

# Impacto ambiental por líneas de transmisión de E.H.V. y U.H.V.

Por: José Amado Aguilar Roldán\*

## I. INTRODUCCION

El presente trabajo tiene como fin primordial crear inquietudes acerca de un tema que ha sido poco explorado en nuestro medio y que por tal motivo no se ha tenido en cuenta dentro de los diferentes diseños de líneas de transmisión.

En los últimos años se han creado una serie de polémicas por causa del impacto ambiental que pueden presentar las líneas aéreas de transmisión eléctrica. Estas polémicas varían de acuerdo a como las líneas afectan los paisajes, densidades de población, la naturaleza del desarrollo industrial y agrícola, como también los efectos sobre el ser humano.

Aunque las líneas de alta y muy alta tensión no contaminan el aire, no afectan el suelo y no alteran la calidad del agua (como otros centros contaminantes), sí es bueno preocuparse de estudiar y experimentar qué efectos perjudiciales al medio se pueden presentar, como son: corrientes inducidas en los cuerpos ocasionados por los efectos electrostáticos, ruido audible, producción de gases, etc.

Andrew Marino, biofísico del Centro Médico de la Dirección de Excombatientes en Syracuse (Nueva York), ha analizado a personas y animales expuestos en experimentos de laboratorio a un campo Eléctrico semejante al que se forma alrededor de las líneas de Alta Tensión. "Bajo los cables se atrofia todo desarrollo. La exposición a niveles como estos puede impedir el crecimiento, concluye Marino. A una distancia de 100 a 150 mts. ocurren fenómenos fisiológicos, como cambios en la composición química de la sangre y en el ritmo cardíaco; a los 300 suelen hacerse lentas las reacciones.

En 1973, W. Ross Adey, del Instituto de Investigación Cerebral de la Universidad de California en los Angeles, expuso a varios monos de laboratorio a una radiación eléctrica de las mismas frecuencias que se presentan diariamente a nuestro alrededor. El comportamiento de los monos cambió y su sentido del tiempo se distorsionó. Adey cree que el "smog" eléctrico altera los ritmos biológicos naturales, relojes internos que regulan el acto de despertar, el sueño y miles de procesos corporales más sutiles.

El campo magnético de la tierra y otros campos naturales que varían rítmicamente influyen en el modo en que todos los seres vivos sincronizan sus relojes internos.

Las líneas de fuerza eléctrica crean campos artificiales de fuerza electromagnética que perturban este magnetismo natural. Según Adey, el cuerpo humano ajusta sus ritmos biológicos a las frecuencias del smog eléctrico, lo cual produce fatiga y tensión. Resultado: el organismo pierde resistencia general y sucumbe a enfermedades que en circunstancias normales bien hubiera podido resistir. Esto, de acuerdo con los investigadores de la Universidad de Colorado, explica por qué el promedio de muertes causadas por ciertos tipos de cáncer, como la leucemia, es superior en las casas que están a 40 metros o menos de líneas de transmisión eléctrica (de alta tensión).

Estos comentarios que se publican con poca frecuencia hacen que se crean inquietudes que habren paso a esta clase de investigación.

## II. EFECTOS ELECTROSTATICOS

### PRIMERA PARTE

Las intensidades de campo eléctrico varían de acuerdo a la tensión de la línea y de acuerdo a la distancia con respecto a tierra. En suelos despejados se pueden conseguir las siguientes intensidades: (cerca al suelo): (Experiencias de laboratorio)

- Para líneas de 500 KV: 4 a 9 KV/m.
- Para líneas de 765 KV: 5 a 10 KV/m.
- Para líneas de 1100 KV: 8 a 12 KV/m.

En estaciones transformadoras de barras bajas, la intensidad de campo eléctrico a 3 m sobre el suelo es de 10 a 15 KV/m.

En estaciones transformadoras de barras bajas, la intensidad de campo eléctrico a la misma distancia puede alcanzar 20 KV/m.

Todos estos niveles de tensión que se presentan a diferentes distancias del suelo hacen que se induzcan corrientes en los diferentes cuerpos cercanos a las líneas. Es así como este capítulo hará un análisis de las corrientes inducidas en los objetos y el cuerpo humano. Después de este estudio se darán a conocer algunos de los efectos fisiológicos en el hombre, animales y plantas.

\* Instructor Asociado  
Depto. de Electricidad y Electrónica  
Universidad Nacional - Medellín

En esta primera parte solo se estudiará la carga inducida en los objetos.

2.1 Carga Inducida en los objetos. Este numeral examina la teoría que respalda el acoplamiento capacitivo, se estudian los parámetros de potencial espacial y campo eléctrico que son útiles en los cálculos, y el planteamiento de los cálculos de las tensiones y corrientes inducidas que actúan sobre los objetos; se trata de los parámetros de los objetos y se examinan brevemente los fenómenos de descarga disruptiva.

En este numeral se presentará un método de cálculo de la corriente inducida en objetos, en presencia de campos eléctricos; y a continuación se hará una deducción de fórmulas para estimar la corriente inducida en los objetos o del cuerpo humano.

2.1.1 Método de cálculo. Para calcular la tensión y la corriente inducida en un objeto y calcular así los efectos que pueden tener en los animales o seres humanos que hagan contacto con dichos objetos, es preciso determinar la carga inducida en el objeto por la línea de transmisión. Para dicho cálculo hacemos las siguientes suposiciones:

- La intensidad del campo eléctrico se asume uniforme.
- En la línea de transmisión, la distribución de carga no se ve afectada por la presencia de objetos bajo ella.
- Todos los conductores de la línea son horizontales.
- La tierra es un plano liso y un conductor perfecto para un campo eléctrico.
- No existe carga libre.
- El método no es válido bajo la superficie de la tierra.
- La constante dieléctrica  $\epsilon_0$ , tendrá un valor de:

$$8.85 \times 10^{-12} \text{ far/m.}$$

Bajo estas condiciones la inducción en un objeto localizado en este campo uniforme, depende únicamente de las propiedades del objeto y es proporcional a la intensidad de campo en el cual está colocado. La inducción en un objeto puede ser encontrada ejecutando los siguientes cálculos:

- Determinar la intensidad de campo eléctrico ocasionado por la línea de transmisión sin estar presente el objeto.
- La Corriente de corto circuito o corriente total inducida en el objeto es igual a la intensidad de campo eléctrico multiplicado por una tensión que depende de las características del objeto. Utilizando un circuito Norton equivalente y con la corriente de corto  $I_{sc}$ , hallamos esta corriente inducida.

2.1.2 Deducción de fórmulas.

Para la deducción de fórmulas tomamos un caso bien simple: una sola línea y un cilindro paralelo como objeto (Fig. 1).

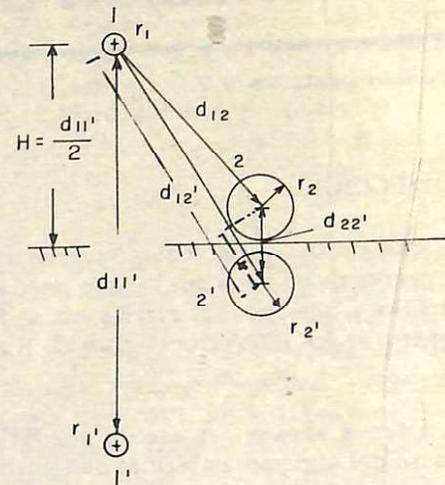


Figura 1. Disposición geométrica de la inducción procedente de un solo conductor sobre un cilindro paralelo.

Por el método de las imágenes, la tensión en un conductor n es igual a:

$$V_n = Q_n p_{nn} + Q_m p_{nm} \quad (1)$$

y como

$$p_{nn} = \left( \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \right) \left( \ln \frac{2H}{r} \right) \quad [\text{m. Fard}^{-1}] \quad (2)$$

y

$$p_{nm} = \left( \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \right) \left( \ln \frac{d_{nm}'}{d_{nm}} \right) \quad [\text{m. Fard}^{-1}] \quad (3)$$

Donde:

$p_{nn}$ : Potencial espontáneo del conductor n

$p_{nm}$ : Coeficiente de potencial mutuo de los conductores n y m.

r: radio del conductor n

H: altura del conductor n sobre el suelo

$d_{nm}$ : distancia entre los conductores n y m

$d_{nm}'$ : distancia entre n y la imagen del conductor m

Para nuestro caso (Fig. 1) será:

$$V_1 = \frac{q_1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{d_{11}'}{r_1} + \frac{q_2}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{d_{12}'}{d_{12}} \quad (4)$$

$$V_2 = \frac{q_1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{d_{12}'}{d_{12}} + \frac{q_2}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{d_{22}'}{r_2} \quad (5)$$

En forma matricial sería:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{d_{11}'}{r_1} & \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{d_{12}'}{d_{12}} \\ \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{d_{12}'}{d_{12}} & \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{d_{22}'}{r_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\text{ó } [V] = [P] \cdot [Q] \quad (7)$$

V: Vector de tensiones en voltios

P: Matriz de coeficientes de potenciales de Maxwell, en Volt/coul. por metro.

Q: Vector de cargas, en coulomb. por metro.

Consideraciones:

1. Como el objeto 2 está cerca del plano de tierra y por lo tanto la carga de 2 no afecta en forma significativa a la carga de 1. De aquí podemos suponer que  $q_2 = 0$ .
2. Como nos interesa la corriente inducida a tierra que es la corriente de corto circuito a tierra del cilindro 2, se tiene que  $V_2 = 0$ .

Estas consideraciones las llevamos a (4) y (5):

$$V_1 = \frac{q_1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{d_{11}'}{r_1} \quad (8)$$

$$0 = \frac{q_1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{d_{12}'}{d_{12}} + \frac{q_2}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{d_{22}'}{r_2} \quad (9)$$

$$\text{de (8): } q_1 = \frac{2\pi\epsilon_0 V_1}{\ln \frac{d_{11}'}{r_1}} \quad [c/m] \quad (10)$$

$$\text{de (9): } q_2 = \frac{-q_1 \ln(d_{12}'/d_{12})}{\ln(d_{22}'/r_2)} \quad [c/m] \quad (11)$$

Otras consideraciones:

En la mayoría de los casos el cilindro 2 está próximo a tierra. Es por esto que comparativamente la distancia de éste a su imagen es muy pequeña en comparación con la distancia entre el conductor 1 y el cilindro 2, o sea  $d_{22}' \lll d_{12}'$ .

Geoméricamente podemos ver que: (Por triángulos semejantes)

$$d_{12}' = d_{12} + x$$

De la figura 1 podemos encontrar el valor de  $x = f(d_{22}', H, d_{12})$  donde  $H = \frac{d_{11}'}{2}$

Las relaciones son:

$$\frac{x}{H - \frac{d_{22}'}{2}} = \frac{d_{22}'}{d_{12}}$$

$$X = \frac{d_{22}' (H - \frac{d_{22}'}{2})}{d_{12}}$$

$$\text{Como } H \gg d_{22}' \Rightarrow H - \frac{d_{22}'}{2} \cong H$$

$$\text{Por lo tanto } x = d_{22}' \cdot (H/d_{12})$$

Y nos queda:

$$\ln \left( \frac{d_{12}'}{d_{12}} \right) \cong \ln \left( \frac{d_{12} + d_{22}' (H/d_{12})}{d_{12}} \right) \ln (1 + d_{22}' (H/d_{12}^2))$$

$$\text{Sea } Y = d_{22}' (H/d_{12}^2)$$

y sabemos que  $\ln(1+y) = y$  para  $y \lll 1$

$$\text{nos queda } \ln \frac{d_{12}'}{d_{12}} = d_{22}' (H/d_{12}^2) \quad (12)$$

(12) en (9)

Partiendo de la expresión en una forma más utilizada, tenemos:

$$q_2 = \left( \frac{-q_1 H}{d_{12}^2} \right) \left( d_{22}' \right) \left( \frac{1}{\ln \frac{d_{22}'}{r_2}} \right) \quad [C] \quad (13)$$

$$\text{Multiplicando por } \left( \frac{2}{2} \right) \left( \frac{2\pi\epsilon_0}{2\pi\epsilon_0} \right) \text{ nos queda:} \quad (14)$$

$$q_2 = \underbrace{\left( \frac{-2 q_1 H}{2\pi\epsilon_0 d_{12}^2} \right)}_A \underbrace{\left( \frac{d_{22}'}{2} \right)}_B \underbrace{\left( \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(d_{22}'/r_2)} \right)}_C$$

$$\underbrace{\hspace{10em}}_D$$

$$\underbrace{\hspace{10em}}_E$$

- A: Campo eléctrico E a nivel del suelo en V/M  
 B: Altura del objeto 2, h, sobre el nivel del suelo.  
 C: Capacitancia,  $C_{og}$ , del objeto a tierra.  
 D: (B y C) propiedades del objeto.  
 E: (A y B) potencial del objeto en voltios.

Aunque la fórmula se haya desarrollado para un cilindro, también se puede generalizar a objetos de cualquier forma geométrica próximos al suelo.

La ecuación (14) es muy importante ya que nos permite calcular el campo eléctrico de la línea sin estar presente el objeto y después calcular la carga aplicando la forma geométrica del objeto.

La ecuación (14) se puede escribir así:

$$q_2 = E \cdot h \cdot C_{og} \quad (15)$$

donde:

- E: Campo eléctrico de la línea de transmisión a nivel del suelo sin estar presente el objeto.  
 h: Altura efectiva del objeto sobre el suelo (ver figura 2) (centroide del objeto).  
 $C_{og}$ : Capacidad del objeto a tierra.

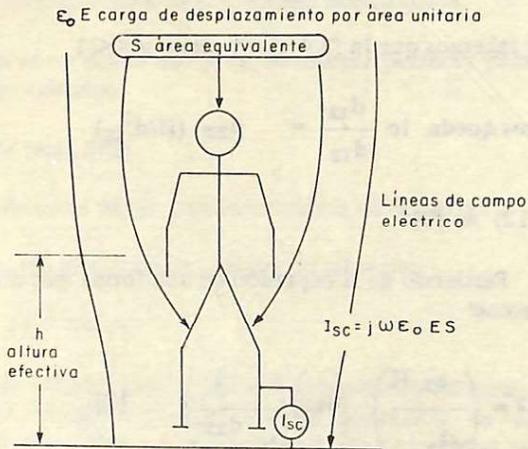


Figura 2. Área colectora de carga equivalente de un cuerpo y concepto de la corriente de cortocircuito.

Debe hacerse notar:

1. Que existe capacitancia entre la línea y el objeto, pero se supone que está incluida en  $C_{og}$ , ya que suele ser menor del 1% de  $C_{og}$ .
2. El campo eléctrico desde la línea a tierra lo suponemos todo vertical.

En las líneas de transmisión de c.a., la carga  $q$  es variable

en función del tiempo  $y$ , por lo tanto, la corriente de corto circuito (corriente inducida en el objeto) es:

$$I_{sc} = dq/dt = J \cdot \omega \cdot q \quad \omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (16)$$

$$(15) \text{ en } (16) \quad I_{sc} = j \cdot \omega \cdot E \cdot h \cdot C_{og} \quad (17)$$

Aunque esta ecuación es dimensionalmente compatible, puede presentar dificultades al utilizarla. Es más conveniente calcular un área colectora de carga equivalente y la corriente de desplazamiento a través de esa área.

De acuerdo con la teoría electromagnética, la ley de Ampere está dada por:

$$\oint \frac{B}{\mu_0} \cdot dl = \int_s J \cdot ds + \frac{d}{dt} \int_s (\epsilon_0 E) \cdot ds = i + \frac{d\varphi_0}{dt} \quad (18)$$

donde el segundo término es la corriente de desplazamiento y denota el cambio con respecto al tiempo del flujo eléctrico, que pasa a través de una superficie  $S$ . De donde:

$$I_D = \frac{d}{dt} \int_s \epsilon_0 E \cdot ds = \frac{d}{dt} \int D \cdot ds$$

D: densidad de flujo de desplazamiento eléctrico,  $= \epsilon_0 E$  esto implica que:

$$I_D = j \omega D = j \omega \epsilon_0 E \quad (19)$$

De donde la ecuación (17) se puede escribir así:

$$I_{sc} = \underbrace{j \omega \epsilon_0 E}_A \times \underbrace{h \times \frac{C_{og}}{\epsilon_0}}_B \quad [\text{AMP.}] \quad (20)$$

- A: Corriente de desplazamiento por  $m^2$  (amp./ $m^2$ )  
 B: Área equivalente en  $m^2$ .

El área equivalente  $S$  se define como el área sobre el plano de tierra la cual recogerá la misma carga en ausencia del objeto.

Tomemos un caso que es particular en nuestro medio:  $f = 60\text{Hz}$ . o sea que  $\omega \epsilon_0 = 2\pi f \epsilon_0 = 1/(3 \times 10^8)$

Y la ecuación (20) se podría escribir así:

$$I_{sc} = \frac{ES}{3 \times 10^8} \quad (\text{amp.}) \quad (21)$$

Una representación de todo lo dicho hasta el momento, está mostrada en la figura 2.

La ecuación (17) se puede aplicar para objetos que no estén conectados con tierra, o sea, que no hagan contacto

directo o no se hallen sobre la tierra, pero que sí se encuentren muy próximos. Si el objeto no está conectado a tierra directamente, sino a través de una impedancia  $Z_{og}$ , entonces se crea una tensión de circuito abierto  $V_{oc}$ ; donde:

$$\bar{V}_{oc} = \bar{I}_{sc} \cdot \bar{Z}_{og} \quad (22)$$

Esto se puede simular y calcular con un equivalente de NORTON (ver figura 3).

Los parámetros del circuito están dados así:

$$\bar{V}_{oc} = \bar{I}_{sc} \times \frac{1}{\frac{1}{R_{og}} + j\omega C_{og}} \quad (\text{Vol.}) \quad (23)$$

Para muchas aplicaciones se supone que  $R_{og}$  es muy grande, haciendo que la  $Z_{og}$  se reduzca a una reactancia capacitativa a tierra, o sea:

$$Z_{og} = j\omega C_{og} \quad (24)$$

Hasta ahora pudimos averiguar la corriente  $I_{sc}$  que emana de un objeto. También es interesante saber si existe disrupción en el momento de la descarga; es por esto que podemos determinar la cantidad de energía almacenada, ya que su efecto es función de la  $C_{og}$  y  $V_{oc}$ ; de donde:

$$W = \frac{1}{2} \cdot C_{og} \cdot V_{oc}^2 \quad (\text{picojulios}) \quad (25)$$

### 2.3.1 Gradientes de Voltaje

La geometría de conductores paralelos con conductores imágenes es el método más conveniente de predecir campos eléctricos comunes en líneas de transmisión. Existen buenas referencias para hacer esto (1), (2).

Hay programas de computador y curvas de referencia que son utilizadas para evaluar este tipo de problemas, (ver figura 4).

#### 2.1.4. Corrientes de corto circuito y Areas colectoras de carga equivalente

Debido a que la mayoría de los objetos expuestos a gradientes de voltajes, son de configuraciones geométricas complejas, se han calculado las áreas colectoras de carga equivalente de diferentes modelos que aproximan estas formas geométricas como son: rectángulos, cuadrados, cubos, semiesferas, cilindros, etc.

##### 2.1.4.1. Objetos rectangulares.

Para calcular la  $I_{sc}$ , recurrimos a las curvas estándar típicas de esta forma geométrica. Estos datos se consiguen

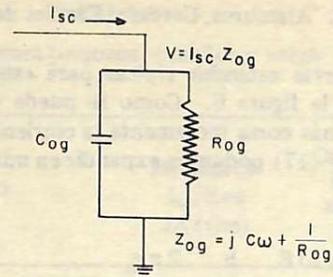


Figura 3. Circuito equivalente de Norton

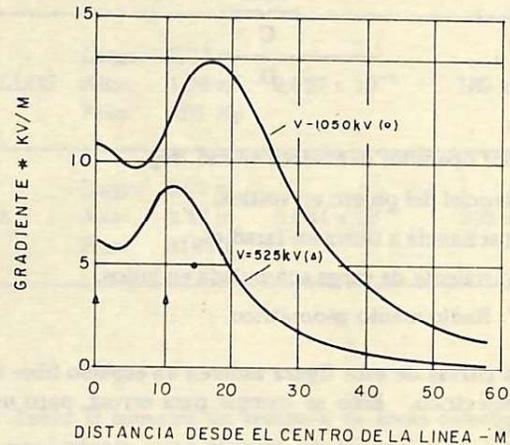


Figura 4. Gradientes de voltaje a nivel de tierra de un circuito simple.

de la relación  $I_{sc}/E$  o del cálculo de la área equivalente  $S$  (ver figura 5).

Una situación común que se presenta es cuando  $B \gg C$ , (ver figura 5) entonces los efectos de  $C$  son despreciables en el cálculo de  $I_{sc}$ . Esta dimensión afecta la capacitancia, para el cual se le hace un tratamiento matemático aparte, para así poder calcular el  $V_{oc}$ .

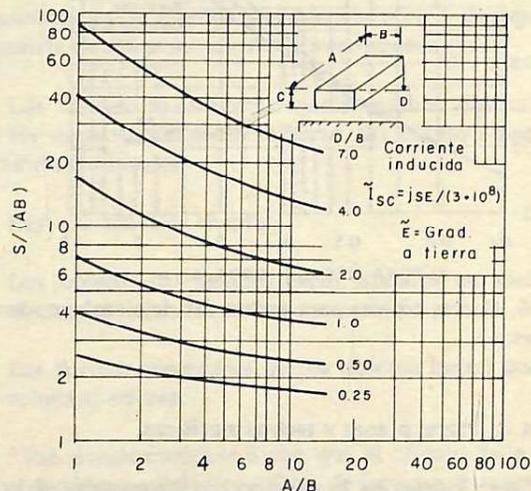


Figura 5. Curvas estándar típicas para evaluar  $I_{sc}$  de objetos rectangulares.

2.1.4.2. Alambres, Cercas y Canales de lluvia.

Las curvas estandar típicas para este caso están mostradas en la figura 6. Como se puede ver en la figura, la longitud más corta incrementa la corriente. De las ecuaciones (14) y (17) podemos expandir en una forma más explícita la  $I_{sc}$ .

$$I_{sc} = \underbrace{j \omega E}_A \underbrace{\frac{h}{B}}_B \underbrace{\frac{2 \pi \epsilon_0}{\ln \frac{2h}{GMR'}}}_C \underbrace{(A/m)}_D \quad (26)$$

- A: Fasor operador derivativo en rad./seg.
- B: Potencial del objeto en voltios.
- C: Capacitancia a tierra en faradios
- D: Equivalente de carga acumulada en julios.
- GMR': Radio medio geométrico.

Las curvas de esta figura asumen un espacio libre de medio dieléctrico. Esto se cumple para cercas, pero no para canales.

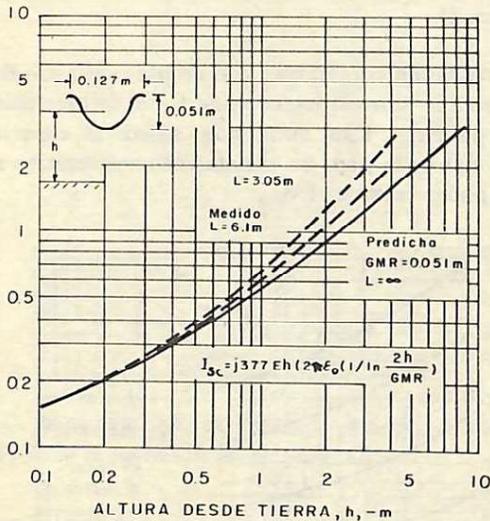


Figura 6. Curvas típicas para evaluar  $I_{sc}$  de alambres, cercas y canales.

2.1.4.3. Placas planas y techos metálicos.

La figura 7 describe la relación  $I_{sc}/E$  para estos objetos. Para este caso se asume que  $h \gg B$  y  $A \gg B$  y se aplica la ecuación (26).

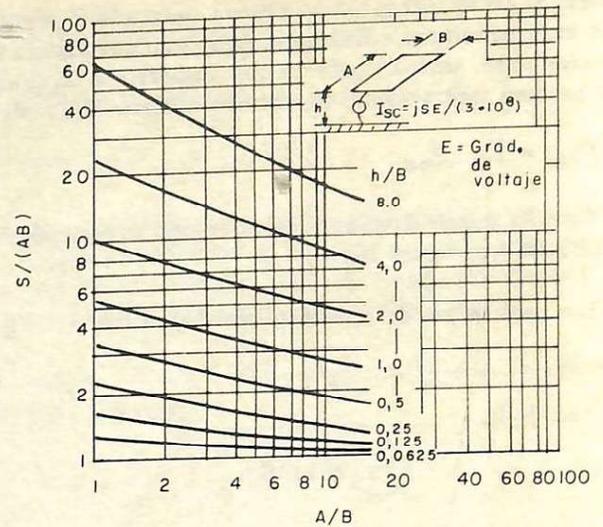


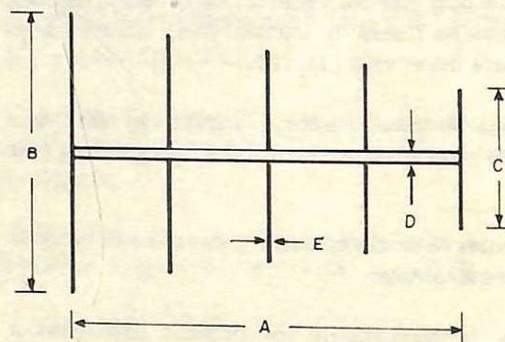
Figura 7. Curvas típicas para evaluar la  $I_{sc}$  de placas planas y techos metálicos.

2.1.4.4. Antenas de TV y FM.

Las antenas de TV tienen una gran variedad de construcciones. En las figuras 8 a 11 se muestran las configuraciones y corrientes de corto circuito  $I_{sc}$ .

2.1.4.5. Personas, Caballos y Vacas.

Las figuras  $I_{sc}/E$  para personas, caballos y vacas están dadas en la tabla 1. Estos datos son tomados teniendo en cuenta una posición fija.



	A	B	C	D	E 10 <sup>-3</sup>	Nº DE ELEMENTOS
TV Canal 6	1,75	1,83	1,58	0,019	9,55	
TV Todo canal	3,80	2,04	1,84	0,254	9,55	
FM "S"	0,765	1,19	-	-	9,55	

Figura 8. Dimensiones de antenas.

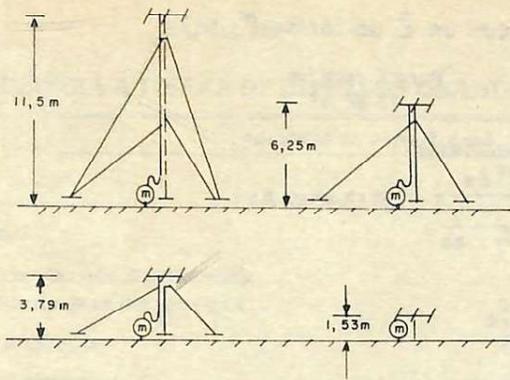


Figura 9. Configuración de antenas, mástil y viento.

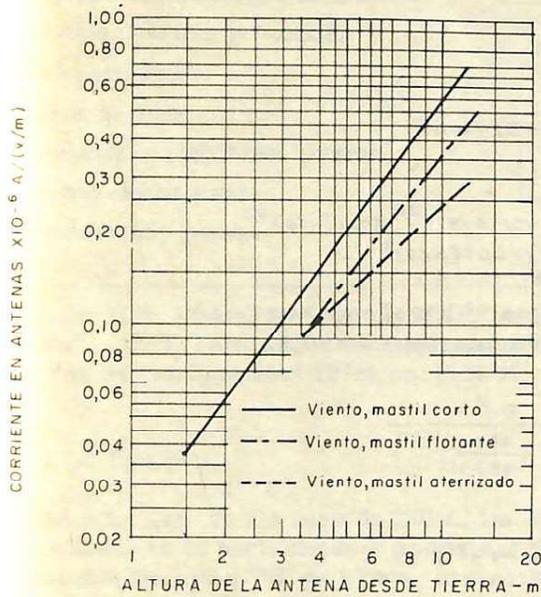


Figura 10.  $I_{sc}$  para toda antena.

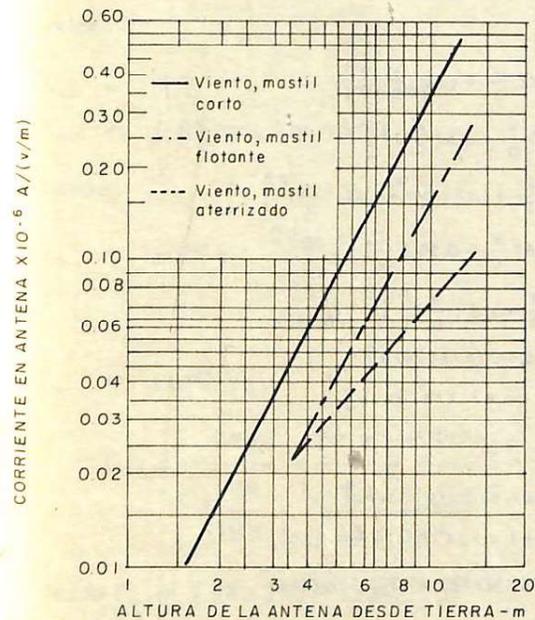


Figura 11.  $I_{sc}$  para antena FM'S"

TABLA 1  
 $I_{sc}/E$  y  $C$  para personas, caballos y vacas

SUJETO	Medidas de $I_{sc}/E$ en JA (v/m)		Capacidad en Farad con aislamiento de 5 cms.	
PERSONAS	1.8 m	105 Kg	$0.02 \times 10^{-6}$	$110 \times 10^{-12}$
	1.75 m	68 kg	$0.018 \times 10^{-6}$	$110 \times 10^{-12}$
CABALLOS	Largo:	2.03 m	$0.027 \times 10^{-6}$	$180 \times 10^{-12}$
	Alto:	1.26 m		
	Peso:	385 Kg		
VACAS	Largo:	2.03 m	$0.024 \times 10^{-6}$	$200 \times 10^{-12}$
	Alto:	1.17 m		
	Peso:	318 Kg		

La Tabla II muestra un resumen de áreas colectoras de carga equivalente para algunas configuraciones o formas geométricas.

2.1.5. Impedancia de los objetos a tierra,  $Z_{og}$ . Los valores de  $C_{og}$  y  $R_{og}$  son funciones del objeto específico y del ambiente que lo rodea. La capacitancia a tierra puede ser medida con un puente capacitivo o midiendo  $I_{sc}$  y  $V_{oc}$  ó sea:  $C_{og} = I_{sc}/j\omega V_{oc}$

En la tabla III figuran algunos de los valores típicos de capacitancias de objetos que descansan en 4 cms aproximadamente de aislamiento sobre un pavimento seco.

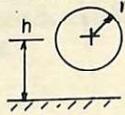
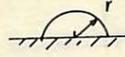
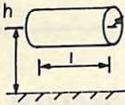
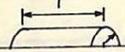
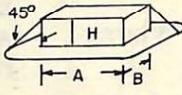
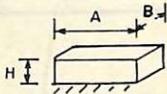
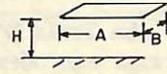
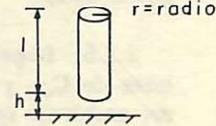
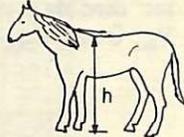
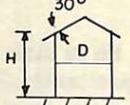
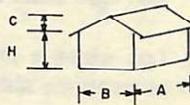
Los valores de esta tabla fueron establecidos en el peor de los casos (aislamiento máximo del objeto a tierra y en condiciones ideales).

Hay que tener en cuenta:

1. Los objetos no siempre están situados en suelo seco, ni tampoco aislados en todo momento.
2. Las formas irregulares de los objetos hacen que se involucren errores.

Estas consideraciones hacen que el cálculo de la  $Z_{og}$  sea de naturaleza estadística. Otra de las consideraciones que se hace es tomar a  $R_{og}$  de una magnitud y de esta forma considerar el peor caso.

**TABLA II** Fórmulas de  $I_{sc}$  inducida con un  $\bar{E}$  uniforme \*

Fórmula general	$I_{sc} = j_w \bar{E} ES$	$I_{sc} = \frac{j}{3 \times 10^{-8}} ES$	Para E en V/m S en m <sup>2</sup>
Formas generales		Area S para la ecuación	
Corriente inducida en una esfera por encima del suelo		$h \frac{4\pi}{\frac{1}{r} - \frac{1}{2h}}$ o $4\pi rh$ para $h > r$	
Semiesfera sobre el suelo		$3\pi r^2$	
Cilindro por encima del suelo		$\frac{2\pi h}{\ln(2h/r)} (1+2r)$	
Medio cilindro sobre el suelo		$4r(1+2r)$	
Sólido rectangular, aproximación ángulo blindaje 45°		$AB + 2H(A+B) + \pi H^2$	
Sólido rectangular empírico		$AB [1 + [1,4 + 5/(A/B)]^{0,6} [10,1 [H/B]^{0,5} + 0,78 [H/B] + 0,07 [H/B]^2 + 0,01 [(H/B)/(A/B)]^4]$	
Placa rectangular plana empírica *		$[AB] [1 + 8/(A/B)^{0,6} [10,3 [H/B]^{1/2} + 0,6 [H/B] + 0,07 [H/B]^2 + 0,0085 [(H/B)/(A/B)]^3]$	
			* $0,125 < H \cdot B < 7,0$ y $1 < A/B < 16$
Un cilindro vertical		$\frac{\pi l^2}{\ln \left[ \left( \frac{l}{r} \right) \left( \frac{4h+l}{4h+3l} \right)^{1/2} \right]}$	
Caballo		$I_{sc} = 17,0 + 10^{-9} h^2 E A$	
h = altura			
$C_c = 180 \mu F$			
Vaca		$I_{sc} = 17,5 + 10^{-9} h^2 E A$	
$C_c = 200 \mu F$			
Techo y silo conductores		$\frac{\pi D^2}{4} \times [1 + 8,32 \frac{H}{D} + 1,62 (\frac{H}{D})^2]$	
Total			
Techo		$\frac{\pi D^2}{4} \times [1 + 1,5 \frac{H}{D} + 2,5 (\frac{H}{D})^2]$	
Silo	límites datos empíricos $< H/D < 4$	$\frac{\pi D^2}{4} \times [5,18 \frac{H}{D} + 1,17 (\frac{H}{D})^2 - 0,35 (\frac{H}{D})^3]$	
Techo conductor, silo aislado		$\frac{\pi D^2}{4} \times [1 + 6,67 \frac{H}{D} + 0,33 (\frac{H}{D})^2]$	
Techo aislado, silo conductor	$C/B = 0,25$	$\frac{\pi D^2}{4} \times [6,5 \frac{H}{D} + 1,5 (\frac{H}{D})^2]$	
Casa aislada, techo conductor		$AB [1 + [4,7 + 0,64/(A/B)] H/B]$	
Casa conductora, techo aislado		$AB [1 + [1,92 + 4,6/(A/B)] H/B]$	
Casa y techo conductores			
Total	límites datos empíricos $4 < H/B < 3,5$ y $1 < A/B < 3,5$	$AB [1 + [3,94 + 5/(A/B)] H/B]$	
Techo		$AB [1 + [1,1 + 1,4/(A/B)] [H/B + 0,55]]$	

\* Fuente: DW. Deno "Electric and Magnetic Effects. Method of Calculation" (véase la bibliografía)

TABLA III

CAPACITANCIA A TIERRA DE DIVERSOS OBJETOS

Objeto	Capacitancia (Pf.)
Ser humano	100
Ser humano con una herramienta (un surtidor de gasolina, por ej.)	150
Vehículo pequeño	700
Automóvil compacto	800
Camioneta	900
Automóvil de tamaño grande corriente	1.000
Carretilla elevadora de horquilla	1.000
Camioneta familiar	1.200
Camión de línea	1.200
Trabajador en plataforma elevadora	1.900
Autobús escolar grande	2.000
Vehículos muy grandes y más	3.000

Fuente: D.W. Deno. "Electrostatic Effect Induction Formulae". IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vo. PAS-04, No. 5 (sept/oct 1975), pp. 1524-36.

2.1.6 Ejemplos

2.1.6.1. Caso de una cerca de 150m., 1m. sobre tierra y localizada en un punto donde el gradiente es de 5KV/m.; el alambre tiene un GMR' de 1.5mm.; se considera que las cercas están bien aisladas de tierra.

Solución:

$$V_{oc} = E \cdot h \quad (\text{voltios})$$

$$V_{oc} = 5 \text{ KV/m} \times 1 \text{ m} = 5 \text{ KV}$$

de donde:

$$I_{sc} = j \omega E h \cdot \frac{2\pi \epsilon_0}{\ln \frac{2h}{\text{GMR}'}}$$

$$\text{ó } I_{sc} = j \omega C V_{oc}$$

$$\text{pero } C_{og/m} = \frac{2\pi \epsilon_0}{\ln \frac{2h}{\text{GMR}'}} = \frac{2\pi \times 8.85 \text{ Pf/m.}}{\ln \frac{2 \times 1}{1.5 \times 10^{-3}}} = 7.73 \text{ Pf/m.}$$

de donde  $C_{og} = 7.73 \times 150 = 1159.19 \text{ pF}$

$$\text{y } I_{sc} = 2\pi f C V_{oc}$$

$$\begin{aligned} &= 2\pi \times 60 \times 1159 \times 10^{-12} \times 5 \times 10^3 \\ &= 2185021.6 \times 10^{-9} \\ &= 0.002185 \text{ Amp.} \end{aligned}$$

La energía almacenada a un voltaje pico será:

$$\begin{aligned} J &= (C) (V_{oc})^2 = 1159.19 \times 25 \times 10^6 \times 10^{-12} \\ J &= 0.02898 \text{ julios} \end{aligned}$$

2.1.6.2. En la siguiente ilustración, figura 12, podemos ver un caso aplicado a un bus de pasajeros.

Las medidas son las mostradas. Suponemos que el bus está debajo de una línea de 345 KV.

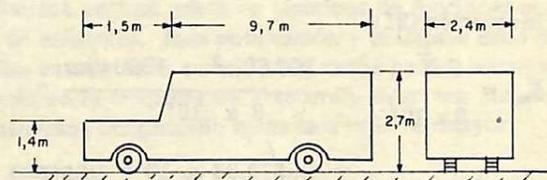


Figura 12. Dimensiones de un bus de pasajeros (aprox.) para evaluar Isc.

Solución:

Según la tabla III podemos ver que aproximadamente  $C_{og} = 2000 \text{ pF}$  un modelo físico aproximado de esta configuración sería un paralelepípedo rectangular; de donde podemos utilizar las curvas típicas de la figura 5 y así determinar los parámetros:

$$A = 9.7 \text{ m}$$

$$B = 2.4 \text{ m}$$

La altura media h será:

$$h = \frac{(1.5)(1.4) + (9.7 - 1.5)(2.7)}{9.7}$$

$$h = 2.5 \text{ m.}$$

$$AB = 9.7 \times 2.4 = 23.3 \text{ m}^2$$

$$h/B = 1.04$$

$$A/B = 4.04$$

Según la figura 5:

$$S/AB = ?$$

Tenemos que interpolar (aproximadamente): (ver figura 5)

$$\frac{8.1 - 4.3}{X - 4.3} = \frac{2 - 1}{1.04 - 1}$$



$$\frac{3.8}{X-4.3} = \frac{1}{.04}$$

$$X - 4.3 = .152$$

$$X = 4.45$$

o sea que  $S/AB = 4.45$   
 y tenemos que  $S = 4.45 \times 23.3m^2 = 103.69m^2$

Suponemos una configuración de conductor plano con espacio de fase de 9.45m y una altura de fase a tierra de 12.5 m. el campo eléctrico vertical máximo en la línea de tierra al borde de la zona de paso (a 22.86m de la línea central) sería de 1.9 KV/m.

de la ecuación (21)

$$\bar{I}_{sc} = \frac{S \bar{E}}{3 \times 10^8} = \frac{103.69m^2 \times 1900 \text{ v/m}}{3 \times 10^8}$$

$$= 65670.33 \times 10^{-8} \text{ amperios}$$

$$I_{sc} = 0.6567 \text{ mA}$$

La  $V_{oc}$  (tensión de circuito abierto) es: suponemos  $R_{og}$  muy grande.

$$V_{oc} = I_{sc} \cdot Z_{og} = I_{sc} / \omega C_{og}$$

$$= \frac{0.6567 \times 10^{-3}}{2 \times 3.142 \times 60 \times 2000 \times 10^{-12}}$$

$$= 8.70974 \times 10^2$$

$$V_{oc} = 870.97 \text{ voltios}$$

La energía en una descarga disruptiva se calcula así:

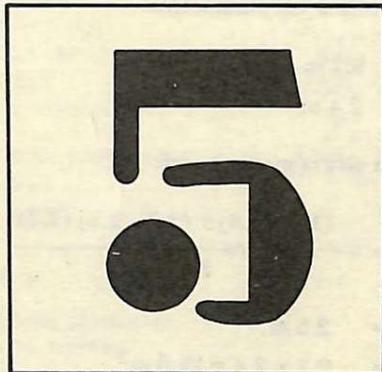
$$W = 2000 \text{ pF} \times (870.97 \text{ v})^2$$

$$= 1.5171 \times 10^{-3} \text{ julios}$$

$$W = 1.52 \text{ mJ}$$

#### Bibliografía

- GENERAL Electric Company, "Transmission line Reference Book KV and above", Projet UHV (Palo Alto, California, EUA: Electric Power Research Institute, 1975).
- D. W. Deno, "Electrostatic Effect Induction Formulae", IEEE, Vol PAS, 94 No. 5 sept/oct., 1975, pp 1524-36.
- WORKING Group on Electrostatic Effects of Transmission lines, "Electrostatic Effects of overhead Transmission lines PART I - Hazards and effects", IEEE Vol PASS 91, No. 2, marzo /abril, 1972.
- IDEM. PART II - "Methods of calculation".
- D. W. Deno, "Electric and Magnetic Effects, Method of of calculations", IEEE, Tutorial course: The Electrostatic and Electromagnetic. Effects of A C Transmission Lines, IEEE pub No. 79 EH0145-3 PWR, 1975.



**CINCO LTDA.**  
**INGENIEROS CIVILES**

**SOCIOS:**

**Ing. Luis Carlos Restrepo A.**

**Ing. Rafael Núñez M.**

**Ing. Gustavo Acosta D.**

**Avenida Nutibara No. 72-55**

**Teléfonos: 437386 - 483361 - 482230**

**Medellín - Colombia**