

## ANEXO A

En este anexo se reseña el modelo electrogeométrico expuesto en [5], que indica la causa del fallo en el apantallamiento y el subsecuente impacto de rayos de determinadas magnitudes sobre los conductores de fase.

### A.1.- APANTALLAMIENTO.

El aislamiento de las líneas de transmisión debería soportar cualquier sobretensión que se presente, para ello la longitud de las cadenas de aisladores y las distancias mínimas de aire deberían ser grandes, lo que implicaría el incremento de costos y espacios físicos necesarios. Por esta razón se diseña el aislamiento para que pueda soportar todas las sobretensiones de origen interno, mas no la totalidad de las sobretensiones debido a descargas atmosféricas. Al apantallar una línea usando cables de guarda se protegen los conductores de fase, logrando desviar la corriente del rayo a tierra cuando el diseño ha sido bien elaborado.

El apantallamiento es la protección que se logra mediante la colocación de un elemento que impide o atenúa en gran medida el paso de campos hasta la unidad que se desea proteger. El cable de guarda es dispositivo de apantallamiento usado en las líneas aéreas.

### A.2.- INTERCEPCIÓN DE LAS DESCARGAS POR LA LÍNEA.

Una línea de transporte de energía eléctrica crea un área de sombra de atracción de la descarga, por lo tanto los rayos ubicados dentro del área de sombra en vez de terminar en la tierra, impactan sobre la línea. En la figura A.1 se representa una línea trifásica (fases A B y C) protegida por dos hilos de guarda (GW), donde  $\alpha$  es el ángulo de apantallamiento y  $\theta$  el ángulo de sombra.

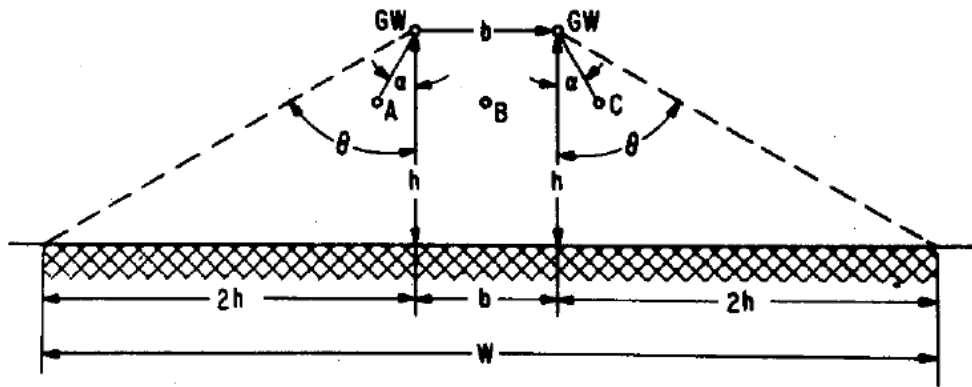


Figura A.1. Ángulos de sombra y apantallamiento.

Además se muestra el ancho  $W$  de la mencionada sombra para la línea de dos hilos de guarda, claro que en el caso de una línea con sólo un hilo de guarda  $b$  es nula. La altura  $h$ , media del hilo de guarda de la línea se obtiene según:

$$h = h_g - \frac{2}{3} * (h_g - h_{gw}) \quad (\text{A.1})$$

Donde:

**$h_g$** : altura del hilo de guarda en la torre

**$h_{gw}$** : distancia del hilo de guarda a la tierra en la mitad del vano.

Una vez determinada  $h$ , se calcula la anchura  $W$ :

$$W = b + 4 * h^{1.09}; \text{ en metros} \quad (\text{A.2})$$

Por tanto, el número de descargas de origen atmosférico que impactan la línea por cada 100 km al año “NL” será:

$$N_L = 0.012 * T * (b + 4 * h^{1.09}) \quad (\text{A.3})$$

Donde:

**T**: nivel cerámico de la zona

### A.3.- ÁNGULO DE APANTALLAMIENTO

El que un rayo caiga sobre un conductor de fase o no depende de la posición de los cables de guarda respecto este. El ángulo de apantallamiento se define como el

ángulo que forman la vertical que pasa por el cable de guarda y la recta que une dicho cable de guarda y el conductor de interés en una vista frontal de la estructura [14].

#### A.4.- MODELO ELECTROGEOMÉTRICO

El modelo electrogeométrico presentado en [3], es ampliamente usado y aceptado debido a su sencillez, el mismo descansa sobre las siguientes hipótesis:

a) La intensidad del rayo es proporcional a la tensión del canal guía previo a la descarga.

b) En su recorrido hacia la tierra o la línea el rayo se aproxima una distancia  $S$  (distancia de impacto), y dependiendo de su localización da un salto final hacia el objeto que esté debajo. Esta distancia depende de la intensidad de la descarga y viene dada aproximadamente por la ecuación de Love:

$$S = 10 * I^{0.65}; S \text{ en metros}; I \text{ en kA} \quad (\text{A.4})$$

En la figura A.2 se puede observar un modelo simplificado del mecanismo de fallo de apantallamiento para un hilo de tierra y un conductor de fase sobre un terreno horizontal.

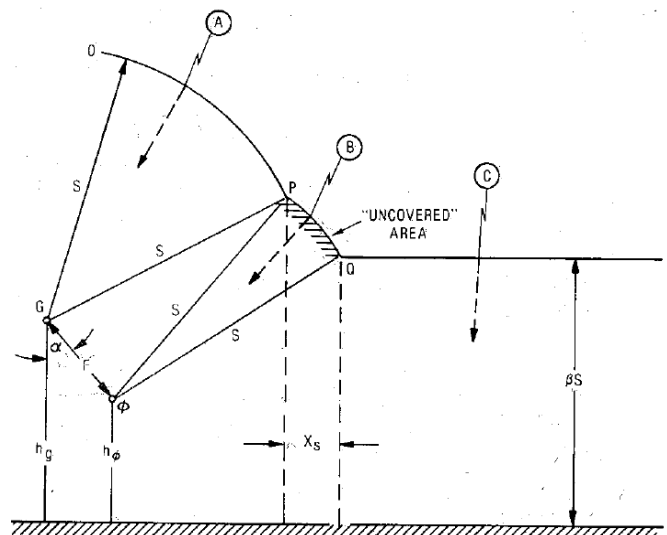


Figura A.2. Modelo electrogeométrico simplificado

En la figura el rayo A realiza el salto final hacia el hilo de tierra porque en cualquier punto del arco OP la distancia al conductor de fase es mayor que S. El rayo C realizará el salto final hacia la tierra ya que en cualquier punto de la recta QR la distancia al conductor de fase es mayor que  $\beta S$ . El coeficiente  $\beta$  refleja la atracción distinta que ejerce la tierra en comparación con la que ejerce un conductor suspendido sobre ella. El valor de dicho coeficiente se puede considerar 0.8 para líneas de alta tensión. Para líneas de muy alta tensión sería 0.67. El rayo B tan pronto como alcanza el arco PQ realizará el salto final hacia el conductor de fase ya que la distancia al hilo de tierra y a la tierra misma, excede la distancia correspondiente.

La distancia  $X_s$  establece la zona desprotegida por el apantallamiento, es decir, los rayos que estén ubicados dentro de esta franja caerán sobre el conductor de fase. En los cálculos de fallo de apantallamiento se usan las alturas medias de los conductores (altura en la torre menos dos tercios de la flecha máxima). Si el hilo de tierra se acerca al conductor de fase, el arco PQ puede llegar a desaparecer dando lugar a un apantallamiento total.

- Si S es conocido y  $\beta S > Y_F$ , siendo  $Y_F$  la altura media del conductor de fase:

$$X_s = S. [\cos\theta + \text{sen}(\alpha - \omega)], \text{ en metros} \quad (\text{A.5})$$

Donde:

$$\theta = \arcsen \frac{\beta S - Y_F}{S} \quad (\text{A.6})$$

$$\omega = \arccos \frac{F}{2.S} \quad (\text{A.7})$$

$$\alpha = \arctan \frac{X_F - X_G}{Y_G - Y_F} \quad (\text{A.8})$$

Donde:

**F:** Distancia entre el conductor de fase y el hilo de tierra.

**YF:** altura media del conductor de fase

**XF:** Coordenada horizontal del conductor de fase.

**XG:** Coordenada horizontal del hilo de tierra.

**YG:** Altura media del hilo de tierra.

- Si  $\beta S < Y_F$ ;  $\cos\theta$  se fija en 1 y:

$$X_S = S \cdot [1 + \text{sen}(\alpha - \omega)] \quad (\text{A.9})$$

Para lograr un ángulo de apantallamiento efectivo, figura A.3, en la fase de diseño lo que debe hacerse es desplazar el conductor de guarda horizontalmente hasta que la distancia  $X_s$  sea cero.

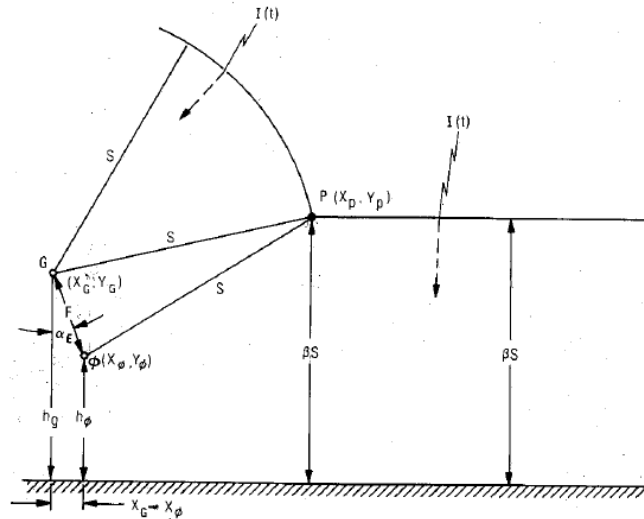


Figura A.3. Modelo electrogeométrico simplificado,  $X_s=0$

Para un buen apantallamiento, si la coordenada  $X$  del conductor de fase es tomada como referencia (cero), entonces la coordenada  $X_G$  del cable de guarda respecto a el será:

$$X_G = \sqrt{S^2 - (\beta S - Y_F)^2} - \sqrt{S^2 - (\beta S - Y_G)^2} \quad (\text{A.10})$$

Así el ángulo efectivo de apantallamiento será:

$$\alpha_E = \arctan\left(\frac{X_G}{Y_F - Y_G}\right) \quad (\text{A.11})$$

Como de observó en el Capítulo 2, de caer un rayo directamente sobre un conductor de fase el comportamiento de las ondas viajeras es el mostrado en la ecuación (2.3), al despejar la corriente mínima que produce el flashover en la cadena de aisladores se obtiene:

$$I_{mín} = \frac{2.Vc}{Z_o} \quad (\text{A.12})$$

Donde:

Zo: impedancia característica del conductor de fase

Vc: voltaje crítico

Insertando este valor de corriente en la ecuación (A.4) se haya el valor de la distancia de impacto mínima  $S_{mín}$ , luego con esta distancia se haya la  $X_s$  usando las ecuaciones (A.5) y (A.9) según sea el caso.

A medida que la distancia  $S$  aumenta, el arco PQ disminuye. Si  $S$  es suficientemente grande, PQ se hace 0. La distancia para la que PQ se anula,  $S_{máx}$ , corresponde a una intensidad máxima del rayo que puede caer sobre el conductor de fase. Sólo los rayos que posean valores picos de corriente entre  $I_{mín}$  e  $I_{máx}$  pueden provocar una falla de apantallamiento si están ubicados en la zona desprotegida  $X_s$ . La solución para  $S_{máx}$  se obtiene a partir de la ecuación (A.10)

$$S_{max} = Y_0 \cdot \left( \frac{-B_S - \sqrt{B_S^2 + A_S \cdot C_S}}{A_S} \right) = Y_0 \cdot \bar{S} \quad (\text{A.13})$$

Donde:

$$Y_0 = \frac{Y_G + Y_F}{2} \quad (\text{A.14})$$

$$A_S = m^2 - m^2 \cdot \beta - \beta^2 \quad (\text{A.15})$$

$$B_S = \beta \cdot (m^2 + 1) \quad (\text{A.16})$$

$$C_S = (m^2 + 1) \quad (\text{A.17})$$

$$m = \frac{X_F - X_G}{Y_G - Y_F} \quad (\text{A.18})$$

Con el valor de  $S_{m\acute{a}x}$  se calcula  $I_{m\acute{a}x}$  :

$$I_{m\acute{a}x} = 0,029 \cdot (S_{m\acute{a}x})^{1,54} \quad (\text{A.19})$$

El número de rayos que producen fallo de apantallamiento en una línea se puede determinar con la siguiente ecuación:

$$N_{SF} = 0.012 \cdot T \cdot \frac{X_S}{2} \cdot (P_{m\acute{i}n} - P_{m\acute{a}x}) \quad (\text{A.20})$$

Donde:

NSF: es el número de fallos de apantallamiento por 100 km al ano.

T: es el nivel cerunico de la zona.

$P_{m\acute{i}n}$ : es la probabilidad de que la corriente del rayo exceda  $I_{m\acute{i}n}$ .

$P_{m\acute{a}x}$ : es la probabilidad de que la corriente del rayo exceda  $I_{m\acute{a}x}$ .

## ANEXO B

En este anexo se reseñan las premisas del método de los dos puntos expuesto en [5] para realizar el cálculo de la tasa de salida debido a descargas retroactivas BFOR en líneas de transmisión.

### B.1.- GENERALIDADES DEL MÉTODO

a) Sólo una forma de onda es utilizada. Debido a un gran número de mediciones realizadas se tiene la certeza que la magnitud pico de una descarga, su tasa de alza de corriente respecto al tiempo y su tiempo de frente están relacionadas como se muestra en la figura B.1.

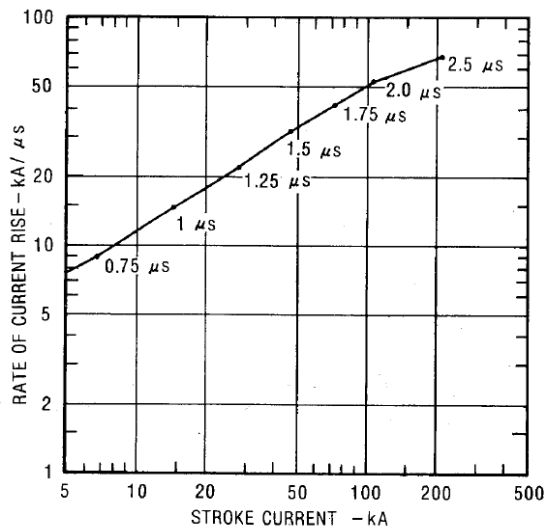


Figura B.1. Relación entre la corriente pico, la tasa frontal de crecimiento y tiempo de frente de una función rampa que cumple con los requerimientos probabilísticos obtenidos de múltiples mediciones.

La mayor parte de las salidas de líneas debido a descargas retroactivas son provocadas por descargas con corrientes pico de 80 kA o más, y en la figura B.1 se puede apreciar que como una forma de onda con tiempo de frente entre 1,8 y 2 μs se



adapta a los datos de campo recolectados. Por lo tanto la forma de onda utilizada en este método es una rampa de  $2 \mu\text{s}$  a la cresta y cola plana.

b) Las reflexiones desde las torres adyacentes son tomadas en cuenta, estas contribuyen a la reducción de los potenciales en el tope de la torre y por ende contribuyen a bajar la tasa de salida de la línea. Estas reflexiones son distorsionadas y su velocidad se reduce debido al efecto corona y a la resistencia. (El autor usa  $0,9 \cdot C$  para ondas reflejadas en las torres adyacentes, aún cuando es conocido que la velocidad de propagación depende de la frecuencia y por ende en cualquier onda no periódica cada armónico que la conforma viajará a distintas velocidades). Asumiendo esta velocidad de desplazamiento y si el vano en cuestión midiera 300m, entonces deberían transcurrir  $2,2 \mu\text{s}$  aproximadamente para que la primera reflexión ralentizada arribara a la torre impactada, si se tuviera un vano de 200m este tiempo se reduciría a  $1,5 \mu\text{s}$ . Como en la mayoría de las líneas de extra alto voltaje los vanos miden 200m o más, la onda rampa seleccionada de  $2 \mu\text{s}$  a la cresta y cola plana se debe corregir en los tiempos obtenidos según las distancias de los vanos.

c) Las penetraciones en la curva voltaje-tiempo son computadas sólo en dos puntos como se observa en la figura B.2

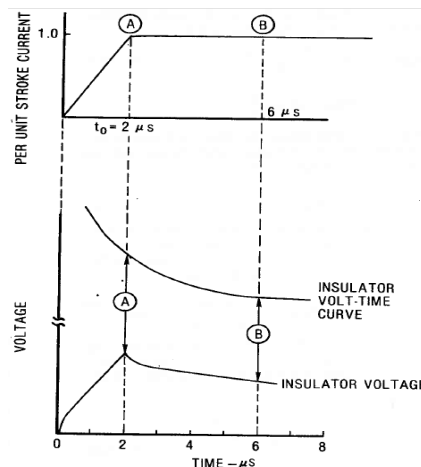


Figura B.2. Onda de corriente rampa usada y cómputo del voltaje en la cadena de aisladores en dos instantes de tiempo.

En estos puntos A y B la corriente crítica del rayo necesaria para penetrar la curva voltaje-tiempo de la cadena de aisladores es calculada. La más baja de las dos es usada entonces como la corriente crítica para los cálculos posteriores del flashover. No es usado ningún factor de penetración. Flashover's mas allá de 6  $\mu s$  se asumen como improbables debido al aplanamiento de la curva voltaje-tiempo. Los dos voltajes en A y B son calculados para cada aislamiento de la torre a menos que se determine por inspección que todos los aislamientos tienen la misma curva.

d) Las descargas subsecuentes no son tomadas en cuenta. Los análisis sugieren que en cuanto al voltaje en las cadenas de aisladores se refiere, las descargas subsecuentes de un rayo no son peores que la primera descarga, pues estas dan origen a sobretensiones más elevadas pero en un tiempo menor, donde la tensión de ruptura de los aisladores es mayor.

e) Al seleccionar los tiempos para calcular las tensiones que luego han de compararse con la curva voltaje-tiempo de los aisladores para observar si hay penetraciones de esta última, todas las ecuaciones de tensión se simplifican. Con  $t_0 = 2\mu s$ , (punto A en la figura B.2) y sin considerar las reflexiones en las torres adyacentes, la ecuación para obtener la tensión en el tope de la torre será:

$$(V_T)_2 = \left[ Z_I - \frac{Z_W}{1-\psi} * \left( 1 - \frac{\tau_T}{1-\psi} \right) \right] * I \quad \text{(B.1)}$$

Donde:

$(V_T)_2$ : es la magnitud de la tensión en el tope de la torre en  $t = 2\mu s$ , (sin considerar reflexiones en las torres adyacentes), para una corriente de impacto en por unidad con cresta en  $2\mu s$ .

$Z_I$ : es la impedancia en ohm del circuito equivalente visto por la corriente del rayo, como se muestra en la figura 2.4, y se detalla en la ecuación (2.3) del capítulo 2.

$Z_W$ : es una impedancia de onda constante sobre la cual todas las componentes de corriente de la onda viajera operan para proveer las componentes de tensión en el tope de la torre. Su ecuación es la siguiente:

$$Z_W = \left[ \frac{2 \cdot Z_S^2 \cdot Z_T}{(Z_S + 2 \cdot Z_T)^2} \right] * \left[ \frac{Z_T - R}{Z_T + R} \right] \quad (\text{B.2})$$

$\tau_T$ : tiempo de viaje en micro segundos desde el tope de la torre hasta la base, es decir, la altura de la torre en metros dividida entre 300.

$\Psi$ : una constante de amortiguamiento que sucesivamente reduce la contribución de las reflexiones. Su ecuación es la siguiente:

$$\psi = \left( \frac{2 \cdot Z_T - Z_S}{2 \cdot Z_T + Z_S} \right) * \left( \frac{Z_T - R}{Z_T + R} \right) \quad (\text{B.3})$$

NOTA: la constante de amortiguamiento usualmente no excede el valor de 0.2,  $Z_T$  es la impedancia característica de la torre como medio de propagación que es,  $Z_S$  es la impedancia característica del cable de guarda y  $R$  es el valor de resistencia del sistema de puesta a tierra.

La magnitud de la tensión en la resistencia del pie de la torre, en  $t = 2\mu s + \tau_T$ , queda reducida a la siguiente expresión:

$$(V_R)_2 = \left[ \frac{\overline{\alpha_R} \cdot Z_I}{1 - \psi} * \left( 1 - \frac{\psi \cdot \tau_T}{1 - \psi} \right) \right] * I \quad (\text{B.4})$$

Donde:

$(V_R)_2$ : es la magnitud de la tensión a través de la resistencia de pie de torre en  $t = 2\mu s + \tau_T$  para una corriente de impacto en por unidad con cresta en  $2\mu s$ .

$$\overline{\alpha_R} = \frac{2 \cdot R}{Z_T + R} \quad (\text{B.5})$$

Y dependiendo de la longitud del vano se deben considerar o no las tensiones reflejadas en las torres adyacentes a la impactada aplicando la siguiente ecuación:

$$(V'_T)_2 = \frac{-4.K_S \cdot (V_T)_2^2}{Z_S} * \left[ \frac{1-2 \cdot (V_T)_2}{Z_S} \right] * (1 - \tau_S) \quad (\text{B.6})$$

Donde:

$(V'_T)_2$ : suma de las ondas de tensión reflejadas en las torres adyacentes, que aparece en la torre impactada en  $t = 2\mu s$ .

$K_S$ : es un factor de atenuación, (se asume 0.85 a menos que se disponga de mejor información)

$\tau_S$ : tiempo de viaje en micro segundos desde la torre impactada hasta la torre adyacente, es decir, la distancia del vano en metros dividida entre  $300 \cdot 0,9$ .

Si  $\tau_S > 1\mu s$ , no se presentarán los voltajes reflejados en la torre impactada para un tiempo de  $2\mu s$ . La magnitud del voltaje total en el tope de la torre es entonces:

$$(\bar{V}_T)_2 = (V_T)_2 + (V'_T)_2 \quad (\text{B.7})$$

El voltaje  $(V_{pn})_2$ , en el brazo “n” a los  $2\mu s$  se determina por interpolación aplicando la siguiente expresión:

$$(V_{pn})_2 = (V_R)_2 + \frac{\tau_T - \tau_{pn}}{\tau_T} * [(V_T)_2 - (V_R)_2] \quad (\text{B.8})$$

El voltaje en la cadena de aisladores debido a la sobretensión transitoria para la fase “n” a los  $2\mu s$  es la diferencia entre la sobretensión en el brazo y la sobretensión en el conductor de fase como se muestra en la siguiente expresión:

$$(V_{sn})_2 = (V_{pn})_2 - K_n \cdot (\bar{V}_T)_2 \quad (\text{B.9})$$

Donde:

$K_n$ : es el factor de acoplamiento

Determinado por la siguiente expresión para el caso de dos cables de guarda a la misma altura:

$$K_n = \frac{Z_{n1} + Z_{n2}}{Z_{11} + Z_{12}} \quad (\text{B.10})$$

Siendo:

$Z_{mn}$ : es la impedancia mutua entre un conductor “m” y otro “n”

$Z_{11} = Z_{22} = Z_{mm}$ : es la impedancia característica propia de cada cable de guarda

NOTA: con cable de guarda 1, cable de guarda 2 y conductor de fase “n”

Si existe un sólo cable de guarda la expresión aplicada es la siguiente:

$$K_n = \frac{Z_{1n}}{Z_{11}} \quad (\text{B.11})$$

Después que la onda de corriente ha alcanzado su máximo, las reflexiones en la torre impactada hayan alcanzado su estado estable y por lo tanto el efecto de la impedancia característica de la torre como medio de transmisión que es haya desaparecido, entonces las ecuaciones anteriores se reducen a la siguiente expresión:

$$(V_T)_6 = (V_R)_6 = (V_{pn})_6 = \left[ \frac{Z_S \cdot R}{Z_S + 2R} \right] * I \quad (\text{B.12})$$

Las reflexiones de las torres adyacentes no han desaparecido por completo. Por simplificación sólo el primer set de reflexiones es usado. Lo que reduce la expresión para la tensión en el tope de la torre impactada debido a las reflexiones en las torres adyacentes a:

$$(V'_T)_6 = -4 \cdot K_S \cdot Z_S \cdot \left( \frac{R}{Z_S + 2R} \right)^2 \cdot \left[ 1 - \frac{2R}{Z_S + 2R} \right] \cdot I \quad (\text{B.13})$$

El voltaje total en la cadena de aisladores a los  $6\mu s$  es:

$$(V_{sn})_6 = [(V_T)_6 + (V'_T)_6] \cdot (1 - K_n) \quad (\text{B.14})$$

A partir de la figura B.3 se obtienen las tensiones de flashover para determinadas cadenas de aisladores en  $t = 2\mu s$  y  $t = 6\mu s$ :

$$(V_I)_2 = 820 \cdot W \quad (\text{B.15})$$

$$(V_I)_6 = 585 \cdot W \quad (\text{B.16})$$

Siendo  $W$  la longitud de de la cadena de aisladores en metros. La corriente crítica que se necesita para producir el flashover en la cadena de aisladores “n” en  $t = 2\mu s$  y  $t = 6\mu s$  respectivamente, (sin considerar la tensión nominal de la red), son respectivamente:

$$(I_{cn})_2 = \frac{820 \cdot W}{(V_{sn})_2} = \frac{(V_I)_2}{(V_{sn})_2} \quad (\text{B.17})$$

$$(I_{cn})_6 = \frac{585 \cdot W}{(V_{sn})_6} = \frac{(V_I)_6}{(V_{sn})_6} \quad (\text{B.18})$$

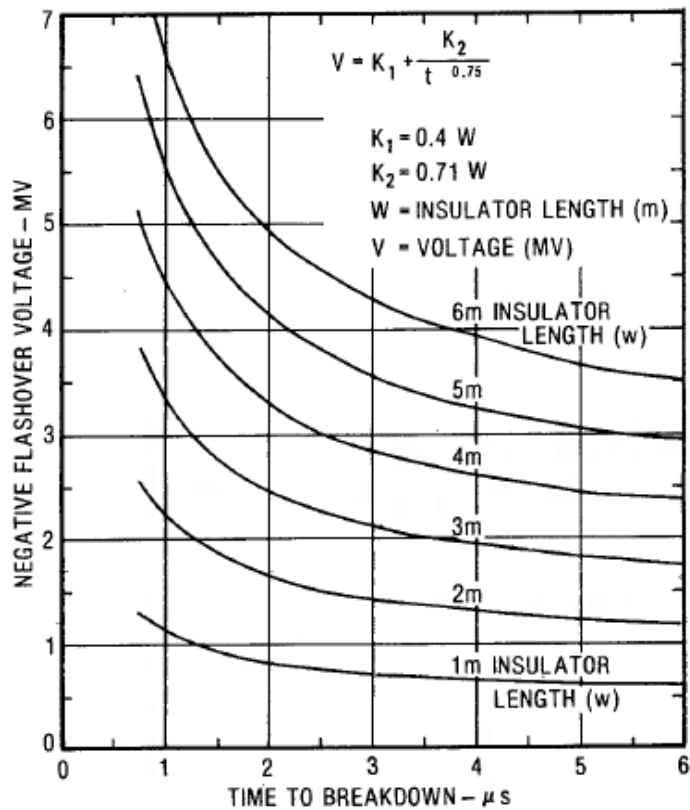


Figura B.3. Curva voltaje-tiempo de tensiones de flashover en cadenas de aisladores de líneas aéreas proporcionada por CIGRE, Darveniza, Popolansky y Whitehead.

f) Un análisis general de los efectos de la tensión nominal de la red en estado estable es incluido para obtener una buena simulación de la forma en que las tensiones a frecuencia de 60Hz influyen en la distribución entre las diferentes fases de las salidas que se producen y porque la presencia de dichas tensiones pueden incrementar notablemente las salidas observadas, es así como se llega a las siguientes expresiones:

$$(I'_{cn})_2 = \left[ \frac{820.W - V_{on} \sin(\vartheta_n - \alpha_n)}{(V_{sn})_2} \right] * (I_{cn})_2 \quad (\text{B.19})$$

$$(I'_{cn})_6 = \left[ \frac{585.W - V_{on} \sin(\vartheta_n - \alpha_n)}{(V_{sn})_6} \right] * (I_{cn})_6 \quad (\text{B.20})$$

Donde  $(I_{cn})_m$  es la corriente crítica requerida para provocar el flashover de la cadena de aisladores “n” en “m”  $\mu$ s con la tensión nominal de la red presente,  $V_{on}$  es el pico (fase a tierra) del voltaje de la fase n,  $\vartheta_n$  es el ángulo instantáneo de voltaje,  $\alpha_n$  es el ángulo de fase de la fase n ( $0^\circ$ ,  $-120^\circ$  o  $120^\circ$ ).

g) Las probabilidades de flashover son determinadas directamente de las curvas de probabilidad. Después de hallar la corriente crítica, la probabilidad de que el rayo iguale o exceda dicho valor se obtiene de la curva de la figura B.4

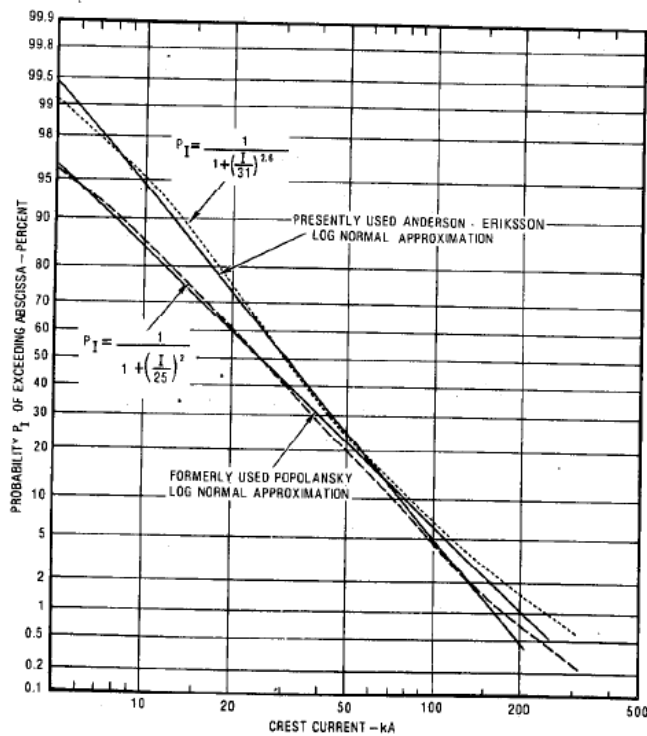


Figura B.4. Distribución de frecuencia acumulativa de amplitudes del pico de corriente en rayos descendentes de polaridad negativa

Conociendo esta probabilidad y el número de impactos a la línea (sin contar los impactos que producen fallos de apantallamiento), el número esperado de flashovers por cada 100 kilómetros al año se puede obtener. Los fallos de apantallamiento son incluídos.



## ANEXO C

En este anexo se presentarán algunas gráficas obtenidas de las simulaciones del Caso 4, (Temblador I-Tucupita. Monagas-Delta Amacuro, 115 kV y un solo circuito), y se comentarán algunos aspectos de las sobretensiones originadas en distintas ubicaciones del sistema.

NOTA: todas las simulaciones se llevaron a cabo con los impulsos de corriente normalizados de magnitudes pico indicadas en el capítulo 3 que no provocaron operación de ningún interruptor controlado por tensión a menos que se indique lo contrario.

### C.1.- SOBRETENSIONES INDUCIDAS EN LOS CONDUCTORES DE FASE (factor de acoplamiento)

Como fue mencionado en el capítulo 2 cuando un rayo impacta sobre el cable de guarda, bien sea en la torre ó a mitad de un vano, se inducen unas tensiones en cada uno de los conductores de fase con la misma forma de la sobretensión tipo impulso originada en el cable de guarda impactado cuya magnitud dependerá del valor del coeficiente de acoplamiento “K” entre cada conductor de fase y el cable de guarda.

#### C.1.1.- Sobretensiones inducidas en los conductores de fase cuando se simula la caída del rayo sobre una torre.

En la figura C.1 se muestra el modelo implementado en el ATP para observar las tensiones inducidas en las tres fases, se dividió el vano de 400 m de longitud adyacente a la torre impactada del lado fuente en dos bloques LCC, el primero de 320 m (80% de la longitud total del vano) y el segundo de 80 m (20% de la longitud total del vano).

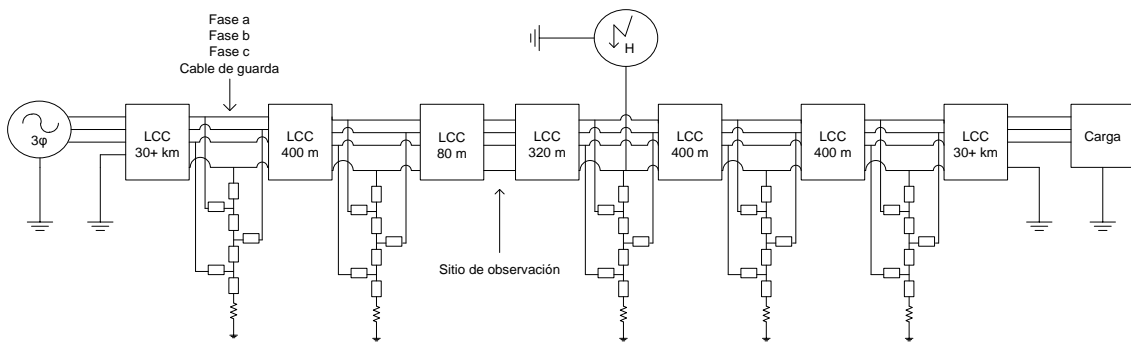


Figura C.1. Modelo implementado en el ATP-Draw cuando el rayo impacta sobre una torre

Se observó la sobretensión en el cable de guarda y las sobretensiones de fase inducidas en los tres respectivos conductores, obteniendo la figura C.2.

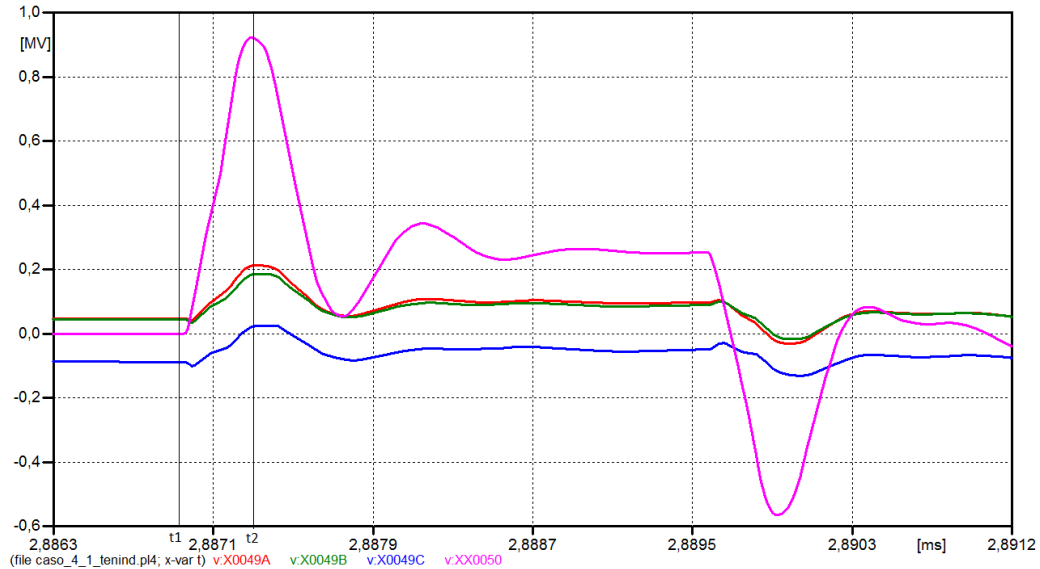


Figura C.2. Sobretensiones inducidas en las 3 fases, como consecuencia de la corriente tipo impulso que se desplaza por el cable de guarda.

Donde:

Color rojo: **tensión de la fase A**

Color verde: **tensión de la fase B**

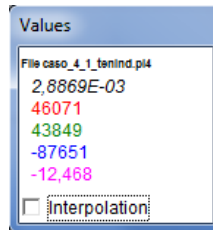
Color azul: **tensión de la fase C**

Color morado: **tensión del cable de guarda**

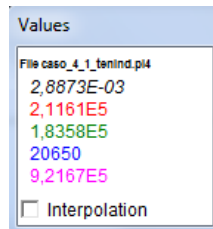
Se puede apreciar como la sobretensión presente en el cable de guarda (producto de la corriente tipo impulso aplicada) es de mayor magnitud que las

sobretensiones que se inducen en los tres conductores de fase, aunque poseen la misma polaridad y forma.

Además en el tiempo “t1”, previo al arribo de las sobretensiones al “sitio de observación”, las tensiones presentes en las fases y el cable de guarda poseían las siguientes magnitudes:



, mientras que en el tiempo “t2”, momento en que las sobretensiones originadas como consecuencia de la aplicación de la corriente tipo impulso alcanzan su valor máximo en el “sitio de observación”, las tensiones presentes en las fases y el cable de guarda poseían las siguientes magnitudes:



Si restamos las magnitudes de tensión en estos dos instantes, obtendremos:

Fase A: 211,61 kV- 46,071 kV= 165,539 kV

Fase B: 183,58 kV- 43,849 kV=139,731 kV

Fase C: 20,650 kV- (-87,651) kV= 108,301 kV

Por lo tanto, al tener la fase más lejana del cable de guarda (fase C) el menor coeficiente de acoplamiento, la tensión que se induce en dicho conductor debido a la corriente tipo impulso que se desplaza por el cable de guarda será menor que las tensiones inducidas en los conductores de las fases restantes A y B que están físicamente más próximos al cable de guarda tal como muestra la ecuación **(B.9)** del anexo B.

C.1.2.- Sobretensiones inducidas en los conductores de fase cuando se simula la caída del rayo sobre el cable de guarda a mitad de un vano.

En la figura C.3 se muestra el modelo implementado en el ATP para observar las tensiones inducidas en las tres fases, se dividió el bloque LCC de 200 m de longitud del lado fuente en dos bloques LCC, el primero de 160 m (80% de la longitud del medio vano) y el segundo de 40 m (20% de la longitud del medio vano).

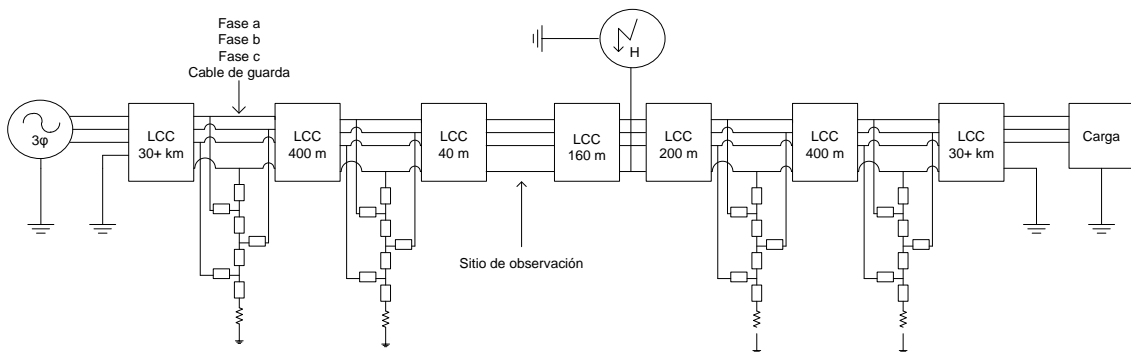


Figura C.3. Modelo implementado en el ATP-Draw cuando el rayo impacta en la mitad de un vano

Se observó la sobretensión en el cable de guarda y las sobretensiones de fase inducidas en los tres respectivos conductores, obteniendo la figura C.4.

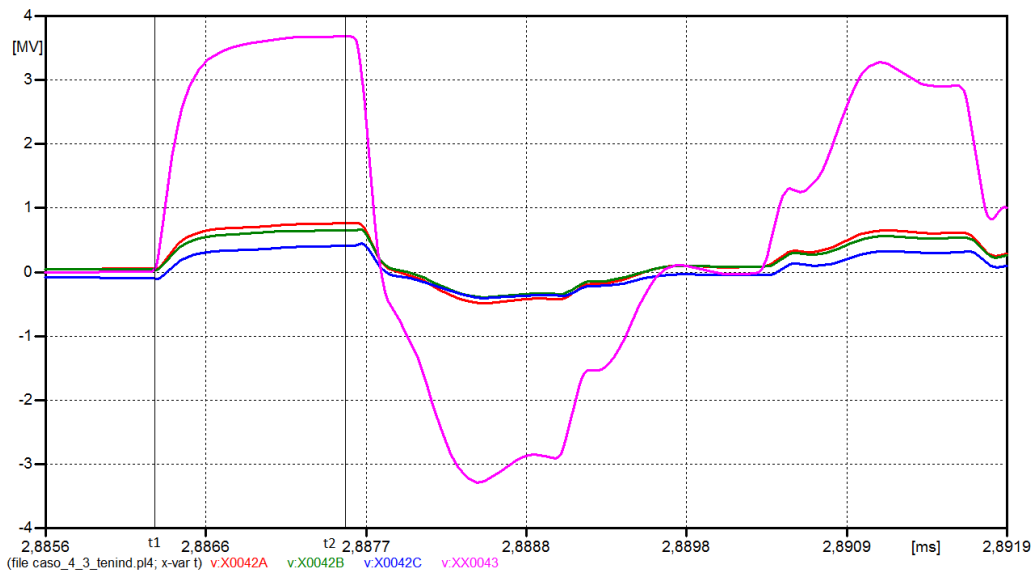


Figura C.4. Sobretensiones inducidas en las 3 fases, como consecuencia de la corriente tipo impulso que se desplaza por el cable de guarda.

Donde:

Color rojo: **tensión de la fase A**

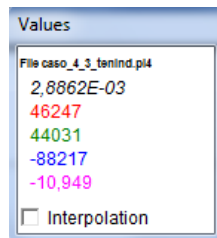
Color verde: **tensión de la fase B**

Color azul: **tensión de la fase C**

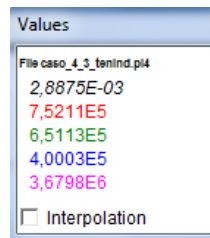
Color morado: **tensión del cable de guarda**

Se puede apreciar como la sobretensión presente en el cable de guarda (producto de la corriente tipo impulso aplicada) es de mayor magnitud que las sobretensiones que se inducen en los tres conductores de fase, aunque poseen la misma polaridad y forma.

Además en el tiempo “t1”, previo a la aplicación de la corriente tipo impulso, las tensiones presentes en las fases y el cable de guarda poseían las siguientes magnitudes:



, mientras que en el tiempo “t2”, momento en que las sobretensiones originadas como consecuencia de la aplicación de la corriente tipo impulso alcanzan su valor máximo, las tensiones presentes en las fases y el cable de guarda poseían las siguientes magnitudes:



Si restamos las magnitudes de tensión en estos dos instantes, obtendremos:

Fase A: 752,11 kV- 46,247 kV= 705,863 kV

Fase B: 651,13 kV- 44,031 kV= 607,099 kV

Fase C: 400,03 kV- (-88,217) kV= 488,247 kV

Por lo tanto, al tener la fase más lejana del cable de guarda (fase C) el menor coeficiente de acoplamiento, la tensión que se induce en dicho conductor debido a la corriente tipo impulso que se desplaza por el cable de guarda será menor que las tensiones inducidas en los conductores de las fases restantes A y B que están físicamente más próximos al cable de guarda, tal como muestra la ecuación **(B.9)** del anexo B.

NOTA: al observar la figura C.2 se destaca que la sobretensión en el cable de guarda alcanza un valor pico que es menor al pico alcanzado por la sobretensión en el cable de guarda en la figura C.4 aún con una corriente impulso de mayor magnitud. Esto se debe a que la impedancia equivalente “Zeq” vista desde el aire en el caso de impacto sobre la torre es considerablemente menor ( $Z_{eq}=88,96 \Omega$ , usando la ecuación **(2.3)**) a la Zeq vista desde el aire cuando el impacto sucede a mitad de un vano sobre el cable de guarda ( $Z_{eq}=277,25 \Omega$  usando la ecuación **(2.5)**).

NOTA: se usaron las impedancias características de los medios de transmisión que conforman la torre calculados según su forma cónica o cilíndrica con las expresiones **(3.1)** y **(3.2)** y la impedancia característica del cable de guarda de  $554,49 \Omega$  (tomada del archivo .LIS del caso correspondiente).

## C.2.- SOBRETENSIONES EN EL PUNTO MAS ALTO DE LA TORRE IMPACTADA Y EN LOS EXTREMOS ESTRUCTURA DE LAS CADENAS DE AISLADORES PERTENECIENTES A ESTA

Se midieron las tensiones tanto en el tope de la torre impactada, como en los “extremos estructura” de las cadenas de las tres fases respecto a una referencia de 0V, y se obtuvo la figura C.5:

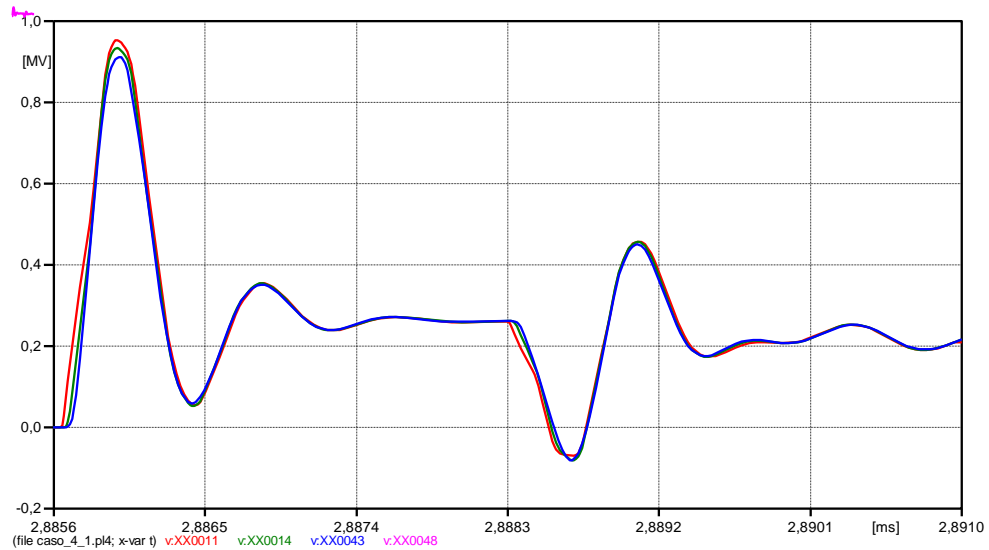


Figura C.5. Sobretensiones en distintos puntos de la torre impactada

Donde:

Color rojo: Tensión en el tope de la torre

Color verde: Tensión en el extremo estructura de la cadena de la fase A

Color azul: Tensión en el extremo estructura de la cadena de la fase B

Color rosado: Tensión en el extremo estructura de la cadena de la fase C

Este gráfico permite ver como la onda de tensión se desplaza del tope de la torre hacia tierra, al transcurrir el tiempo va arribando progresivamente a las partes inferiores de la torre impactada.

Values	Values	Values	Values
File caso_4_1.pl4	File caso_4_1.pl4	File caso_4_1.pl4	File caso_4_1.pl4
2,8856E-03	2,8856E-03	2,8857E-03	2,8859E-03
4160,9	67535	1,5495E5	9,5298E5
-0,15705	1927,5	40220	9,333E5
-0,15704	-0,15649	7140,1	9,1005E5
-0,15703	-0,15658	571,8	8,8023E5
<input type="checkbox"/> Interpolation	<input type="checkbox"/> Interpolation	<input type="checkbox"/> Interpolation	<input type="checkbox"/> Interpolation

El marcador de valores de tensión respecto al tiempo que fue utilizado (ventanas superiores), muestra los incrementos de tiempo en pasos de 0,1  $\mu$ s. Al desplazarnos en forma creciente en el tiempo notamos como en las dos primeras ventanas aún estando en el mismo instante de tiempo de 2,8856 ms se observa el incremento de tensión en el tope de la torre (color rojo) y la llegada de la onda al punto más cercano (extremo estructura de la cadena de la fase A, color verde), así

sucesivamente en las dos siguientes ventanas se aprecia como en  $t=2.8857$  ms la onda llega por primera vez en su trayectoria descendente al extremo estructura de la cadena de la fase B, color azul) y finalmente en  $t=2.8859$  ms ó  $0,3 \mu\text{s}$  luego de la descarga del impulso de corriente sobre la torre se alcanza el máximo valor de tensión en el tope que debería observarse en  $1,2 \mu\text{s}$  dada la forma de la onda tipo impulso original, pero dadas las múltiples reflexiones en los distintos medios de transmisión que conforman la torre (que no son apreciados en la figura C.5), la reflexión negativa en la base de la torre (coeficiente de reflexión negativo), luego la reflexión de esta primera onda reflejada negativa ascendente en el tope de la torre, así como la forma de onda del impulso de la fuente Heidler cuya pendiente empieza a disminuir a partir de los  $0,3 \mu\text{s}$  (“ $t_1$ ” en la figura C.6), provocan en conjunto el corte brusco de la sobretensión en este instante de tiempo.

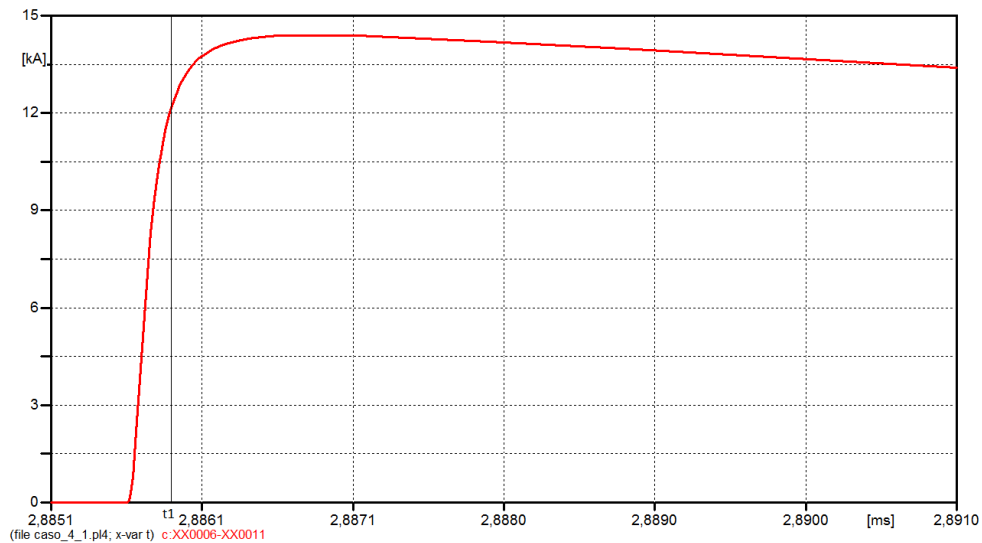


Figura C.6. Forma del impulso de corriente aplicado en el caso 4 cuando el impulso de corriente se ubica sobre la torre

NOTA: recordando lo expuesto en el capítulo 2, la tensión total en cualquier ubicación de un medio de propagación (tope de la torre en este caso) es  $V(t) = V_i(t) + V_r(t)$  para un instante de tiempo, siendo  $V_i$ : voltaje incidente y  $V_r$ : voltaje reflejado. El coeficiente de reflexión en la base de la torre es  $\Gamma \approx -0,82$  y el del tope de la torre cuando la onda va ascendiendo es  $\Gamma \approx 0,36$  según la expresión (2.4).



NOTA: se usaron las impedancias características de los medios de transmisión que conforman la torre calculados según su forma cónica o cilíndrica con las expresiones (3.1) y (3.2), los valores de resistencia de la puesta a tierra obtenidos de las normas CADAFE y la impedancia característica del cable de guarda de 554,49  $\Omega$  (tomada del archivo .LIS del caso correspondiente).

### C.3.- SOBRETENSIONES EN LAS CADENAS DE AISLADORES DE LA TORRE IMPACTADA Y EN LAS CADENAS DE AISLADORES DE LAS TORRES ADYACENTES

La figura C.7 que se muestra a continuación es un acercamiento de la figura 3.19 del capítulo 3, donde se muestran las tensiones en las cadenas de aisladores de la torre impactada cuando el impulso de corriente se produjo en “t<sub>9</sub>” (ver figura 3.15).

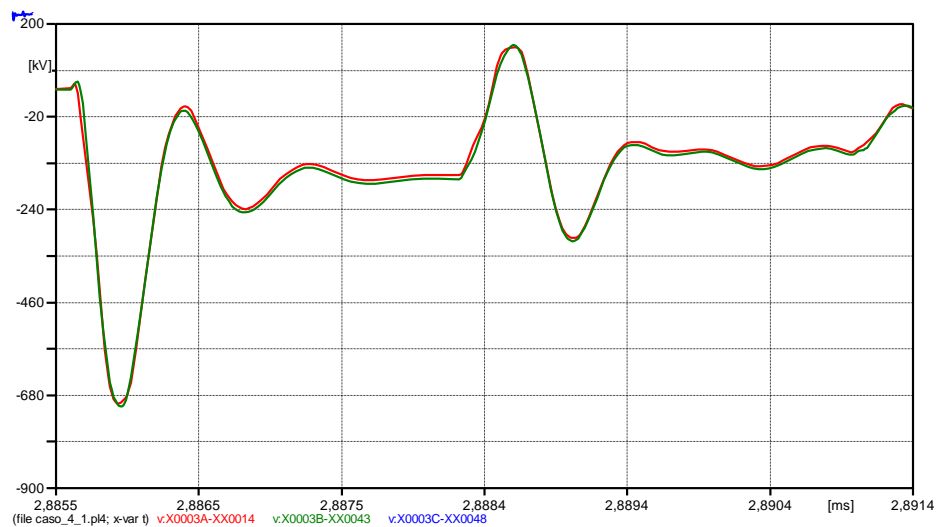


Figura C.7. Tensiones en las cadenas de aisladores de las tres fases de la torre impactada, (acercamiento de la figura 3.19)

Donde:

Color rojo: **tensión en la cadena de aisladores correspondiente a la fase A**

Color verde: **tensión en la cadena de aisladores correspondiente a la fase B**

Color azul: **tensión en la cadena de aisladores correspondiente a la fase C**

La figura C.8 muestra las tensiones en las cadenas de aisladores de las torres adyacentes a la torre impactada cuando el impulso de corriente se produjo en “t9” (ver figura 3.15). A las tensiones en las cadenas del lado fuente les corresponde el prefijo numérico “2” y a las del lado carga el prefijo numérico “4”

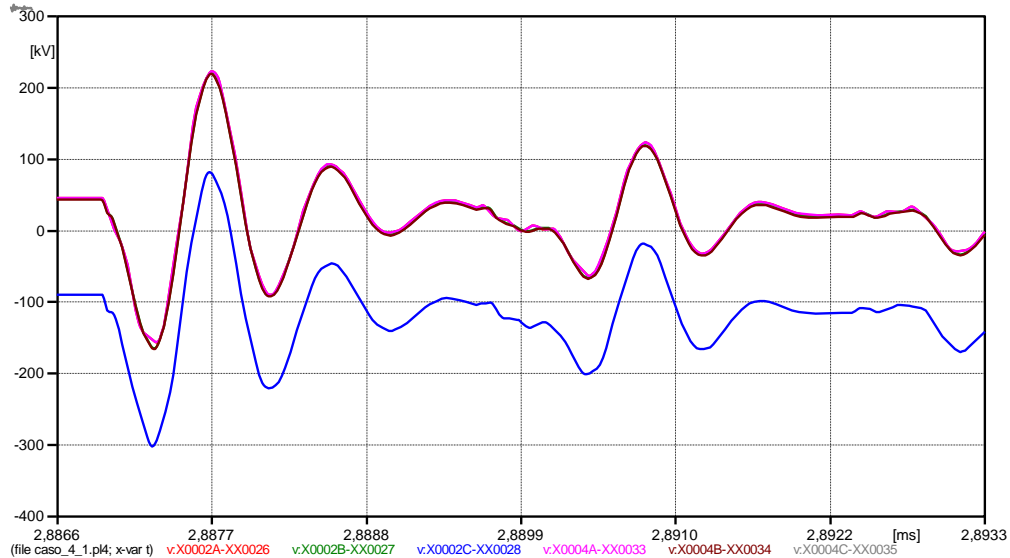


Figura C.8. Tensiones en las cadenas de aisladores de las tres fases de las torres adyacentes a la impactada

*Con las tensiones en las cadenas de aisladores de la torre del lado fuente:*

Color rojo: **tensión en la cadena de aisladores correspondiente a la fase A**

Color verde: **tensión en la cadena de aisladores correspondiente a la fase B**

Color azul: **tensión en la cadena de aisladores correspondiente a la fase C**

*Y las tensiones en las cadenas de aisladores de la torre del lado carga:*

Color rojo: **tensión en la cadena de aisladores correspondiente a la fase A**

Color verde: **tensión en la cadena de aisladores correspondiente a la fase B**

Color azul: **tensión en la cadena de aisladores correspondiente a la fase C**

Se aprecia que las sobretensiones en las cadenas de aisladores en las torres adyacentes, figura C.8, presentan un comportamiento muy similar como era de esperarse pues están ubicadas a la misma distancia del punto de conexión de la fuente de corriente y tanto los bloques LCC como las torres en sí poseen las mismas características eléctricas de ambos lados, por ende las sobretensiones reflejadas y

transmitidas en ambos sentidos poseerán las mismas magnitudes (coeficientes de reflexión iguales en las ubicaciones donde cambia el medio de transmisión ó lo que es igual donde se cambia la impedancia característica) y arribarán en los mismos instantes de tiempo. Las ligeras diferencias de magnitud se deben a la caída de tensión que introduce el modelo en las tensiones de fase de estado estable previo a la activación de la fuente de corriente Heidler.

Entre las figuras C.7 y C.8 se observa que transcurre un tiempo antes que las sobretensiones que se originan en la torre impactada arriben a las torres adyacentes. Y además que el valor máximo de la tensión en la cadena de aisladores de la fase C (más vulnerable), en la torre impactada es considerablemente mayor a las tensiones en las cadenas de aisladores de la fase C de las torres adyacentes; esto puede deberse principalmente a que las sobretensiones que viajan por el cable de guarda en ambos sentidos desde el sitio de impacto perciben un cambio de impedancia (cuyo coeficiente de reflexión es negativo) cuando arriban a las respectivas torres adyacentes, por lo que a partir de los topes de las torres adyacentes las sobretensiones que se transmiten hacia la tierra y hacia las torres que les siguen habrán disminuido considerablemente su magnitud. Además al ser una línea aérea real siempre existe un coeficiente de atenuación asociado aún cuando la distancia recorrida sea de sólo 400 m.

#### C.4.- SOBRETENSIONES EN LAS CADENAS DE AISLADORES DE LA TORRE IMPACTADA APLICANDO UN IMPULSO DE CORRIENTE CON VALOR PICO DE 14,5 kA.

En este caso se produjo el cierre del interruptor controlado por tensión que simula la cadena de aisladores de la fase C de la torre impactada, en la figura C.9 se observan las tensiones de las cadenas de aisladores de las tres fases.

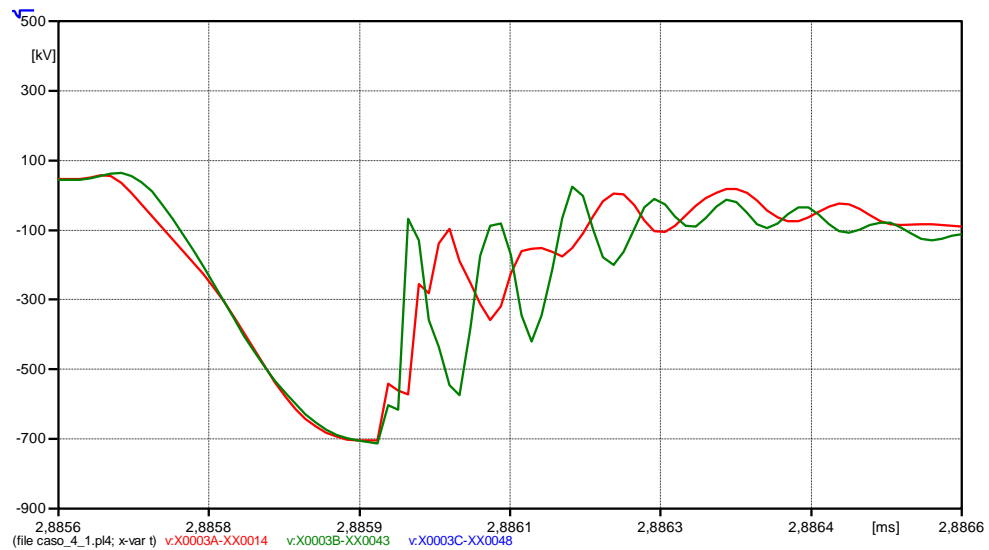


Figura C.9 Tensiones en las cadenas de aisladores de las tres fases de la torre impactada, (acercamiento de la figura 3.18)

Donde:

Color rojo: **tensión en la cadena de aisladores correspondiente a la fase A**

Color verde: **tensión en la cadena de aisladores correspondiente a la fase B**

Color azul: **tensión en la cadena de aisladores correspondiente a la fase C**

#### C.5.- SOBRETENSIONES EN LAS CADENAS DE AISLADORES DE LAS TORRES MAS CERCANAS AL SITIO DE IMPACTO, CUANDO EL IMPULSO DE CORRIENTE SE APLICA A MITAD DE UN VANO

La figura C.10 que se muestra a continuación es un acercamiento de la figura 3.21 del capítulo 3, donde se muestran las tensiones en las cadenas de aisladores de las torres adyacentes al cable de guarda impactado a medio vano por el impulso de corriente. A las tensiones en las cadenas del lado fuente les corresponde el prefijo numérico “2” y a las del lado carga el prefijo numérico “4”

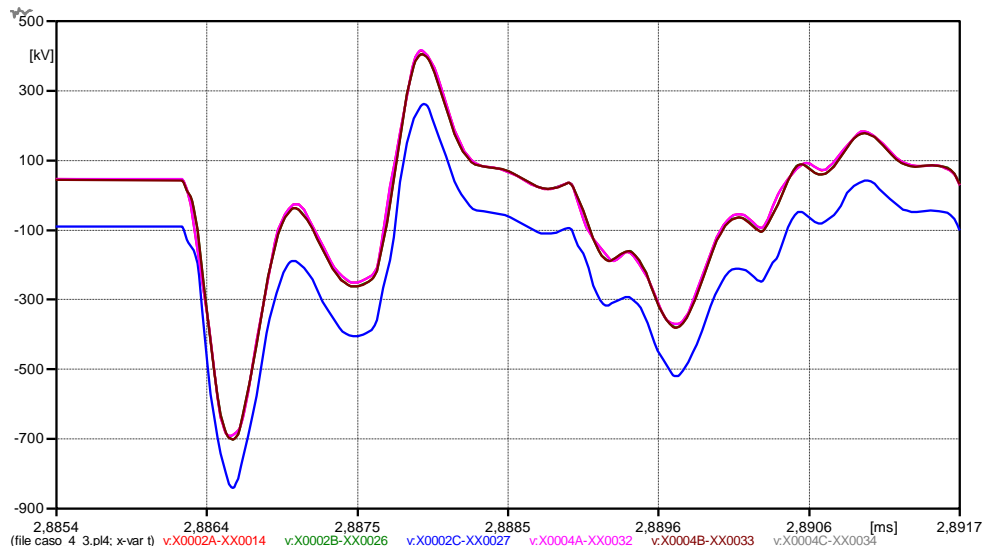


Figura C.10. Tensiones en las cadenas de aisladores de las tres fases de las torres adyacentes al sitio de impacto del impulso, (acercamiento de la figura 3.21)

*Con las tensiones en las cadenas de aisladores de la torre del lado fuente:*

Color rojo: **tensión en la cadena de aisladores correspondiente a la fase A**

Color verde: **tensión en la cadena de aisladores correspondiente a la fase B**

Color azul: **tensión en la cadena de aisladores correspondiente a la fase C**

*Y las tensiones en las cadenas de aisladores de la torre del lado carga:*

Color rojo: **tensión en la cadena de aisladores correspondiente a la fase A**

Color verde: **tensión en la cadena de aisladores correspondiente a la fase B**

Color azul: **tensión en la cadena de aisladores correspondiente a la fase C**

La impedancia equivalente vista desde el conductor de guarda hacia una torre ( $Z_{eq}'=105,97\Omega$  para el caso 4), es el paralelo de la impedancia característica de la parte superior de la torre (que en el caso 4 es de  $131\Omega$ ), con la impedancia característica del cable de guarda que es de  $554,49\Omega$  (tomada del archivo .LIS del caso correspondiente). Por lo tanto el coeficiente de reflexión en las torres adyacentes a la torre impactada será  $\Gamma \approx -0,68$  al aplicar la ecuación (2.4). De acá que a pesar que la sobretensión originada cuando el rayo impacta a mitad de un vano es considerablemente mayor a la originada cuando el rayo impacta en la torre, al momento de arribar a las torres más cercanas la sobretensión total que se transmite

hacia tierra y se observa en los extremos estructura de las cadenas de aisladores es drásticamente menor y comparable a las que se observan en los extremos estructura de las cadenas de aisladores cuando el impacto acontece en dicha torre.

C.6.- SOBRETENSIONES EN LAS CADENAS DE AISLADORES DE LAS TORRES ADYACENTES AL SITIO DE IMPACTO, CUANDO EL IMPULSO DE CORRIENTE SE APLICA A MITAD DE UN VANO Y POSEE UN VALOR PICO DE 13,7 kA.

En este caso se produjo el cierre de los interruptores controlados por tensión que simulan las cadenas de aisladores de la fase C de las torres adyacentes al sitio de impacto, en la figura C.11 se observan las tensiones de las cadenas de aisladores de las tres fases en ambas torres.

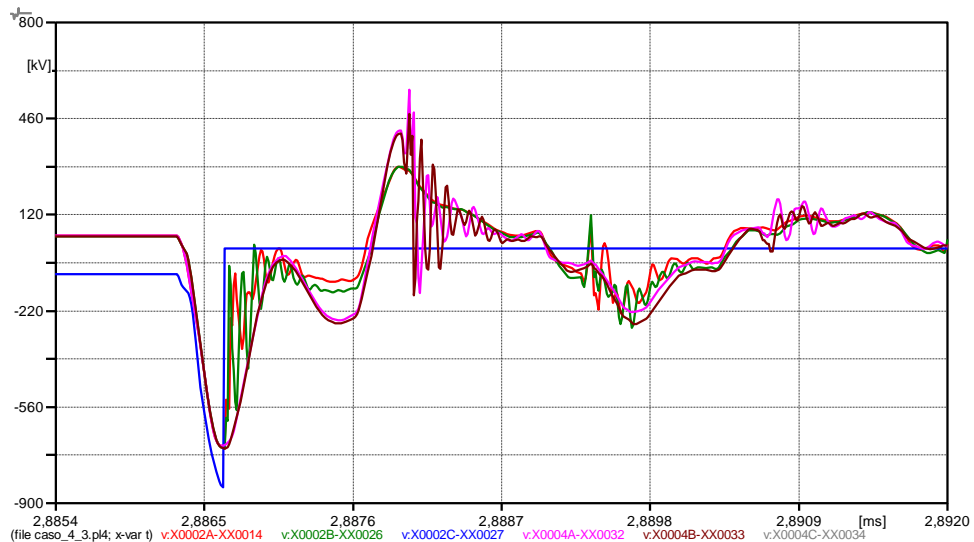


Figura C.11 Tensiones en las cadenas de aisladores de las tres fases de las torres adyacentes al sitio de impacto del impulso, (acercamiento de la figura 3.20)

*Con las tensiones en las cadenas de aisladores de la torre del lado fuente:*

Color rojo: **tensión en la cadena de aisladores correspondiente a la fase A**

Color verde: **tensión en la cadena de aisladores correspondiente a la fase B**

Color azul: **tensión en la cadena de aisladores correspondiente a la fase C**

*Y las tensiones en las cadenas de aisladores de la torre del lado carga:*

Color rojo: tensión en la cadena de aisladores correspondiente a la fase A

Color verde: tensión en la cadena de aisladores correspondiente a la fase B

Color azul: tensión en la cadena de aisladores correspondiente a la fase C

## ANEXO D

Para el Caso 4, Temblador I-Tucupita. Estados Monagas-Delta Amacuro, 115 kV y un solo circuito, se ubicaron los instantes de tiempo en los que cada fase alcanzó el máximo positivo, el paso por cero y el máximo negativo como se indicó en el paso “a)” del apartado 3.3, capítulo 3, (metodología para correr las simulaciones), estos tiempos se muestran en la tabla D.1:

Tabla D.1. Tiempos de ocurrencia de máximos de tensión y pasos por cero de las tres fases en condiciones normales.

Tiempos (ms)	Máximo positivo	Paso por cero	Máximo negativo
Fase A	0,14926	4,3284	8,4909
Fase B	5,6716	1,5091	14,013
Fase C	11,211	7,0481	2,8856

Así mismo se tomaron las magnitudes de las tensiones en las 3 cadenas de aisladores en cada uno de los nueve instantes observados arriba:

*Para la fase A:*

Tabla D.2. Tensiones entre los extremos de las 3 cadenas de aisladores en los instantes de máximo positivo, paso por cero y máximo negativo de la fase A.

Tensiones (kV)	Cadena de la fase A	Cadena de la fase B	Cadena de la fase C
Max (+)	89347	-43338	-44975
Paso (0)	5,3771	77165	-74780
Max (-)	-89347	43097	45209

*Para la fase B:*

Tabla D.3. Tensiones entre los extremos de las 3 cadenas de aisladores en los instantes de máximo positivo, paso por cero y máximo negativo de la fase B.

Tensiones (kV)	Cadena de la fase A	Cadena de la fase B	Cadena de la fase C
Max (+)	-43332	88326	-43410
Paso (0)	78069	-16,606	-75977
Max (-)	43576	-88326	43172



*Para la fase C:*

Tabla D.4. Tensiones entre los extremos de las 3 cadenas de aisladores en los instantes de máximo positivo, paso por cero y máximo negativo de la fase C.

Tensiones (kV)	Cadena de la fase A	Cadena de la fase B	Cadena de la fase C
Max (+)	-46480	-43549	87444
Paso (0)	-76378	76775	-49,576
Max (-)	46241	43789	-87445

Se podría esperar que el peor instante para que se produzca el impacto de corriente sobre la línea fuese alguno de los tiempos resaltados en la tabla D.1, en los que se alcanzan los máximos negativos de las tensiones de fase debido a que el impulso de corriente generado en el ATP-Draw será de polaridad positiva y la máxima tensión en las cadenas de aisladores se producirá cuando las tensiones entre sus dos extremos tengan diferentes polaridades; yendo más allá según las magnitudes observadas en las tablas D.2, D.3 y D.4 la corriente crítica en la peor condición debería obtenerse en  $t=8,4909$  ms cuando la “fase a” alcanza su máximo negativo, pues la magnitud de este pico supera el valor de los picos negativos de las “fases b y c” (dado que no es una línea traspuesta no son de igual magnitud), *esto claro está si no fuera considerado el coeficiente de acoplamiento*.

Luego de realizar el paso “c)” (*segundo montaje*, en el que la descarga impacta directamente sobre la torre), se obtuvieron las siguientes magnitudes de corrientes  $I_c$  necesarias para provocar el cierre de algún interruptor controlado por tensión en cada uno de los 9 instantes de interés:

**Máximo (+) de la fase A:** 15400 A, cierre del interruptor en la fase C como se esperaba, dado que en este instante previo a la descarga esta era la fase con la tensión más negativa según se observa en la primera fila de la tabla D.2.

**Paso por cero (0) de la fase A:** 14800 A, cierre del interruptor en la fase C como se esperaba, dado que en este instante previo a la descarga esta era la fase con la tensión más negativa según se observa en la segunda fila de la tabla D.2.

**Máximo (-) de la fase A:** 14600 A, cierre del interruptor en la fase A como se esperaba, dado que en este instante previo a la descarga esta era la fase con la tensión más negativa según se observa en la tercera fila de la tabla D.2.

**Máximo (+) de la fase B:** 15400 A, cierre del interruptor en la fase C como se esperaba, dado que en este instante previo a la descarga esta era la fase con la tensión más negativa según se observa en la primera fila de la tabla D.3.

**Paso por cero (0) de la fase B:** 14800A, cierre del interruptor en la fase C como se esperaba, dado que en este instante previo a la descarga esta era la fase con la tensión más negativa según se observa en la segunda fila de la tabla D.3.

**Máximo (-) de la fase B:** 14600 A, cierre del interruptor en la fase B como se esperaba, dado que en este instante previo a la descarga esta era la fase con la tensión más negativa según se observa en la tercera fila de la tabla D.3.

**Máximo (+) de la fase C:** 15400 A, cierre del interruptor en la fase B. Aún cuando se esperaba que el flashover hubiera ocurrido en la fase A dado que en este instante previo a la descarga esta era la fase con la tensión más negativa según se observa en la primera fila de la tabla D.4. Esto es producto de que el coeficiente de acoplamiento entre la fase A y el cable de guarda es mayor que el coeficiente de acoplamiento entre la fase B y el cable de guarda.

**Paso por cero (0) de la fase C:** 14900 A, cierre del interruptor en la fase A como se esperaba, dado que en este instante previo a la descarga esta era la fase con la tensión más negativa según se observa en la segunda fila de la tabla D.4.

**Máximo (-) de la fase C:** 14500 A, cierre del interruptor en la fase C, como se esperaba, dado que en este instante previo a la descarga esta era la fase con la tensión más negativa según se observa en la tercera fila de la tabla D.4.

Finalmente la corriente crítica se obtuvo en el máximo negativo de la fase C, no en el máximo negativo de la fase A como se expuso en las tablas D.2, D.3, D.4 y los comentarios posteriores. La fase C es la más distanciada respecto al cable de guarda, posee el coeficiente de acoplamiento más bajo de las tres fases, por lo que la

tensión que se induce en las 3 fases de la misma forma y polaridad que el impulso de tensión que se desplaza por el cable de guarda será menor en este “conductor C”, dejando que la tensión en la cadena de aisladores de la fase C sea mayor que en las otras dos. Esta es la razón por la cual la  $I_{crítica}$  en los 3 instantes más críticos (máximos negativos de las 3 fases) no es la misma, sino que es menor cuando la descarga se da en el máximo negativo de la tensión a frecuencia de operación de la fase C.

NOTA: se recuerda que el impulso aplicado con la fuente Heidler fue de polaridad positiva, razón por la cual la diferencia de potencial era mayor en los máximos negativos de la tensión a 60Hz, si el impulso aplicado hubiese sido de polaridad negativa, entonces los instantes críticos se hubieran presentado durante los máximos positivos de las tensiones nominales.

Luego de realizar el paso “d)” (*tercer montaje*, en el que la descarga impacta sobre el cable de guarda a mitad del vano), se obtuvieron las siguientes magnitudes de corrientes  $I_c$  necesarias para provocar el flashover en cada uno de los 9 instantes de interés:

**Máximo (+) de la fase A:** 14600 A, cierre del interruptor en la fase C

**Paso por cero (0) de la fase A:** 14100 A, cierre del interruptor en la fase C

**Máximo (-) de la fase A:** 14100 A, cierre del interruptor en la fase A

**Máximo (+) de la fase B:** 14600 A, cierre del interruptor en la fase C

**Paso por cero (0) de la fase B:** 14000 A, cierre del interruptor en la fase C

**Máximo (-) de la fase B:** 13900 A, cierre del interruptor en la fase B

**Máximo (+) de la fase C:** 14800 A, cierre del interruptor en la fase B

**Paso por cero (0) de la fase C:** 14300 A, cierre del interruptor en la fase A

**Máximo (-) de la fase C:** 13800 A, cierre del interruptor en la fase C

NOTA: se repite el comportamiento observado en el segundo montaje, sólo que las magnitudes de las corrientes son menores (a pesar de estar en el mismo orden).



# ANEXO F

## MAPA DE RELIEVE DE VENEZUELA

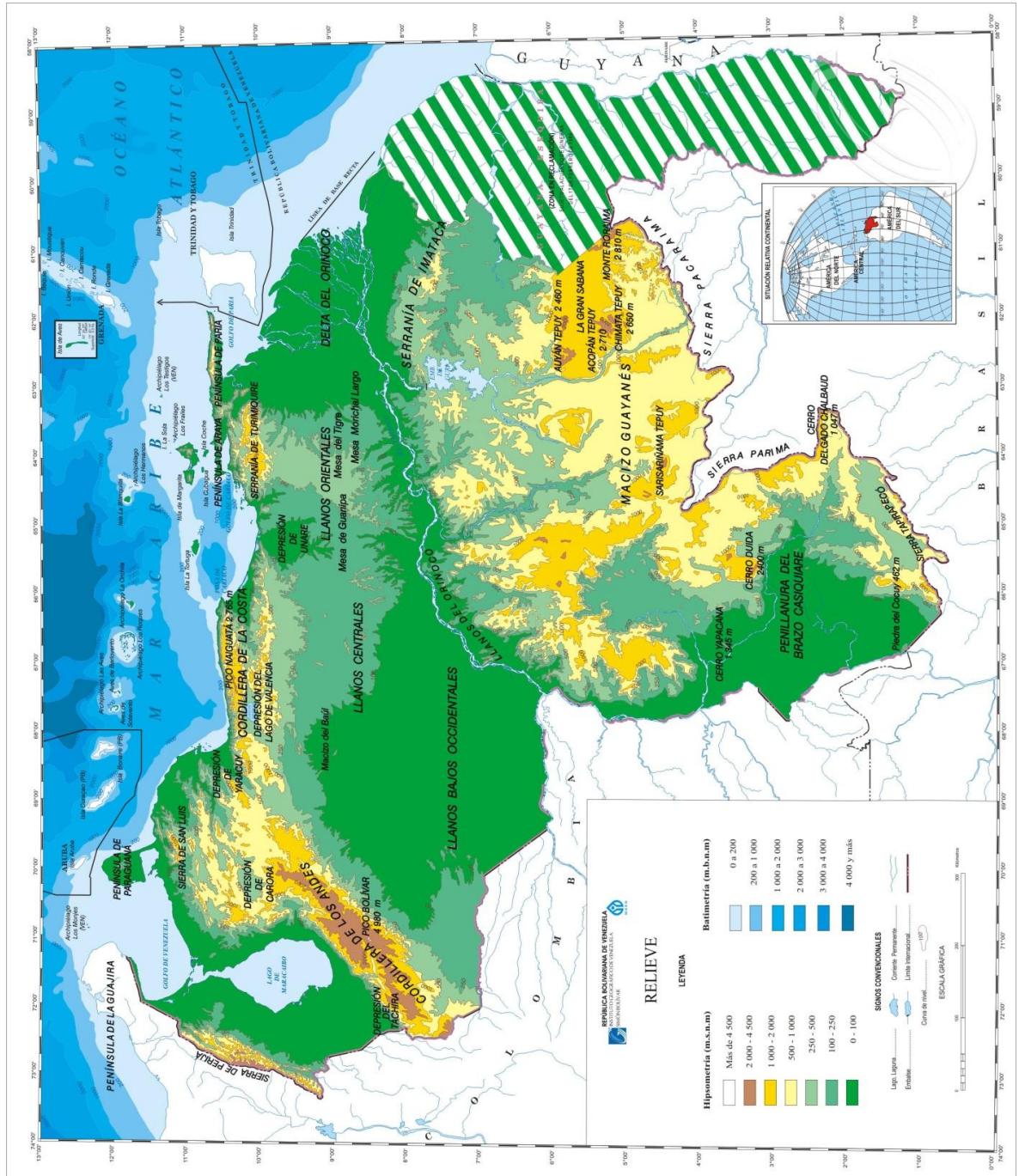


Figura F.1. Mapa de relieve de Venezuela. Fuente: Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar.

## ANEXO G

Efecto de la variación de algunos componentes que forman o no parte de las líneas de transmisión, en las sobretensiones originadas en las mismas.

NOTA: ya que se tiene el Caso 4 como ejemplo se continúa trabajando con el mismo, en el particular de impacto del rayo sobre la torre.

a) Se procedió a variar la forma del impulso de corriente, aumentando el tiempo de frente T1, lo que implica disminuir la rata de ascenso de la corriente del rayo.

**Con  $T1=2\mu s$ :**

Se necesitó subir la  $I_{pico}$  de 14,5 kA a 20,6 kA para que se produjera el cierre del interruptor controlado por tensión en la cadena de aisladores correspondiente a la fase C como se observa en la figura C.1:

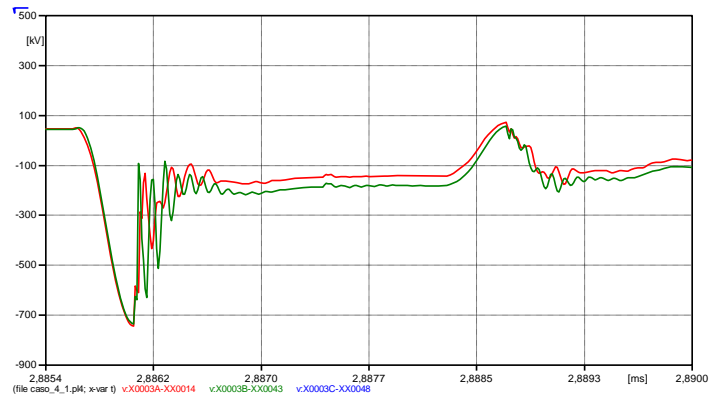


Figura C.1. Gráfico de las tensiones en las cadenas de aisladores de las tres fases, con  $I_{pico}=20,6$  kA

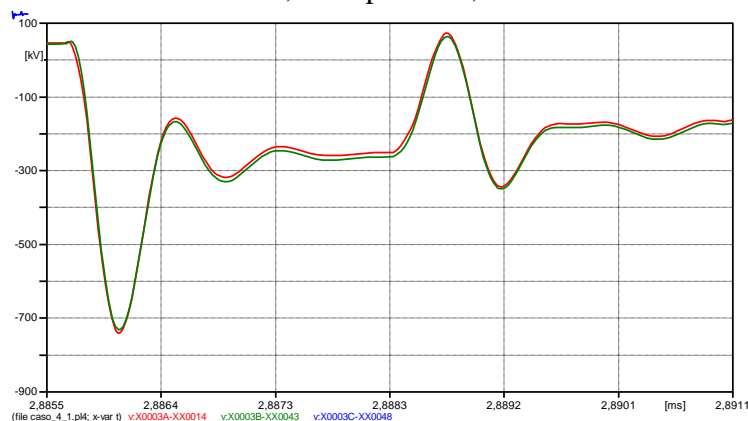


Figura C.2. Gráfico de tensiones en las cadenas de aisladores de las tres fases, con  $I_{pico}=20,5$  kA

Con  $I_{pico}=20,5$  kA, figura C.2, se observó el mismo comportamiento general de las sobretensiones que con la forma de onda normalizada, pero tuvo que transcurrir un tiempo mayor para alcanzar el pico de tensión,  $t=2,8861$  ms, es decir,  $0,5\mu s$  luego del impacto.

**Con  $T1=4\mu s$ :**

Se necesitó subir la  $I_{pico}$  de 14,5 kA a 44,3 kA para que se produjera el cierre del interruptor controlado por tensión en la cadena de aisladores correspondiente a la fase C como se observa en la figura C.3:

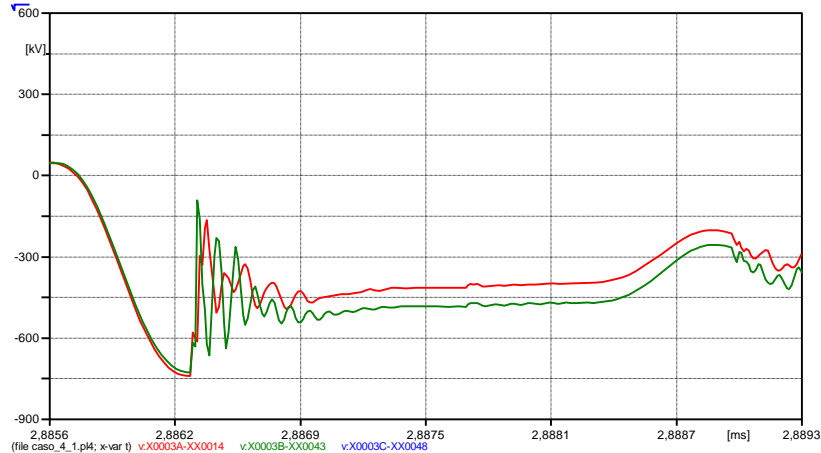


Figura C.3. Gráfico de las tensiones en las cadenas de aisladores de las tres fases, con  $I_{pico}=44,3$  kA

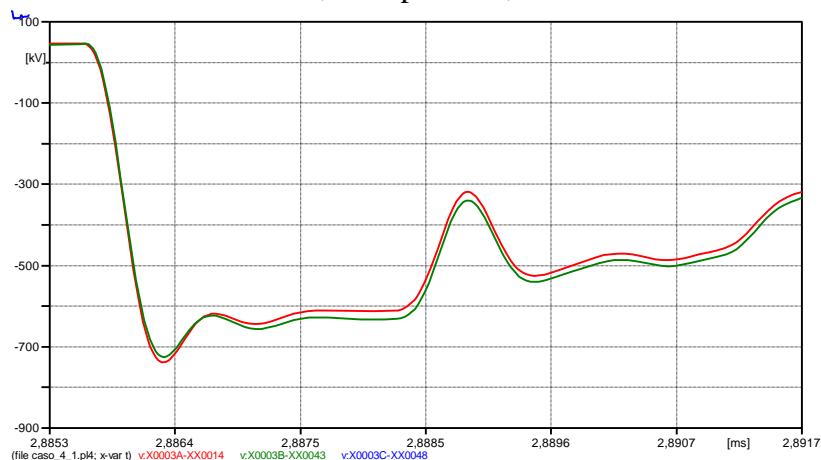


Figura C.4. Gráfico de las tensiones en las cadenas de aisladores de las tres fases, con  $I_{pico}=44,2$  kA

Con  $I_{pico}=44,2$  kA, figura C.4, ya cambió la forma de la tensión de las cadenas de aisladores en el tiempo como se aprecia en la figura C.4.

**Resumiendo:**

Se presenta la tabla C.1, donde se muestran las corrientes críticas halladas al aplicar impulso con diferentes tiempos de frente  $T1$ .

Tabla C.1. Variación de la Icrítica respecto al tiempo de frente del impulso de corriente aplicado.

T1	Icrítica
1,2 $\mu$ s	14,5 kA
2 $\mu$ s	20,6 kA
4 $\mu$ s	44,3 kA

Al disminuir la tasa de ascenso de la corriente del rayo, se debe incrementar su magnitud pico para poder provocar la descarga disruptiva en la cadena de aisladores.

b) Se procedió a variar la resistencia del sistema de puesta a tierra de los apoyos de la línea, dejando el impulso de corriente Heidler con la forma normalizada  $T1=1,2 \mu$ s y  $T2=50 \mu$ s.

**Con  $R=5\Omega$ :**

Se necesitó de un impulso de corriente con  $I_{pico} = 15,2$  kA para provocar el cierre del interruptor controlado por tensión como se muestra en la figura C.5

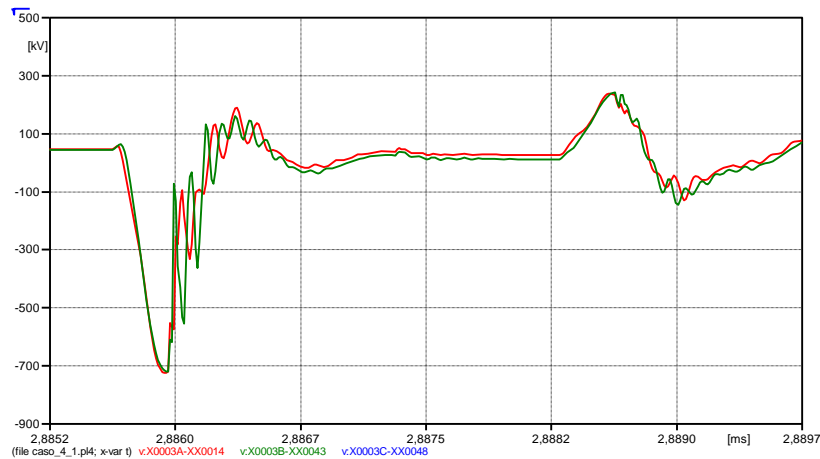


Figura C.5. Gráfico de las tensiones en las cadenas de aisladores de las tres fases, con  $I_{pico}=15,2$  kA

En la figura C.6 se muestran las formas de onda de tensión respecto al tiempo en las cadenas de aisladores con  $I_{pico}=15,1$  kA



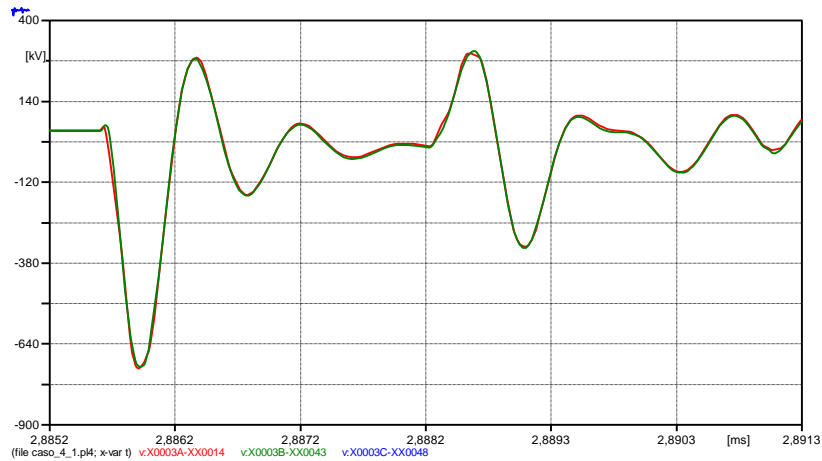


Figura C.6. Gráfico de las tensiones en las cadenas de aisladores de las tres fases, con  $I_{pico}=15,2$  kA

**Con  $R=40\Omega$ :**

Se necesitó de un impulso de corriente con  $I_{pico} = 13,8$  kA para provocar el cierre del interruptor controlado por tensión como se muestra en la figura C.7

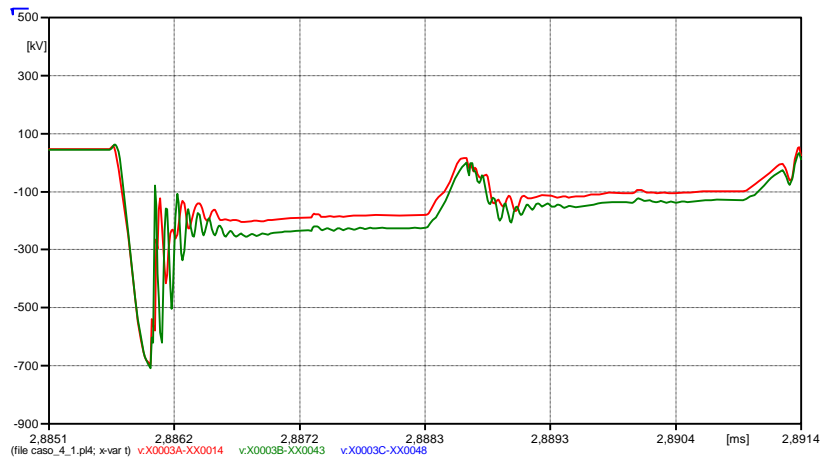


Figura C.7. Gráfico de las tensiones en las cadenas de aisladores de las tres fases, con  $I_{pico}=13,8$  kA

En la figura C.8 se muestran las formas de onda de tensión respecto al tiempo en las cadenas de aisladores con  $I_{pico}=13,7$  kA

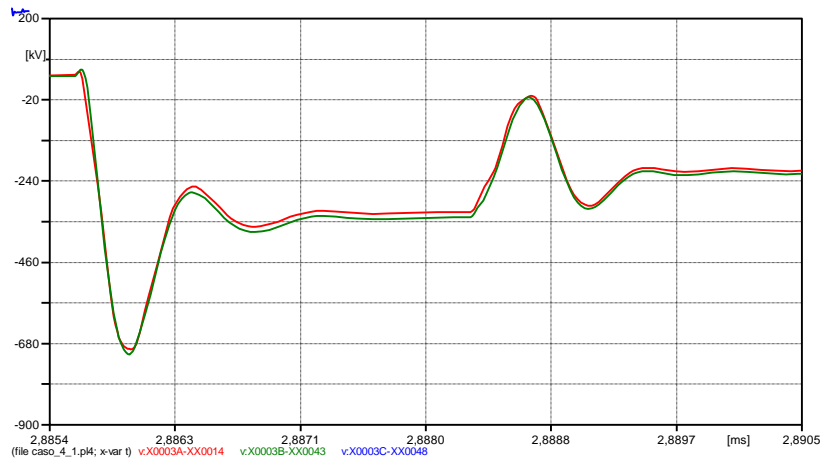


Figura C.8. Gráfico de las tensiones en las cadenas de aisladores de las tres fases, con  $I_{pico}=13,7$  kA

Resumiendo:

Se presenta la tabla C.2, donde se muestran las corrientes críticas halladas al aplicar impulso con diferentes valores de la resistencia del sistema de puesta a tierra.

Tabla C.2. Variación de la  $I_{critica}$  respecto al valor de la resistencia del sistema de puesta a tierra.

T1	$I_{critica}$
5 $\Omega$	15,2 kA
20 $\Omega$	14,5 kA
40 $\Omega$	13,8 kA

Al disminuir la resistencia del sistema de puesta a tierra el coeficiente de reflexión con el que se debe tratar la onda que llega al suelo será igualmente negativo, pero más cercano a la unidad lo que implica que la onda que se refleja poseerá una pendiente más elevada y similar a la de la onda incidente por lo que el efecto atenuador al llegar al extremo torre del aislador será mayor; por ello la corriente debe ser mayor, para poder alcanzar una mayor tensión en este punto de la torre que a su vez provoque la descarga en la cadena de aisladores.

## ANEXO H

En el software Flash v1.9 de la IEEE el código está escrito en Visual Basic para Aplicaciones (VBA) y puede ser visto o editado usando las Herramientas / Macro / Visual Basic, comando del menú Editor en Excel, que como se observa en la figura H.1 es el que proporciona la interfaz con el usuario. Las macros deben estar habilitadas al abrir el libro. Antes de hacer clic en el botón “Run”, se deben actualizar las rutas de acceso al programa en las celdas a través de J1 J3. Al hacer clic en "Run", el código VBA escribe un archivo de entrada a partir de los valores de la hoja y la guarda en el archivo especificado en la celda J2. A continuación, se ejecuta el programa de la celda J1 con la bandera-b, escribir en el fichero de salida en la celda J3. Las salidas se colocan en las celdas amarillas de la hoja de trabajo. Si aparece un mensaje de error aparece en el archivo de salida, la hoja de cálculo mostrará un cuadro de mensaje. Este mensaje de error puede parecer críptico, pero a partir de los valores de entrada que la rodean debe ser posible identificar la celda de hoja de cálculo con los datos infractores.

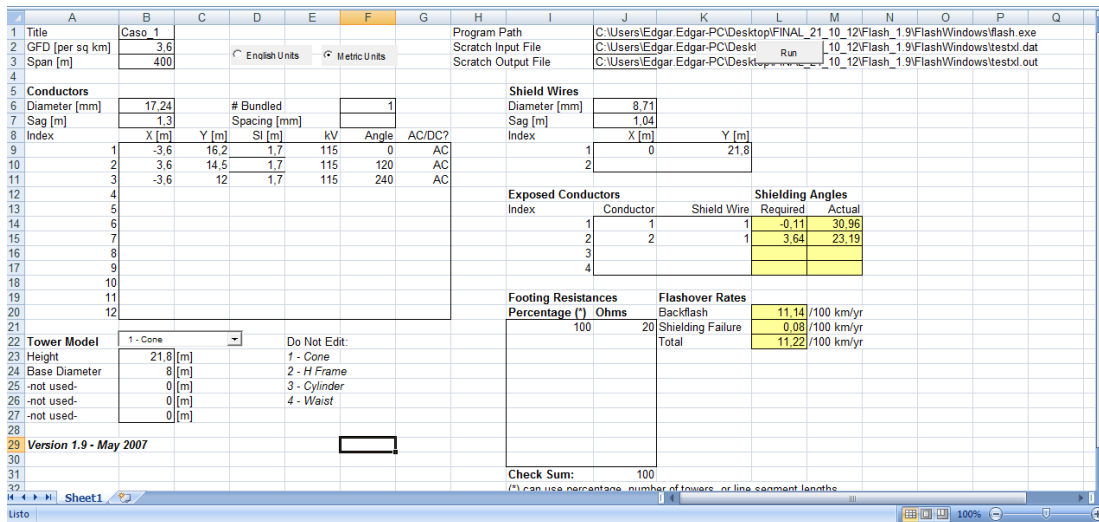


Figura H.1. Interfaz en entorno Microsoft Excel del programa Flash v1.9 de la IEEE.

Las entradas corresponden a:

- a) La densidad de rayos a tierra para la cual se usó la expresión (3.20) y el nivel cerámico extraído del anexo E, en la celda B2.

b) La longitud del vano en metros, en la celda B3.

c) Los datos de los conductores de fase:

- El diámetro en milímetros, en la celda B6.
- La flecha de los conductores de fase en metros, en la celda B7
- El número de sub conductores correspondientes a cada fase, en la celda F6,

como se observa en la figura 3.22 en el caso de un solo conductor por fase el espacio entre los sub conductores no existe, de existir esta distancia entre sub conductores se introduciría en la celda F7.

d) Los datos correspondientes a las coordenadas de las fases en la torre, el programa tiene disponibilidad para circuitos aéreos formados por hasta 12 fases. Las coordenadas horizontales se introducen desde la celda B9 hasta la B20. Las coordenadas verticales se introducen desde la celda C9 hasta la C20.

e) La longitud de las cadenas de aisladores de cada fase en metros. Se introducen desde la celda D9 hasta la D20

f) El nivel de tensión nominal de la línea, desde la celda E9 hasta la E20

g) El ángulo de fase, desde la celda F9 hasta la F20

h) Si el sistema es AC o DC, desde la celda G9 hasta la G20

i) Los datos de los cables de guarda:

- El diámetro en milímetros, en la celda J6.
- La flecha de los cables de guarda en metros, en la celda J7

j) Los datos correspondientes a las coordenadas de los cables de guarda en la torre, el programa tiene disponibilidad para líneas con hasta 2 cables de guarda. Las coordenadas horizontales se introducen en la celda J9 y la J10. Las coordenadas verticales se introducen en la celda K9 y la K10.

k) En el cuadro inferior se puede verificar el ángulo de apantallamiento existente y el requerido entre alguno de los conductores de fase y alguno de los cables de apantallamiento, para ello se debe introducir el número del conductor de fase en alguna de las celdas J14 hasta la J17 y en la celda de al lado (de la K14 hasta la K17) el número del cable de guarda con el que se desea comprobar el mencionado ángulo.

l) En la celda B22 se selecciona el tipo de torre y en las celdas inferiores se introducen las respectivas medidas.

m) En el cuadro correspondiente a las resistencias del sistema de puesta a tierra de las torres se introducen en la columna correspondiente a los porcentajes (letra I) el % de las torres que conforman la línea que poseen un sistema de puesta a tierra con un valor en ohm “x” que se introduce en la celda de al lado. En la figura 3.22 se observa como fue fijado que el total de las torres que conforman esa línea poseen un sistema de puesta a tierra con una resistencia de  $20\Omega$ .

Las salidas (resultados) corresponden a las celdas con fondo amarillo:

a) Las celdas que van desde la L14 a la L17 muestran los ángulos de apantallamiento requeridos entre alguna de las fases y alguno de los cables de guarda.

b) Las celdas que van desde la M14 a la M17 muestran los ángulos de apantallamiento reales entre alguna de las fases y alguno de los cables de guarda.

c) En la celda L20 se muestra el valor de la tasa de salida debido a descargas retroactivas por cada 100 km al año, en la celda L21 se muestra el valor de la tasa de salida debido a fallo de apantallamiento por cada 100 km al año y en la celda L22 se muestra el valor total de la tasa de salida por cada 100 km al año.