

EM 719 Ingeniería de Alta Tensión
Pauta Ejercicio N°1

31 de marzo de 2005
Tiempo 1,5 hrs

Prof.: Nelson Morales
Con apuntes

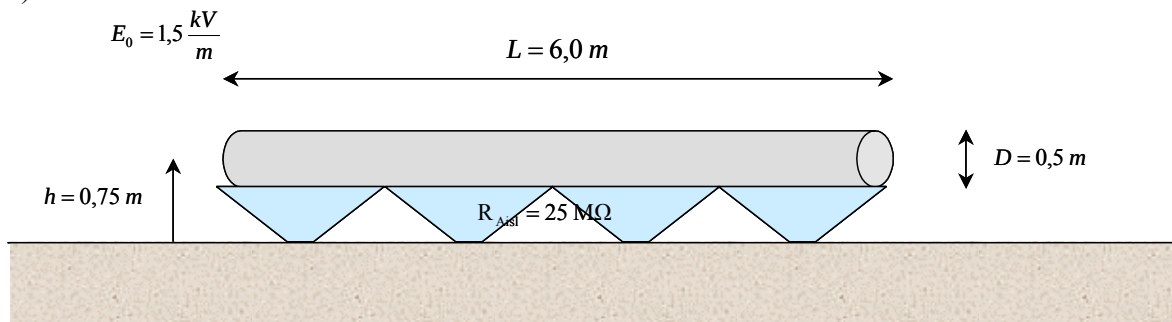
Problema 1.

En dirección paralela al eje de una línea de transmisión, se está instalando una tubería de acero para transporte de fluidos. Durante el proceso de montaje, un trozo de 6 m de longitud de la tubería quedó transitoriamente a 0,5 m sobre el suelo, reposando sobre unos soportes que pueden considerarse aislantes, con resistencia de aislamiento distribuida y de valor estimado total 25 Mega Ohms. La tubería tiene un diámetro de 0,5 m.

a) Si en esta posición se ha medido previamente un campo eléctrico no perturbado de 1,5 kV/m, determine V_0 , C_0 e I_0 para el trozo de tubería.

b)Cuál sería el valor de **corriente transitoria** que se descargaría a través de una persona que toca la tubería y está en contacto con tierra? Suponga $R_h = 1000$ Ohms para la persona.

a)

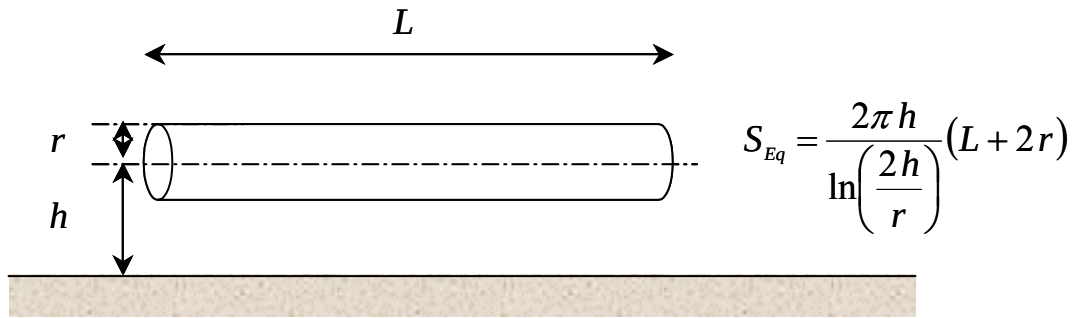


Considerando el diagrama de la figura se consideran las variables geométricas para el conductor, es este caso la tubería, de tal forma de obtener la capacidad C_0 de un equivalente de placas planas paralelas. Lo anterior permite determinar la magnitud de la corriente eléctrica inducida en forma permanente con la siguiente expresión:

$$I_0 = j \omega \varepsilon_0 S_{Eq} E_0$$

donde E_0 representa el campo eléctrico no perturbado.

Luego el primer paso es determinar la superficie equivalente de exposición al campo eléctrico del condensador equivalente de placas planas paralelas con la siguiente expresión:



$$\Rightarrow S_{Eq} = \frac{2\pi * 0,75}{\ln\left(\frac{2 * 0,75}{0,25}\right)} (6 + 2 * 0,25) = 17,095 \text{ m}^2$$

$$\therefore I_0 = j\omega\epsilon_0 S_{Eq} E_0 = j2\pi * 50 * \frac{10^{-9}}{36\pi} * 17,095 * 1,5 * 10^3 = j71,23 \mu A$$

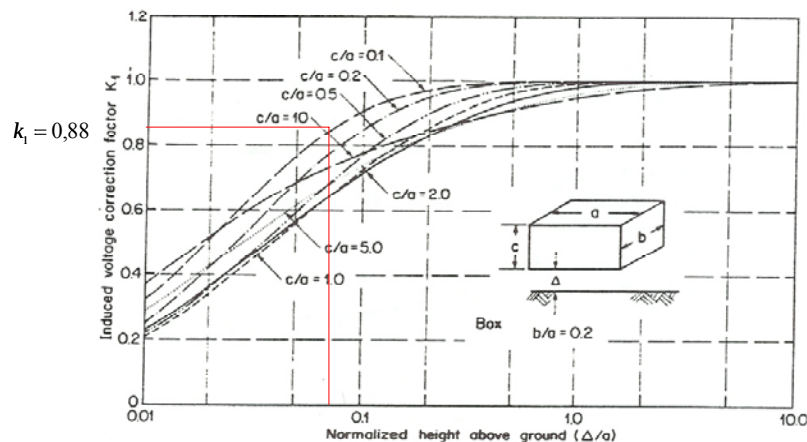
Ahora se debe calcular el voltaje de circuito abierto V_0 para objetos que ocupan un volumen, es decir, incorporando un factor de corrección k_I que es función del objeto.

$$V_0 = k_I E_0 h$$

Para la determinación de k_I se debe realizar en forma gráfica, utilizando las dimensiones de la tubería y buscando el más representativo, que ente caso corresponde de un paralelepípedo (caja), tal como se muestra a continuación.

$$a = 6,0 \text{ m} \quad b = c = 0,5 \text{ m} \quad \Delta = 0,5 \text{ m}$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta}{a} = \frac{0,5}{6,0} = 0,0833 \quad \wedge \quad \frac{c}{a} = \frac{0,5}{6,0} = 0,0833$$



$$\Rightarrow k_1 = 0,88$$

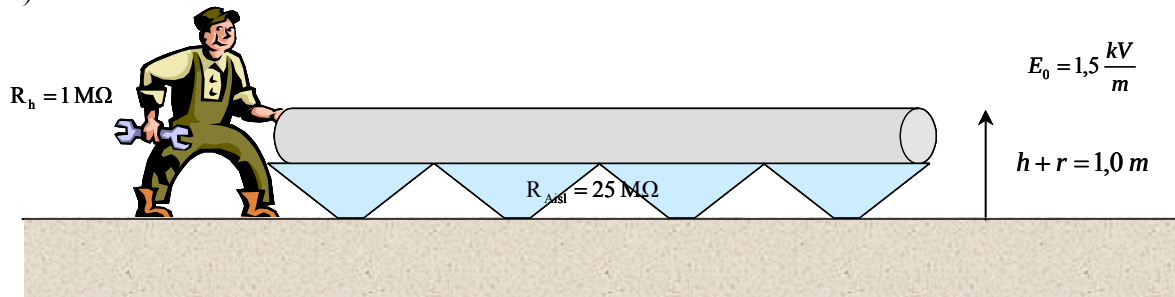
$$\therefore V_0 = k_1 E_0 h = 0,88 * 1,5 * 10^3 * 0,75 = 990 \quad V \approx 1kV$$

Finalmente se puede determinar la capacidad del objeto C_0

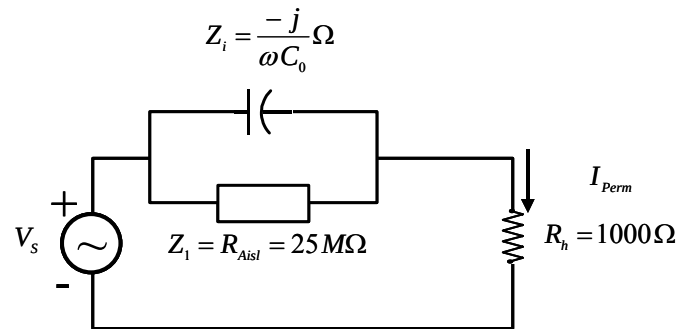
$$I_0 = j \omega C_0 V_0$$

$$\Rightarrow C_0 = \frac{I_0}{j \omega V_0} = \frac{j 71,23 * 10^{-6}}{j 2\pi * 50 * 1 * 10^3} = 226,73 \text{ pF}$$

b)



Para el caso de determinara la corriente transitoria máxima que circula por una persona en contacto con la tubería, es determinar la corrección del voltaje interno del circuito de la figura, y que permite determinar la corriente permanente.



Del circuito anterior rescatamos la expresión para V_s

$$V_s = \frac{Z_i * Z_1}{Z_i + Z_1} I_0 = \frac{\frac{-j}{\omega C_0} * 25 * 10^6}{\frac{-j}{\omega C_0} + 25 * 10^6} * j 71,23 * 10^{-6}$$

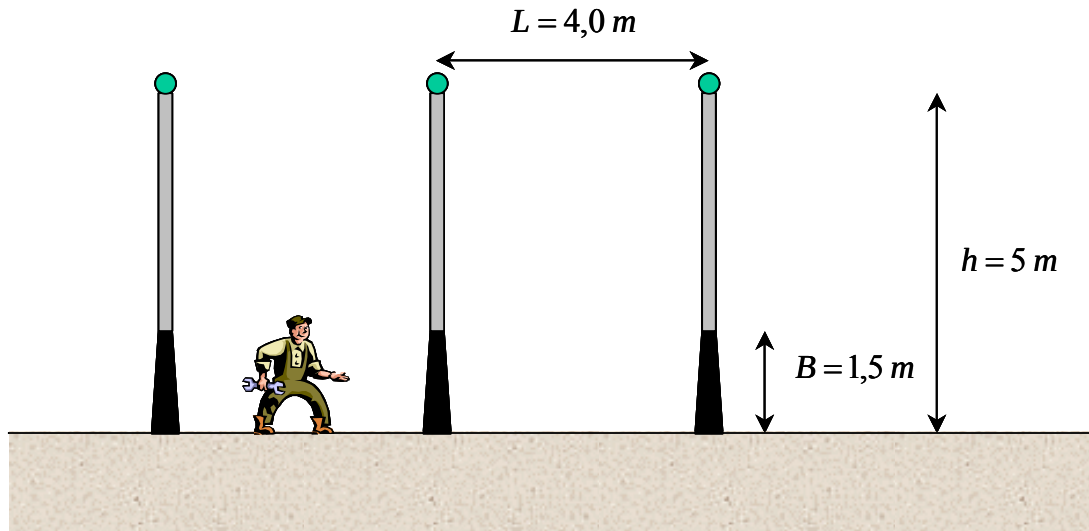
$$V_s = 871,925 \angle -60,68^\circ \text{ V}$$

$$\therefore I_{Trans_Max} = \frac{V_s}{R_h} = \frac{871,925}{1000} = 0,872 \text{ A}$$

Problema 2

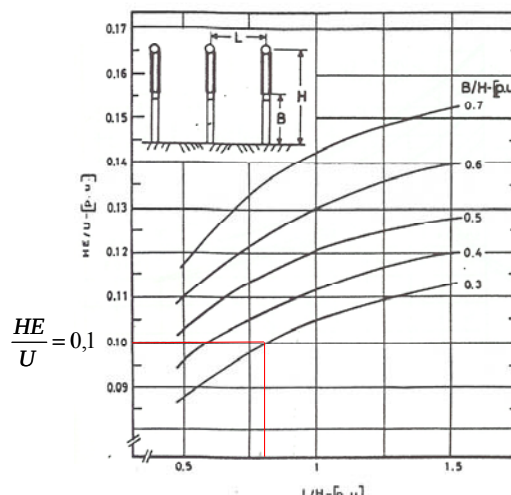
En el interior de una subestación de 220 kV y bajo un grupo de cuchillos energizados, montados sobre aisladores de pedestal, se encuentra una persona, en contacto directo con tierra. Determine el valor de la **corriente de régimen permanente** que dicha persona deriva a tierra, conociendo los siguientes datos:

- Altura del conductor: 5m
- Altura de la estructura metálica de soporte: 1,5m
- Altura de aislador: 3,5m
- Separación entre fases: 4m
- Resistencia de la persona: 1000 Ω



Para la configuración de la figura se debe establecer el campo eléctrico no perturbado en las proximidades de la persona. Para lo anterior se utilizan los siguientes datos y la siguiente curva.

$$L = 4,0\text{ m} \quad H = 5,0\text{ m} \quad B = 1,5\text{ m}$$
$$\Rightarrow \frac{L}{H} = \frac{4,0}{5,0} = 0,8 \quad \wedge \quad \frac{B}{H} = \frac{1,5}{5,0} = 0,3$$



$$\Rightarrow \frac{HE}{U} = 0,1$$

$$\therefore E = \frac{0,1 * U}{H} = \frac{0,1 * 220 * 10^3}{5} = 4,4 \text{ kV}$$

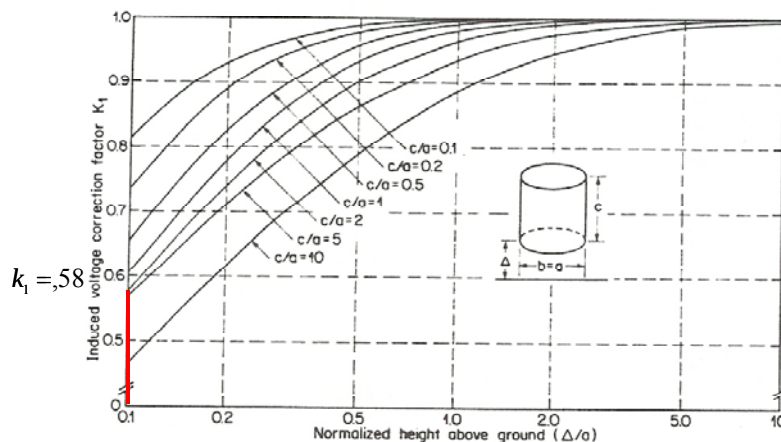
Para la determinación del atención se utiliza la siguiente expresión

$$V_0 = k_1 E_0 h$$

y en este caso particular se puede asimilar a la persona a un tubo vertical de altura 1,7 m., y de diámetro 0,5 m., con lo cual se puede determinar la constante k_1 a partir del siguiente gráfico.

$$a = b = 0,5 \text{ m} \quad c = 1,7 \text{ m} \quad \Delta = 0,05 \text{ m}$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta}{a} = \frac{0,05}{0,5} = 0,1 \quad \wedge \quad \frac{c}{a} = \frac{1,7}{0,5} = 3,4$$

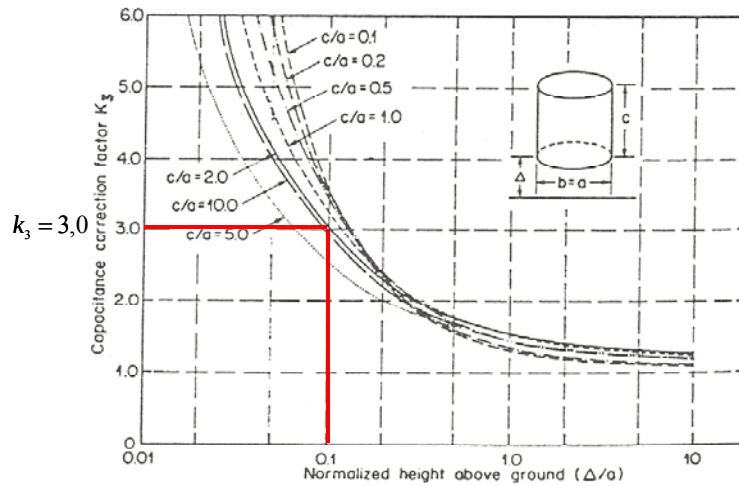


$$2 < \frac{c}{a} < 5$$

$$\Rightarrow k_1 = 0,58$$

$$\therefore V_0 = k_1 E_0 h = 0,58 * 4,4 * 10^3 * 1,7 = 4,3384 \text{ kV}$$

y para poder determinar la corriente permanente por la persona se necesita adicionalmente la constante k_3 , para poder determinar la capacidad asociada a la persona, tal cual se muestra en el siguiente gráfico.

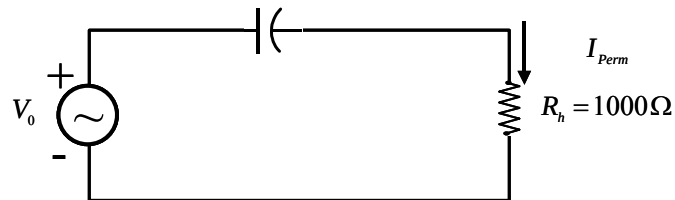


$$2 < \frac{c}{a} < 10$$

$$\Rightarrow k_3 = 3,0$$

$$\therefore C_0 = k_3 4\pi\epsilon_0 \frac{a+b+c}{3} = 3,0 * 4\pi * \frac{10^{-9}}{36\pi} * \frac{0,5 + 0,5 + 1,7}{3} = 300,0 \text{ pF}$$

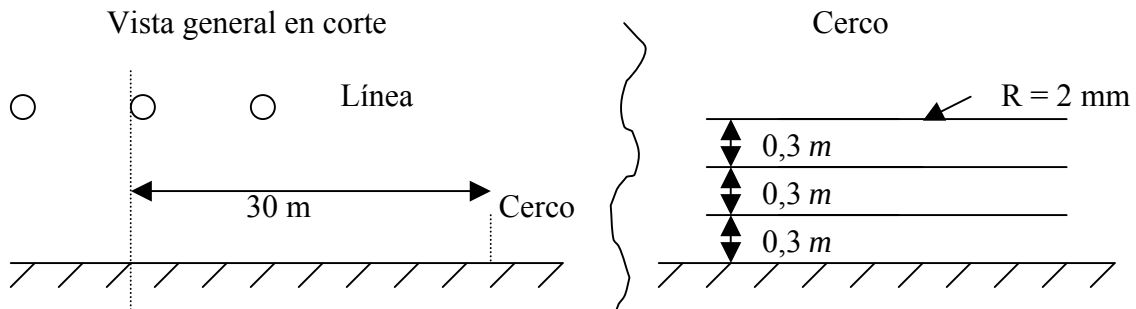
$$Z_i = \frac{-j}{\omega C_0} = \frac{-j}{2\pi * 50 * 300 * 10^{-12}} \Omega$$



$$I_{Perm} = \frac{V_0}{|Z_i + R_h|} = \frac{4338,4}{|-j10610329,54 + 1000|} = 0,409 \text{ mA}$$

Problema 3

Un cerco de alambre soportado sobre pilares de concreto, se construye paralelo al eje de una línea de alta tensión y a 30 m. de éste, según el dibujo siguiente:



El campo eléctrico en esa posición, es 1 kV/m.

- Si los pilares de concreto están secos, puede considerarse alambres aislados de tierra. Determine el voltaje inducido por efecto electrostático sobre cada alambre.
- Si los pilares de concreto están humedecidos por lluvia, puede considerarse todos los alambres directamente conectados a tierra. ¿Cuál es la máxima corriente que puede derivar a tierra el cerco en régimen permanente?

a)

Para este caso se puede considerar la tensión sobre cada alambre del cerco como:

$$V_1 = h_1 * E_0 = 0,9 * 1000 = 900 \quad V$$

$$V_2 = h_2 * E_0 = 0,6 * 1000 = 600 \quad V$$

$$V_3 = h_3 * E_0 = 0,3 * 1000 = 300 \quad V$$

Adicionalmente para calcular la capacidad de cada uno de los alambres que forma el cerco, se utiliza la expresión del cilindro horizontal que entrega la capacidad por unidad de longitud.

$$C_0 = \frac{4\pi\epsilon_0}{\ln\left\{\frac{h + \sqrt{h^2 - r^2}}{h - \sqrt{h^2 - r^2}}\right\}}$$

Y en particular para este caso se obtiene:

$$C_{0-1} = \frac{4\pi\epsilon_0}{\ln\left\{\frac{h_1 + \sqrt{h_1^2 - r^2}}{h_1 - \sqrt{h_1^2 - r^2}}\right\}} = \frac{4\pi \frac{10^{-9}}{36\pi}}{\ln\left\{\frac{0,9 + \sqrt{(0,9)^2 - (0,002)^2}}{0,9 - \sqrt{(0,9)^2 - (0,002)^2}}\right\}} = 8,167 \quad pF/m$$

$$C_{0_2} = \frac{4\pi\epsilon_0}{\ln\left\{\frac{h_2 + \sqrt{h_2^2 - r^2}}{h_2 - \sqrt{h_2^2 - r^2}}\right\}} = \frac{4\pi\frac{10^{-9}}{36\pi}}{\ln\left\{\frac{0,6 + \sqrt{(0,6)^2 - (0,002)^2}}{0,6 - \sqrt{(0,6)^2 - (0,002)^2}}\right\}} = 8,685 \text{ pF/m}$$

$$C_{0_3} = \frac{4\pi\epsilon_0}{\ln\left\{\frac{h_3 + \sqrt{h_3^2 - r^2}}{h_3 - \sqrt{h_3^2 - r^2}}\right\}} = \frac{4\pi\frac{10^{-9}}{36\pi}}{\ln\left\{\frac{0,3 + \sqrt{(0,3)^2 - (0,002)^2}}{0,3 - \sqrt{(0,3)^2 - (0,002)^2}}\right\}} = 9,740 \text{ pF/m}$$

Con lo que finalmente se puede determinar V_0 , para el caso aislado

$$V_0 = \frac{C_{0_1}V_1 + C_{0_2}V_2 + C_{0_3}V_3}{C_{0_1} + C_{0_2} + C_{0_3}}$$

$$V_0 = \frac{8,167 * 900 + 8,685 * 600 + 9,740 * 300}{8,167 + 8,685 + 9,740} * \frac{10^{-12}}{10^{-12}} = 582,25 \text{ V}$$

b)

Cuando los pilares están húmedos se puede establecer la siguiente expresión.

$$I_0 = j\omega(C_{10}V_1 + C_{20}V_2 + C_{30}V_3) * L_{\text{Pilares}}$$

$$I_0 = j2\pi * 50 * (8,167 * 900 + 8,685 * 600 + 9,740 * 300) * 10^{-12} * L_{\text{Pilares}}$$

$$\therefore I_0 = j4,86 * 10^{-9} L_{\text{Pilares}}$$

$$L_{\text{Pilares}} = 20 \text{ m}$$

$$\Rightarrow I_0(L_{\text{Pilares}} = 20) = 4,86 * 10^{-9} * 20 = 9,728 * 10^{-8} \text{ A}$$

$$L_{\text{Pilares}} = 30 \text{ m}$$

$$\Rightarrow I_0(L_{\text{Pilares}} = 30) = 4,86 * 10^{-9} * 30 = 1,459 * 10^{-7} \text{ A}$$