se encuentra debidamente justificado en la referencia (\*7). Finalmente queda la opción de que el usuario pueda editar sus propias ecuaciones, en las que podrá manipular a su conveniencia el efecto de los parámetros B, b, Ks, Kt, Kt1, y Ke definidos en las expresiones 2.2 a 2.5 .

#### **ECUACIONES DE A. MOUSA :**

$$S = 8 * I^{0.65} = S_s = S_e$$

$$S_t = K_t * S , \text{ para estructuras verticales}$$

Donde :  $S_t = 1.2 * S$ , para mástiles

$$S_{t1} = 1.1 * S , \text{ para torres y extremos de los cables de guardia.}$$

#### **ECUACIONES DE BROWN Y WHITEHEAD :**

$$S = 7.1 * I^{0.75} = S_s = S_t = S_e$$

#### **ECUACIONES RECOMENDADAS :**

$$S = 10 * I^{0.65} = S_s = S_e$$

$$S_t = 1.2 * S , \text{ para mástiles}$$

$$S_t = 1.1 * S , \text{ para los extremos de un cable de guardia}$$

Es importante notar la influencia que representa el empleo de estas ecuaciones al determinar la altura, que tendrán los elementos de guardia, sobre el plano expuesto de la subestación, y que se puede apreciar claramente en las figuras (4.1 a 4.6). Por otro lado para evaluar la influencia

sobre el período de protección, el análisis se hará considerando el efecto que se puede presentar bajo ciertas configuraciones que definan a un esquema de apantallamiento, y que será detallado en las siguientes secciones. Para complementar las observaciones se ha planteado la utilización de las curvas propuestas por Uman, Herodotou(exponencial) y la Cigrè, definidas conforme se indica en la sección 3.2.4.

El estudio se ha realizado tomando como base una subestación tipo de 200 [m] de largo, por 200 [m] de ancho. Sometida a un radio de influencia de una milla, según lo mencionado en la referencia (\*2), y considerando un intervalo de variación del ancho de la denominada área marginal de riesgo(fig. 3.14), que para efectos de la comparación y con el propósito de poder apreciar los cambios en el período de protección se asumirá que toma valores entre 10 y 50 metros. Además se supondrá una densidad de descargas a tierra igual a 3.86 [desc. / Km<sup>2</sup> \*año], una altura del plano expuesto de la subestación igual a 15 metros, y un período de estudio de 500 años. La altura del plano expuesto será modificada en algunos casos típicos, de tal manera que se pueda apreciar el efecto resultante de dicho cambio.

El programa presenta la opción de poder usar la simulación digital basada en el método de Monte-Carlo, o aquella presentada en este trabajo, sin embargo se realizaron varias pruebas con el afán de comparar los resultados obtenidos bajo las dos propuestas, que entre otras cosas, dejaron muy claro que la aplicación del método de Monte-Carlo a parte de resultar notablemente aleatorio involucra un análisis más pesimista pero que en definitiva no diverge en demasía de los resultados obtenidos mediante el modelo aquí planteado, por lo que es factible garantizar la confiabilidad y congruencia de la alternativa propuesta en el modelo analítico de este trabajo, respecto del presentado en la referencia (\*2).

#### 4.4. INFLUENCIA DE LA UBICACIÓN Y NUMERO DE CABLES DE GUARDIA A EMPLEARSE EN UN ESQUEMA DE APANTALLAMIENTO SOBRE EL PERIODO DE PROTECCION RESULTANTE

- UTILIZACION DE 2 CABLES DE GUARDIA PARALELOS :

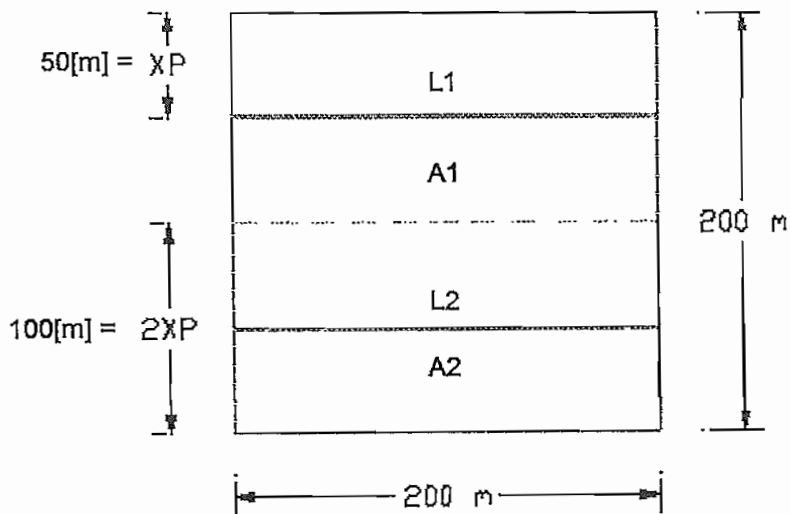


FIG. 4.6a

##### DATOS DE LA SUBESTACION :

$$T = 500 \text{ años}$$

$$A = 200 * 200 \text{ [m}^2\text{]} = 40000 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$A1 = 200 * 100 = 20000 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$A2 = 200 * 100 = 20000 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$TA1 = T * A / A1 = 500 * 40000 / 20000 = 1000 \text{ [años]}$$

$$TA2 = T * A / A2 = 500 * 40000 / 20000 = 1000 \text{ [años]}$$

Entonces :

$$A1 : TA1 = 1000 \text{ años, } XP = 50 \text{ [m], } L1 = 200 \text{ [m]}$$

$$A2 : TA2 = 1000 \text{ años, } XP = 50 \text{ [m], } L2 = 200 \text{ [m]}$$

Donde L1, L2 son las longitudes de los cables empleados.

Para el presente análisis se supondrá que ambos cables serán ubicados sobre estructuras de 15 metros.

Según las ecuaciones de WHITEHEAD :

Cable 1 y Cable 2 (condiciones similares)

Curva de UMAN :  $H = 13.95$

Curva CIGRÉ :  $H = 12.8$

Curva EXPONENCIAL :  $H = 9.45$

Según las ecuaciones de A. MOUSA :

Cable 1 y Cable 2 (condiciones similares)

Curva de UMAN :  $H = 18.55$

Curva CIGRÉ :  $H = 17.6$

Curva EXPONENCIAL :  $H = 13.2$

Como se puede notar la altura  $H$  a las que se deberán colocar los cables de guardia resulta ser poco práctica y de hecho no recomendable, ya que el costo del apantallamiento se incrementaría en forma excesiva. Sin embargo para efectos del análisis que se pretende realizar no se le prestará mayor atención debido a que el objetivo es evaluar el efecto de posibles influencias que se puedan presentar bajo este tipo de configuraciones dentro de un esquema de apantallamiento. De otro lado no está por demás dejar claro una recomendación que determinará que la altura de los elementos de protección sobre el plano expuesto de la subestación no resulte ser extremadamente grande, y que consiste en dividir a la subestación en el mayor número de áreas posibles, donde los cables de guardia no tengan que cubrir distancias (XP) demasiado grandes, sin importar el tamaño del cable ya que esto puede resultar poco influyente según lo que se explicará en la sección 4.4.1.

A continuación se presentan dos figuras que muestran la influencia sobre el período de protección resultante de esta solución, tomando una variación del área marginal de riesgo entre 10 y 50 metros.

### ECUACIONES DE WHITEHEAD

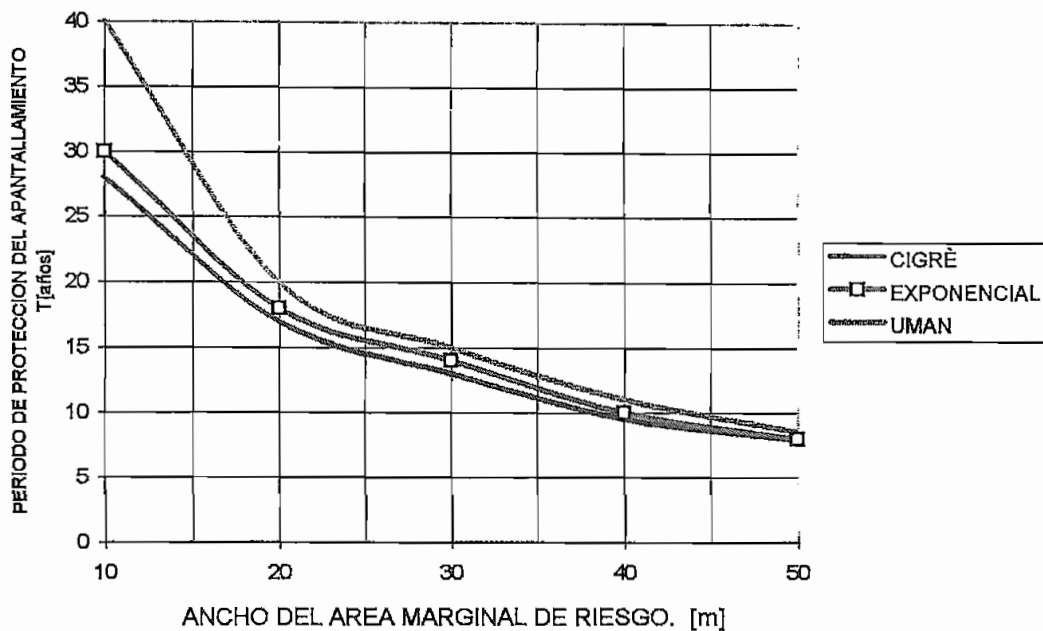


FIG. 4.7 ANALISIS DEL PERIODO DE PROTECCION PARA 2 CABLES DE GUARDIA PARALELOS. ECUACIONES DE WHITEHEAD

### ECUACIONES DE MOUSA

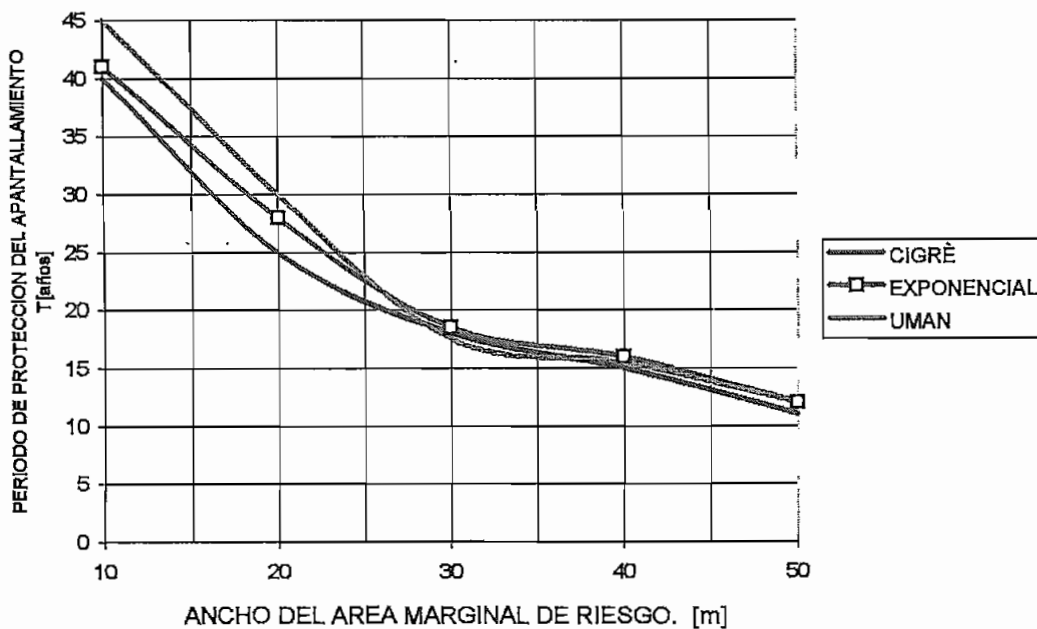


FIG. 4.8 ANALISIS DEL PERIODO DE PROTECCION PARA 2 CABLES DE GUARDIA PARALELOS. ECUACIONES DE A. MOUSA

Después de realizar un variado grupo de pruebas, se ha detectado que el empleo de este tipo de alternativas, para diseñar un esquema de apantallamiento, y en forma más general la utilización de cables guardia, presenta cierta sensibilidad a posibles fallas del sistema en aquellas zonas que determinan el perímetro del área protegida, y sobre todo en el lindero marcado por las zonas de protección dadas por cada cable de guardia. Razón por la cual se ha visto la necesidad de permitir que dichas zonas cubran un área mas allá de la delimitada por la subestación y sobre todo generen una superficie interceptora(escudo) que se asemeje al plano expuesto de la subestación, de tal manera que se corrijan este tipo de inconvenientes.

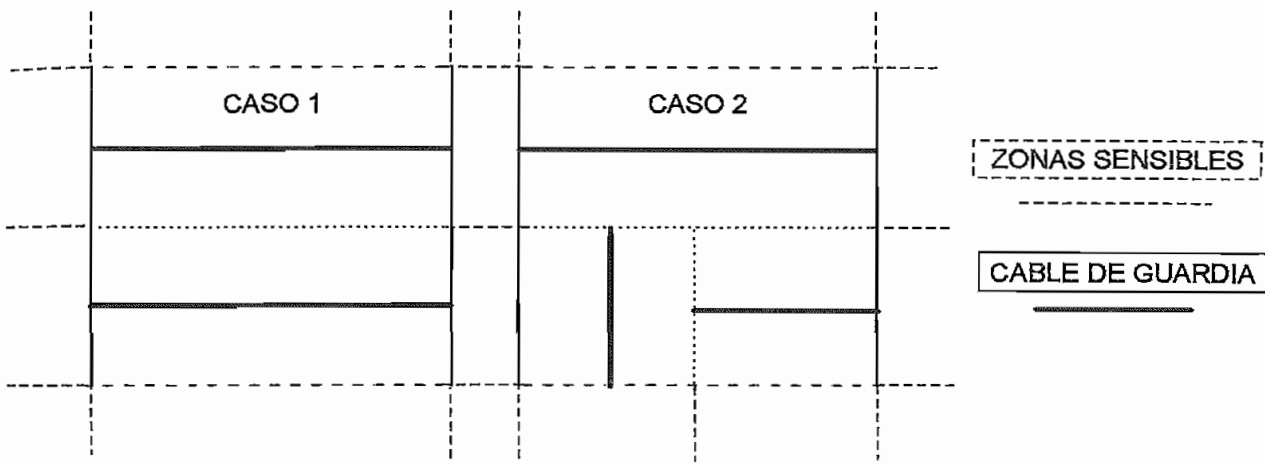


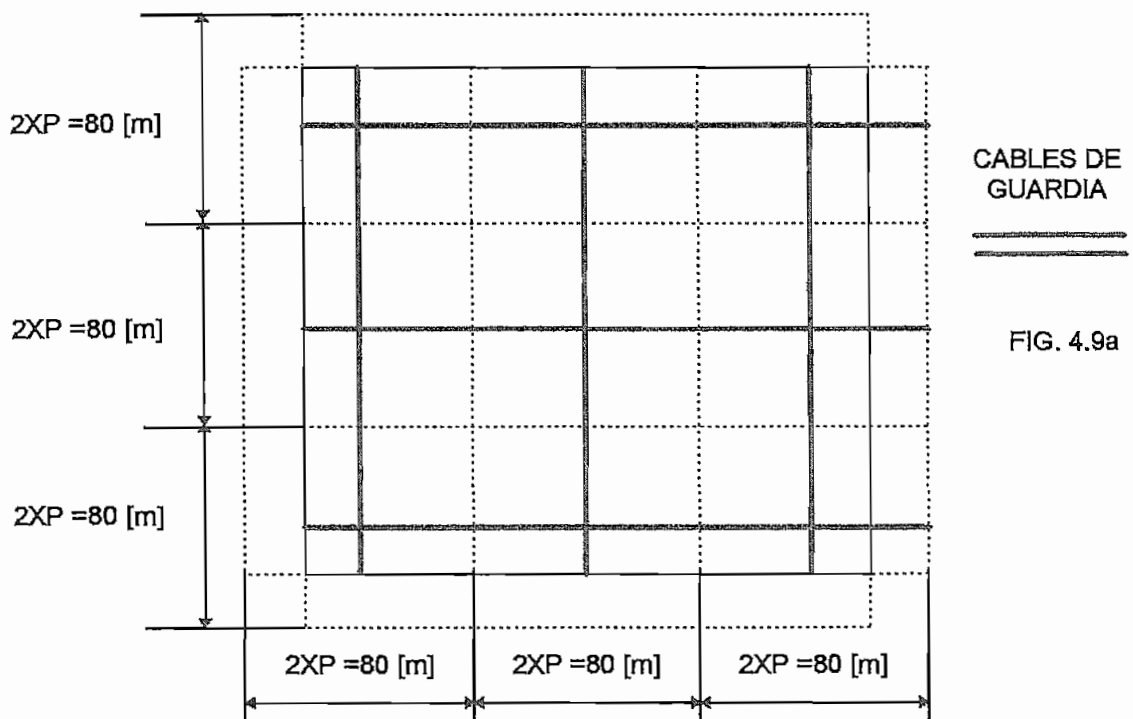
FIG. 4.9 ZONAS SENSIBLES, DETECTADAS BAJO EL EMPLEO DE CABLES DE GUARDIA

Por otro lado, se ha podido apreciar que el mayor número de salidas que se presentan en el sistema, es debido a descargas incidentes sobre el área marginal de riesgo (área periférica sobre la subestación), ya que obviamente la altura  $H$ , resultante de este caso particular, resulta ser un valor extremadamente grande, por lo que es de esperarse que el blindaje sobre el área de la subestación sea confiable. Además la simulación digital que permitió determinar dicho valor ( $H$ ), debe estar acorde a los requerimientos de un apantallamiento efectivo.

Adicionalmente se ha notado, que el área marginal de riesgo dada en aquellas zonas perpendiculares al cable de guardia, es mucho más sensible que aquellas que se marcan en la zona paralela a la longitud del mismo.

En cuenta a las figuras 4.7 y 4.8, se puede observar que el período de protección del apantallamiento, no marca diferencias grandes de una curva de distribución de corriente a otra. Esto debe resultar lógico ya que existe una compensación para el empleo de cada curva, dada por la altura a la que se deben colocar los elementos de guardia y la cual si es notablemente diferente para cada caso, según se demostró en la sección 4.1. Esta situación no se comporta de igual forma cuando se comparan los resultados bajo el empleo de las ecuaciones propuestas, ya que en el caso de Mousa(\*7) se ha permitido considerar un factor adicional para la distancia crítica de arqueo dada para los extremos de los cables de guardia, y que obviamente influirá en los resultados finales.

• **UTILIZACION DE CABLES DE GUARDIA CRUZADOS :**



**DATOS DE LA SUBESTACION :**

$T = 500$  años

$A = 200 * 200 \text{ [m}^2\text{]} = 40000 \text{ [m}^2\text{]}$



Como se puede ver en la última figura la subestación será apantallada por seis cables de guardia, ubicados perpendicularmente sobre la subestación y donde cada uno de los cuales protegerá un área de las siguientes características:

$$a = 200 * 80 = 16000 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$T_a = T * A / a = 500 * 40000 / 16000 = 1250 \text{ [años]}$$

$$XP = 40 \text{ [m]} \text{ y } L = 200 \text{ [m]}$$

Donde L es la longitud para cada uno de los cables empleados.

Para el presente análisis se supondrá que todos los cables serán ubicados sobre estructuras de 15 metros.

Como los seis cables están sujetos a condiciones similares la altura H resulta ser la misma para todos los casos :

Según las ecuaciones de WHITEHEAD :

$$\text{Curva de UMAN : } H = 8.86$$

$$\text{Curva CIGRE : } H = 8.1$$

$$\text{Curva EXPONENCIAL : } H = 6.11$$

Según las ecuaciones de a. MOUSA :

$$\text{Curva de UMAN : } H = 11.55$$

$$\text{Curva CIGRE : } H = 10.69$$

$$\text{Curva EXPONENCIAL : } H = 8.42$$

Resulta claro que el valor de la altura H ha disminuido respecto del caso anterior, ya que las distancias protegidas(XP) por cada cable se ha reducido. Sin embargo como ya se dijo no se va a tomar en cuenta este efecto ya que lo importante es evaluar los posibles puntos sensibles que puedan presentarse dentro del esquema.

### ECUACIONES DE WHITEHEAD

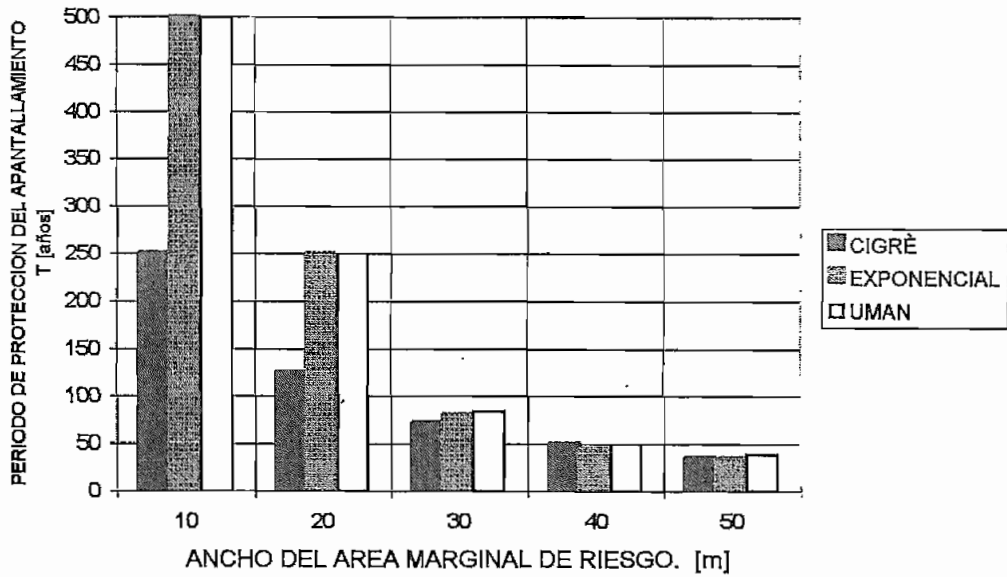


FIG. 4.10 ANALISIS DEL PERIODO DE PROTECCION PARA CABLES CRUZADOS. ECUACIONES : WHITEHEAD

### ECUACIONES DE A. MOUSA

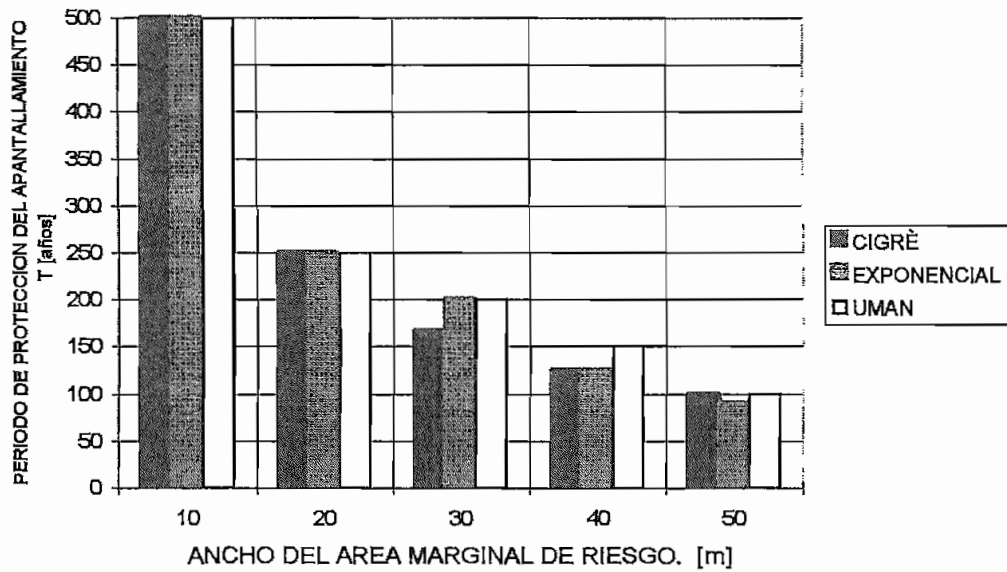


FIG. 4.11 ANALISIS DEL PERIODO DE PROTECCION PARA CABLES CRUZADOS. ECUACIONES DE A. MOUSA

Bajo este esquema el período de protección para la subestación contra las descargas atmosféricas se ha incrementado notablemente, respecto del análisis anterior. Es decir, mediante el empleo de cables de guardia paralelos y perpendiculares se ha corregido la debilidad que se puede presentar en las regiones aledañas al perímetro de cada una de las zonas a proteger por los elementos de guardia, de ahí que, se puede concluir que esta alternativa constituye una mejor solución para diseñar un esquema de apantallamiento.

Un aspecto importante que no se debe dejar de mencionar es la influencia notablemente marcada por el área alrededor de la subestación sobre la cual se considera que todas las descargas provocan la salida del sistema (área marginal de riesgo), ya que se ha detectado que la gran mayoría de rayos que descienden sobre una subestación apantallada y que han perforado el blindaje, terminan su trayectoria en zonas cercanas a la subestación y no necesariamente sobre el equipo de la misma, por lo que se hace necesario tomar las medidas del caso para corregir este problema. En el caso de subestaciones conectadas a líneas de transmisión apantalladas este aspecto puede ser solventado, sin embargo no está por demás dejar una recomendación que determine el practicar diseños para el apantallamiento de una subestación que cubran, en algo, las regiones cercanas y que bordean el perímetro de la misma.

#### **4.4.1. INFLUENCIA DE LA LONGITUD DE LOS CABLES DE GUARDIA A EMPLEARSE PARA DISEÑAR UN SISTEMA DE APANTALLAMIENTO Y SU POSIBLE ALTURA DE COLOCACION SOBRE EL PLANO EXPUESTO DE LA SUBESTACION**

La altura a la que se debe colocar un determinado cable de guardia, será determinada conociendo previamente el área que será protegida por este elemento, lo cual implica saber la distancia y período de protección

según lo estipulado en el modelo planteado en la sección 3.1.3, y que se puede resumir como sigue :

Sea una subárea  $a_1$  dentro de la subestación, la cual será apantallada por un cable de guardia de longitud  $L_1$ , entonces el período de protección para ésta zona estará dado por :

$$Ta_1 = T * (A / a_1)$$

Donde :

T : período de protección de toda la subestación

A : área de la subestación

$a_1 = 2 * L_1 * XP$  ;  $L_1$  : longitud del cable de guardia

XP : distancia protegida por el cable

Conociendo entonces el valor de XP, y  $Ta_1$ , se procede a determinar el valor de H, altura a la que se colocará el cable, obtenida mediante la simulación digital presentada en este trabajo, y que arroja un variado grupo de resultados que relacionan el período de protección con la distancia protegida.

Si intentamos determinar los mismos resultados para otra subárea  $a_2$ , protegida por un cable de longitud  $L_2$ , pero con la particularidad de que la distancia XP será la misma que para el área  $a_1$ , entonces :

$$Ta_2 = T * (A / a_2)$$

Donde :  $a_2 = 2 * L_2 * XP$ , y además

T, A, XP : valores constantes para los dos casos, entonces :

$$Ta_1 = cte / L_1$$

$$Ta_2 = cte / L_2$$

Lo cual implica entre  $Ta_1$ , y  $Ta_2$  existirá una relación que dependerá de cuanto representa el valor de  $L_1/L_2$ .

El análisis matemático que se ha planteado determina que para los dos casos, la altura a la que se colocarán los cables tiene que ser la misma, ya que la simulación digital que permitirá encontrar este valor, dará resultados del período de protección como una función del valor de  $XP$ , y en los cuales la diferencia presente entre los valores de  $Ta_1$  y  $Ta_2$  será compensada por la relación entre  $L_1$  y  $L_2$ , que como se acaba de demostrar es la misma.

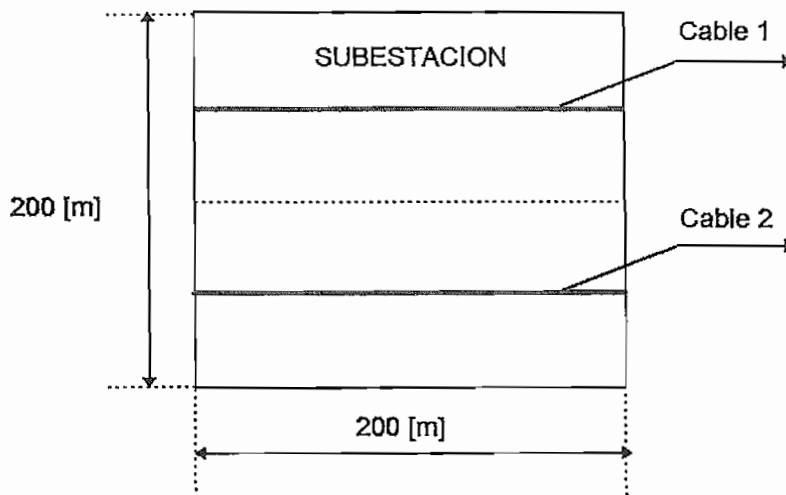
Como conclusión se puede finalmente decir, que no es recomendable la utilización de cables muy pequeños con los cuales se requiera proteger distancias( $XP$ ) excesivamente grandes, ya que el empleo de cables de mucha mayor longitud involucrará que la altura  $H$  sea la misma para ambos casos, y que obviamente para el cable pequeño puede resultar demasiado grande, lo cual representa una mala solución desde el punto de vista económico.

#### **4.4.2. INFLUENCIA Y RELACION DE LA ALTURA DEL PLANO EXPUESTO DE LA SUBESTACION, SOBRE LA POSIBLE COLOCACION DE CABLES DE GUARDIA EN ESTRUCTURAS DE MENOR ALTURA QUE ESTE, Y SU REPERCUSION SOBRE EL PERIODO DE PROTECCION DEL APANTALLAMIENTO**

Para este análisis se ha planteado la alternativa de utilizar 2 cables de guardia paralelos, como los analizados en el primer caso de la sección 4.4., por lo cual será necesario que los resultados aquí presentados sean comparados con los indicados en dicha sección. Como ya se mencionó los análisis desarrollados se ha hecho tomando en consideración un radio de influencia de una milla, una densidad de descargas a tierra de  $3.86$  [desc. /  $Km^2 \cdot año$ ], un período de estudio de 500 años, y una variación de 10 a 50 metros para el área marginal de riesgo.

CASO A : Cable No.1,  $H_0=15$  [m],(ubicado sobre estructuras de 15 [m])  
 Cable No.2,  $H_0=15$  [m],(ubicado sobre estructuras de 15 [m])

CASO B : Cable No.1,  $H_0=15$  [m],(ubicado sobre estructuras de 15 [m])  
 Cable No.2,  $H_0 = 6$  [m],(ubicado sobre estructuras de 6 [m])



**ECUACIONES DE WHITEHEAD**

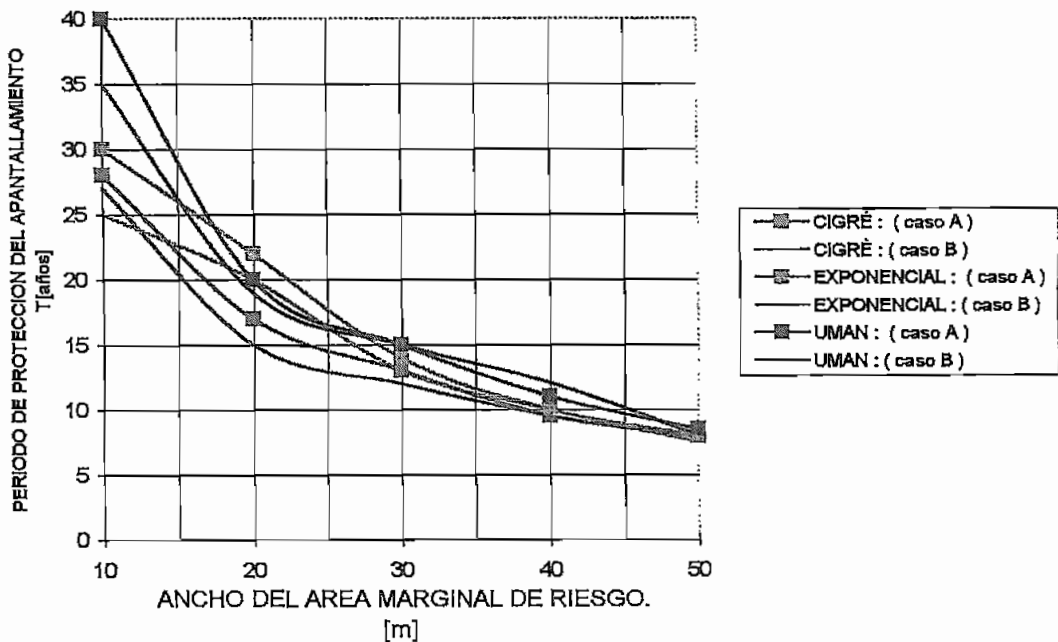


FIG. 4.12 ANALISIS DEL PERIODO DE PROTECCION PARA CABLES UBICADOS SOBRE PLANOS EXPUESTOS DE DIFERENTE ALTURA . ECUACIONES DE WHITEHEAD

## ECUACIONES DE A. MOUSA

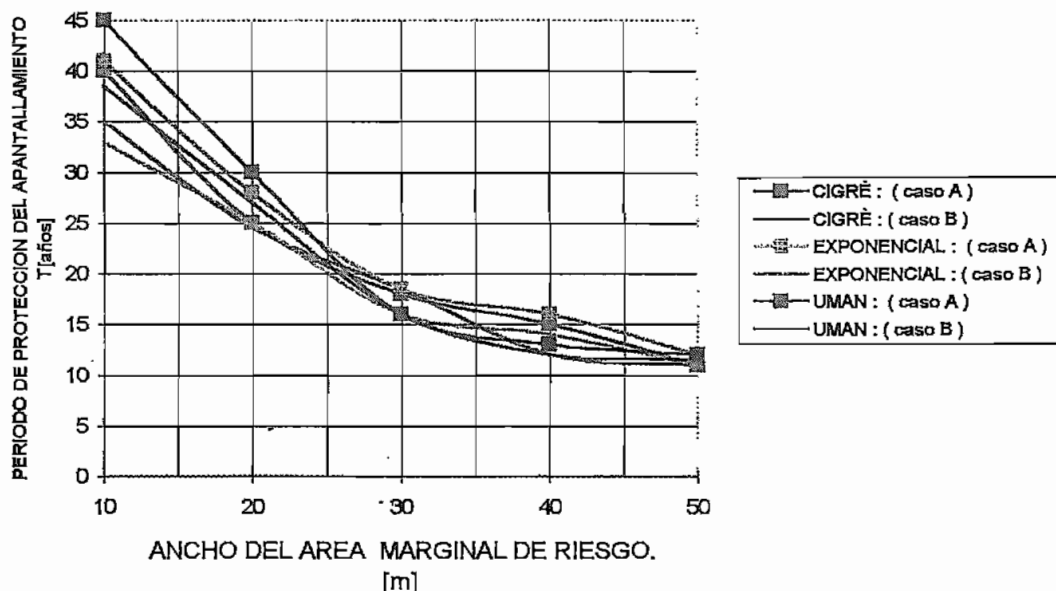


FIG. 4.13

ANÁLISIS DEL PERÍODO DE PROTECCIÓN PARA CABLES UBICADOS SOBRE PLANOS EXPUESTOS DE DIFERENTE ALTURA. ECUACIONES DE A. MOUSA

Se puede notar claramente que los resultados indicados por las figuras 4.12 y 4.13, reflejan como el período de protección para el caso B presenta cierta disminución respecto del presentado en el caso A. Esto es de esperarse ya que para evaluar la efectividad del esquema de apantallamiento en forma global, por el hecho que la superficie expuesta planteada para el cable 2, está a diferente nivel que la superficie de exposición del cable 1, debe introducirse un borde adicional que eventualmente podría emitir canales ascendentes, y por tanto interceptar una descarga. Siendo este borde aquel que se encuentra en el lindero marcado por las dos áreas que se desean proteger, y supuesto sobre una superficie de exposición que tiene un nivel de altura y igual a la del plano expuesto del cable 1, resulta lógico que se produzca cierta variación sobre el período de protección resultante. Sin embargo se puede notar además, que en forma general, los períodos resultantes no divergen en demasía del caso A al caso B, lo cual demuestra que este tipo de configuraciones, si bien es cierto pueden provocar que el período de protección baje en cierto grado, la efectividad del apantallamiento no se verá muy afectada comparándola con aquella que pudiese resultar de un esquema

similar, pero con los cables colocados sobre superficies de exposición a un mismo nivel. Como conclusión se debe dejar claro que lo importante en conseguir obtener un esquema de apantallamiento efectivo, y que para esto configuraciones como la indicada en este ejemplo no incidirán mayormente, por lo tanto si eventualmente se presentan este tipo de situaciones y resulta imposible evadirlas, se puede aceptar la presencia de este tipo de esquemas.

Por otra lado, en las estaciones de nuestro medio, debido a su poco perfil estético podrán presentarse situaciones en las que se deba colocar cables de guardia sobre dos estructuras de diferente altura, es decir cada uno de sus extremos ubicado sobre torres de diferente nivel, lo cual implicaría que el extremo ubicado a una menor altura no podrá desempeñar en igual forma el papel de apantallamiento que lo cumplirá el otro extremo, por lo que indudablemente se obtendrá un mayor riesgo para posibles perforaciones del blindaje según lo estipulado en la sección 2.4.5., y tal como lo muestra la figura 4.14.

#### ECUACIONES DE A. MOUSA BAJO LA CURVA EXPONENCIAL

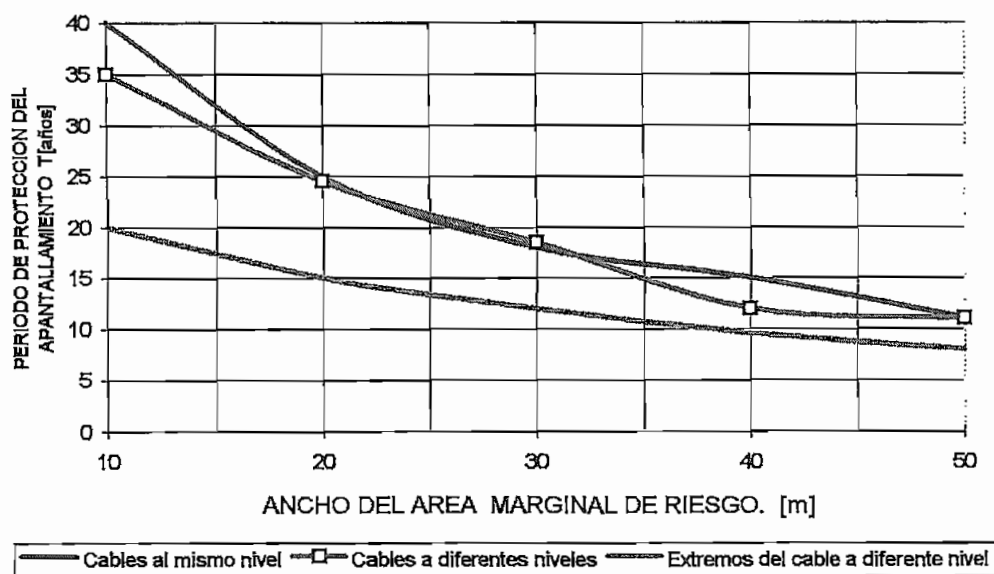


FIG. 4.14 ANALISIS DEL PERIODO DE PROTECCION PARA EL CASO DE CABLES DE GUARDIA, RELACIONANDO EL EFECTO DE COLOCARLOS SOBRE PLANOS EXPUESTOS DE DIFERENTE ALTURA. ECUACIONES A. MOUSA Y CURVA EXPONENCIAL



Como se puede notar en la fig. 4.14, efectivamente para el caso de cables en los que se ha colocado cada uno de sus extremos sobre torres de distinta altura, se presenta una notoria diferencia del período de protección. Matemáticamente este efecto dentro de los algoritmos de solución planteados para la simulación digital, ha sido simulado tratando de reducir en algo el error a obtenerse (fig. 4.15), ya que el modelo descrito en la sección 2.4.5 no permite que se pueda evaluar los resultados a presentarse bajo este caso particular que siempre va a estar presente cuando se quiera diseñar un sistema de apantallamiento, sin embargo es posible considerar, como se ha mencionado para tratar de reducir el margen de error que pueda presentarse, que la altura del cable será el valor medio de la que presenten sus extremos, es decir :

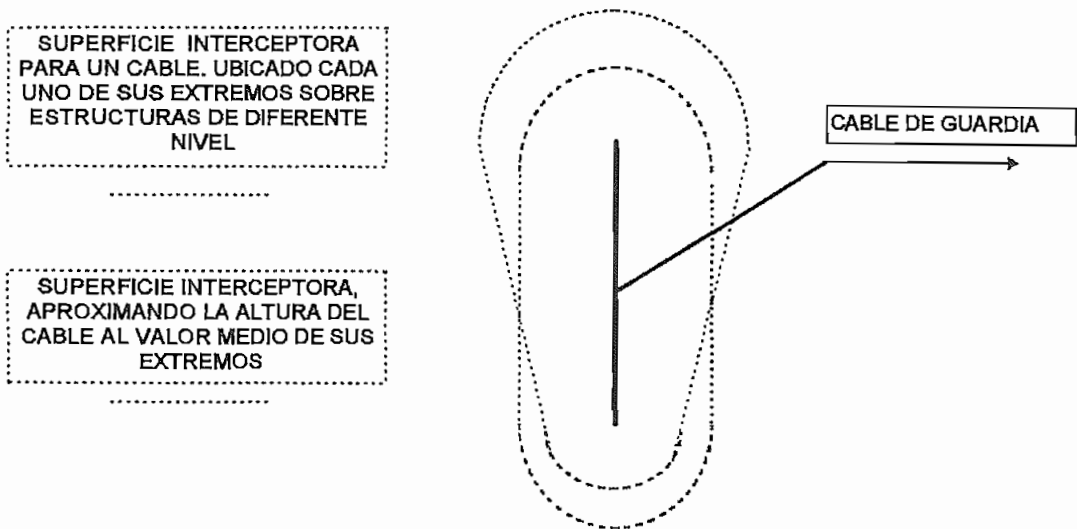


FIG. 4.15 ANALISIS DE LA SUPERFICIE INTERCEPTORA PROYECTADA SOBRE UN PLANO HORIZONTAL. PARA EL CASO DE UN CABLE EN EL CUAL SUS EXTREMOS SE HAN COLOCADO SOBRE ESTRUCTURAS DE DIFERENTE NIVEL

#### 4.5. INFLUENCIA DE LA UBICACIÓN Y NUMERO DE MASTILES A EMPLEARSE EN UN ESQUEMA DE APANTALLAMIENTO SOBRE EL PERIODO DE PROTECCION RESULTANTE

Para iniciar este análisis se supondrá una posible solución dada por 4 mástiles colocados sobre una subestación, cuyas características y condiciones iniciales para la simulación son iguales a las descritas en la sección 4.4.

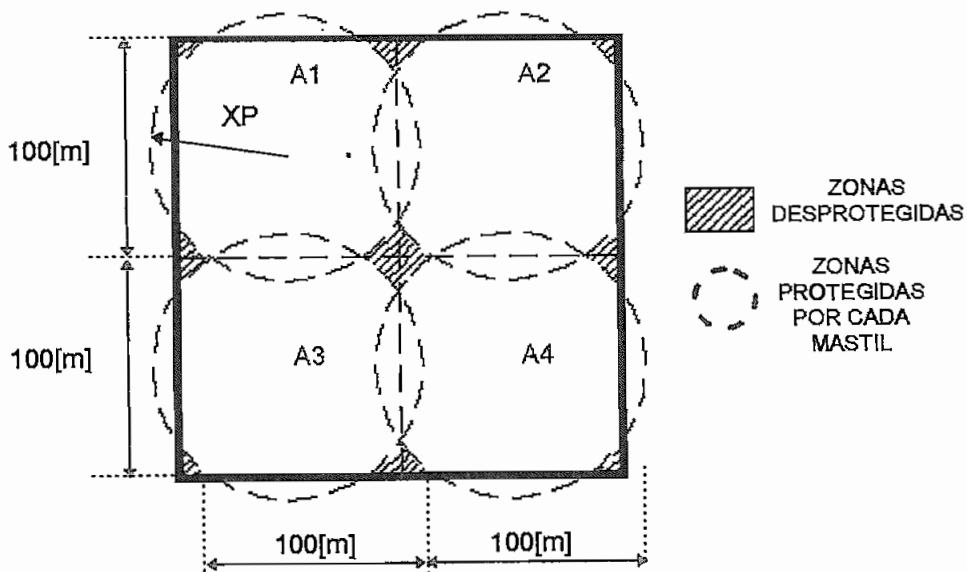


FIG. 4.16

#### DATOS DE LA S/E :

Altura del plano expuesto de la subestación = 15 metros

$T = 500$  años

$$A = 200 * 200 = 40000 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$A1 = 100 * 100 = 10000 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$A2 = 100 * 100 = 10000 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$A2 = 100 * 100 = 10000 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$A2 = 100 * 100 = 10000 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$TA1 = TA2 = TA3 = TA4 = 500 * 40000 / 10000 = 2000 \text{ años}$$

$$XP = \sqrt{An / \pi} = \sqrt{10000 / \pi}$$

$$XP = 56.5 \text{ [m]}$$

Los 4 mástiles debido a sus características similares tendrán el mismo valor de H, determinado bajo las siguientes condiciones :

#### ECUACIONES WHITEHEAD :

$$\text{Curva de UMAN : } H = 18 \text{ [m]}$$

$$\text{Curva de la CIGRE : } H=16 \text{ [m]}$$

$$\text{Curva EXPONENCIAL : } H = 11.75 \text{ [m]}$$

#### ECUACIONES DE A. MOUSA :

$$\text{Curva de UMAN : } H = 4 \text{ [m]}$$

$$\text{Curva de la CIGRE : } H=4 \text{ [m]}$$

$$\text{Curva EXPONENCIAL : } H = 4 \text{ [m]}$$

Para el caso de la ecuaciones de Mousa, los resultados muestran que debido a la distancia de protección requerida para cada mástil (XP) igual a 56.5 metros, no se presenta ningún riesgo de que pueda fallar el apantallamiento, sin importar la altura a la que sean colocados dichos mástiles. Esto es debido al incremento del 20% que se asume para la distancia crítica de arqueo de un mástil. Por lo tanto debería tomarse el valor de (H), como se menciona en la sección 4.1, igual a una altura mínima de aislamiento (dada por el nivel de aislamiento de la subestación), sin embargo para efectos del ejemplo se asumirá que dicha altura es igual 4 metros, aclarando que este valor ha sido tomado en forma arbitraria, y que para situaciones reales debe considerarse como la (Hmin) de aislamiento.

**ECUACIONES DE WHITEHEAD**

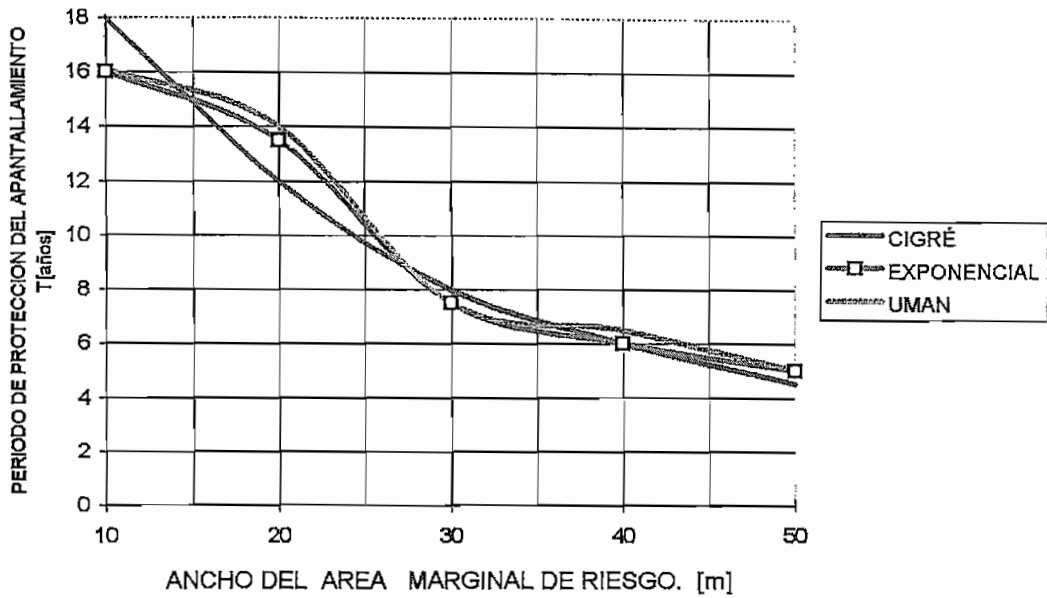


FIG. 4.17 ANALISIS DEL PERIODO DE PROTECCION MEDIANTE EL USO DE MASTILES ECUACIONES : WHITEHEAD

**ECUACIONES DE A. MOUSA**

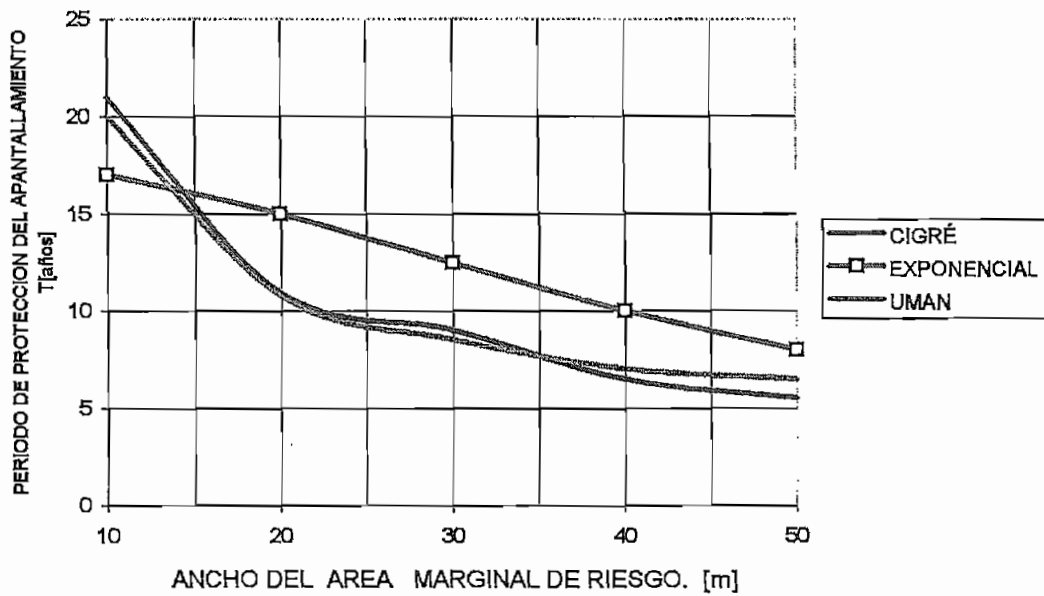


FIG. 4.18 ANALISIS DEL PERIODO DE PROTECCION MEDIANTE EL USO DE MASTILES ECUACIONES : A. MOUSA

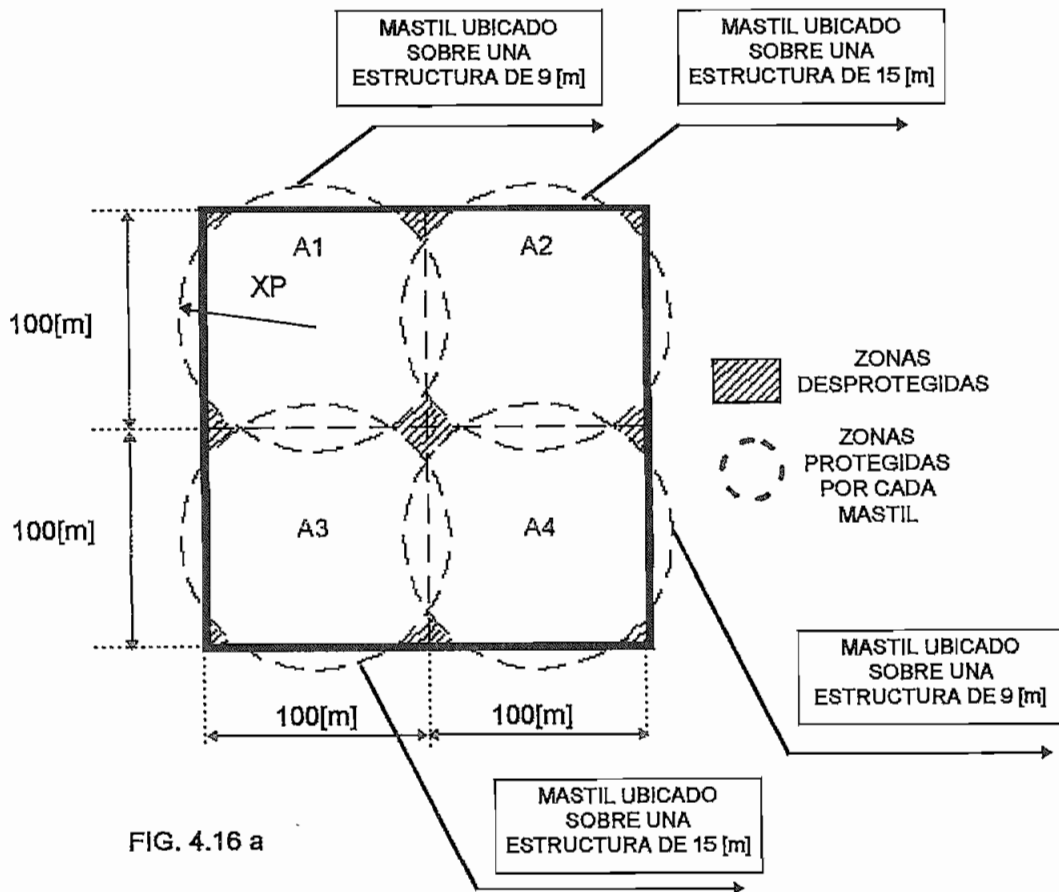
Los resultados indican un bajo período de protección cuando se emplea este tipo de alternativa, lo cual conduce a la conclusión de que siempre existirá un mayor riesgo de posibles fallas de apantallamiento, ya que el empleo de mástiles por lo general deja ciertas zonas desprotegidas (fig. 4.16), y por lo tanto sensibles para que las descargas puedan penetrar el blindaje. Por otra parte se ha detectado que el empleo de mástiles no presenta un efecto apantallador sobre el área marginal de riesgo, es decir para este tipo de configuraciones necesariamente deberán tomarse medidas para apantallar los bordes y zonas cercanas a la subestación (área marginal de riesgo), ya que fuera de las descargas que obviamente tienden a incidir sobre las zonas desprotegidas, dejadas por cada mástil, el resto de descargas terminan en zonas aledañas al perímetro de la subestación.

Por otro lado se ha podido notar como los resultados sobre el período de protección varían en forma mucho más aleatoria cuando se utilizan mástiles en un esquema de apantallamiento, lo cual indudablemente resulta ser debido a que el campo eléctrico homogéneo, presente sobre las superficies interceptoras, cuando se utilizan cables de guardia, es muy difícil de conseguir mediante la utilización de mástiles, ya que esto implicaría que sea necesario recurrir a la instalación de un gran número de estos elementos (mástiles). Son estas algunas de las razones por las que muchos estudios han llegado a la conclusión de que, este tipo de esquemas de apantallamiento no son recomendables(\*7).

Nótese también, al comparar las curvas 4.17 y 4.18, la influencia de las ecuaciones empleadas. Las ecuaciones de Mousa muestran más disimilitud para la curva exponencial que las de Whitehead, como de esperarse debido a su expresión matemática (véase pág. 105).

#### 4.5.1. INFLUENCIA Y RELACION DE LA ALTURA DEL PLANO EXPUESTO DE LA SUBESTACION, SOBRE LA POSIBLE COLOCACION DE MASTILES EN ESTRUCTURAS DE MENOR ALTURA QUE ÉSTE, Y SU REPERCUSION SOBRE EL PERIODO DE PROTECCION DEL APANTALLAMIENTO

Para evaluar este efecto se supondrá que dos de los mástiles empleados en la alternativa anterior (sección 4.5.), están ubicados sobre estructuras de 9 metros. La subestación será tomada bajo las mismas condiciones, que se plantearon en dicha sección. El análisis comparativo está hecho en base a los resultados obtenidos cuando los 4 mástiles fueron colocados sobre estructuras de 15 metros, al cual se lo llamará (caso A), mientras que para el análisis de esta sección las el esquema a emplearse es el mostrado en la siguiente figura, y lo se lo definirá como (caso B).



### ECUACIONES DE WHITEHEAD

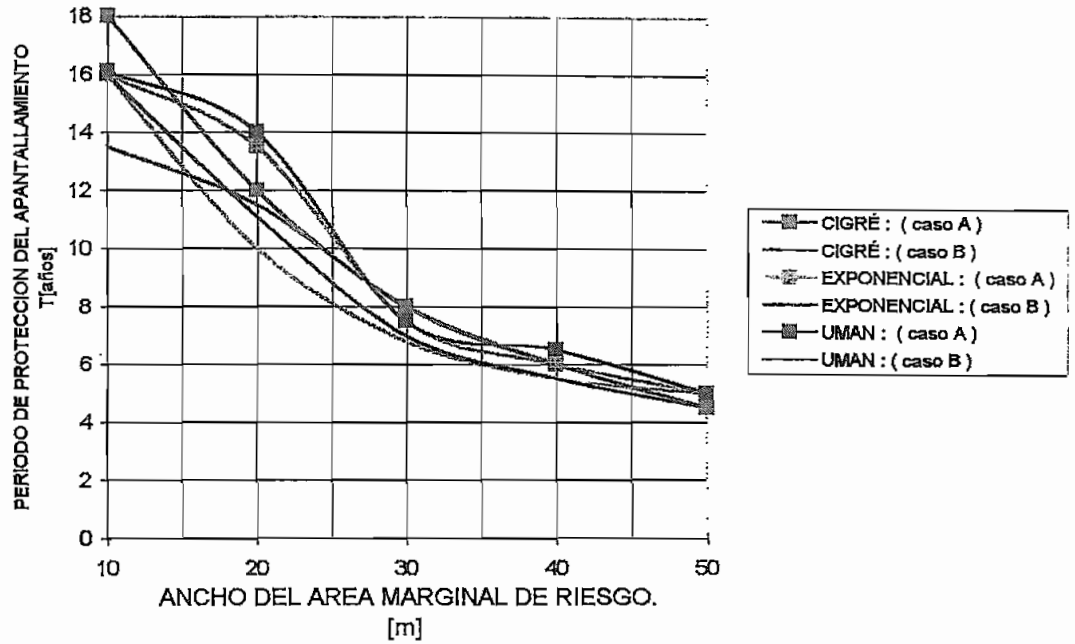


FIG. 4.19 ANALISIS DEL PERIODO DE PROTECCION PARA MASTILES UBICADOS SOBRE ESTRUCTURAS DE DIFERENTE ALTURA. ECUACIONES: WHITEHEAD

### ECUACIONES DE A. MOUSA

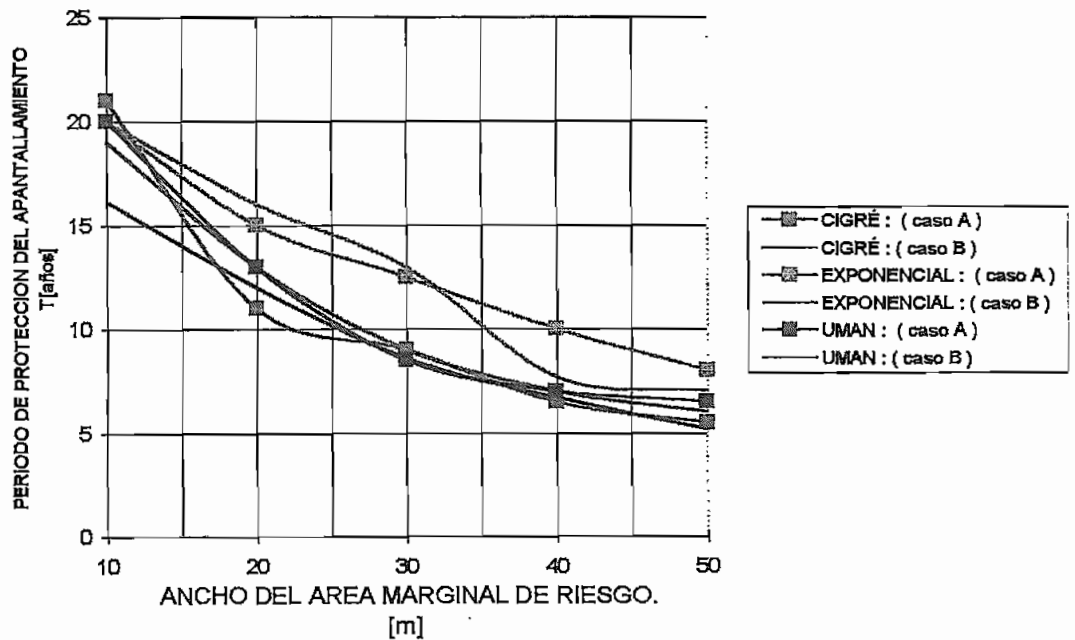


FIG. 4.20 ANALISIS DEL PERIODO DE PROTECCION PARA MASTILES UBICADOS SOBRE ESTRUCTURAS DE DIFERENTE ALTURA. ECUACIONES: A. MOUSA

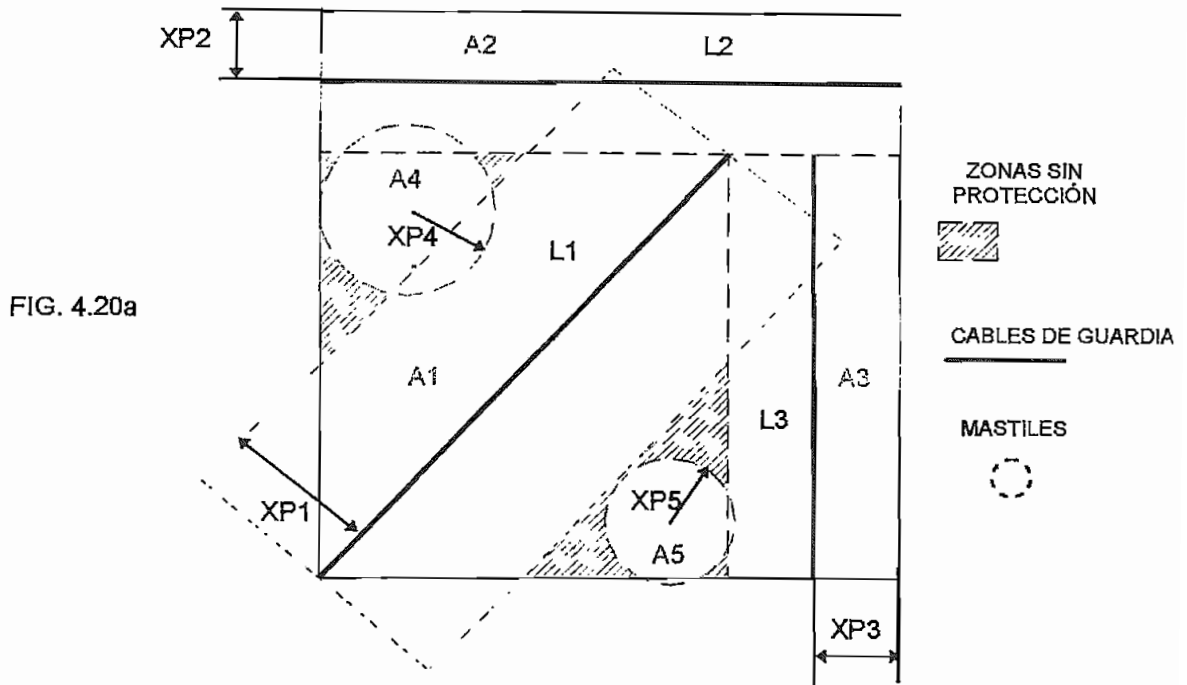
El efecto producido bajo esta configuración, resulta ser muy similar al presentado cuando se analizó los cables de guardia ubicados sobre estructuras de diferente nivel, ya que de igual manera el período de protección tiende a disminuir, debido al efecto producido por la simulación de los bordes y vértices adicionales a los que están sujetas las superficies de exposición de cada mástil. En el caso del ejemplo será necesario tomar en consideración los bordes y vértices que delimitan a cada una de las áreas que serán protegidas por los mástiles, ya que la diferencia en altura de cada superficie expuesta, se ve marcada para los 4 mástiles. De hecho este factor adicional produce las diferencias mostradas en los períodos de protección resultantes.

Es importante mencionar que en las figuras 4.19 y 4.20, al igual que en el resto de figuras en las que se indica los resultados de los diferentes esquemas de apantallamiento simulados, el período de protección tiende a ser el mismo a medida que el área marginal de riesgo aumenta, es decir el empleo de las curvas de distribución de corriente (Uman, Cigrè, y exponencial), presenta resultados muy coincidentes para valores del área marginal de riesgo superiores a los 30 metros.

#### **4.6. INFLUENCIA DE LA COMBINACION DE CABLES DE GUARDIA Y MASTILES A EMPLEARSE EN UN ESQUEMA DE APANTALLAMIENTO SOBRE EL PERIODO DE PROTECCION RESULTANTE**

Una alternativa totalmente factible de presentarse, al momento de diseñar un esquema de apantallamiento, es aquella en la que se pueda contar con cables de guardia y mástiles. Por lo que se ha creído conveniente analizar un caso que obviamente puede resultar ser muy particular pero que en definitiva permitirá evaluar los efectos que puedan presentarse bajo este tipo de configuraciones.





#### DATOS DE LA SUBESTACION :

Altura del plano expuesto de la subestación :  $H_0 = 15$  [m]

$T = 500$  [ años]

$A = 200 * 200 = 40000$  [m<sup>2</sup>]

$A_1 = 150 * 140 = 21000$  [m<sup>2</sup>], cable  $L_1 = 205$  [m]

$TA_1 = 500 * 40000 / 21000 = 953$  [años]

$XP_1 = 21000 / 2 * 205 = 52$  [m]

$A_2 = 200 * 50 = 10000$  [m<sup>2</sup>], cable  $L_2 = 200$  [m]

$TA_2 = 500 * 40000 / 10000 = 2000$  [años]

$XP_2 = 10000 / 2 * 200 = 25$  [m]

$A_3 = 150 * 60 = 9000$  [m<sup>2</sup>], cable  $L_3 = 150$  [m]

$TA_3 = 500 * 40000 / 9000 = 2223$  [años]

$XP_3 = 9000 / 2 * 150 = 30$  [m]

$$A4 = (30)^2 * \pi = 2827.4 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$TA4 = 500 * 40000 / 2827.4 = 7074 \text{ [años]}$$

$$XP4 = 30 \text{ [m]}$$

$$A5 = (20)^2 * \pi = 1256.6 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$TA5 = 500 * 40000 / 1256.6 = 15916 \text{ [años]}$$

$$XP5 = 20 \text{ [m]}$$

RESULTADOS DE LA EVALUACION DIGITAL PARA OBTENER LOS VALORES DE H :

ECUACIONES DE WHITEHEAD :

**Curva UMAN :**

$$A1, H = 14.95 \text{ [m]}$$

$$A2, H = 3.3 \text{ [m]}$$

$$A3, H = 4.8 \text{ [m]}$$

$$A4, H = 4.6 \text{ [m]}$$

$$A5, H = 2 \text{ [m]}$$

**Curva CIGRE :**

$$A1, H = 13.65 \text{ [m]}$$

$$A2, H = 3.1 \text{ [m]}$$

$$A3, H = 4.49 \text{ [m]}$$

$$A4, H = 4.2 \text{ [m]}$$

$$A5, H = 1.8 \text{ [m]}$$

**Curva EXPONENCIAL :**

$$A1, H = 10.1 \text{ [m]}$$

$$A2, H = 2.35 \text{ [m]}$$

$$A3, H = 3.39 \text{ [m]}$$

$$A4, H = 3.2 \text{ [m]}$$

$$A5, H = 1.4 \text{ [m]}$$

**ECUACIONES DE A. MOUSA :****Curva UMAN :**

A1,  $H = 21$  [m]

A2,  $H = 4.22$  [m]

A3,  $H = 6.2$  [m]

A4,  $H =$  No existe riesgo, se asumirá = 1.5 [m]

A5,  $H =$  No existe riesgo, se asumirá = 1.5 [m]

**Curva CIGRE :**

A1,  $H = 19.3$  [m]

A2,  $H = 3.98$  [m]

A3,  $H = 5.81$  [m]

A4,  $H =$  No existe riesgo, se asumirá = 1.5 [m]

A5,  $H =$  No existe riesgo, se asumirá = 1.5 [m]

**Curva EXPONENCIAL :**

A1,  $H = 14.4$  [m]

A2,  $H = 3.12$  [m]

A3,  $H = 4.54$  [m]

A4,  $H =$  No existe riesgo, se asumirá = 1.5 [m]

A5,  $H =$  No existe riesgo, se asumirá = 1.5 [m]

Para el caso de los mástiles, se asumirá como la altura mínima de aislamiento, el valor de 1.5 metros. Este es solamente un valor arbitrario, tomado para evaluar el efecto resultante del esquema propuesto. Como ya se ha mencionado dicho valor debe estar relacionado con el nivel de aislamiento de la subestación analizada.

**ECUACIONES DE WHITEHEAD**

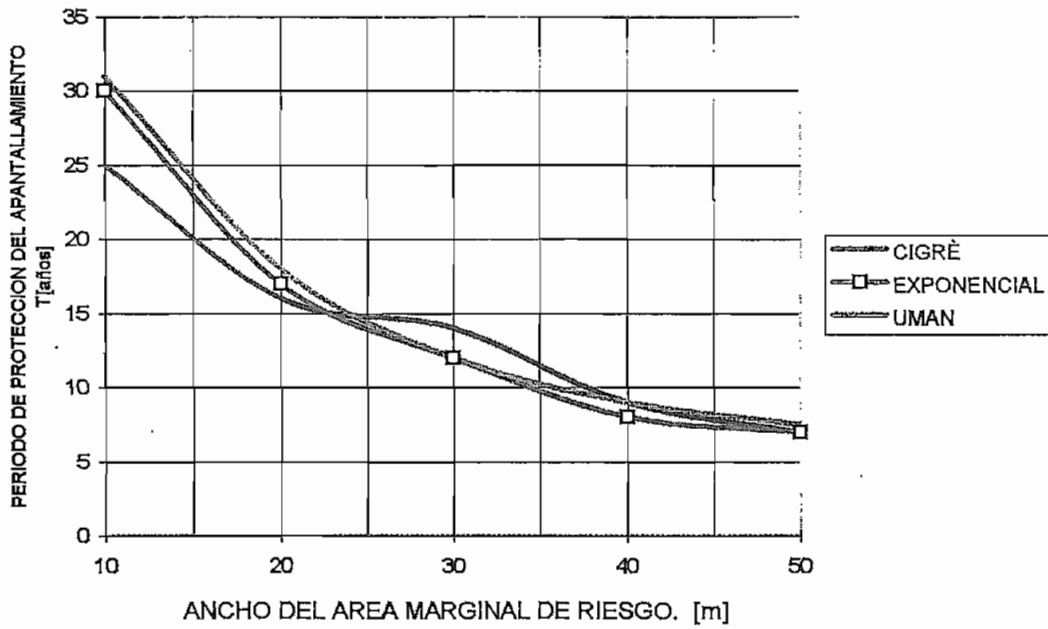


FIG. 4.21 ANALISIS DEL PERIODO DE PROTECCION PARA UN APANTALLAMIENTO EMPLEANDO CABLES Y MASTILES . ECUACIONES : WHITEHEAD

**ECUACIONES DE MOUSA**

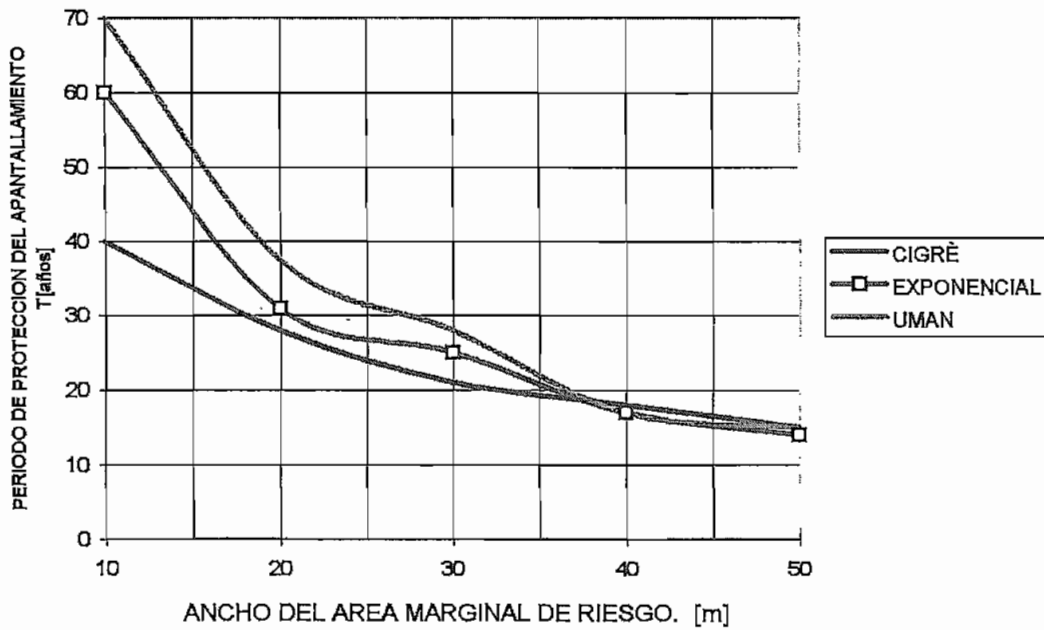


FIG. 4.22 ANALISIS DEL PERIODO DE PROTECCION PARA UN APANTALLAMIENTO EMPLEANDO CABLES Y MASTILES . ECUACIONES : A. MOUSA

Los resultados obtenidos reflejan un pequeño incremento en el período de protección del apantallamiento, respecto de las soluciones que emplearon únicamente mástiles o en su defecto cables de guardia. Sin embargo se ha detectado que al igual que los mástiles, el empleo de cables diagonales no apantalla el área marginal de riesgo, por lo que en igual forma será necesario tomar las medidas correctivas del caso para evitar estos inconvenientes. La utilización de cables de guardia diagonales hasta cierto punto puede resultar beneficiosa, ya que la sobreprotección que brinda a las zonas cercanas a él (escudos); permite corregir la sensibilidad que presentan los linderos de las áreas que se desean proteger, pero por otro lado se puede apreciar como el empleo de estos cables suele generar escudos que dejan áreas desprotegidas(al igual que los mástiles). Entonces se puede concluir que este tipo de esquemas serán convenientes siempre y cuando se evite dejar zonas sin ningún tipo de protección.

# CAPITULO V

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- 5.1. En forma general se puede decir que el objetivo planteado al inicio de este trabajo se ha cumplido de una manera satisfactoria, ya que se ha logrado formular un modelo analítico complementado con simulaciones digitales que sin duda conducen y permiten el desarrollo de un esquema de apantallamiento para una subestación de potencia con altos requerimientos de confiabilidad, y que obviamente ha sido 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 pueda contar con una herramienta de fácil manejo y sobre todo que permita a sus usuarios poder 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 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. Es decir los resultados podrán ser considerados completamente valederos siempre y cuando hayan sido comparados con aquellos que pudiesen presentarse en forma experimental. Desafortunadamente en nuestro medio no se cuenta con

esta información imprescindible para confirmar la certeza de los resultados, pero la confiabilidad de los mismos puede ser aceptada en gran porcentaje ya que el modelo analítico desarrollado y que permitió formular los algoritmos de solución para el programa digital, se basó en criterios y modelos propuestos por varios investigadores que han dedicado mucho tiempo al análisis de diseños para el apantallamiento de subestaciones y que obviamente han probado sus teorías de manera experimental.

- 5.3.** Algo importante que no se puede dejar de mencionar, y que complementa la idea de la conclusión anterior, es que cualquier modelo que se plantee para realizar el diseño de un esquema 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 cuenta 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 a estar influenciado por todos los objetos que se

encuentren en tierra, bajo un determinado radio de atracción, dado por la superficie expuesta del 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 motivo 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.** Otro de los objetivos fundamentales planteados en este trabajo es la posibilidad de generar una guía de parámetros que permitan que la persona que desea iniciar un diseño para el apantallamiento de una subestación cuente con 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 el capítulo cuarto.

Un factor muy importante resulta ser las ecuaciones que definen a la distancia crítica de arqueo, se ha podido comprobar que el efecto adicional al que se hace referencia cuando se considera una estructura vertical para definir dicha distancia (ecuaciones 2.2 a 2.5), permite que la efectividad de un esquema de apantallamiento se vea incrementada, situación que resulta ser lógica, ya que dicho valor definirá la cobertura que tendrá la zona protegida por el elemento de guardia, según lo demuestra la aplicación del modelo electrogeométrico (ecuaciones 3.1 y 3.2).



Otro 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 expuesto de la subestación, a la que se debe colocar los elementos de guardia sea mucho menor respecto de la obtenida mediante el empleo de las curvas de (Uman o Cigrè). Por otro lado 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, estas son razones por las que es posible 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 (XP) 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, para sobre cada una de ellas colocar un elemento de guardia.

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 que se desea proteger, 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 superficie interceptora que se asemeje lo más próximo al plano expuesto de la subestación.

Como conclusión final se debe recalcar que cualquier solución o alternativa planteada de una manera tentativa, para diseñar un esquema de apantallamiento, puede resultar conveniente 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. Desafortunadamente este tipo de situaciones se presentan por lo general cuando se emplean mástiles o cables diagonales, pero en definitiva es posible corregir estos inconvenientes, al igual que los mencionados anteriormente y que dependen de la sensibilidad detectada en los perímetros de las áreas que se desean proteger así como del área marginal de riesgo.

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 último valor se vea disminuido en forma drástica, y 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.

## 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

## ANEXO N°.1

### EJEMPLO DE APLICACIÓN

La idea de resolver un ejemplo de aplicación, es con el objeto de validar los resultados que se presentan bajo la aplicación del modelo propuesto en la tesis de Máx Molina(\*2), y aquellos que se obtienen bajo la aplicación del modelo planteado en este trabajo. El ejemplo a ser analizado es la subestación Quevedo del INECEL, cuyos planos se encuentran en la referencia(\*2).

Se ha planteado tres alternativas, el CASO1 que constituye un esquema de apantallamiento según los planos proporcionados por INECEL, y cuya efectividad fue probada con el modelo de M. Molina, el CASO 2, que representa un esquema planteado por M. Molina, y el CASO 3, que resulta de la aplicación del modelo propuesto en este trabajo.

La subestación en mención, dispone de tres patios cuyas dimensiones son :

PATIO :	DIMENSIONES [m]
230 kV	183 * 119
138 Kv	183 * 123.5
69 kV	89.5 * 82

Los resultados obtenidos fueron los siguientes :

CASO 1 : 25 salidas del sistema

CASO 2 : 10 salidas del sistema

CASO 3 : 8 salidas del sistema

Es importante mencionar que los resultados obtenidos para el CASO 1, y el CASO 2, son la suma de las tres simulaciones que se realizaron en forma individual para cada uno de los patios, según lo muestra la referencia(\*2). Mientras que para el CASO 3, la subestación fue modelada planteando un esquema de apantallamiento global, es decir la simulación se realizó bajo el efecto de los tres patios a los que se hace referencia.

Además fue necesario considerar para el CASO 3, que el ancho del área marginal de riesgo tiene un valor de 20 metros, esto debido a la irregularidad que presenta la forma de la subestación, ya que según los planos mostrados en la referencia (\*2), existen áreas dentro de lo que se puede considerar a la estación que supuestamente no cuentan con equipo, sin embargo la eventual incidencia de descargas sobre dichas zonas puede resultar peligroso para el correcto funcionamiento de la instalación.

Según las tablas adjuntas, se puede apreciar como un excesivo número de elementos de protección, colocados sin haber realizado un diseño previo, no constituye una solución favorable para el apantallamiento de una subestación (CASO 1). Por otro lado se puede determinar la congruencia de los resultados obtenidos bajo el esquema del CASO 2 y el CASO 3, tomando en consideración que para el segundo caso la subestación se modeló en forma individual para cada patio, mientras que para el tercer caso, esto no fue necesario hacer, ya que el modelo empleado permite simular una subestación con la presencia de diferentes patios, cuyo tamaño de estructuras difiere de uno a otro. Finalmente se debe mencionar que las ecuaciones empleadas para simular el tercer caso constituyen la opción "recomendada" a la que se hace referencia en el capítulo cuarto, y de igual manera se utilizó la curva de distribución de probabilidad de corrientes propuesta por Herodotou(\*10).

La solución planteada para el caso 3, según el modelo propuesto en la sección 3.1 de este trabajo, es la siguiente :

Patio de 230 Kv (estructuras de 19 metros)**CABLE No. 1**

	Area a proteger :		Cable :
	X	Y	
			L = 51 metros
P1	18	44.5	XP = 36 metros
P2	18	80.5	T1 = 16545 años
P3	69	80.5	
P4	69	44.5	

**CABLE No. 2**

	Area a proteger :		Cable :
	X	Y	
			L = 51 metros
P1	69	44.5	XP = 36 metros
P2	69	80.5	T1 = 16545 años
P3	120	80.5	
P4	120	44.5	

**CABLE No. 3**

	Area a proteger :		Cable :
	X	Y	
			L = 51 metros
P1	120	44.5	XP = 21 metros
P2	120	80.5	T1 = 16545 años
P3	171	80.5	
P4	171	44.5	

**CABLE No. 4**

	Area a proteger :		Cable :
	X	Y	
			L = 51 metros
P1	69	0	XP = 21 metros
P2	69	44.5	T1 = 13385 años
P3	120	44.5	
P4	120	0	

**CABLE No. 5**

	Area a proteger :		Cable :
	X	Y	
			L = 51 metros
P1	120	80.5	XP = 21 metros
P2	120	120	T1 = 13385 años
P3	171	120	
P4	171	80.5	

Patio de 138 kV (estructuras de 16 metros)**CABLE No. 6**

	Area a proteger :		Cable :
	X	Y	
			L = 71.25 metros
P1	99	142.5	XP = 17.76 metros
P2	99	210	T1 = 12000 años
P3	135	210	
P4	135	142.5	

**CABLE No. 7**

	Area a proteger :		Cable :
	X	Y	
			L = 97.5 metros
P1	39	180	XP = 30 metros
P2	39	240	T1 = 10385 años
P3	135	240	
P4	135	180	

Patio de 69 kV (estructuras de 11 metros)**CABLE No. 8**

	Area a proteger :		Cable :
	X	Y	
			L = 71.25 metros
P1	39	240	XP = 48.75 metros
P2	39	311.25	T1 = 4372 años
P3	136.5	311.25	
P4	136.5	240	



**MASTIL No. 1**

Area a proteger :

	X	Y	
P1	93.75	311	XP = 30 metros
P2	93.75	332	Se asume una altura mínima de
P3	127	332	aislamiento igual a 2 metros
P4	127	311	

Para la aplicación del esquema que se acaba de describir se utilizó un período de estudio de 500 años, y un radio de influencia de una milla.

Las coordenadas de cada uno de los elementos de protección utilizados para cada caso se indican en las tablas adjuntas.

# ANEXO N°. 1

## EJEMPLO DE APLICACION

CASO 3 :  
DISEÑO DE ACUERDO AL MODELO  
PLANTEADO EN ESTE TRABAJO

LA SIMULACION SE HA HECHO EN FORMA  
CONJUNTA PARA LOS TRES PATIOS

COORDENADAS DE LOS EXTREMOS DE LOS  
CABLES DE GUARDIA ( METROS )

CABLE	X	Y	Z
1	18.0	62.5	24.3
	69.0	62.5	24.3
2	69.0	62.5	24.3
	120.0	62.5	24.3
3	120.0	62.5	24.3
	171.0	62.5	24.3
4	69.0	23.5	20.7
	120.0	23.5	20.7
5	120.0	101.5	20.7
	171.0	101.5	20.7
6	108.8	150.0	17.2
	110.3	210.0	17.2
7	39.0	211.0	19.6
	135.0	211.0	19.6
8	86.3	240.0	20.8
	86.3	311.3	20.8

COORDENADAS DE LOS MASTILES (METROS)

MASTIL	X	Y	Z
1	97.5	330.0	13.0

# ANEXO N°. 1

## EJEMPLO DE APLICACION

### CASO 1 :

DISEÑO ORIGINAL DE ACUERDO A LOS PLANOS  
PROPORCIONADOS POR INECEL : PATIO DE 69 KV

COORDENADAS DE LOS EXTREMOS DE LOS  
CABLES DE GUARDIA ( METROS )

CABLE	X	Y	Z
1	9.0	43.5	12.4
	9.0	74.5	12.4
2	41.3	43.5	12.4
	41.3	74.5	12.4
3	73.0	43.5	12.4
	73.0	74.5	12.4
4	9.0	43.5	12.4
	73.0	43.5	12.4
5	9.0	51.5	12.4
	73.0	51.5	12.4
6	9.0	54.5	12.4
	73.0	54.5	12.4
7	9.0	66.5	12.4
	73.0	66.5	12.4
8	9.0	74.5	12.4
	73.0	74.5	12.4
9	16.5	0.0	17.9
	22.5	9.0	17.4
10	22.5	9.0	17.4
	22.5	54.5	12.4
11	22.5	0.0	17.9
	22.5	9.0	17.4
12	34.5	0.0	18.5
	34.5	9.0	17.4
13	34.5	9.0	17.4
	33.5	54.5	12.4
14	22.5	9.0	17.4
	58.5	9.0	17.4
15	-14.0	-17.5	20.4
	82.0	-17.5	20.4

COORDENADAS DE LOS MASTILES (METROS)

MASTIL	X	Y	Z
1	22.5	9.0	21.6
2	34.5	9.0	21.6
3	25.5	54.5	14.6
4	33.5	54.5	14.6
5	41.3	74.5	14.6

# ANEXO N°. 1

## EJEMPLO DE APLICACION

### CASO 1:

DISEÑO ORIGINAL DE ACUERDO A LOS PLANOS  
PROPORCIONADOS POR INECEL : PATIO DE 138 KV

COORDENADAS DE LOS EXTREMOS DE LOS  
CABLES DE GUARDIA ( METROS )

CABLE	X	Y	Z
1	-16.5	-0.5	21.6
	49.1	43.1	21.6
2	49.1	43.1	21.6
	37.5	84.0	20.4
3	49.5	-26.5	24.5
	60.8	45.0	24.5
4	104.3	0.0	22.8
	96.7	16.0	21.6
5	96.7	16.0	21.6
	109.5	84.0	20.4
6	128.8	0.0	22.7
	126.5	16.0	21.6
7	126.5	16.0	21.6
	121.5	84.0	20.4
8	133.5	-26.5	24.5
	151.5	43.9	24.5
9	151.5	43.9	24.5
	151.5	-26.5	24.5
10	96.7	16.0	21.6
	126.5	16.0	21.6
11	37.5	67.5	20.4
	37.5	112.0	20.4
12	85.5	67.5	20.4
	85.5	112.0	20.4
13	133.5	67.5	20.4
	133.5	112.0	20.4
14	37.5	67.5	20.4
	133.5	67.5	20.4
15	37.5	80.5	20.4
	133.5	80.5	20.4
16	37.5	84.0	20.4
	133.5	84.0	20.4
17	37.5	99.0	20.4
	133.5	99.0	20.4
18	37.5	112.0	20.4
	133.5	112.0	20.4
19	37.5	84.0	20.4
	64.5	123.5	18.2
20	73.1	84.0	20.4
	73.1	123.5	18.2
21	85.5	112.0	20.4
	85.5	123.5	19.1
22	73.5	138.5	21.6
	85.5	138.5	21.6

COORDENADAS DE LOS MASTILES (METROS)

MASTIL	X	Y	Z
1	37.5	67.5	23.4
2	37.5	84.0	23.4
3	37.5	112.0	23.4
4	48.8	84.0	23.4
5	61.5	84.0	23.4
6	13.5	84.0	23.4
7	85.5	67.5	23.4
8	85.5	84.0	23.4
9	85.5	112.0	23.4
10	97.5	84.0	23.4
11	109.5	84.0	23.4
12	121.5	84.0	23.4
13	133.5	67.0	23.4
14	133.5	84.0	23.4
15	133.5	112.0	23.4
16	96.8	16.0	24.4
17	106.5	16.0	24.4
18	116.3	16.0	24.4
19	126.0	16.0	24.4
20	49.1	43.1	24.4
21	151.5	43.9	28.5

# ANEXO N°. 1

## EJEMPLO DE APLICACION

### CASO 1 :

DISEÑO ORIGINAL DE ACUERDO A LOS PLANOS  
 PROPORCIONADOS POR INECEL : PATIO DE 230 KV

COORDENADAS DE LOS EXTREMOS DE LOS  
 CABLES DE GUARDIA ( METROS )

CABLE	X	Y	Z
1	15.0	41.5	23.8
	15.0	77.5	23.8
2	49.5	20.5	23.8
	49.5	98.5	24.5
3	49.5	20.5	23.8
	62.2	0.0	23.8
4	49.5	98.5	24.5
	60.8	170.0	24.5
5	66.0	20.5	23.8
	66.0	77.5	23.8
6	66.0	77.5	23.8
	66.0	98.5	24.5
7	66.0	20.5	23.8
	74.2	0.0	23.8
8	83.6	20.5	23.8
	83.6	59.5	23.8
9	100.5	20.5	23.8
	100.5	59.5	23.8
10	117.0	20.5	23.8
	117.0	77.5	23.8
11	117.0	77.5	23.8
	117.0	98.5	24.5
12	117.0	98.5	24.5
	107.3	119.0	23.2
13	117.0	20.5	23.8
	109.9	0.0	23.8
14	133.5	59.5	23.8
	133.5	98.5	24.5
15	133.5	98.5	24.5
	130.5	119.0	23.1
16	133.5	98.5	24.5
	151.5	168.9	24.5
17	150.8	59.5	23.8
	150.8	98.5	24.5
18	168.0	41.5	23.8
	168.0	77.5	23.8
19	168.0	77.5	23.8
	168.0	98.5	24.5
20	168.0	98.5	24.5
	151.5	168.9	24.5
21	49.5	20.5	23.8
	117.0	20.5	23.8
22	15.0	41.5	23.8
	168.0	41.5	23.8
23	15.0	59.5	23.8
	168.0	59.5	23.8
24	15.0	77.5	23.8
	168.0	77.5	23.8
25	49.5	98.5	24.5
	168.0	98.5	24.5
26	-16.5	124.5	21.6
	49.1	168.8	21.6

COORDENADAS DE LOS MASTILES (

MASTIL	X	Y
1	66.0	20.5
2	66.0	41.5
3	66.0	59.5
4	66.0	77.5
5	83.5	20.5
6	83.5	59.5
7	100.5	20.5
8	100.5	59.5
9	117.0	20.5
10	117.0	41.5
11	117.0	59.5
12	117.0	77.5
13	117.0	98.5
14	133.5	59.5
15	133.5	98.5
16	150.8	59.5
17	150.8	98.5
18	168.0	41.5
19	168.0	59.5
20	168.0	77.5
21	168.0	98.5

# ANEXO N°. 1

## EJEMPLO DE APLICACION

CASO 2 :  
DISEÑO DE ACUERDO LO PLANTEADO EN  
LA TESIS DE MAX MOLINA

### PATIO DE 230 kV

COORDENADAS DE LOS EXTREMOS DE LOS  
CABLES DE GUARDIA ( METROS )

CABLE	X	Y	Z
1	0.0	0.0	22.0
	183.0	0.0	22.0
2	0.0	19.8	22.0
	183.0	19.8	22.0
3	0.0	59.4	22.0
	183.0	59.4	22.0
4	0.0	99.0	22.0
	183.0	99.0	22.0
5	0.0	145.6	22.0
	183.0	145.6	22.0

### PATIO DE 138 kV

COORDENADAS DE LOS EXTREMOS DE LOS  
CABLES DE GUARDIA ( METROS )

CABLE	X	Y	Z
1	0.0	-26.0	22.0
	183.0	-26.0	22.0
2	0.0	20.6	22.0
	183.0	20.6	22.0
3	0.0	61.8	18.0
	183.0	61.8	18.0
4	0.0	103.0	18.0
	183.0	103.0	18.0
5	0.0	123.5	18.0
	183.0	123.5	18.0

### PATIO DE 69 kV

COORDENADAS DE LOS EXTREMOS DE LOS  
CABLES DE GUARDIA ( METROS )

CABLE	X	Y	Z
1	-50.5	-6.0	18.0
	132.5	-6.0	18.0
2	0.0	40.1	13.0
	82.0	40.1	13.0
3	0.0	89.5	13.0
	82.0	89.5	13.0

# ANEXO N°.2

## MANUAL DEL USUARIO

### REQUERIMIENTOS DE SOFTWARE Y HARDWARE

- Un sistema compatible IBM® con un microprocesador 80486 o superior.
- Microsoft Windows 95, o versiones superiores.
- Disco duro con un mínimo de espacio disponible de 15 megabytes, para la instalación y ejecución.
- 16 megabytes mínimo en memoria RAM
- Monitor de resolución SVGA o superior, soportado por Microsoft Windows.
- El área de escritorio de la pantalla, está diseñada para trabajar con 800\*600 píxeles. Una resolución menor no es recomendable.
- Para poder visualizar correctamente ciertas pantallas que se presentan durante la ejecución del programa, es necesario tener instalado una versión de Microsoft Word para Windows 95 (7.0a, ó superior). En caso contrario algunos gráficos que sirven para complementar una explicación teórica del modelo empleado, no se podrán apreciar correctamente.

### INTRODUCCION

D . A . S ., es un programa desarrollado exclusivamente para complementar el diseño del apantallamiento en subestaciones de potencia, de ahí sus siglas (DAS). Fue implementado tratando en lo posible de que sus usuarios puedan contar con una herramienta versátil y de fácil manejo, y que permita además la manipulación de la mayor parte de variables y parámetros que se involucran cuando se analiza el fenómeno concerniente a la formación de una descarga atmosférica hasta que ésta termina su trayectoria sobre algún objeto en tierra, y cuyo proceso conlleva al estudio y posterior formulación de los modelos que servirán para el diseño de un esquema de

apantallamiento dentro de una subestación de potencia con altos requerimientos de confiabilidad.

A continuación se detalla el menú principal con cada una de las alternativas que se presentan sobre éste, y que aparecerán una vez que se ha ingresado a la aplicación. Es necesario mencionar que mediante la tecla Alt se podrá acceder al menú principal, luego de lo cual la pulsación de cualquiera de las teclas que representen a una de las letras que están subrayadas dentro de las opciones presentadas, e incluso de los submenús permitirá que la acción sea ejecutada.

<u>Archivo</u>	
<u>N</u> ueva simulación	F4
<u>S</u> alir del programa...	Ctrl+S

#### **Nueva simulación :**

Es una opción que permite realizar un encerado general de todas las variables involucradas en el proceso de simulación, así como un borrado y actualización de la base de datos que se ha introducido como parte del programa para guardar los resultados que se van a obtener durante cualquiera de las corridas que se desee realizar. Por otro lado el usuario podrá ejecutar esta acción de una manera rápida mediante la pulsación de la tecla "F4".

#### **Salir del programa :**

Esta opción lógicamente permitirá que el usuario abandone la aplicación después de haberle hecho una pregunta que ratifique la decisión. De otro lado si el usuario ha decidido salir del programa, también se realizará un borrado de la base de datos sobre la cual se guardarán o guardaron los resultados que pudiesen resultar de alguna simulación o corrida del programa. La pulsación simultánea de las teclas Ctrl+S conseguirá que se ejecute ésta acción.



<b>Ver</b>	
<u>Sist. de coordenadas para fijar los puntos de ubicac. de c / elemento de protección...</u>	
<u>Curvas de la distrib. de probabilidad para la corriente de rayos</u>	▶ CIGRÉ...
<u>Modelo Electrogeométrico...</u>	UMAN...
<u>Modelo analítico para el cálculo de la zona de protección...</u>	EXPONENC...

### **Sist. de coordenadas para fijar los puntos de ubicac. de c/elemento de protección :**

Es una opción que permitirá a través de una pantalla mostrar gráficamente el sistema de ejes coordenados que deberá emplearse para ingresar los respectivos puntos de ubicación de cada uno de los elementos de protección que se desea emplear en un posible esquema de apantallamiento. Los valores de dichos puntos serán necesarios conocer cuando se requiera ejecutar la simulación en la cual se evaluará o verificarán las distintas alternativas que se hayan propuesto como posibles soluciones de un sistema de apantallamiento para una subestación determinada. Por otro lado también será necesario conocer las coordenadas de los vértices que representan a cada una de las áreas que protegerán los elementos de guardia y que en definitiva definirán en forma conjunta a toda la subestación, es decir la suma de estas áreas deberá dar como resultado final el área total de la subestación.

### **Curvas de la distrib. de probabilidad para la corriente de rayos :**

Uno de los parámetros fundamentales que determinarán la efectividad de un sistema de apantallamiento es la corriente que tenga una determinada descarga atmosférica. Existen varios mecanismos que se van venido empleando para evaluar estos valores, y de igual forma se han propuesto varias curvas de definen una distribución de probabilidad acumulada de las corrientes atmosféricas. En el presente programa se proponen 4 alternativas, una de las cuales permitirá que el usuario pueda ingresar o editar una nueva curva a través de un variado grupo de puntos que la definan, las 3 opciones adicionales presentan curvas ya establecidas y que se han definido durante períodos de estudio y análisis bastante considerables. La opción del menú a la se está haciendo referencia permite mostrar en una pantalla la forma

gráfica que tiene cada una de éstas curvas y que se han definido como : CIGRÈ, UMAN, EXPONENCIAL

Un artículo publicado para la IEEE en 1993 (\*10), y escrito por Herodotou N., Chisholm W., y Janischewskyj presenta un análisis comparativo de estas curvas, mostrando además que la curva que denominaron exponencial ya que fue encontrada usando un modelo de propagación del campo magnético radiado entre nubes y tierra en el proceso de formación de una descarga, varía en forma exponencialmente inversa con la distancia, lo cual ha permitido reducir la incertidumbre en la determinación de la corriente de dichas descargas del 25% al 10%. La curva propuesta por Uman asume que el campo magnético generado varía inversamente con la distancia, pero dicho modelo no toma en consideración los campos intermedios, las posibles variaciones de la conductividad de la tierra y la ionosfera, donde el factor más significativo resulta ser la atenuación en la conductividad de la tierra. Todas estas limitantes pueden provocar que señal del rayo se atenúe alrededor del 65 % (\*10).

Las razones expuestas conducen al hecho de que la curva exponencial presenta un intervalo de posibles valores para la corriente de una descarga que cubre magnitudes mucho más cerca de la realidad. Por lo cual se podría recomendar la utilización de dicha curva para realizar todos los análisis que conllevan a determinar un esquema de apantallamiento óptimo. Sin embargo quedan propuestas las dos alternativas restantes ya que sirvieron para realizar un análisis de sensibilidad que se presentó en la tesis desarrollada por Freud Paredes y que acompaña a la implementación de este programa.

Como ya se mencionó en cada una de las opciones (CIGRE, UMAN, EXPONENCIAL) se muestra una pantalla con las curvas planteadas en el artículo que se acaba de hacer referencia, y que a través de una función de densidad de probabilidad han sido utilizadas para realizar la simulación que conlleva a evaluar la altura a la que se colocarán los elementos de protección. Además se presentan 40 puntos tomados de dichas

curvas y que sirvieron para implementar una nueva representación de las mismas de una manera ciertamente discreta, y que será empleada para la simulación que permite realizar la verificación de los diseños en condiciones próximas a la realidad. Para más información consulte la tesis "Análisis de sensibilidad del apantallamiento contra rayos en subestaciones de potencia" desarrollada por Freud Paredes.

### **Modelo Electrogeométrico :**

Esta opción presenta una pantalla en la que se indica de manera gráfica el sistema de coordenadas cartesianas para el análisis del modelo electrogeométrico, y que definen además el posible punto de incidencia de una descarga considerando en forma general el lugar geométrico de todos los puntos que eventualmente la pudiesen atraer.

### **Modelo analítico para el cálculo de la zona de protección :**

Esta opción presenta una pantalla en la que se muestra gráficamente un modelo que permite evaluar la distancia protegida por un elemento de guardia, y que será función directa de la altura a la que éste se coloque, por lo que se indican las dos posibilidades que tendrían lugar si es que dicha altura es menor o mayor a la distancia crítica de arqueo a tierra. Para más información consulte la tesis "Análisis de sensibilidad del apantallamiento contra rayos en subestaciones de potencia" desarrollada por Freud Paredes.

### **Ecuaciones a usar**

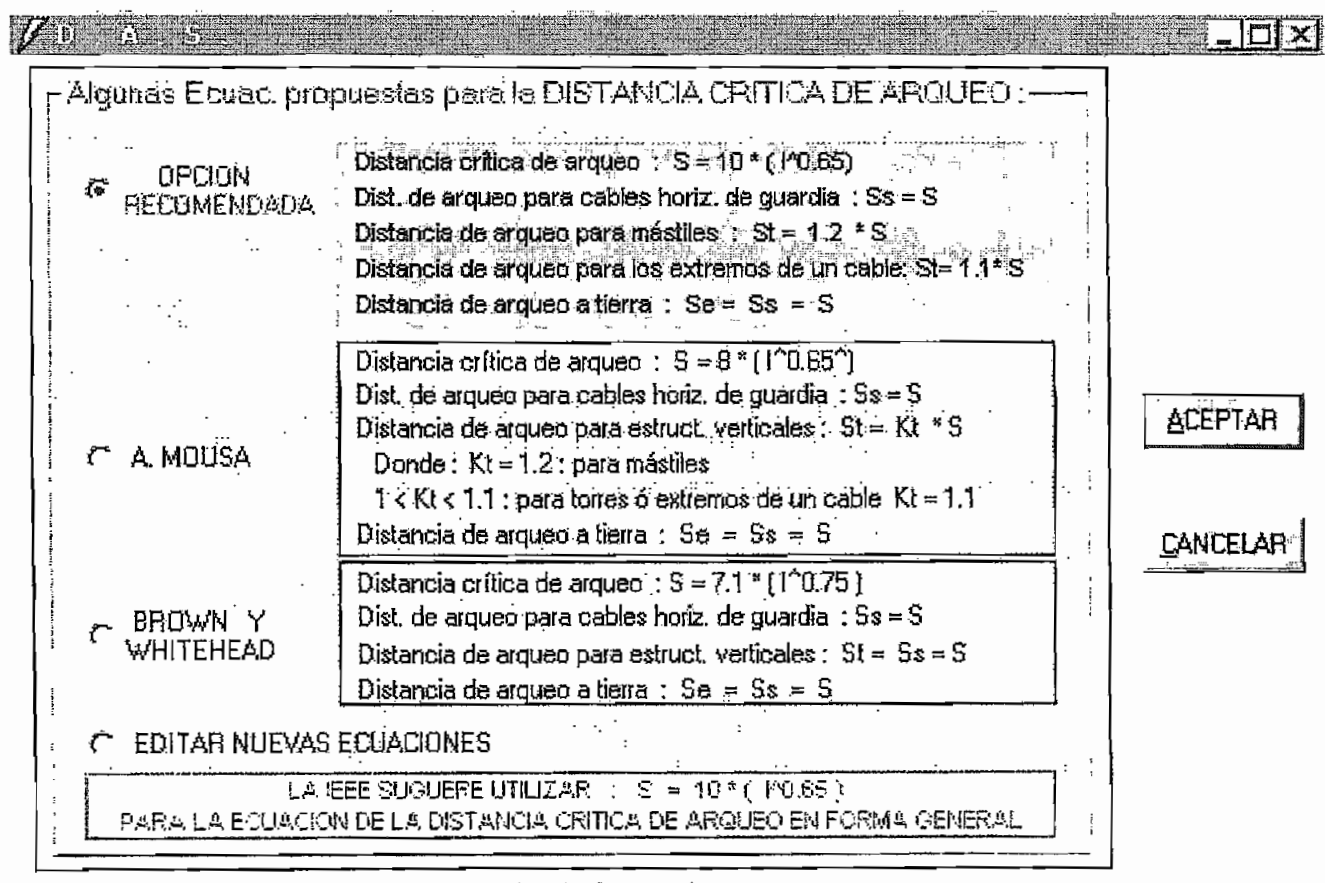
Dist. crítica de arqueo y Curvas de distrib. de probab. para la corriente de rayos...

Este es el menú quizá más importante de toda la aplicación, ya que imprescindiblemente deberá ser activado, y obviamente ejecutada la opción que éste presenta, para poder habilitar el resto de menús que inicialmente aparecerán desactivados.

### Distancia crítica de arqueo y Curvas de distribución de probabilidad para la corriente de rayos :

Es la alternativa que ofrece este menú y cuya acción mostrará una pantalla con algunas de las posibles ecuaciones que se ha propuesto para la distancia crítica de arqueo, parámetro fundamental en el análisis del modelo electrogeométrico que ha sido utilizado en este programa para determinar el posible punto de incidencia de una descarga.

A continuación se presenta una imagen muy similar a la pantalla que aparecerá al momento de ejecutar esta acción :



Como se puede notar existen 4 alternativas, dentro de las cuales solo una de ellas podrá activarse. Es importante mencionar que estudios recientes muestran que la distancia crítica de arqueo sufre ciertas variaciones dependiendo del tipo de estructura que se este analizando, y que especialmente para de estructuras verticales presenta un incremento que puede variar entre 10 y el 20% respecto de los valores que se muestran en

los componentes horizontales como es el caso de los cables, o el plano de tierra. El factor de variación puede variar dependiendo de si la estructura analizada es un mástil propiamente dicho, o es el caso de los extremos de un conductor horizontal colocado sobre una torre en cuyo caso la variación tendrá un tope del 10%. Las ecuaciones de A. Mousa tienen en consideración éste tipo de modificaciones, sin embargo la ecuación general para evaluar la distancia crítica de arqueo, según un reporte presentado por la IEEE en 1993, indica que una expresión que define de forma mucho más real a este parámetro está dada por :

$$S = 10 * (I^{0.65})$$

Son estas razones y los resultados obtenidos con las simulaciones, los motivos por los que se ha propuesto una opción recomendada en la que se toma en cuenta todo lo antes mencionado. Por otro lado se plantea además una alternativa en la que el usuario podrá editar unas ecuaciones totalmente nuevas, pero siguiendo el patrón de las que se muestran en la imagen anterior, para lo cual se le presentará una pantalla similar a la siguiente imagen :

D A S

DISTANCIA CRITICA DE ARQUEO  
 ECUACION GENERAL BAJO LA FORMA  
 $S = A * (I^b)$

PARAMETRO : A =  PARAMETRO : b =

Dist. de arqueo para cables de guardia.  
 Valor de la constante Ks que relaciona  
 $S_s = K_s * S$  :

Dist. de arqueo para mástiles.  
 Valor de la constante Kt que relaciona  
 $S_t = K_t * S$  :

Dist. de arqueo para estruct. verticales.  
 (extremos de los cables de guardia)  
 Valor de la constante Kt1 que relaciona  
 $S_{t1} = K_{t1} * S$  :

Dist. de arqueo para tierra.  
 Valor de la constante Ke que relaciona  
 $S_e = K_e * S$  :

Aceptar Cancelar

Como se puede notar el usuario debe ingresar algunos parámetros que definirán a la distancia crítica de arqueo para cada una de las estructuras que serán analizadas en este programa. Como ya se mencionó las últimas investigaciones han conducido a resultados que muestran que la expresión de define esta distancia puede variar dependiendo del tipo de estructura que se esté analizando.

Como una guía se deja la posibilidad de que se introduzcan factores dentro de los siguientes rangos :

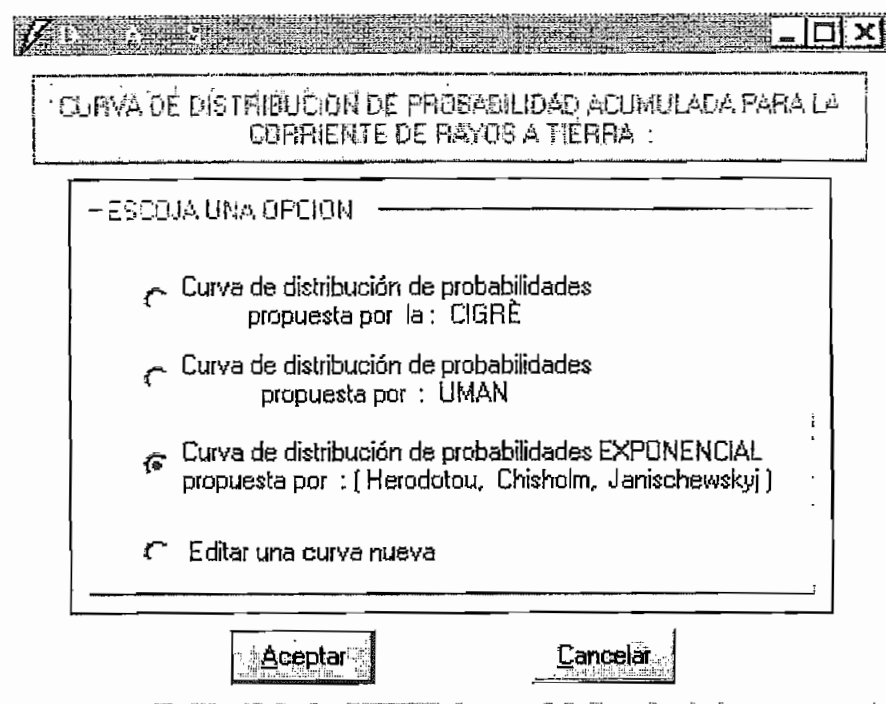
$S = A * ( I^b )$ , existen muchas ecuaciones que se ha propuesto para definir a esta expresión, el usuario tendrá libertad de emplear la que considere más adecuada.

$S = S_s = S_e$  ;  $K_s = K_e = 1$ (dist. Crítica de arqueo a tierra y conductores horizontales, bordes del plano expuesto)

$S_t = K_t * S$  ;  $1 < K_t < 1.2$  (dist. Crítica de arqueo para mástiles, vértices del plano expuesto)

$S_{t1} = K_{t1} * S$  ;  $1 < K_{t1} < 1.1$ (dist. Crítica de arqueo para torres-extremos de los cables de guardia)

Una vez que se haya escogido la opción para evaluar la distancia crítica de arqueo o en su defecto se hayan editado las respectivas ecuaciones, y obviamente presionado el botón aceptar, automáticamente aparecerá una nueva pantalla en la que el usuario de igual manera deberá optar por una de las alternativas presentadas y que determinan la *curva de distribución de probabilidades acumulada* para la corriente de lo rayos, tal como lo muestra la siguiente imagen :



Las posibles curvas a escoger son aquellas que se hacen mención el menú **Ver**, donde además se da una explicación de cómo se obtuvo cada una de ellas y cual podría representar una alternativa bastante objetiva, por lo tanto se recomienda revisar la segunda opción que presenta este menú.

La ultima alternativa que se presenta en esta pantalla es la posibilidad de que el usuario pueda generar una curva totalmente nueva, para lo cual tendrá que cumplir con algunos requisitos necesarios para que las simulaciones puedan llevarse a cabo sin ningún inconveniente. La pantalla que asomará en caso de haber optado por ésta opción es similar a la siguiente imagen :

CURVA No. 1			CURVA No. 2		
Datos de las Probabilidades ACUMULATIVAS y Corrientes de la curva que será analizada			Datos de las Probabilidades y Corrientes obtenidos derivando la curva No. 1		
	PROBABILIDAD (%)	CORRIENTE (KA)		PROBABILIDAD (%)	CORRIENTE (KA)
1			1		
2			2		
3			3		
4			4		
5			5		
6			6		
7			7		
Actualizar gráfico 2			Actualizar gráfico 1		
Ejemplo para el INGRESO DE DATOS					
Aceptar			Cancelar		

Las dos tablas mostradas deberán ser llenadas por el usuario con puntos que definan a la curva que se encuentre editando. La curva que se ha llamado 1 es aquella que se representará en una escala logarítmica, y mostrará la probabilidad de ocurrencia en forma acumulada de las posibles corrientes de una determinada descarga. Esta curva será empleada a través de una función de densidad de probabilidad para evaluar la altura a la que se debe colocar los elementos de protección, de igual forma los parámetros concernientes a la función de densidad de probabilidad tienen que ser ingresados por el usuario. En cuanto a la curva que se ha llamado 2, ésta resulta de un proceso matemático de derivación de la primera curva y con cuyos puntos se procederá a generar una representación gráfica en cierta manera discreta, lo que significa que se tomarán los valores de probabilidad por intervalos que deberán cubrir todo el rango propuesto en la curva 1. Aparte de que estos valores pueden tomarse en forma arbitraria siempre deberá tratarse de que los intervalos de corriente se evalúen para aquellos valores donde en forma puntual no se marquen grandes diferencias de probabilidad. Por ejemplo para un intervalo de corrientes entre  $I_1$  e  $I_2$ , existirá una probabilidad de ocurrencia  $P_2 - P_1$ , valor que deberá ingresarse en la



primera fila de columna 1, mientras que el valor de I1, e I2 se colocarán en la primera y segunda fila de la columna 2 y así sucesivamente. Esto implica que si tenemos "n" intervalos se habrán definido "n+1" corrientes que cubrirán todo el rango y para los cuales se habrán definido "n" probabilidades. A continuación se muestra un pequeño ejemplo de dos curvas que podrían representar todo lo mencionado:

**CURVA 1**

CORRIENTE	PROBABILIDAD
3	99.7
8	93
15	85
20	80
24	70
27	65
30	60
36	45
40	39
50	20
60	16
75	8
80	7
90	4
100	2
125	1.2
175	0.7
200	0.25

**CURVA 2**

CORRIENTE	PROBABILIDAD
3	6.7
8	13
20	20
30	21
40	23
60	9
80	3
90	2
100	0.8
125	0.5
175	0.45
200	

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18

SUMA PROB. = 99.45

**No. PUNTOS**

**CURVA 1 18**

**CURVA 2 11**

Como se puede notar los puntos de la curva 2 se han cubierto a través de 11 intervalos marcados por 12 valores de corriente y que obviamente definieron 11 probabilidades, por lo que se hace necesario recalcar que pese a que el número de puntos para dicha curva será 11, necesariamente deberán ingresarse las 12 corrientes que los definieron.

## CURVA 1

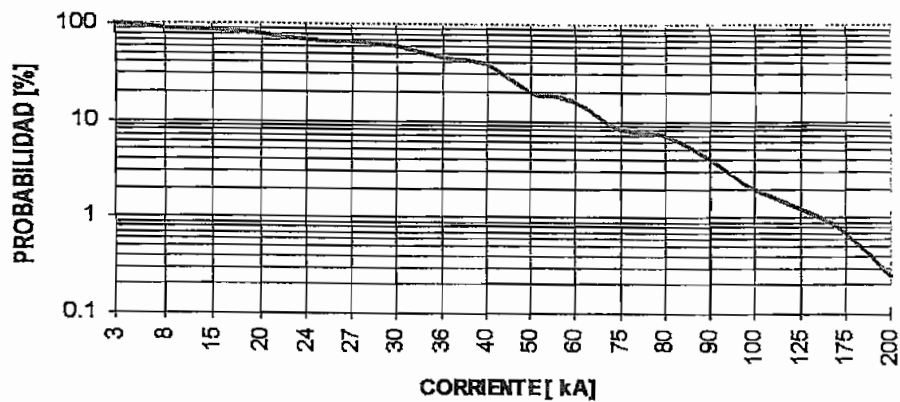


FIG. No. 1 : (Elaborado por : Freud Paredes)

## CURVA 2

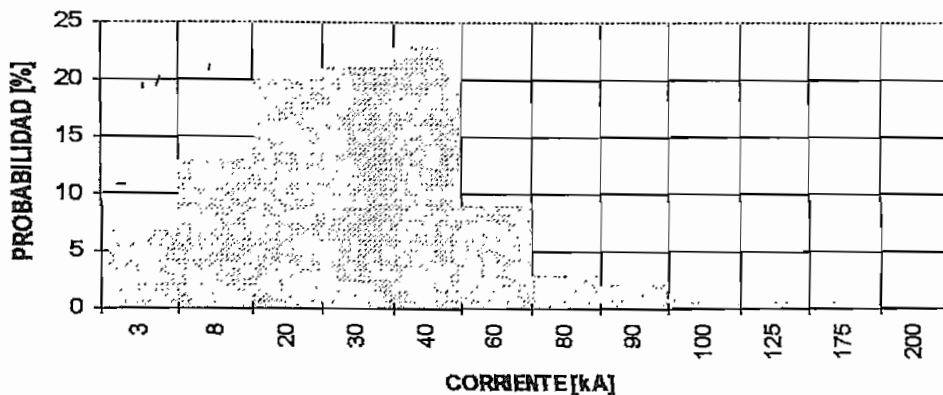


FIG. No. 2 : (Elaborado por : Freud Paredes)

La curva 2, será empleada para efectuar la simulación que permitirá encontrar el período de protección resultante de cada una de las alternativas que se desean probar en condiciones próximas a la realidad, es decir para realizar la verificación de los diseños.

A continuación se muestra una imagen similar a la pantalla que aparecerá cuando se presione el botón **EJEMPLO PARA EL INGRESO DE DATOS**, y en la cual se describe en forma resumida un ejemplo de como se deben ingresar los datos para la curva 1 y la curva 2.

**DATA**

**CURVA No. 1**

Datos de las Probabilidades ACUMULATIVAS y Corrientes de la curva que será analizada

	PROBABILIDAD (%)	CORRIENTE (KA)
1	99.7	3
2	99.5	3.5
3	99	3.8
4	98.5	4
5	98	4.3
6	97	4.8
7	96	5

**CURVA No. 2**

Datos de las Probabilidades y Corrientes obtenidos derivando la curva No. 1

	PROBABILIDAD (%)	CORRIENTE (KA)
1	7.2	3
2	2.5	3
3	5	11
4	10	15
5	5	22
6	15	24
7	25	32

LOS PUNTOS DE LA CURVA No. 2 HAN SIDO OBTENIDOS DERIVANDO LA CURVA No. 1 PARA CADA UNO DE LOS INTERVALOS DADOS POR LAS CORRIENTES MOSTRADAS, POR EJEMPLO: EN EL PRIMER DATO ENTRE 3 KA Y 3.5 KA LAS PROBABILIDADES SON 99.7% Y 99.5% RESPECTIVAMENTE, DE AHI QUE LA DIFERENCIA (DERIVADA) CUYO RESULTADO ES EL INDICADO RESULTA SER 7.2%. LOS PUNTOS PUEDEN SER ELEGIDOS ARBITRARIAMENTE PERO TOMANDO EN CUENTA QUE LAS VARIACIONES DE CORRIENTE NO MARQUEN MUCHA DIFERENCIA AL IGUAL QUE LAS PROBABILIDADES DE OCURRENCIA QUE REPRESENTAN, Y TRATANDO DE CUBRIR EL MAXIMO NUMERO DE PUNTOS. DEBE NOTARSE QUE A PESAR DE QUE EXISTAN 16 VALORES DE CORRIENTE SOLAMENTE 15 PUNTOS SERAN GRAFICADOS. PARA MAS INFORMACION CONSULTE LA AYUDA.

**ACEPTAR**

Al presionar el botón **Actualizar gráfico 1** automáticamente asomará una pantalla pidiendo que se ingrese el número de puntos que se ha empleado para definir la curva 1, luego de lo cual se procederá a mostrar una pantalla final con una representación gráfica en escala logarítmica de la curva editada, igual situación sucederá con el botón **Actualizar gráfico 2** con la diferencia de que el gráfico se expresará en escala normal tal como lo muestran la fig. 1 y fig. 2 respectivamente. No se debe dejar desapercibido el hecho de que el número de puntos para la curva 2 estará dado por el número de intervalos definidos y no por el número de corrientes consideradas.

Una vez que se hayan actualizado las dos curvas el botón **Aceptar** se habilitará y podrá ser ejecutado produciéndose bajo este efecto una acción adicional y que mostrará una pantalla dentro de la cual se deberá ingresar los parámetros que definan a la función de densidad de probabilidad editada por la curva 1, así como los límites inferior y superior sobre los que se enmarca la misma. La pantalla es similar a la siguiente imagen :

<p>ES NECESARIO ACLARAR QUE PARA PODER REALIZAR LA SIMULACION DIGITAL QUE COMPLEMENTARA EL DISEÑO DEL APANTALLAMIENTO, SE DEBERA INGRESAR CIERTOS PARAMETROS QUE DEFINAN UNA FUNCION DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD QUE CARACTERIZE A LA CURVA DE DISTRIBUCION DE PROBABILIDADES QUE HA SIDO EDITADA, Y QUE SE REPRESENTARA DE LA SIGUIENTE MANERA :</p>	
$H(I) = K1 * e^{-I/I1} + K2 * e^{-I/I2}$	
<p>PARA OBTENER ESTOS PARAMETROS LE RECOMENDAMOS UTILIZAR EL PROGRAMA STATGRAPHICS, EN EL CUAL UD. PODRA INGRESAR LOS DATOS DE LA CURVA EDITADA Y REALIZAR A TRAVES DE ESTOS UNA REGRESION NO LINEAL PARA LA FUNCION TIPO INDICADA.</p>	
K1 = <input type="text"/>	I1 = <input type="text"/>
K2 = <input type="text"/>	I2 = <input type="text"/>
<p>ADICIONALMENTE SE DEBERA INGRESAR LOS LIMITES SUPERIOR E INFERIOR DE LA CURVA DE DISTRIBUCION DE PROBABILIDADES PARA LA CORRIENTE DE RAYOS, QUE SE HA PROPUESTO EDITAR.</p>	
Lim.inf. de corriente = <input type="text"/>	Lim.sup. de corriente = <input type="text"/>
<p>PARA OBTENER MAS INFORMACION DE COMO OBTENER ESTOS PARAMETROS Y SU UTILIDAD, ASI COMO DEL MANEJO DEL PROGRAMA STSTGRAPHICS, CONSULTE LA AYUDA.</p>	
<input type="button" value="Aceptar"/>	<input type="button" value="Cancelar"/>

La forma general que tendrá esta función de densidad de probabilidad es :

$$h(I) = K1 * e^{-I/I1} + K2 * e^{-I/I2} \quad (1)$$

Esta expresión ha sido calibrada para cada una de las alternativas referentes a las curvas de probabilidad propuestas, mediante la ayuda del programa estadístico STATGRAPHICS (Statistical Graphics System), por lo que se recomienda la utilización de este programa para obtener los parámetros K1, I1 y K2, I2. Se puede emplear la versión 6.0 o cualquier otra que presente la facilidad de resolver una regresión no lineal. Para efectuar este proceso se debe tener en cuenta el siguiente desarrollo matemático :

Conociendo que la ecuación (1) representa una función de densidad, se sabe que :

$$\overline{H(I)} = \int_0^I (K1 \cdot e^{-I/I1} + K2 \cdot e^{-I/I2}) dI = 100, \text{ entonces}$$

$$\overline{H(I)} = -K1 \cdot I1 \cdot e^{-I/I1} - K2 \cdot I2 \cdot e^{-I/I2} \Big|_0^I$$

$$\overline{H(I)} = -K1 \cdot I1 \cdot e^{-I/I1} - K2 \cdot I2 \cdot e^{-I/I2} + K1 \cdot I1 + K2 \cdot I2$$

Si la curva de probabilidad que se desea editar está representada en forma acumulada, como es el caso del ejemplo que se ha planteado en líneas anteriores o el de las curvas que se propusieron como posibles alternativas, entonces se debe tener en cuenta que :

$$H(I) = 100 - \overline{H(I)}$$

$$H(I) = 100 + K1 \cdot I1 \cdot (e^{-I/I1} - 1) + K2 \cdot I2 \cdot (e^{-I/I2} - 1)$$

Sabiendo además que :

$$\lim_{I \rightarrow \infty} H(I) = 0$$

Entonces :

$$100 - K1 \cdot I1 - K2 \cdot I2 = 0$$

$$100 = K1 \cdot I1 + K2 \cdot I2$$

$$K1 = \frac{(100 - K2 \cdot I2)}{I1} \quad (2)$$

De esta manera se puede llegar a una función de 3 parámetros dada por la siguiente expresión, y que será justamente la ecuación la que deberá resolverse por medio de una regresión no lineal con la ayuda del programa STATGRAPHICS :

$$H(I) = 100 + \left[ (100 - K2 \cdot I2) \cdot (e^{-I/I1} - 1) \right] + \left[ K2 \cdot I2 \cdot (e^{-I/I2} - 1) \right] \quad (3)$$

Una vez que se ha ingresado a este programa, su menú principal presenta una opción FILE en la cual se deberá crear un archivo sobre el cual se va a trabajar, el menú FILE tiene entre sus alternativas una llamada File Utilites, y es esta opción la que permitirá crear un archivo después de haber ingresado el nombre del mismo y presionado la tecla F6. Luego de esto

deberá editarse el archivo creado, empleando la opción del programa EDIT bajo la acción del Data Editor que esta alternativa presenta y en la cual será necesario crear las dos variables de probabilidad y corriente que serán utilizadas, definiendo primeramente sus nombres y tipo, este último obviamente será numérico y se designará por la letra "N", la tecla F6 permitirá en todo el proceso remplazar la acción de un ENTER. Una vez creadas las variables, el programa solicitará que se ingresen los puntos que definen la curva con la cual se desea trabajar.

Luego de haber realizado todo este proceso se debe recurrir a la opción del menú principal marcada bajo el nombre de modelos (MODELS), y en la cual se optará por la regresión no lineal, lo cual mostrará una pantalla en la que se deben ingresar la variable que se considerará como dependiente, 3 valores iniciales para comenzar el proceso y que representarán a las condiciones iniciales del jacobiano que será resuelto, y por último la función dada por la ecuación (3), esto se puede realizar fácilmente mediante la ayuda de la tecla F7. La función deberá ser expresada de la siguiente manera :

$$H(I) = 100 + \left( \left( 100 - (PARM[1] \cdot PARM[2]) \right) \cdot \left( \left( EXP(-CORRIENTE / PARM[3]) \right) - 1 \right) \right) \\ + \left( (PARM[1] \cdot PARM[2]) \cdot \left( \left( EXP(-CORRIENTE / PARM[2]) \right) - 1 \right) \right)$$

Donde : La variable PARM [ ], representa las siguientes parámetros

$$PARM[1] = k2$$

$$PARM[2] = I2$$

$$PARM[3] = I1$$

El programa automáticamente devolverá los valores de estas variables, en tanto que el valor de K1 se obtendrá mediante la ecuación (2). Debe mencionarse que la solución final podrá requerir de varios intentos hasta conseguir que el margen de error sea lo suficientemente aceptable, y por último no está por demás aclarar que el empleo de este programa es solamente una sugerencia, es decir si se cuenta con cualquier otro

mecanismo que permita evaluar estos factores, el mismo será totalmente aceptado y valedero.

Una vez que se hayan ingresado estos valores el proceso de simulación del programa D.A.S. continuará, al igual que si se hubiese optado por trabajar con cualquiera de las curvas de distribución de probabilidad acumulada preestablecidas, lo cual implica la habilitación de los menús que tienen que ver con la evaluación de la altura a la que se colocarán los elementos de protección o en su defecto con la verificación de los diseños previamente definidos para el esquema de apantallamiento de la subestación.

<b>Eval. Período de protecc.(Verif. diseños)</b>	
Ingreso de datos ▶	Sist. de Coord. a usar
Simulación F2	Características Princip.
Resultados ↕	
Aplicación del método de Monte-Carlo ▶	

Esta parte del menú permitirá realizar la verificación de los posibles diseños que se hayan propuesto para el esquema de un sistema de apantallamiento en una subestación, en primera instancia todas las secciones aparecerán desactivadas, exceptuando la referente al ingreso de datos y será justamente esta opción después de haber sido accionada, la que se encargue de habilitar como primer paso la alternativa de "Simulación" y la denominada como "Aplicación del método de Monte-Carlo", lo que implica que deberán haberse ingresado todos los datos necesarios para esta parte del proceso.

#### **Ingreso de datos :**

Como se puede notar al decidir ingresar los datos se cuenta con 2 alternativas, una de las cuales permite mostrar una pantalla que indicará el sistema de coordenadas a emplearse para ingresar los puntos donde se ha colocado los elementos de protección, así como sus respectivas áreas a proteger, tal como se indica en la opción del menú **Ver**. Por otro lado se cuenta con la opción adicional que concretamente conlleva al ingreso de

datos, y que se ha definido como características principales. La pantalla a presentarse bajo ésta alternativa es similar a la siguiente figura :

<p>PERIODO DE ESTUDIO : [años]      RADIO DE INFLUENCIA ALREDEDOR DE LA SUBESTACION : [m].</p> <hr/> <p>ANCHO DEL AREA MARGINAL DE RIESGO (ALREDEDOR DE LA S/E SOBRE LA CUAL SE CONSIDERARA QUE TODAS LAS DESCARGAS PROVOCAN LA SALIDA DEL SISTEMA) : [m]</p> <hr/> <table style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> <p><input type="checkbox"/> ANALISIS CONSIDERANDO LA DENSIDAD DE DESCARGAS A TIERRA</p> <p><input type="checkbox"/> ANALISIS CONSIDERANDO EL NIVEL CERAUNICO</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Se consideran CABLES DE GUARDIA(en la instalación)</p> <p><input type="checkbox"/> Se consideran MASTILES (en la instalación)</p> </td> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> <p>Estructuras verticales que eventualmente estén dentro de radio de influencia, pero que no forman parte de la instalación</p> <p>Cables eventuales dentro del radio de influencia, pero que no forman parte de la instalación</p> </td> </tr> </table>	<p><input type="checkbox"/> ANALISIS CONSIDERANDO LA DENSIDAD DE DESCARGAS A TIERRA</p> <p><input type="checkbox"/> ANALISIS CONSIDERANDO EL NIVEL CERAUNICO</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Se consideran CABLES DE GUARDIA(en la instalación)</p> <p><input type="checkbox"/> Se consideran MASTILES (en la instalación)</p>	<p>Estructuras verticales que eventualmente estén dentro de radio de influencia, pero que no forman parte de la instalación</p> <p>Cables eventuales dentro del radio de influencia, pero que no forman parte de la instalación</p>	
<p><input type="checkbox"/> ANALISIS CONSIDERANDO LA DENSIDAD DE DESCARGAS A TIERRA</p> <p><input type="checkbox"/> ANALISIS CONSIDERANDO EL NIVEL CERAUNICO</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Se consideran CABLES DE GUARDIA(en la instalación)</p> <p><input type="checkbox"/> Se consideran MASTILES (en la instalación)</p>	<p>Estructuras verticales que eventualmente estén dentro de radio de influencia, pero que no forman parte de la instalación</p> <p>Cables eventuales dentro del radio de influencia, pero que no forman parte de la instalación</p>		
<p>PARA EFECTOS DE LA SIMULACION Y CON EL PROPOSITO DE REALIZAR LA TRASLACION DE DE TODA LA SUBESTACION HACIA EL CENTRO DEL RADIO DE INFLUENCIA SE REQUIERE UNA APROXIMACION QUE REPRESENTA A TODA LA INSTALACION A TRAVES DE UN POLIGONO REGULAR DE 4 LADOS, TODO ESTO CON EL AFAN DE CONTAR CON UNA REFERENCIA QUE NOS PERMITA TRASLADAR SOLAMENTE AQUELLAS AREAS DONDE EXISTA EQUIPO VULNERABLE Y QUE OBMAMENTE DEBERAN ESTAR PROTEGIDAS POR UN ELEMENTO DE GUARDIA . COMO SE PUEDE VER EN LA FIGURA LA SUMA DE ESTAS AREAS NOS DEFINIRA EL AREA TOTAL DE LA SUBESTACION.</p>			
<p>COORDENADA "Y1" (VER FIGURA) QUE REPRESENTA UNO DE LOS LADOS DE LA SUBESTACION Y QUE DEFINIRA SU POSIBLE AREA [m] = _____</p>	<p>COORDENADA "X2" (VER FIGURA) QUE REPRESENTA EL OTRO LADO DE LA SUBESTACION Y QUE DEFINIRA SU POSIBLE AREA [m] = _____</p>		
<p><input type="button" value="Aceptar"/>      <input type="button" value="Cancelar"/></p>			

Los datos que se requieren son los años de simulación que definirán el período de estudio, el radio de influencia alrededor de la subestación que debe considerarse para evaluar el efecto de posibles descargas generadas en las zonas circundantes a la instalación y que eventualmente podrían terminar sobre el equipo provocando una salida del sistema, este dato deberá reflejar un área mayor a la de la subestación e influirá directamente sobre el número de descargas a simular durante el período de estudio analizado. Por otro lado también será necesario conocer el área alrededor de la subestación sobre la cual se va a considerar que todas las descargas pueden provocar la salida del sistema, y que se ha definido como área marginal de riesgo. Esto



debido a que dichas descargas podrían generar sobrevoltajes peligrosos que afectarían al buen funcionamiento de toda la instalación. Adicionalmente se requiere que el usuario defina si desea trabajar con valores definidos por la densidad de descargas a tierra, o en su defecto con el nivel ceraúnico, para esto dependiendo de la opción que se habilite y luego de presionar el botón aceptar el programa automáticamente solicitará que se ingresen los datos de la densidad de descargas o por el contrario si se opto por la otra alternativa los valores del nivel ceraúnico y de la constante "C" que lo relaciona con dicha densidad a través de la siguiente expresión :

$$N_o = C * N_C \quad (4)$$

Donde  $N_o$  : densidad de descargas a tierra [desc. / Km<sup>2</sup>\*año]  
C : constante que puede variar entre 0.1 y 0.2  
N<sub>C</sub> : nivel ceraúnico

Por otro lado el usuario deberá definir si trabajará con cables de guardia y/o mástiles ubicados dentro de la instalación, y cuyo fin será apantallar a la misma. Además se presenta la opción de simular las posibles influencias de eventuales estructuras verticales(mástiles), y/o conductores horizontales colocados en las cercanías de la subestación y que de hecho no forman parte de la misma, esta última alternativa es opcional. Como último requisito se requiere que el usuario defina el área de la estación aproximándola a un polígono regular de 4 lados para lo cual deberá ingresarse 2 de dichos lados, esto con fines exclusivamente de fijar un punto de referencia que posteriormente servirá para realizar la traslación de todas y cada una de las áreas protegidas (cuya suma debe representar el área total de la subestación) por los elementos de guardia hacia el centro del radio de influencia. Es decir la instalación será modelada considerando que ésta se encuentra dividida en varias áreas que incluso podrían representar diferentes planos de exposición los cuales podrán simularse, si así fuese el caso, a diferentes alturas uno de otro. El propósito de realizar éste procedimiento es justamente permitir que el usuario pueda considerar subestaciones en las cuales se encuentren elementos de protección ubicados sobre estructuras de

diferente altura, lo cual implica que el equipo que se desea proteger deberá ser representado por planos imaginarios (expuestos) los cuales se encuentran a distintos niveles de altura. Este análisis además conlleva a que la estación considerada no necesariamente deberá ser un rectángulo o un cuadrado, ya que al realizar la traslación de las áreas protegidas por los elementos de guardia, en su conjunto éstas podrían representar una figura que es totalmente distinta a un polígono regular de 4 lados.

Una vez conocida toda la información que se acaba de detallar, aparecerán secuencialmente una serie de pantallas dependiendo del número de elementos que se deseen modelar y en las cuales el usuario tendrá que ingresar la información referente a los puntos donde se ha supuesto colocados cada uno de los elementos en análisis. Además para el caso de cables y/o mástiles dentro de la instalación será necesario conocer los vértices que definen al área que este elemento deberá proteger y que será evaluada como una superficie expuesta colocada a una cierta altura, en cuyos casos también será pertinente conocer aquellos bordes y vértices del área en mención y que eventualmente podrían emitir canales ascendentes por lo que estarían sujetos a atraer una determinada descarga. Esto resulta ser muy importante cuando se requiera simular planos expuestos ubicados a distintos niveles, ya que en dichos casos los bordes y/o vértices en común entre las áreas que se desean proteger tendrán que ser considerados, situación que no debe analizarse cuando las superficies de exposición se suponen todas a un mismo nivel. Las pantallas que asomarán en el caso de cables de guardia ubicados en la instalación es similar a la siguiente figura :

**INGRESE LAS COORDENADAS DEL PUNTO DE INICIO DEL CABLE EN METROS :**

"X1 " [m] =

"Y1 " [m] =

"Z1 " = H0 + H [m] =

**INGRESE LAS COORDENADAS DEL PUNTO FINAL DEL CABLE EN METROS :**

"X2 " [m] =

"Y2 " [m] =

"Z2 " = H0 + H [m] =

Ingrese las coordenadas de los vértices del área ( Plano ) que se desea proteger : [m]

	"X"	"Y"
PUNTO 1 : P1	<input type="text"/>	<input type="text"/>
PUNTO 2 : P2	<input type="text"/>	<input type="text"/>
PUNTO 3 : P3	<input type="text"/>	<input type="text"/>
PUNTO 4 : P4	<input type="text"/>	<input type="text"/>

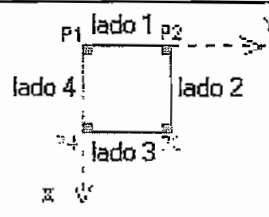
Seleccione los "bordes y vértices" del área analizada que eventualmente podrán atraer una descarga. Esto debe tomarse muy en cuenta para el caso de planos de protección ubicados a diferentes alturas.

lado 1     P1

lado 2     P2

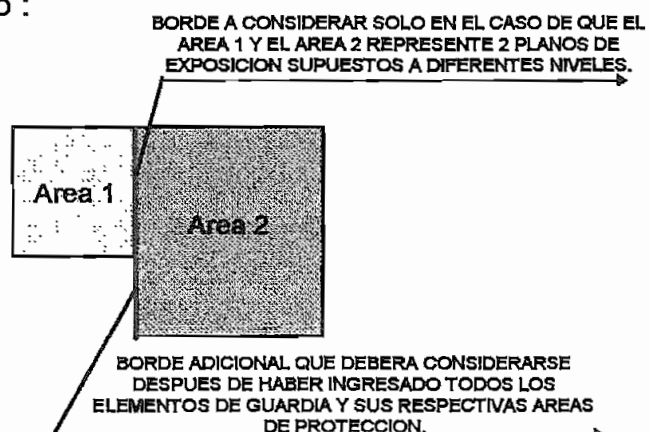
lado 3     P3

lado 4     P4



ALTURA DEL PLANO EXPUESTO DE LA SUBESTACION (H0) : [m] =

Como se puede ver los bordes y vértices del área que será protegida por el elemento de guardia serán considerados (si es necesario hacerlo), a través un visto en las casillas correspondientes y que hacen mención a lo dicho. Por otro lado para el caso de mástiles la pantalla a presentarse es muy similar a la indicada, sin embargo para el caso de cables y/o mástiles ubicados en las cercanías de la subestación la información requerida tendrá que ver exclusivamente con la ubicación de éstos elementos. Finalmente una vez ingresada toda la información el programa solicitará hacer referencia a ciertos bordes y/o mástiles que no hayan podido ser mencionados como un borde completo de una determinada área de protección, tal es el caso del siguiente ejemplo :



**Simulación :**

Una vez que se cuente con toda la información requerida, ésta opción del menú automáticamente se habilitará permitiendo que el usuario pueda ejecutarla, y de esta manera iniciar el proceso de simulación que terminará mostrando una pantalla de resultados en forma muy general sobre el número de descargas simuladas, aquellas que terminaron sobre tierra, las que fueron atraídas por los cables de guardia y/o mástiles y las que provocaron la salida del sistema. Además se indicará el período de protección que ha resultado de la colocación del esquema de apantallamiento así como la efectividad de éste sobre el área analizada. Una vez culminado el proceso de simulación la opción del menú referente a los resultados será habilitada.

Esta opción(simulación) puede ser ejecutada de una manera rápida mediante la pulsación de la tecla F2.

**Resultados :**

<b>Eval. Período de protecc.(Verif. diseños)</b>	
Ingreso de datos	▶
Simulación	F2
<u>Resultados</u>	▶
Aplicación del método de Monte-Carlo	▶
	Resultados generales
	Resultados sobre los puntos de falla
	Análisis para cada elemento de guardia
	Resultados gráficos

Esta opción presenta 4 alternativas :

**Resultados generales :**

Es una alternativa que permite visualizar a través de una pantalla, los resultados obtenidos para todas las descargas simuladas y que se clasificaron por grupos para cada uno de los intervalos de corriente que se evaluaron por medio de la curva de distribución de probabilidades utilizada, y para los cuales además se determinó el número de rayos que estarían presentes con una corriente producto del valor medio del intervalo considerado. Por otro lado se muestra además el número de rayos que han

terminado en tierra, los que fueron atraídos por los elementos de protección, y aquellos que se descargaron sobre el equipo de la subestación, todo esto para cada valor de corriente analizado y que como se dijo es obtenida del valor medio de cada intervalo. Finalmente se muestra un valor porcentual para cada magnitud de corriente y que refleja el número de salidas que se provocaron respecto del total de rayos que se analizaron en el intervalo. La pantalla que muestra estos resultados permitirá mediante el empleo de un botón la opción de que éstos sea impresos en papel común si el usuario así lo requiere.

#### Resultados sobre los puntos de falla :

Esta opción permite mostrar las coordenadas del punto de incidencia para todas aquellas descargas que penetraron el blindaje y que terminaron su trayectoria sobre el equipo de la subestación, o eventualmente sobre el área marginal de riesgo. Adicionalmente se indica el valor de la corriente que tuvo la descarga que provocó la salida, el número de rayos que se simularon con dicha magnitud y el número de rayo al que se produjo la perforación del blindaje. Al igual que en el caso anterior la pantalla que muestra estos resultados permitirá mediante el empleo de un botón la opción de que estos sea impresos en papel común si el usuario así lo requiere.

#### Análisis para cada elemento de guardia :

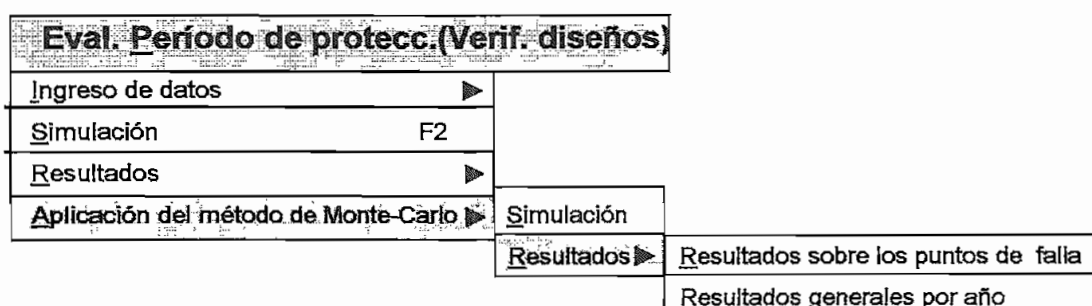
Esta opción presenta la alternativa de mostrar en una pantalla los resultados obtenidos para cada uno de los elementos de guardia empleados, su ubicación y altura de colocación así como las descargas que fueron interceptadas, cuantas terminaron su trayectoria en puntos ubicados dentro de el área que dicho elemento debió apantallar. Por otro lado también se indica la densidad de descargas a tierra relativa, definida como la relación entre aquella densidad que aparece por efecto de la presencia del equipo de la subestación y la resultante de analizar simplemente la influencia de un terreno delimitado por el área que será protegida por cada elemento.

Finalmente se muestra un parámetro definido como la efectividad del elemento de guardia y que tiene que ver justamente con la relación entre las descargas que penetraron el blindaje terminando su trayectoria en el área que debió ser apantallada por el elemento en cuestión y aquellas que obviamente fueron interceptadas por el mismo.

### Resultados gráficos :

Esta es una alternativa que permite indicar de una manera gráfica todas las descargas simuladas, separando aquellas que terminaron en tierra, las que fueron apantalladas y las que provocaron la salida del sistema. Por otro lado, se puede apreciar en forma esquemática y a escala el radio de influencia considerado, así como la subestación que previamente ha sido centrada en dicha área. Adicionalmente se podrá apreciar la presencia de los cables y/o mástiles modelados, permitiéndose además modificar la coordenada en "Z" de cada uno de estos.

### Aplicación del método de Monte-Carlo :



Esta opción representa una alternativa a todo el proceso de simulación que se acaba de describir y de igual forma resulta ser totalmente válida, sin embargo involucra un desarrollo mucho más aleatorio ya que se introducen una serie de variables con carácter probabilístico que determinan que la simulación se tarde un tiempo considerablemente mayor al requerido con el mecanismo antes mencionado, por lo que su utilización no es recomendada, a parte de que los resultados obtenidos bajo las dos propuestas resultan muy

similares y por supuesto confiables. Las opciones que ésta parte del menú presenta son muy similares a las que se acaban de describir, por lo que no se considera necesario detallar nuevamente a cada una de ellas.

<b>Det. altura ( elem. de protección )</b>	
<u>I</u> ngreso de datos ▶	<u>C</u> ables
<u>S</u> imulación F2	<u>M</u> ástiles
<u>R</u> esultados	

Esta sección del menú es pieza fundamental para complementar un diseño de apantallamiento contra descargas atmosféricas en una subestación, y que deberá realizarse según el modelo propuesto en la tesis "Análisis de sensibilidad del apantallamiento contra rayos en subestaciones de potencia" desarrollada por Freud Paredes. Lo que se tratará es de evaluar en forma precisa la altura a la que se deben colocar los elementos de guardia conociendo previamente el área que éstos deberán resguardar y un conjunto de valores que representarán las posibles alturas a las que estos elementos se ubicarán, así como el período de protección que será considerado para el área en mención.

### **Ingreso de datos :**

Es una opción en la que el usuario debe definir para qué elemento de protección desea evaluar la altura a la que éste se colocará, y que además estará referida sobre el plano que representa al equipo de la subestación (plano expuesto). Como se puede ver el menú presenta las dos posibles opciones a emplear, cables de guardia o mástiles.

En el caso de trabajar con cables de guardia el programa solicitará el ingreso de la longitud que tendrá dicho cable, luego de lo cual se preguntará si se requiere trabajar con datos de la densidad de descargas a tierra, o en su defecto con el nivel ceraúnico, en cualquiera de los casos se mostrarán

pequeñas pantallas en las que el usuario tendrá que determinar dichos valores; si fuese el caso del nivel cerámico adicionalmente se deberá ingresar el valor de la constante "C" definida por la expresión (4). Inmediatamente después de que se hayan ingresado estos valores aparecerá una pantalla solicitando que se asignen los valores del intervalo de distancias protegidas que se desean analizar, al igual que las posibles alturas a las que se presume el cable podrá ser colocado.

Si por el contrario se desea trabajar con mástiles, el programa solo solicitará que se ingrese los valores referentes a la densidad de descargas a tierra, o nivel cerámico si fuese el caso, y de igual manera que para los cables de guardia, se presentará una pantalla en la que se deben ingresar los intervalos de las distancias protegidas y de las alturas que serán evaluadas para determinar el período de protección resultante.

La pantalla que asomará después de haber ingresado estos datos para cualquiera de las dos alternativas es similar a la siguiente imagen :

D A S	
<b>DETERMINACION DEL PERIODO DE PROTECCION DEL APANTALLAMIENTO PARA UNA SUBESTACION DE POTENCIA :</b>	
Valor inicial de la altura efectiva (H) sobre el plano expuesto de la S/E, que desea considerar . ( EN METROS )	= <input type="text"/>
Valor final de la altura efectiva (H) sobre el plano expuesto de la S/E, que se va a considerar ( EN METROS ), y que debe ser mayor que el valor inicial.	= <input type="text"/>
Incremento en el valor de la altura efectiva considerada ( EN METROS )	= <input type="text"/>
Valor inicial de la distancia protegida por el elemento de guardia considerado . ( EN METROS )	= <input type="text"/>
Valor final de la distancia protegida que va a considerar, y que deberá ser mayor que el valor inicial. ( EN METROS )	= <input type="text"/>
Incremento en el valor de la distancia protegida que desea considerar ( EN METROS )	= <input type="text"/>
<input type="button" value="Aceptar"/> <input type="button" value="Cancelar"/>	



Como se puede ver se requiere que el usuario ingrese un intervalo de posibles alturas  $H$ , a las que se presume podrán ser colocados los elementos de protección. Adicionalmente se ingresará la distancia que protegerá cada uno de éstos elementos, o en su defecto un intervalo de dichos valores que permitirán visualizar de mejor manera los resultados a través ayudas gráficas (curvas).

La opción de simulación que presenta el menú será automáticamente habilitada después de haber ingresado los datos que se acaban de mencionar.

### Simulación :

Esta es la opción del menú que permitirá iniciar el proceso de simulación y que evaluará el período de protección para cada una de las alturas requeridas. Los valores de las distancias protegidas serán considerados para cada altura ingresada de tal manera que los resultados puedan mostrar un conjunto de datos dentro de los cuales se podrá identificar el período de protección esperado y la distancia de protección que cubrirá el elemento considerado. Esta opción puede ser ejecutada de una manera rápida mediante la pulsación de la tecla F3, y habilitará automáticamente la opción de resultados.

### Resultados :

<u>Det. altura ( elem. de protección )</u>	
<u>I</u> ngreso de datos ▶	
<u>S</u> imulación F3	
<u>R</u> esultados ▶	<u>R</u> esultados generales
	<u>R</u> esultados de : $Y = f ( XP, H )$

Es una opción por medio de la cual se podrá acceder a todos los resultados obtenidos de la simulación ejecutada es este menú. Se presentan dos alternativas :

#### Resultados generales :

Esta opción mostrará una pantalla en la que se visualizará todos los resultados obtenidos. Estos se clasificarán para las alturas analizadas y para cada una de ellas se evaluará el período de protección en todos los intervalos de distancias protegidas, así mismo ingresadas por el usuario.

Entre los resultados que serán mostrados se cuenta el área que se desea proteger, dada por las expresiones :

AREA A PROTEGER =  $2 * L * XP$ , en el caso de los cables

AREA QUE SE DESEA PROTEGER =  $\pi * (XP)^2$ , para el caso de mástiles

Donde XP serán las posibles distancias que protegerán los elementos de guardia.

Adicionalmente se mostrarán las distancias XP, el área real protegida por cada elemento de guardia, y el período de protección resultante para el elemento analizado. Estos 2 últimos parámetros serán calculados automáticamente por el programa en base a un algoritmo matemático propuesto en la tesis "Análisis de sensibilidad del apantallamiento contra rayos en subestaciones de potencia" desarrollada por Freud Paredes.

En el caso de que la última columna de la tabla de resultados presente un mensaje de que no existe ningún riesgo de fallas, esto deberá entenderse como una situación en la que el área protegida por el elemento de guardia es mayor que el área que inicialmente se deseaba proteger. La pantalla que

muestra estos resultados permitirá mediante el empleo de un botón la alternativa de imprimir todo lo mencionado en papel común.

### **Resultados de : $Y = f ( XP,H )$ :**

Esta opción mostrará solamente aquellos resultados referidos al período de protección, la distancia protegida y la altura a la que se colocarán los elementos de guardia, recalcando además que se mostrarán solamente aquellos puntos donde se presenten posibles riesgos de salida del sistema, es decir para aquellos valores de altura donde el área protegida por los elementos de guardia es menor al área que se desea proteger.

La pantalla que indica estos resultados presenta una alternativa adicional sobre la posibilidad de mostrar los resultados expresados de manera gráfica. Esto puede resultar útil para conocer en forma general el comportamiento de un elemento de guardia, tomando en consideración las diferentes alturas a las que éste eventualmente puede ser colocado y evaluando adicionalmente para cada uno de éstos valores los diferentes intervalos de distancias protegidas por el elemento analizado.

La pantalla que muestra estos resultados permitirá mediante el empleo de un botón la opción de que los mismos sean impresos en papel común si el usuario así lo requiere.

<b>Ayuda</b>	
<u>C</u> ontenido	F1
<u>A</u> cerca de DAS...	

### **Contenido :**

Esta opción del menú permite que el usuario puede acceder a la información presentada en este manual. La pulsación de la tecla F1 permitirá

además que esta información puede ser controlada en cualquier instancia de la simulación.

**Acerca de DAS :**

Esta opción presenta un información muy general acerca del objetivo y fecha de implementación del programa D. A .S. (Diseño del apantallamiento de subestaciones).

# ANEXO N°.3

## GLOSARIO

### DISTANCIA CRITICA DE ARQUEO .-

El LIDER en su descenso actúa básicamente solo, es decir inadvertido de la influencia de los objetos de tierra, impulsado únicamente por la repulsión de las cargas acumuladas en la nube, hasta alcanzar cierta distancia respecto de los canales ascendentes y a través de la que se produce una fuerte interacción que llega a su punto crítico cuando dicha distancia bordea las decenas y hasta centenas de metros, momento en el cual se produce la disrupción o descarga ya que se ha superado la rigidez dieléctrica del aire. La distancia final a la que se produjo la descarga se llama DISTANCIA CRITICA DE ARQUEO (distancia de choque) y se considera que ocurrió entre el LIDER y un canal ascendente que se lo llamará de CONTACTO (\*4).

### PLANO EXPUESTO DE LA SUBESTACION .-

Es un plano horizontal imaginario que representa un modelo (grosso) 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. (véase pág. 41)

### SUPERFICIES DE EXPOSICION .-

Son aquellas superficies que forman parte del plano expuesto de la subestación pero que eventualmente pueden ser modeladas en forma independiente ya que puede darse el caso de que presenten un valor de la distancia crítica de arqueo diferente al de los demás elementos que forman parte de dicho plano, tal es el caso de los bordes ó vértices. Para el caso de los bordes se ha considerado que esta superficie puede ser modelada como

un semicilindro de radio  $S_s$ , y para los vértices como una semiesfera de radio  $S_s$ .(véase pág. 41)

### **SUPERFICIES INTERCEPTORAS ( ESCUDOS ) .-**

Son aquellas superficies definidas por la presencia de los elementos de guardia, y que se encuentran sobre el plano expuesto de la subestación. Se ha determinado que para el caso de cables de guardia dicha superficie sea tratada como un semicilindro de radio  $S_s$ , y para los extremos de los mencionados cables como una semiesfera de radio  $St_1$ . Para el caso específico de mástiles se asumirá que la superficie interceptora está representada por una semiesfera de radio  $St$  (véase pág. 41)

### **ESQUEMA DE APANTALLAMIENTO ( BLINDAJE ) .-**

Representa un conjunto de elementos de protección(cables de guardia y/o mástiles) dispuestos sobre el equipo de la subestación(plano expuesto), cuya función es interceptar las descargas atmosféricas que descienden sobre la subestación para apartarlas del equipo y conductores vivos, y finalmente descargarlas en la malla de puesta a tierra.

### **PERIODO DE PROTECCION DEL APANTALLAMIENTO .-**

Es un período de tiempo, durante el cual se puede garantizar la efectividad de un esquema de apantallamiento, teniendo en cuenta que es factible que se produzca una salida del sistema por efecto de la perforación del blindaje.

### **MODELO ELECTROGEOMETRICO .-**

Es el lugar geométrico de todos los puntos de un sistema, que pueden eventualmente atraer una descarga, y cuya base es la distancia crítica de arqueo, parámetro que es función directa de la magnitud de corriente de la descarga(ecuación 2.1). De ahí que se le ha dado el nombre de modelo electrogeométrico (véase pág. 46 )

### **RADIO DE INFLUENCIA SOBRE LA SUBESTACION .-**

Es un valor que define el perímetro de influencia de las descargas atmosféricas alrededor de la subestación, y que ha sido tomado en consideración debido a que en muchas ocasiones es probable que algunas descargas generadas en las zonas aledañas a la instalación puedan terminar su trayectoria sobre el área delimitada por el equipo de la subestación (ver figura 3.14).

### **AREA MARGINAL DE RIESGO .-**

Es el área periférica alrededor de la subestación y sobre la cual todas aquellas descargas que terminen su trayectoria deben ser consideradas como salidas del sistema. Se ha comprobado que el ancho de la mencionada área debe estar alrededor de lo 10 metros(ó más), de tal manera que se pueda garantizar la independencia de la puestas a tierra (ver fig. 3.14).

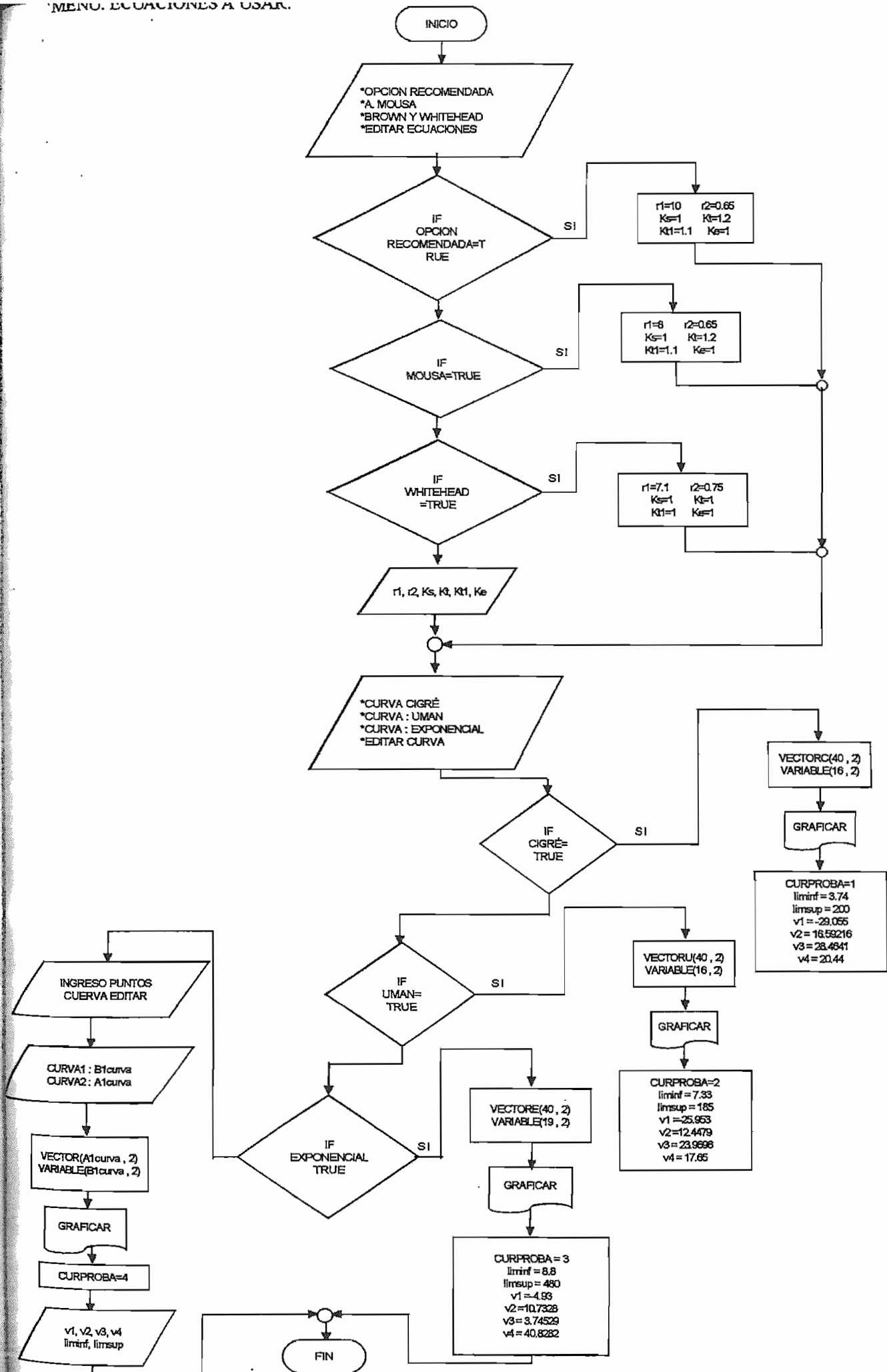
### **DENSIDAD DE DESCARGAS A TIERRA RELATIVA .-**

Cuando se habla de la densidad de descargas a tierra, se esta haciendo referencia a un parámetro que determina el número de descargas por kilómetro cuadrado y por año. Sin embargo dicho valor se ve modificado cuando se está modelando un instalación de potencia, como es el caso de una subestación. Esto se debe a que la presencia del equipo de dicha estación influye notablemente sobre las posibles descargas que puedan descender sobre el área que representa la subestación en análisis. Por esto ha surgido la idea de hablar de una densidad de descargas a tierra relativa, que relacione los valores que se obtienen al considerar el área de la instalación sin ningún tipo de componentes, y aquel valor que resulte tomando en consideración todos los elementos que formen parte de la subestación.

## **ANEXO N°.4**

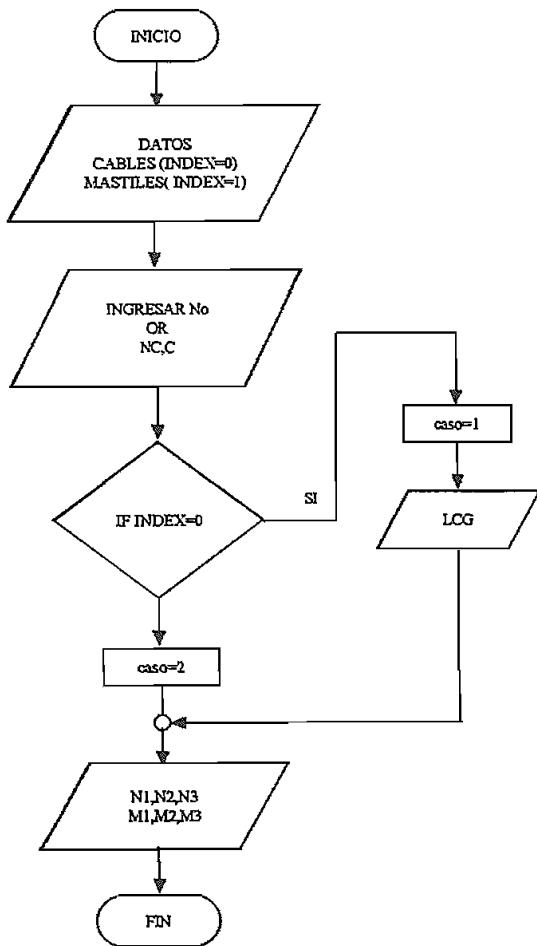
# *DIAGRAMAS DE FLUJO*



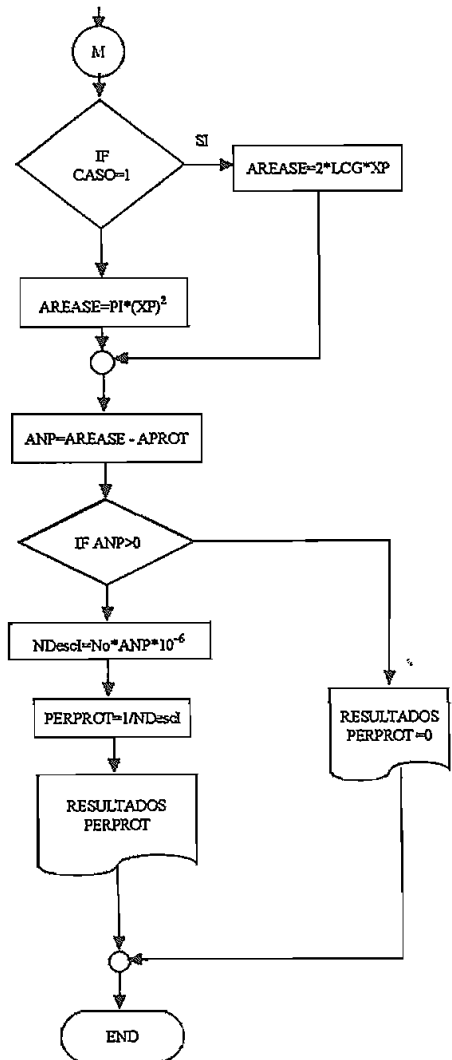
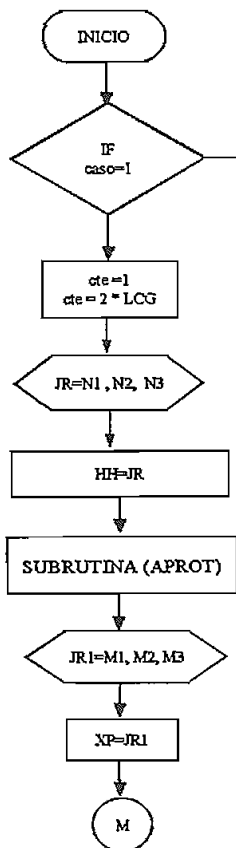


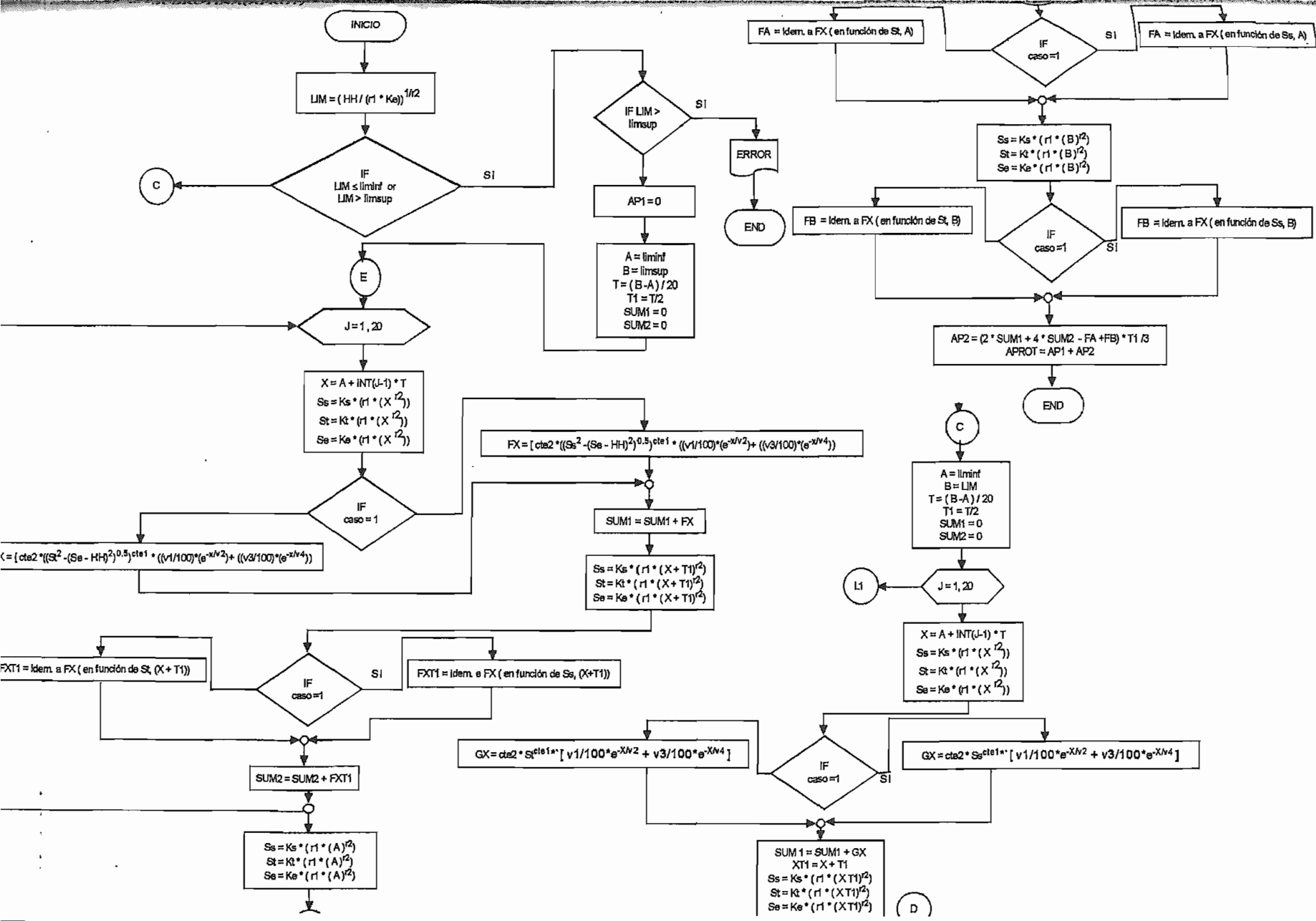
# Menú : Determinación de la altura de los elementos de protección

## INGRESO DE DATOS :

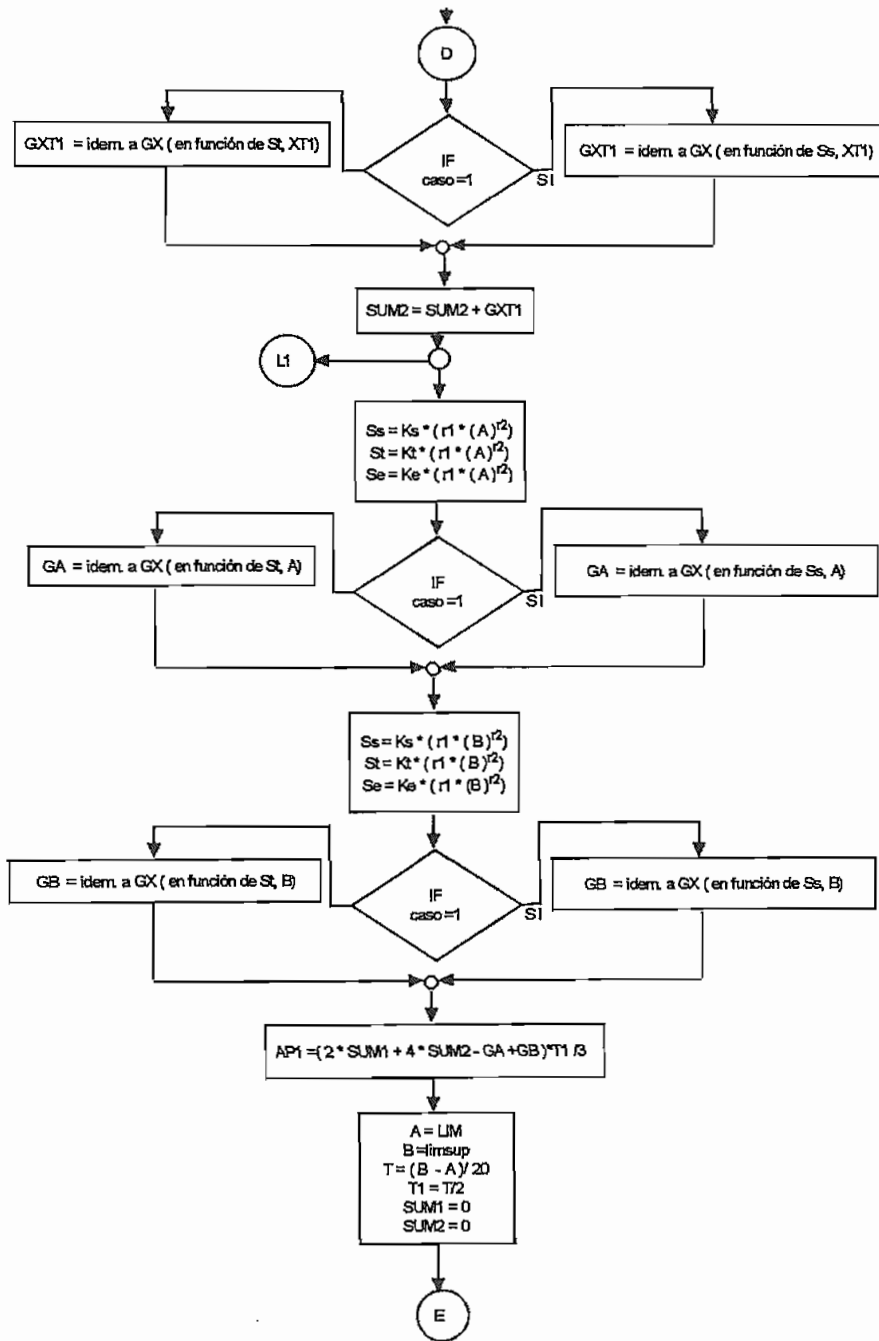


## SIMULACION :





DETERMINACION DEL AREA PROTEGIDA (HOJA 2/ 2)  
 SUBROUTINA(APROT)



**SIMULACION PARA EVALUAR LA EFECTIVIDAD DEL APANTALLAMIENTO**  
**INGRESO DE DATOS : FORMA 2**

INICIO

Periodo estudio = AÑOS  
 Radio de influencia = RI  
 Ancho área marginal riesgo = SOMBRA  
 Densidad Desc tierra = OPTION1  
 Nivel ceratúnico = OPTION2  
 Cables de guardia = Check1  
 Mástiles = Check2  
 Lado Y de la S/E = LADOy  
 Lado X de la S/E = LADOx  
 Estruct verticales fuera instalac = Ckcd3  
 Cables fuera instalación = Check4

$LADOxT = (RI - LADOx)/2$   
 $LADOyT = (RI - LADOy)/2$

IF OPTION1= TRUE

NC, C

No = NC \* C

SUMAPRO = 0

$NDSim = INT[No * AÑOS * (RI/1000)^2]$

IF CURPROBA=1 OR CURPROBA=2

IF CURPROBA=3

$VARIABLE(J,1) = [VARIABLE((J+1),1) + VARIABLE(J,1)] / 2$   
 SUMAPRO = SUMAPRO + VARIABLE(J,2)

$VARIABLE(J,2) = (VARIABLE(J,2) * NDSim) / SUMAPRO$

$VARIABLE(J,1) = [VARIABLE((J+1),1) + VARIABLE(J,1)] / 2$   
 SUMAPRO = SUMAPRO + VARIABLE(J,2)

$VARIABLE(J,2) = (VARIABLE(J,2) * NDSim) / SUMAPRO$

$VARIABLE(J,1) = [VARIABLE((J+1),1) + VARIABLE(J,1)] / 2$   
 SUMAPRO = SUMAPRO + VARIABLE(J,2)

$VARIABLE(J,2) = (VARIABLE(J,2) * NDSim) / SUMAPRO$

IF Check1=1 and Check2=0

IF Check1=1 and Check2=0

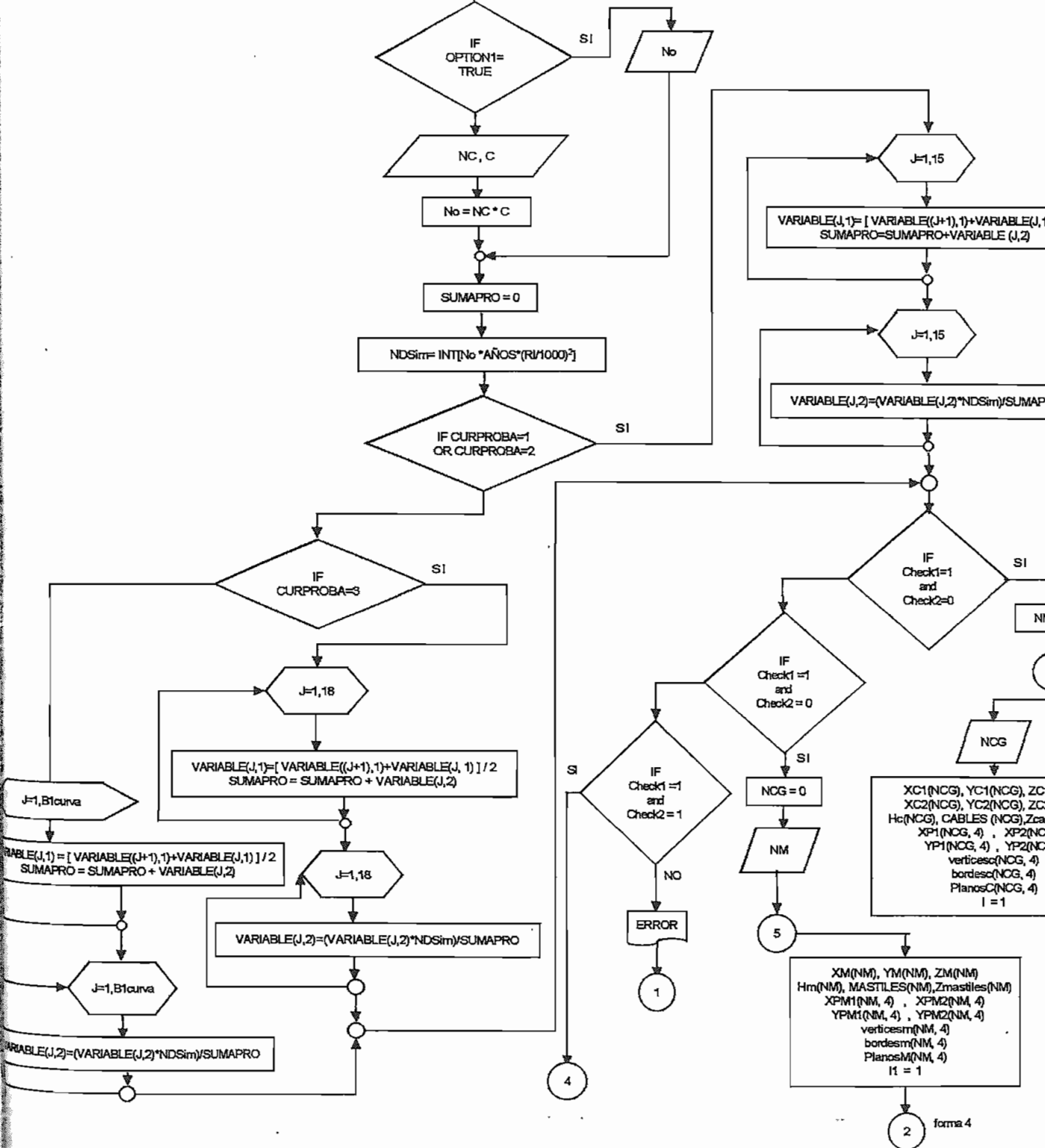
NCG = 0

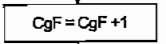
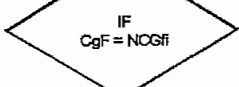
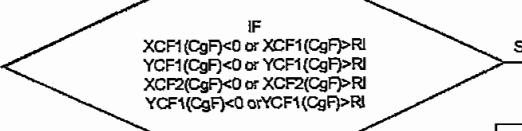
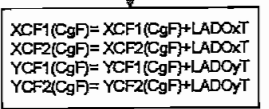
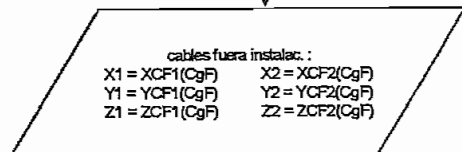
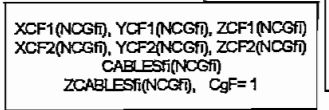
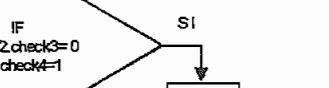
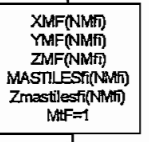
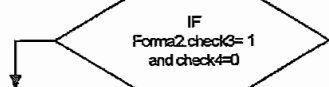
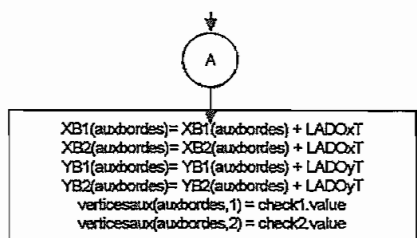
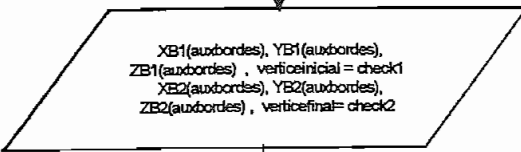
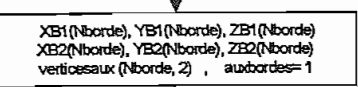
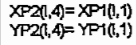
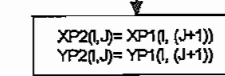
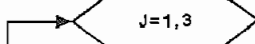
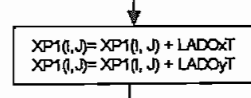
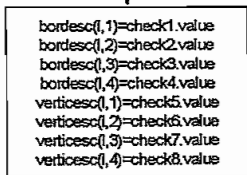
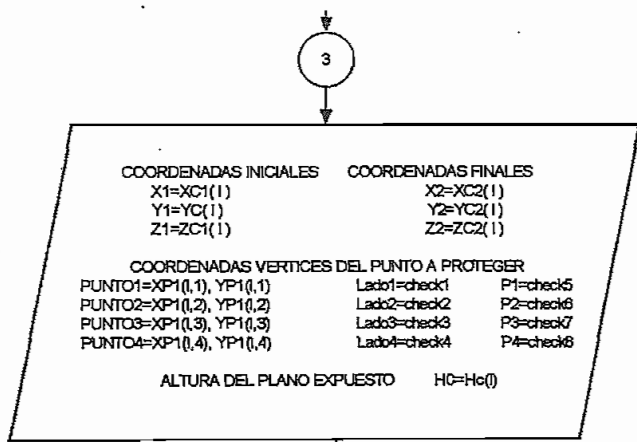
NM

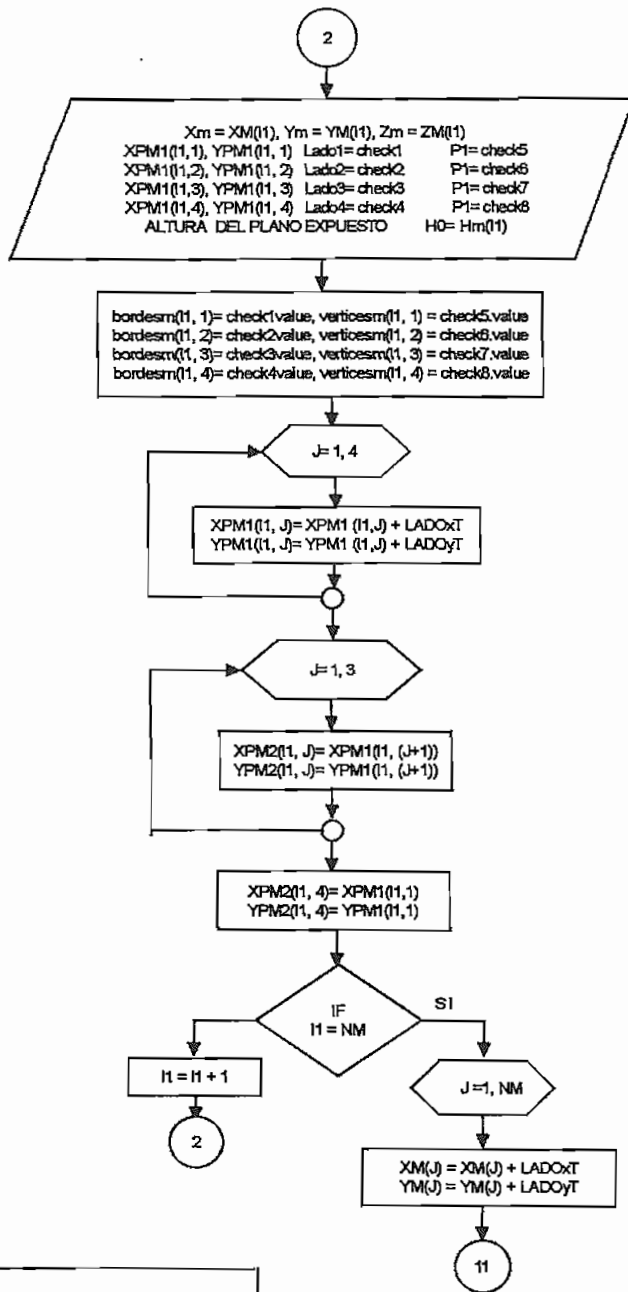
XC1(NCG), YC1(NCG), ZC1(NCG),  
 XC2(NCG), YC2(NCG), ZC2(NCG),  
 Hc(NCG), CABLES(NCG), Zcab(NCG),  
 XP1(NCG, 4), XP2(NCG, 4),  
 YP1(NCG, 4), YP2(NCG, 4),  
 verticesc(NCG, 4),  
 bordesc(NCG, 4),  
 Planosc(NCG, 4)  
 I = 1

XM(NM), YM(NM), ZM(NM)  
 Hm(NM), MASTILES(NM), Zmastiles(NM)  
 XPM1(NM, 4), XPM2(NM, 4)  
 YPM1(NM, 4), YPM2(NM, 4)  
 verticesm(NM, 4)  
 bordesm(NM, 4)  
 PlanosM(NM, 4)  
 I = 1

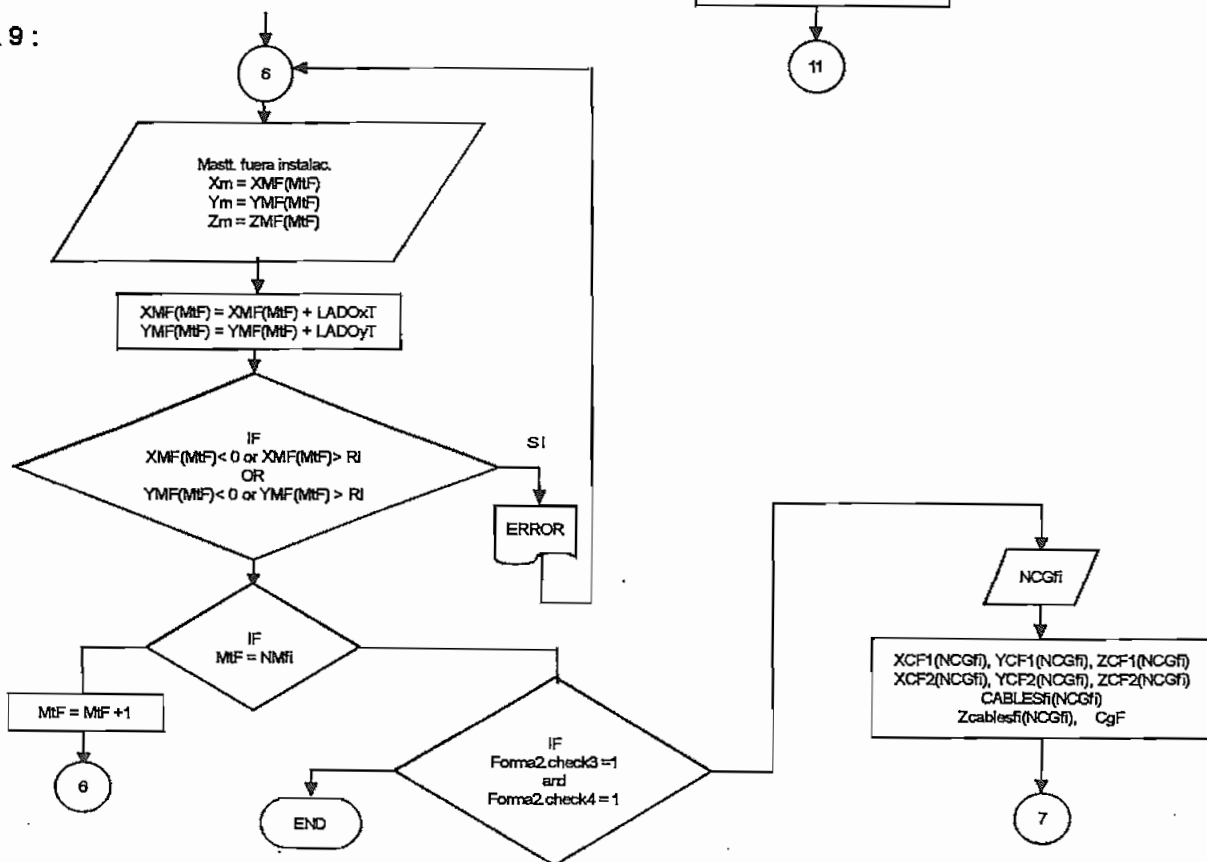
forma 4



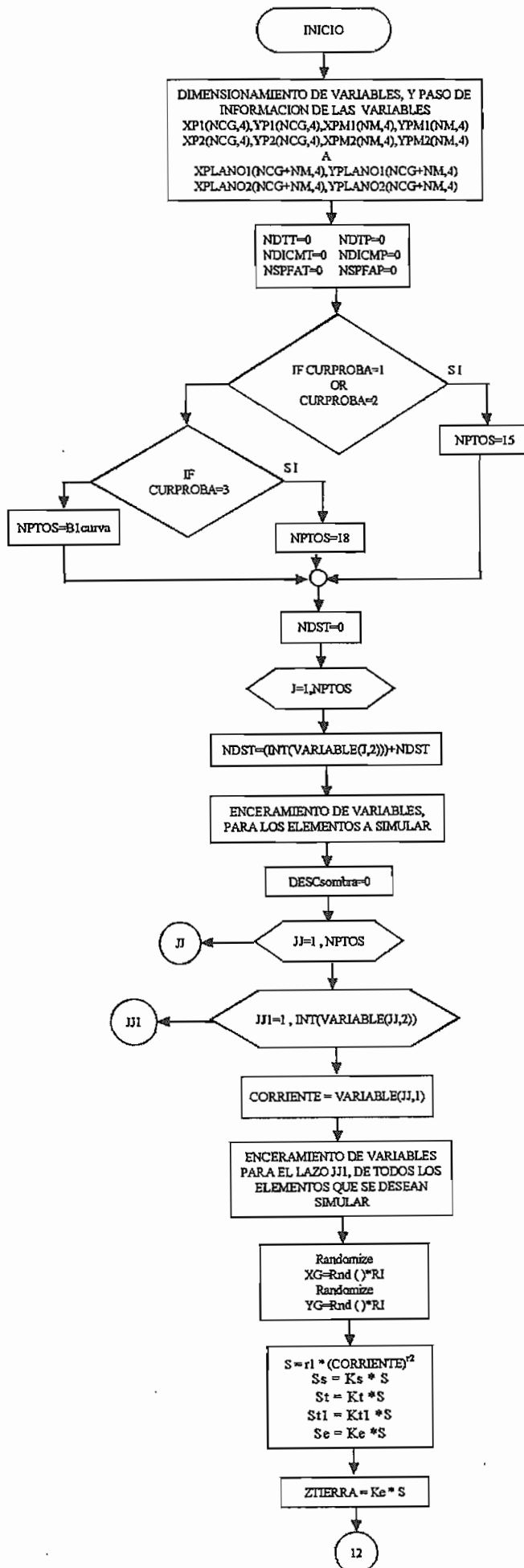




FORMA 9 :



SIMULACION D.A.S.(VERIFICACION DE ESQUEMAS DE APANTALLAMIENTO) :





SIMULACION D.A.S.(VERIFICACION DE ESQUEMAS DE APANTALLAMIENTO) :

A continuación se detalla el proceso que se debe seguir para evaluar la mayor altura de corte de los bordes de cada superficies de exposición y sus respectivos vértices, de los cables horizontales y sus extremos. Para el caso de estructuras verticales. el proceso será como el descrito para los vértices de las superficies de exposición, o extremos de los conductores horizontales. Para el caso se tomara como ejemplo el análisis de los cables de guardia :

