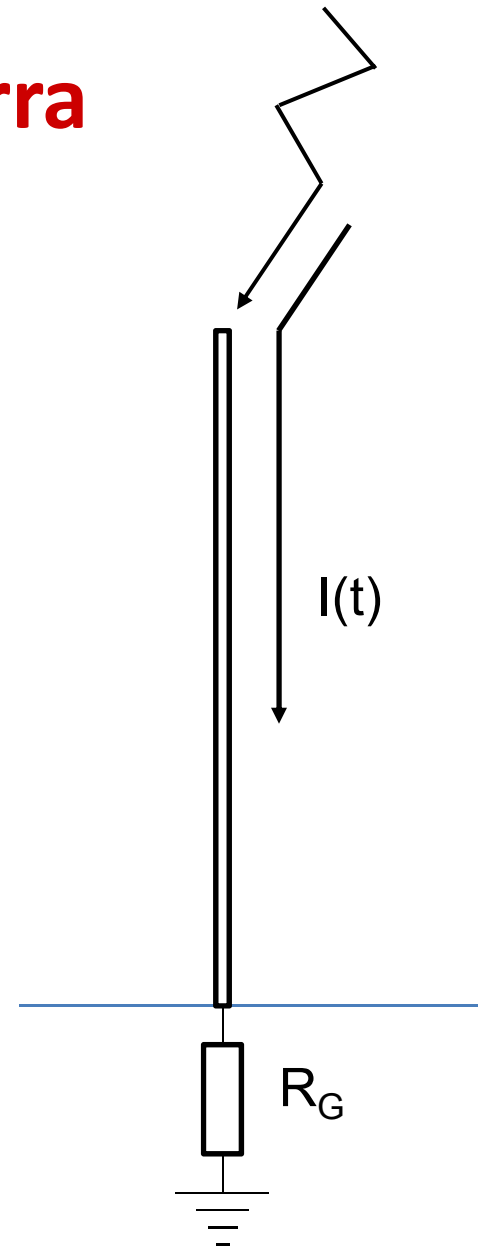
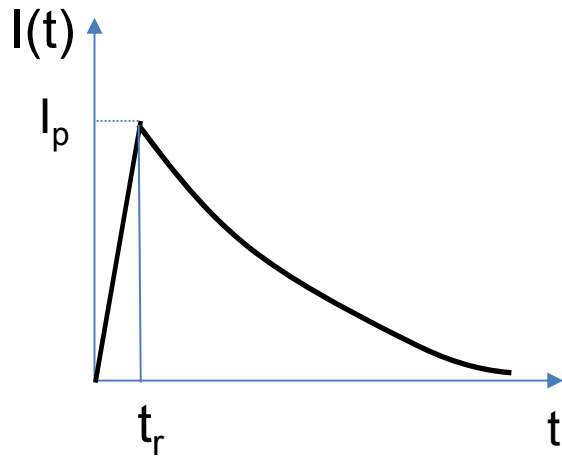
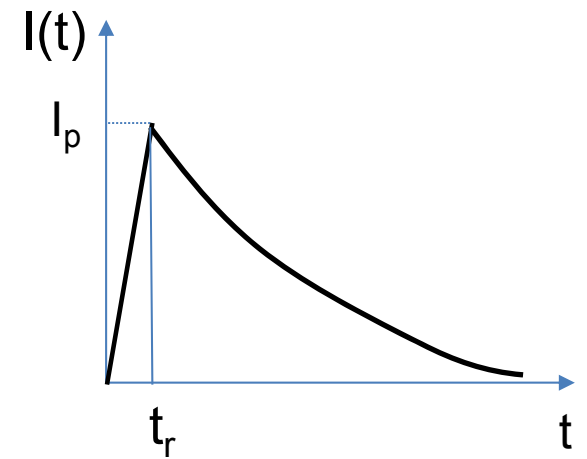
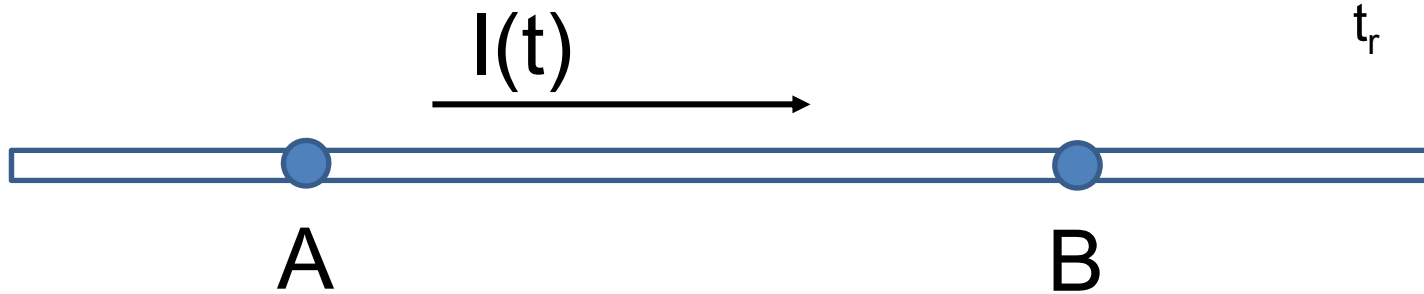


# Conductores de bajada a tierra

Objetivo:  
Conducir la corriente del rayo a tierra  
en forma controlada.

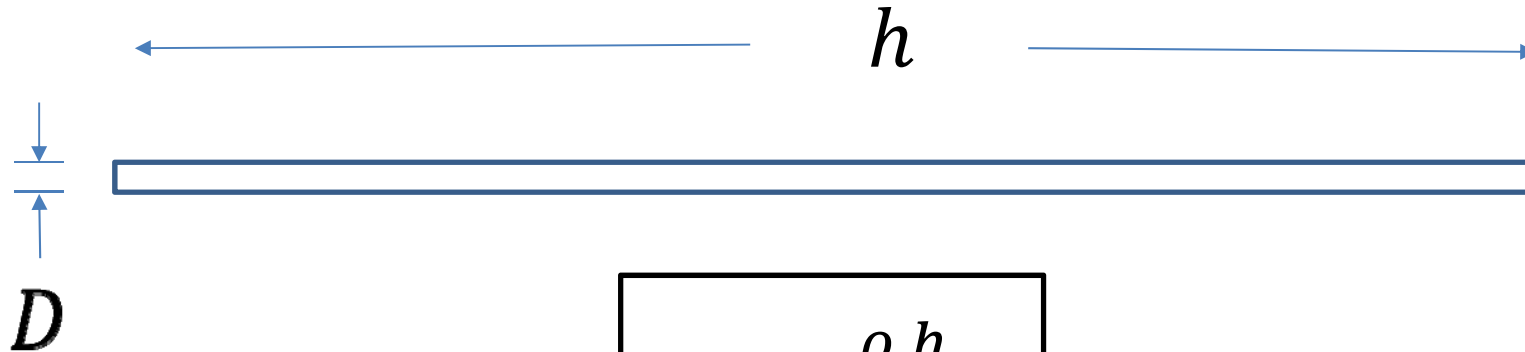


# Resistencia R de un conductor



$$U_A - U_B = R I$$

# Resistencia de un conductor:



$$R = \frac{\rho h}{S}$$

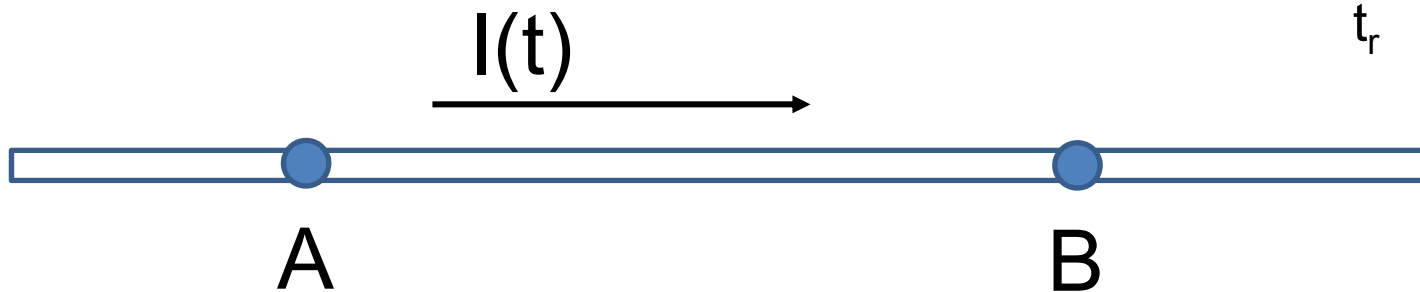
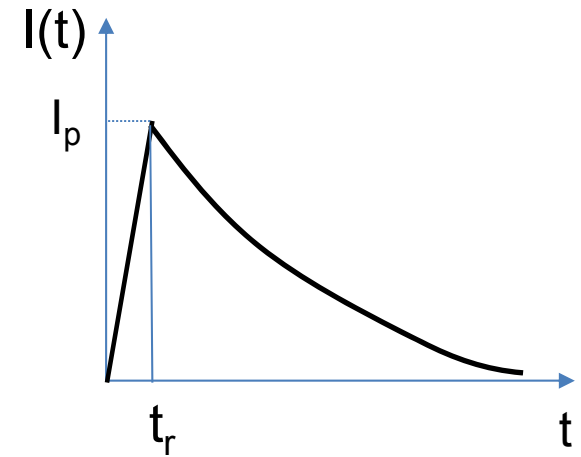
$S$ : Área de la sección ;  $S = \frac{\pi D^2}{4}$

$\rho$ : Resistividad, depende del material

Cobre:  $0.017 \frac{\text{Ohm mm}^2}{\text{m}}$

Hierro galvanizado:  
 $0,1 - 0,2 \frac{\text{Ohm mm}^2}{\text{m}}$

# Inductancia L de un conductor

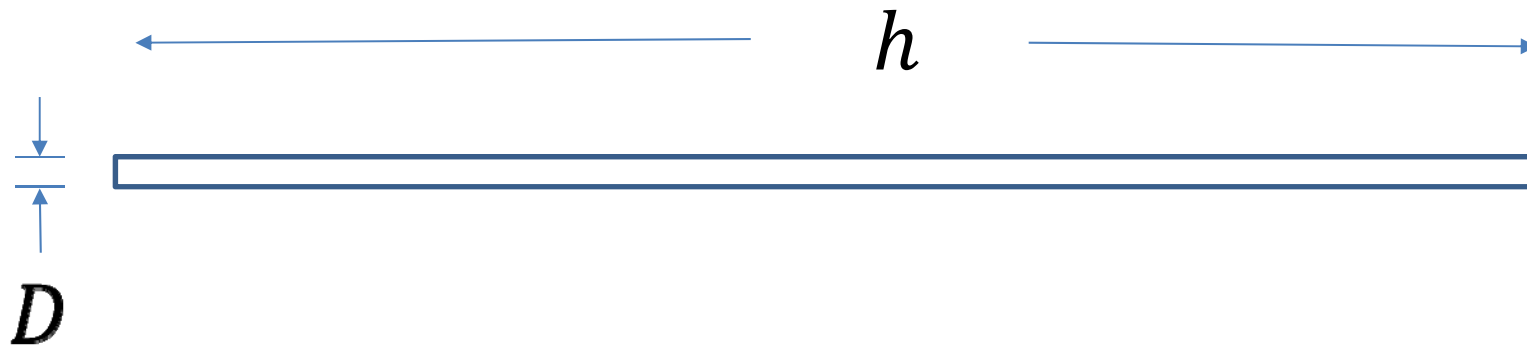


$$U_A - U_B = L \frac{dI}{dt}$$

En la subida, entre 0 y  $t_r$  :

$$U_A - U_B \approx L \frac{I_p}{t_r}$$

## Inductancia de un conductor:

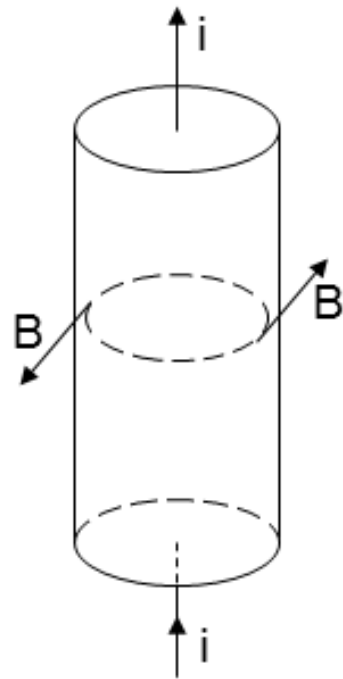


$$L \approx 0,46 h \log_{10} \frac{4h}{D}$$

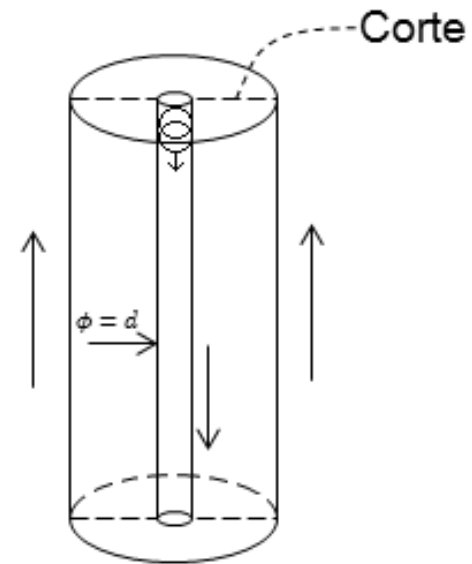


No depende del material

# Inductancia de un conductor rectilíneo (1)

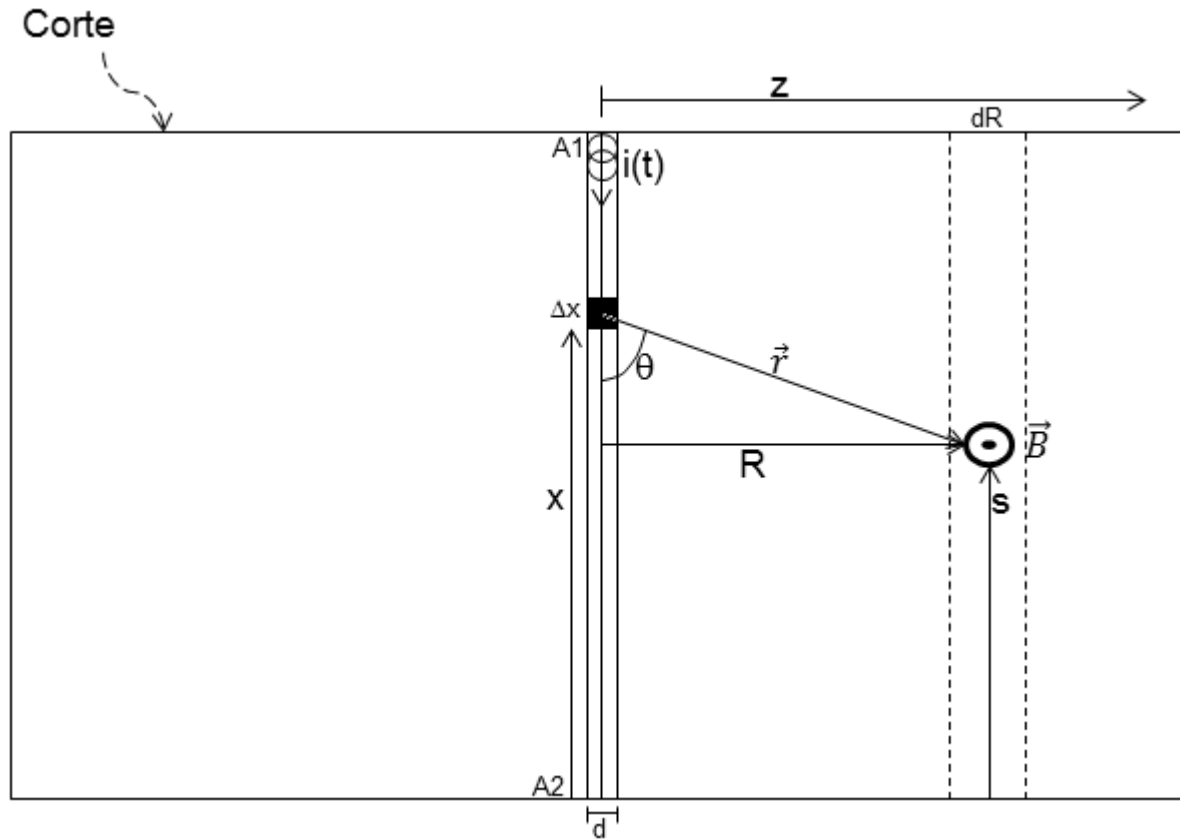


Cilindro hueco con corriente  
circulando por el exterior



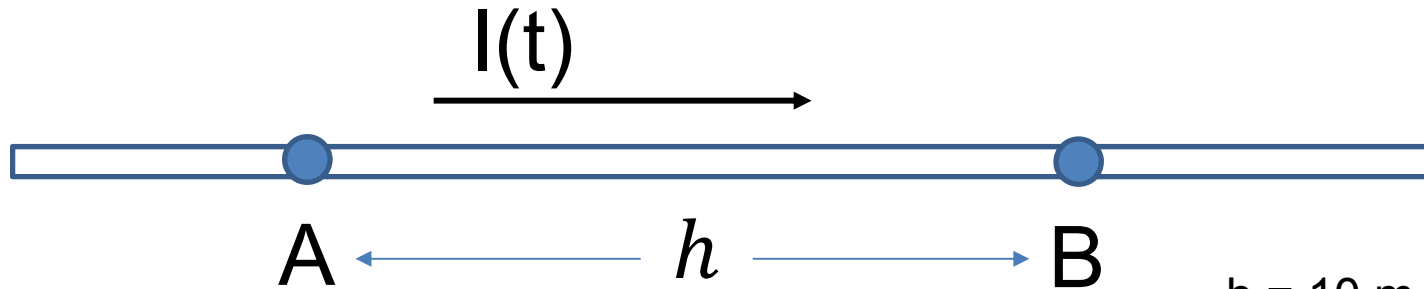
Conductor con  
camino de retorno

# Inductancia de un conductor rectilíneo (2)



Conductor con camino de retorno - CORTE

# Ejemplo de cálculo:



$$h = 10 \text{ m}$$

$$D = 10 \text{ mm}$$

$$\rho = 0,017 \frac{\text{Ohm mm}^2}{\text{m}}$$

$$I_p = 10 \text{ kA}$$

$$R = \frac{\rho h}{S} = 0,0022 \text{ Ohm}$$

$$L \approx 0,46 h \log_{10} \frac{4h}{D} = 16 \mu\text{H}$$

$$U_A - U_B = L \frac{dI}{dt} + R I$$

Cortocircuito  
A tierra de red  
50 Hz :

$$L \frac{dI}{dt} = L 2 \pi f I = 52 \text{ V}$$

$$R I = 0,0022 * 10000 = 22 \text{ V}$$

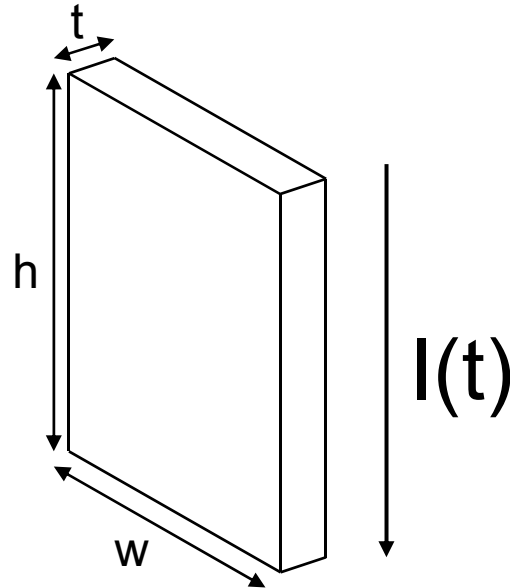
Rayo  
Con tr = 1  $\mu\text{s}$  :

$$L \frac{dI}{dt} = L \frac{I_p}{t_r} = \mathbf{160000 \text{ V}}$$

$$R I = 0,0022 * 10000 = 22 \text{ V}$$



## Conductor en forma de cinta o chapa:



$$L_{cinta} = 0,46(h) \log_{10} \left( \frac{2h}{w + t} \right) + (0,1)h + 0,045(w + t)$$

# Ejemplo de cálculo:

Chapa galvanizada de 2 m de altura, 1 m de ancho y 0,3 mm de espesor

$$\begin{aligned}
 h &= 2 \text{ m} \\
 w &= 1 \text{ m} \\
 t &= 0,3 \text{ mm} \\
 \rho &= 0,15 \frac{\text{Ohm mm}^2}{\text{m}}
 \end{aligned}$$

|  |
|--|
| <p>Rayo con:<br/> <math>t_r = 1 \mu\text{s}</math><br/> <math>I_p = 10\text{kA}</math></p> |
|--|

$$\begin{aligned}
 R_{chapa} &= \frac{\rho h}{S} = \frac{\rho h}{wt} = 1 \text{ m}\Omega; & L_{chapa} &= 0,8 \mu\text{H} \\
 U_{chapa} &\approx L_{chapa} \frac{dI(t)}{dt} \\
 &\Rightarrow U_{chapa} \approx \mathbf{8000V}
 \end{aligned}$$

Cable de cobre con la misma resistencia eléctrica que la chapa:

$$\begin{aligned}
 R_{chapa} &= 1 \text{ m}\Omega \\
 R_{cable} &= 1 \text{ m}\Omega = \frac{4h\rho}{\pi D^2} \\
 \Rightarrow D &= \sqrt{\frac{4h\rho}{\pi R_{cable}}} = 6,6 \text{ mm} \\
 S &= \frac{\pi D^2}{4} = 34 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

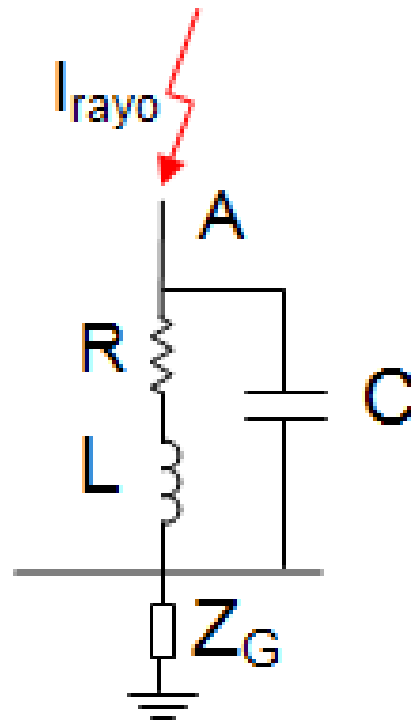
$$\begin{aligned}
 L_{cable} &= 2,83 \mu\text{H} \\
 U_{cable} &\approx L_{cable} \frac{dI(t)}{dt} \\
 &\Rightarrow U_{cable} \approx \mathbf{28300V}
 \end{aligned}$$

Si tuviera la misma sección S:

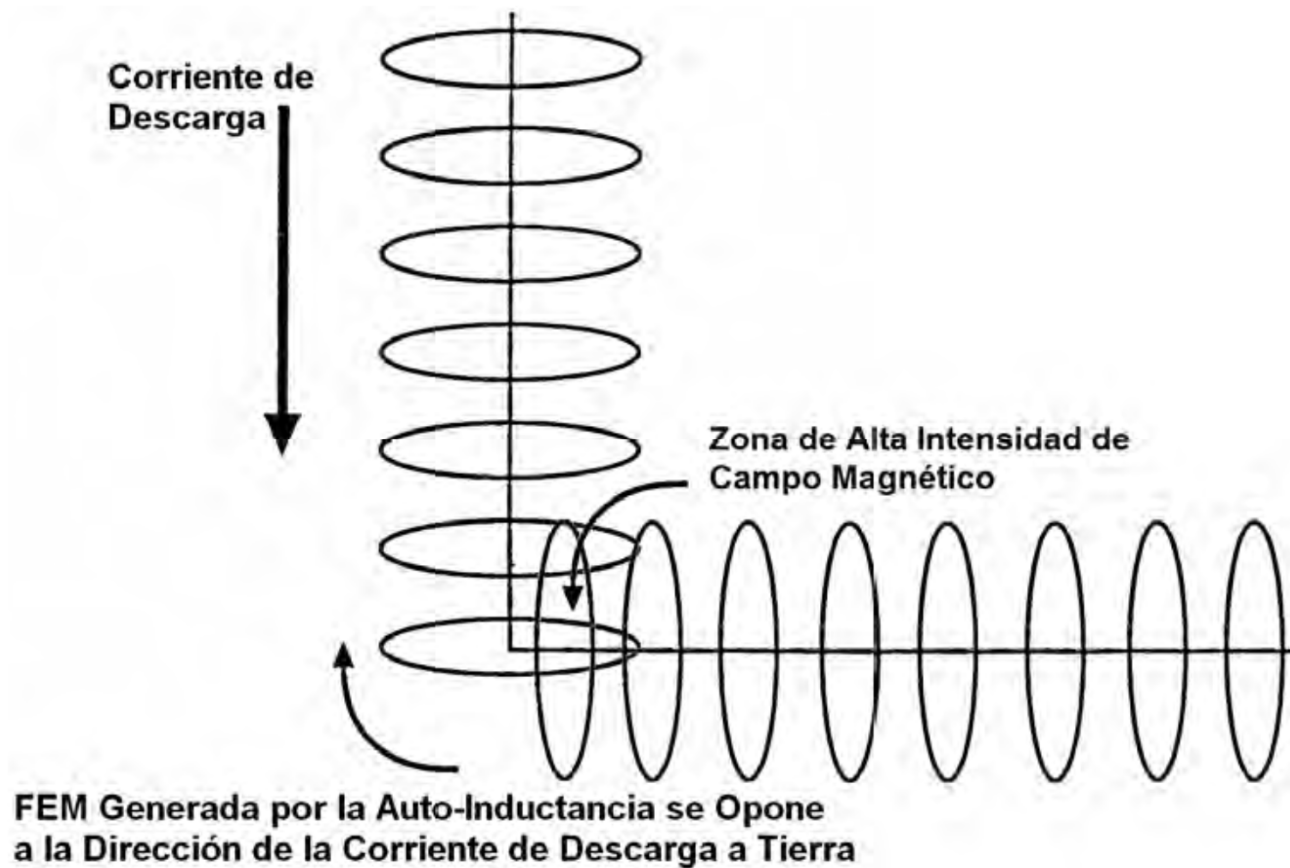
$$D = 19,5 \text{ mm}, L_{cable} = 2,4 \mu\text{H}$$

$$\Rightarrow U_{cable} \approx \mathbf{24000V}$$

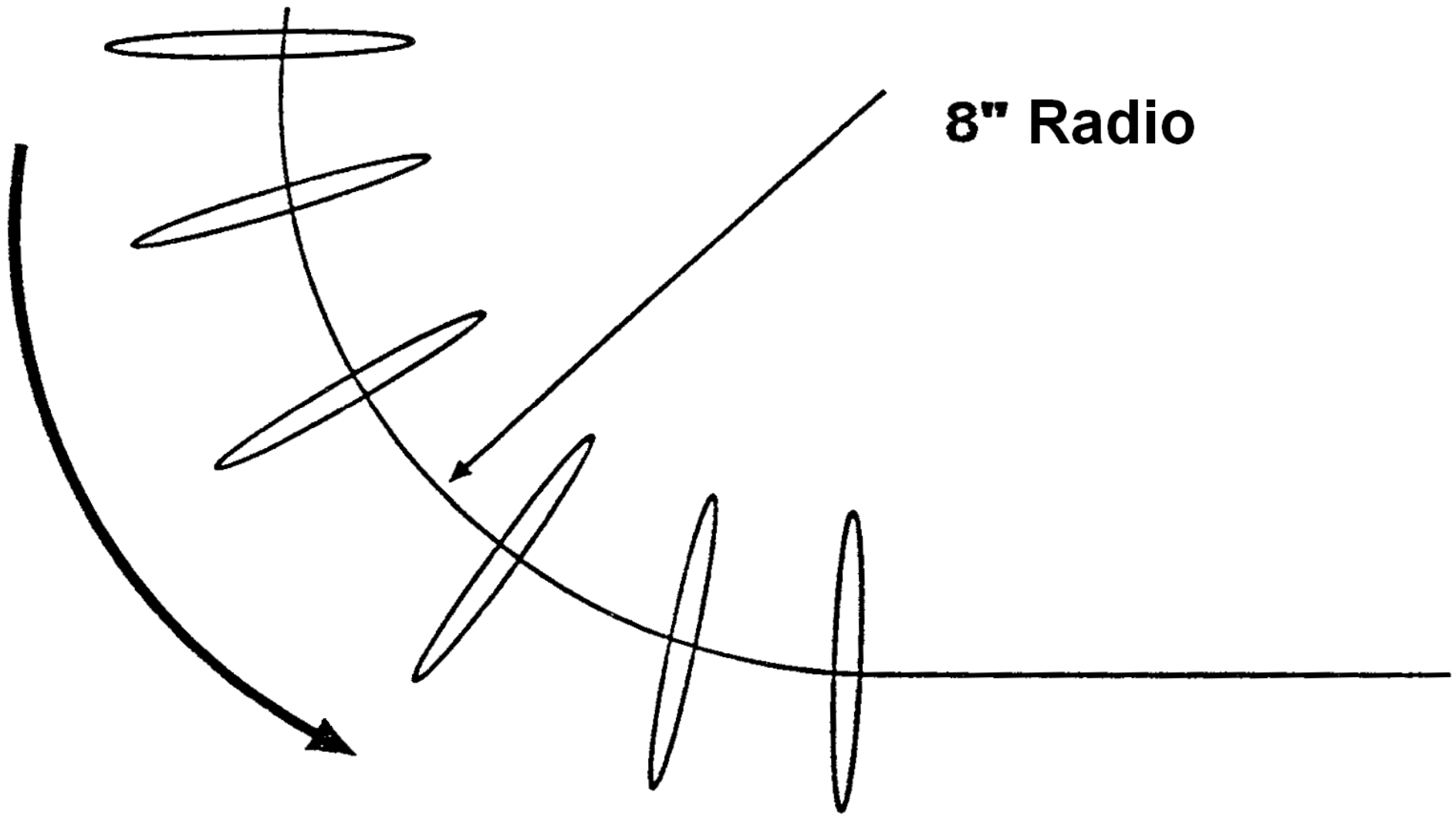
# Modelo de captor y bajada a tierra vertical rectilínea



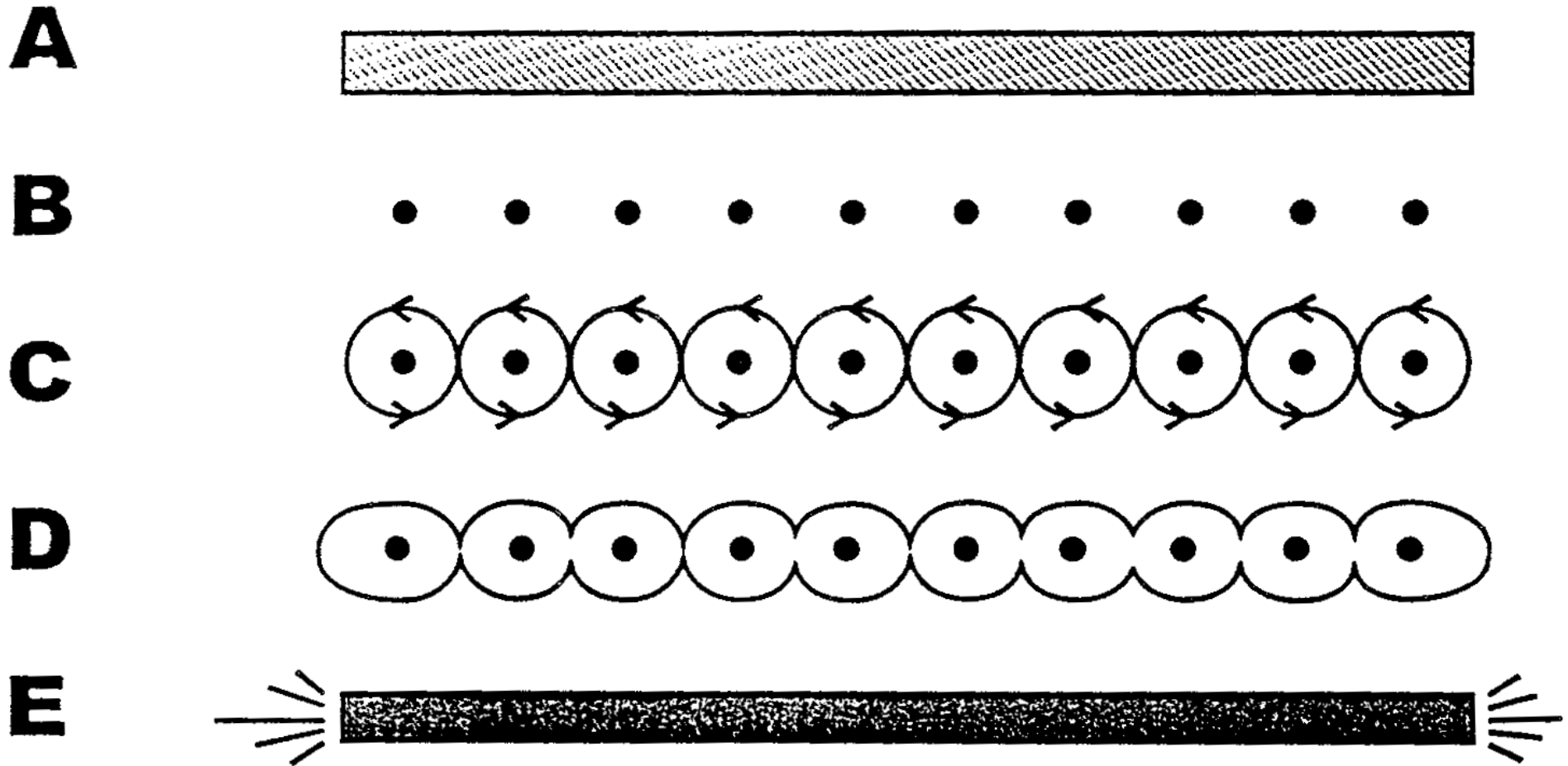
# Comportamiento de los ángulos:



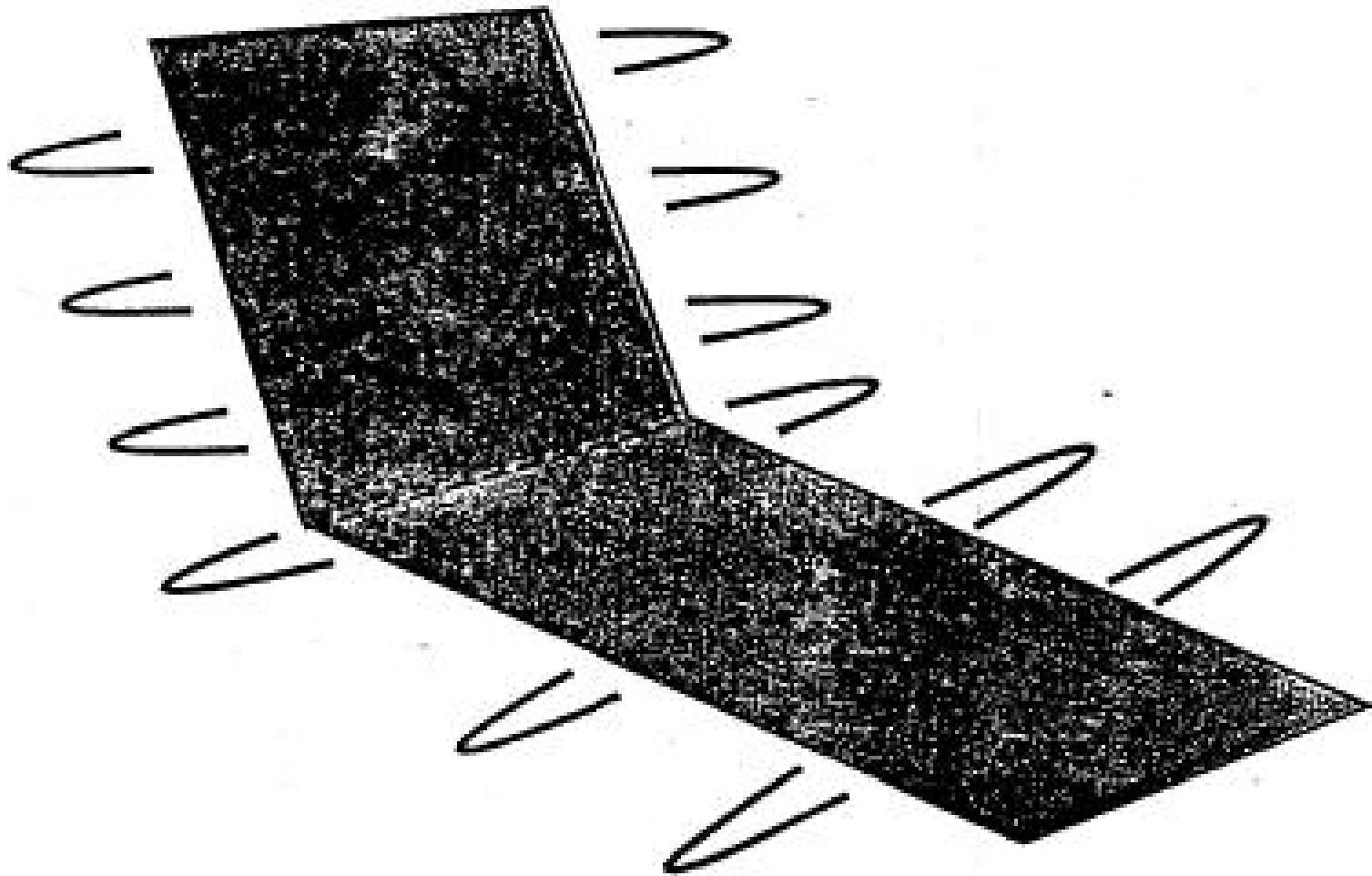
# Forma de disminuir la inductancia agregada por ángulos. Recomendación NFPA 780



# Campo en un conductor plano

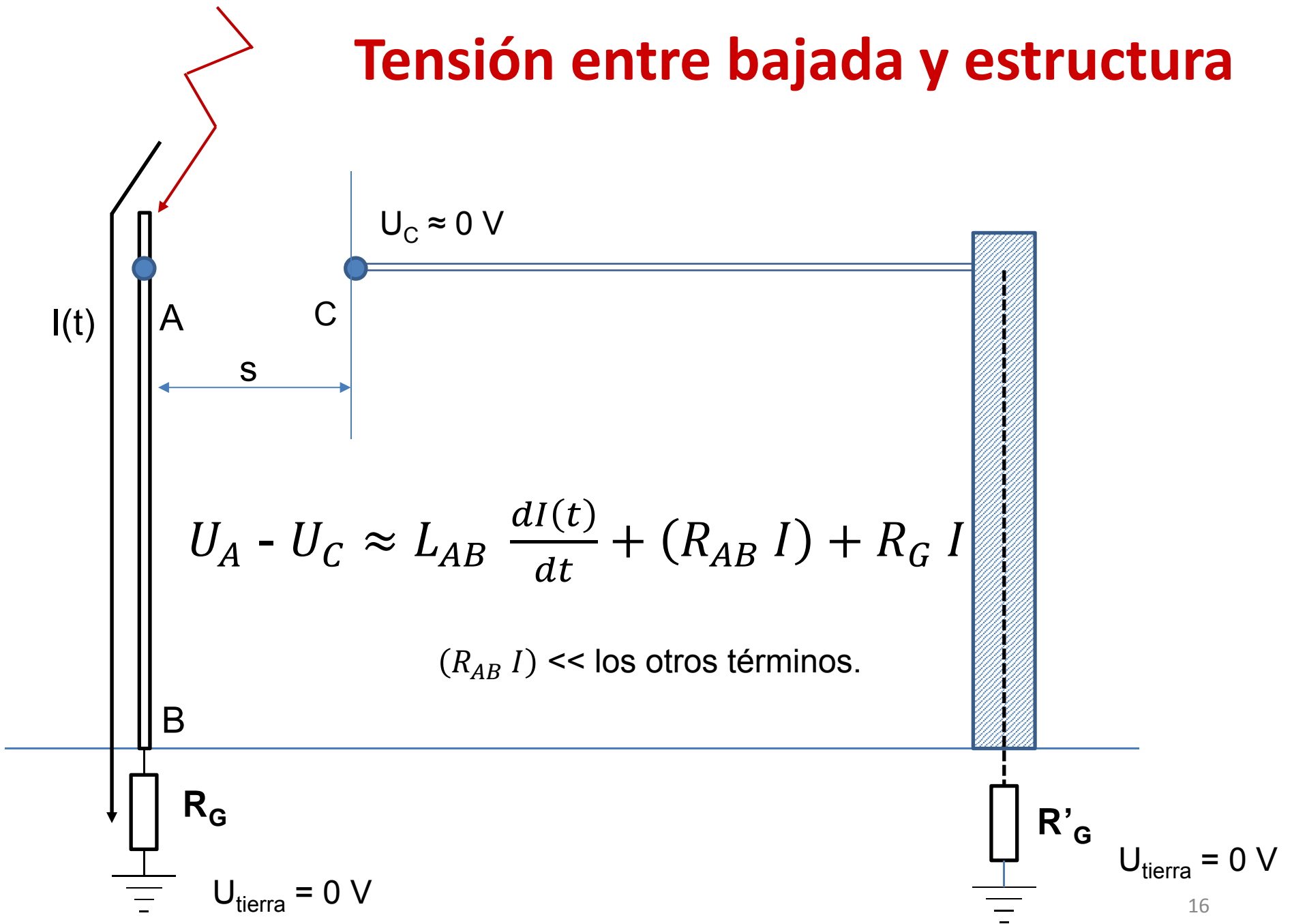


**Los campos magnéticos en conductores planos son más intensos en los bordes**



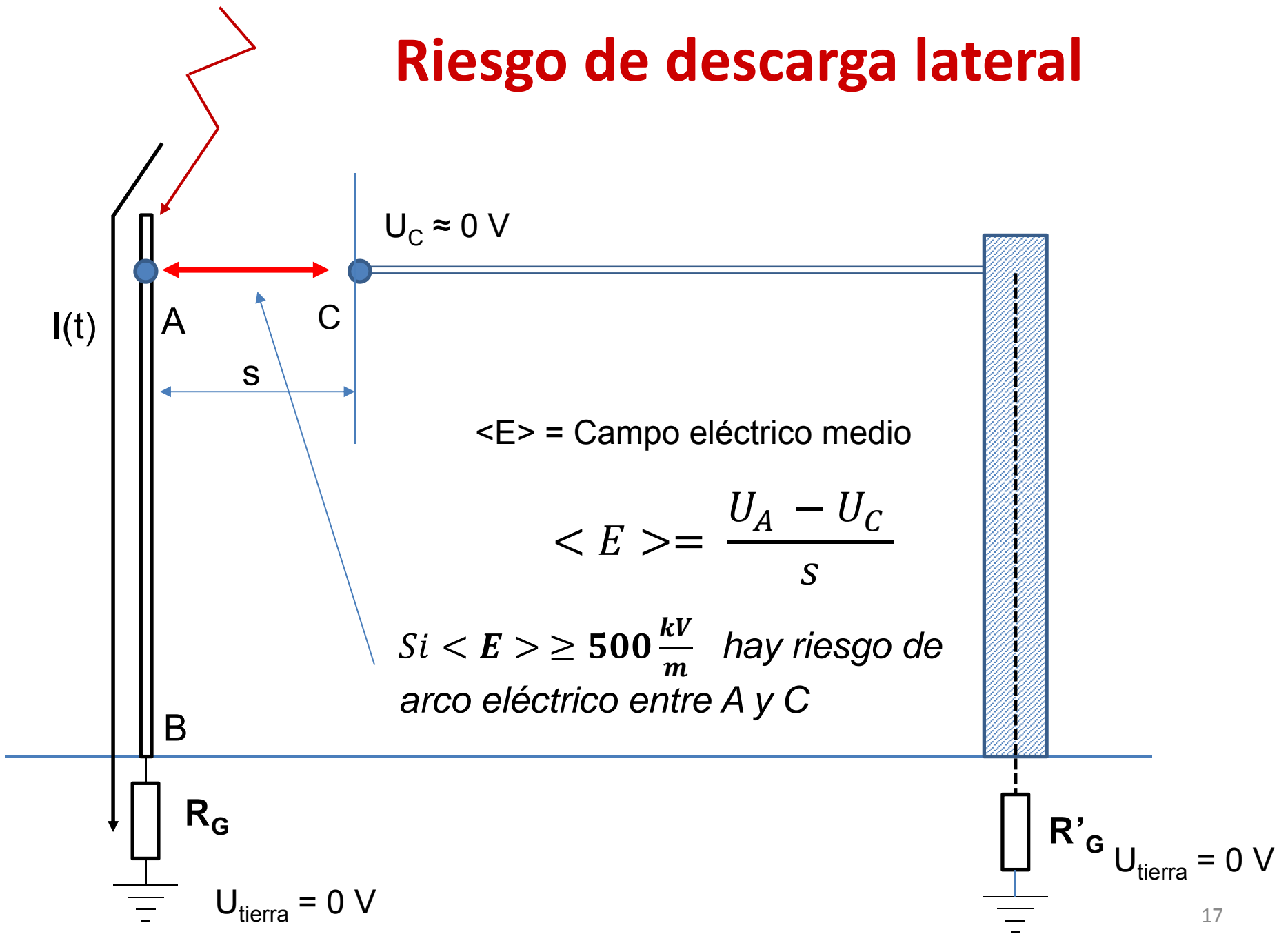
Proc.: Polyphaser

# Tensión entre bajada y estructura





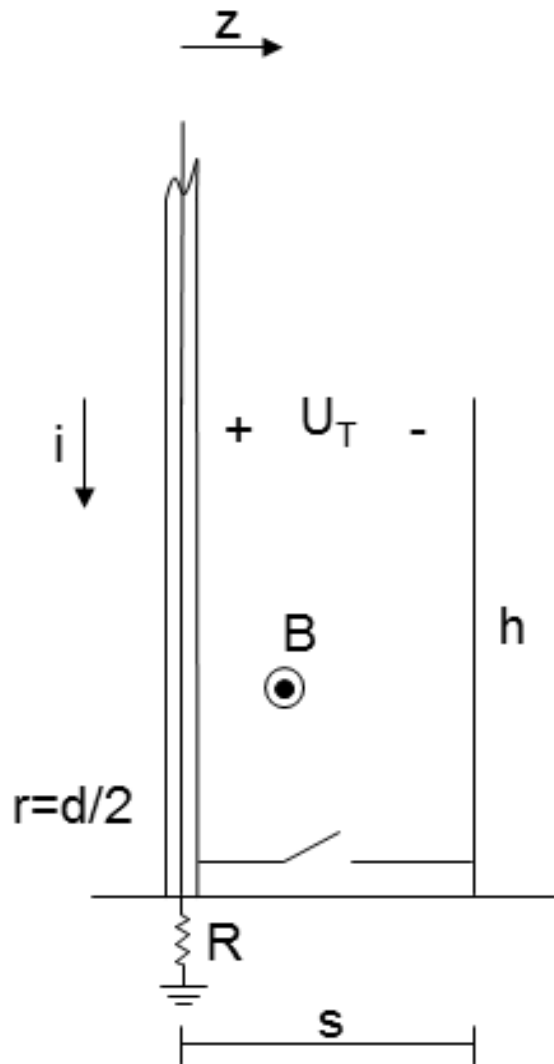
# Riesgo de descarga lateral



# Riesgo de descarga lateral



# Riesgo de descarga lateral a un conductor próximo



Con la llave cerrada:

$$U_T = M_T \frac{di}{dt} \approx M_T \frac{I_p}{t_r}$$

siendo  $M_T = \left[ 0,46h \log_{10} \left( \frac{s}{r} \right) \right]$

Con la llave abierta:

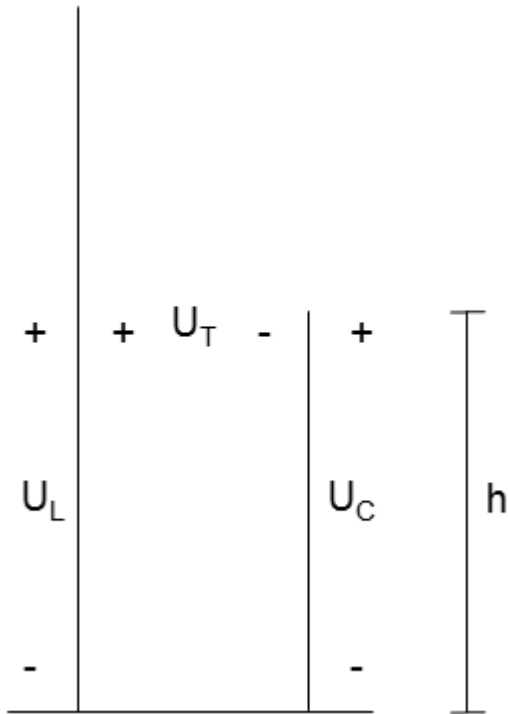
$$U_T = M_T \frac{di}{dt} + Ri(t)$$

# Riesgo de descarga al techo





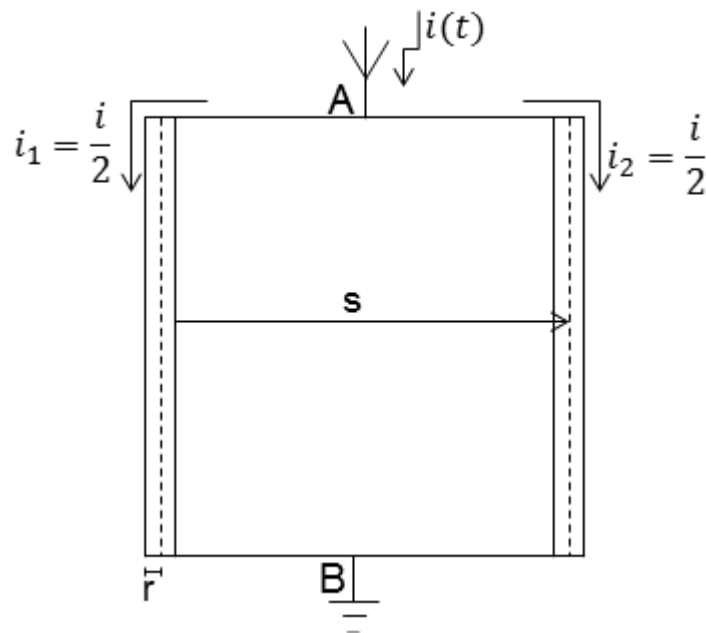
# Tensión inducida en un conductor



$$U_C = M \frac{di}{dt} \approx M \frac{I_p}{t_r}$$

$$\text{siendo } M \approx \left[ 0,46h \log_{10} \left( \frac{2h}{s} \right) \right]$$

# Interacción entre bajadas iguales



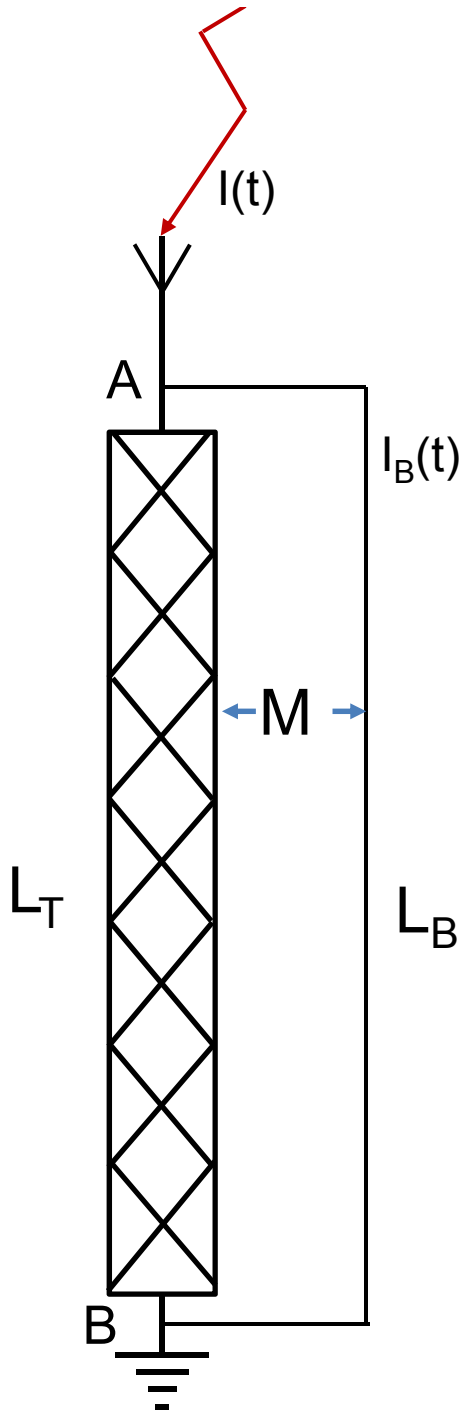
$$U_{AB} = L \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt}$$

Bajadas iguales:

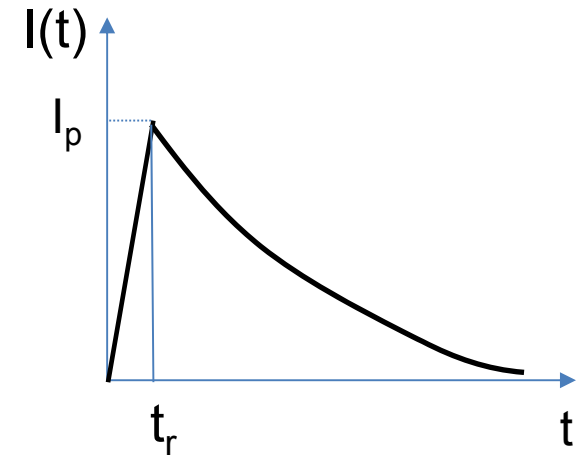
$$\text{Suponemos que } i_1 = i_2 = \frac{i}{2}$$

$$U_{AB} \approx 0,46h \left[ \log_{10} \left( \frac{2h}{r} \right) + \log_{10} \left( \frac{2h}{s} \right) \right] \frac{1}{2} \frac{di}{dt}$$

# Interacción entre bajada natural (torre) y bajada adicional (conductor)



$$I(t) = I_T(t) + I_B(t)$$

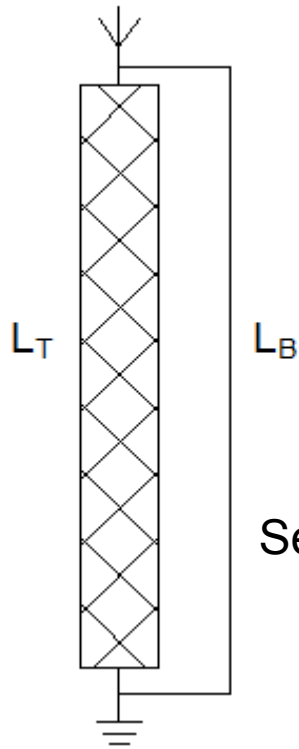


$$U_A - U_B = U_{AB} = L_T \frac{dI_T}{dt} + M \frac{dI_B}{dt}$$

$$U_A - U_B = U_{AB} = L_B \frac{dI_B}{dt} + M \frac{dI_T}{dt}$$



# Interacción entre bajada natural (torre) y bajada adicional (conductor)



$$U_{AB} = L_B \frac{di_B}{dt} + M \frac{di_T}{dt} = L_T \frac{di_T}{dt} + M \frac{di_B}{dt}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{di_T}{dt} + \frac{di_B}{dt}$$

$$\frac{di_T}{dt} = \frac{L_B - M}{L_B + L_T - 2M} \frac{di}{dt}$$

$$\frac{di_B}{dt} = \frac{L_T - M}{L_B + L_T - 2M} \frac{di}{dt}$$

Según nuestro modelo de corriente

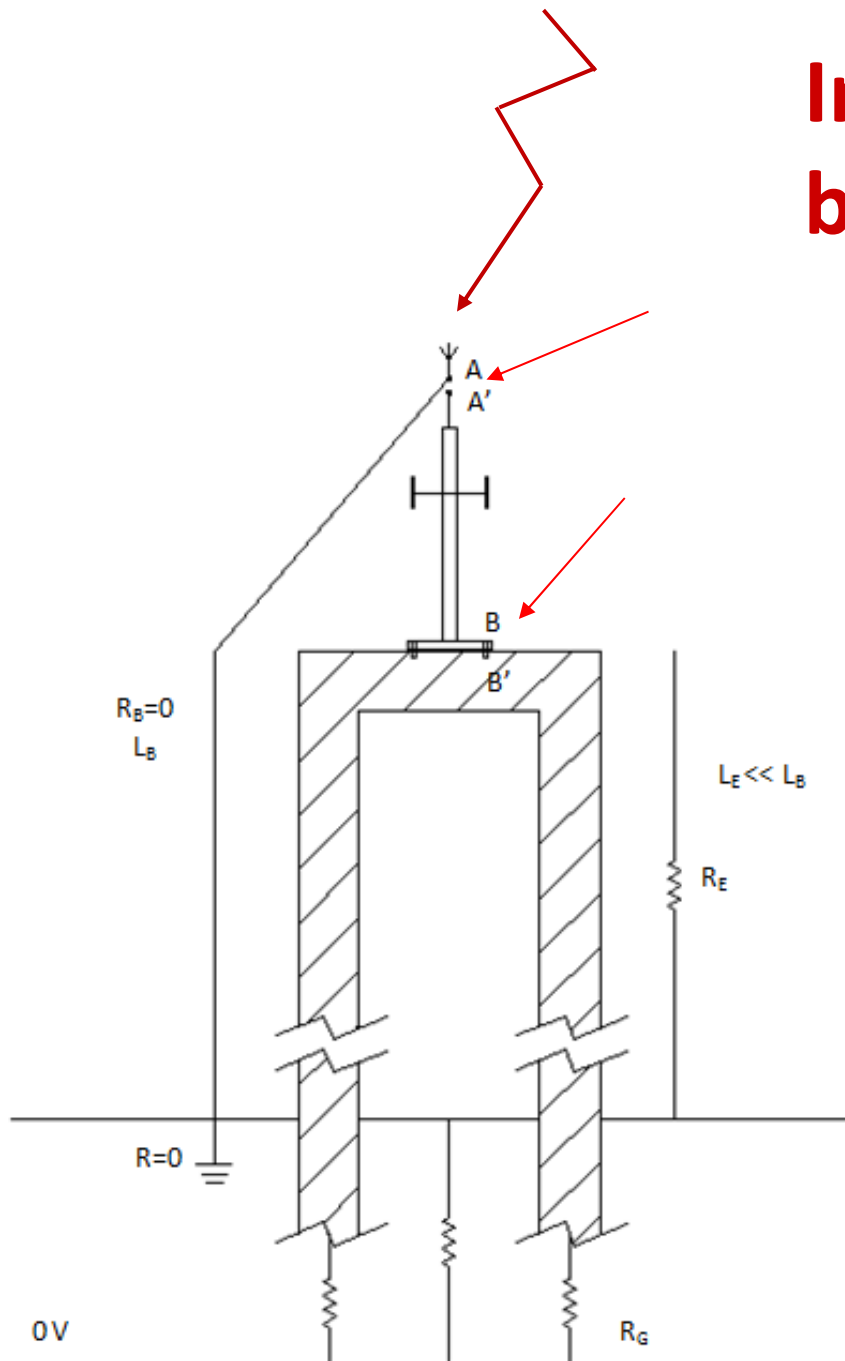
$$\frac{dI}{dt} \approx \frac{I_p}{t_r} = \frac{\hat{I}_T}{t_r} + \frac{\hat{I}_B}{t_r}$$

$$\hat{I}_T \approx \frac{L_B - M}{L_B + L_T - 2M} I_p$$

$$\hat{I}_B \approx \frac{L_T - M}{L_B + L_T - 2M} I_p$$

Circula más corriente por la torre que por la bajada y la mutua aumenta el desbalance

# Interacción entre bajada y estructura



Suponemos que no hay continuidad eléctrica en A-A' y en B-B'. La antena y el edificio están al potencial de tierra  $U_G = 0V$ .

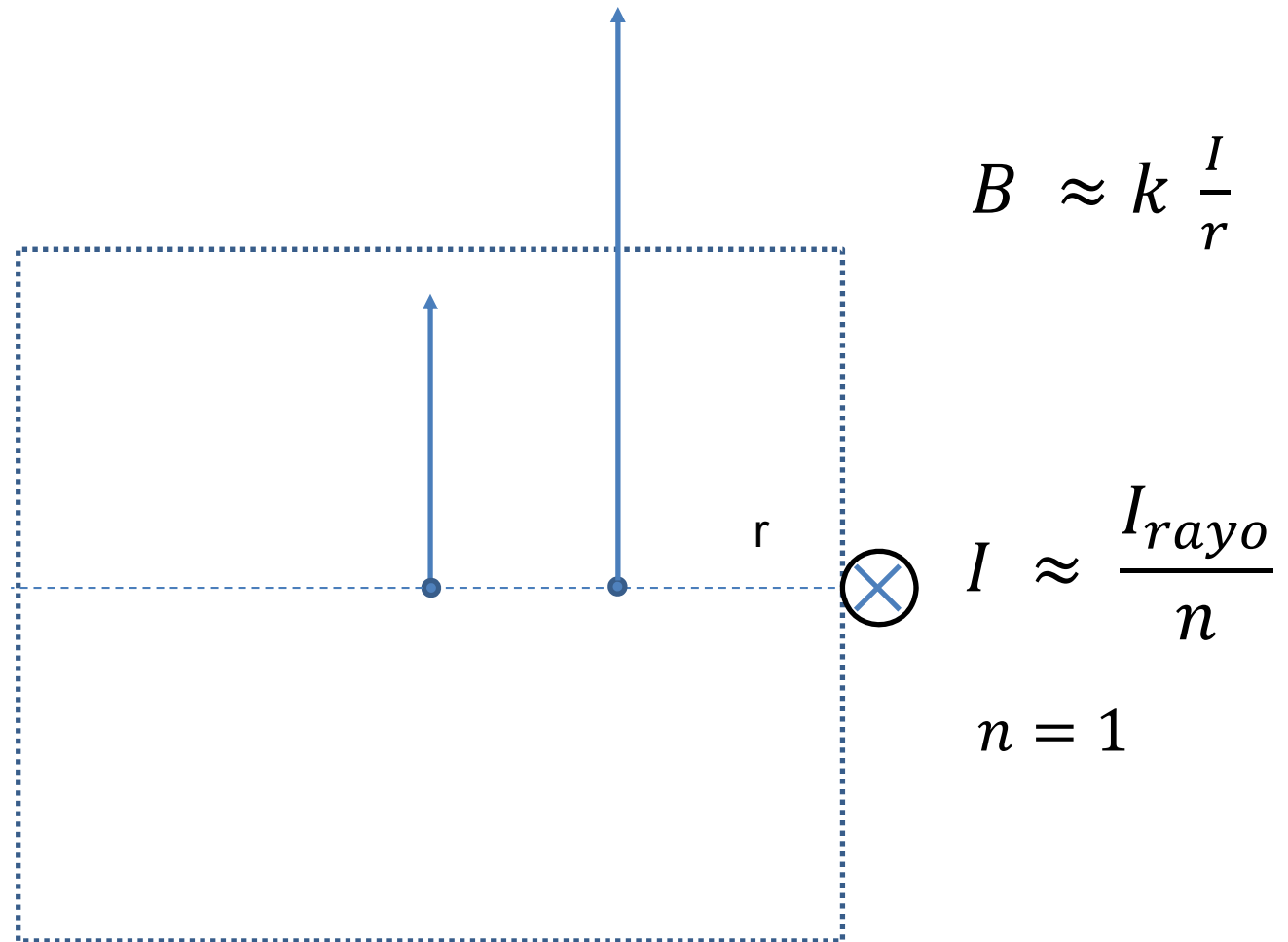
La tensión sobre el cable de bajada:

$$U_A - U_G = L_B \frac{dI}{dt} \approx U_A - U_{A'}$$

⇒ Se forma arco en AA' y luego en BB'

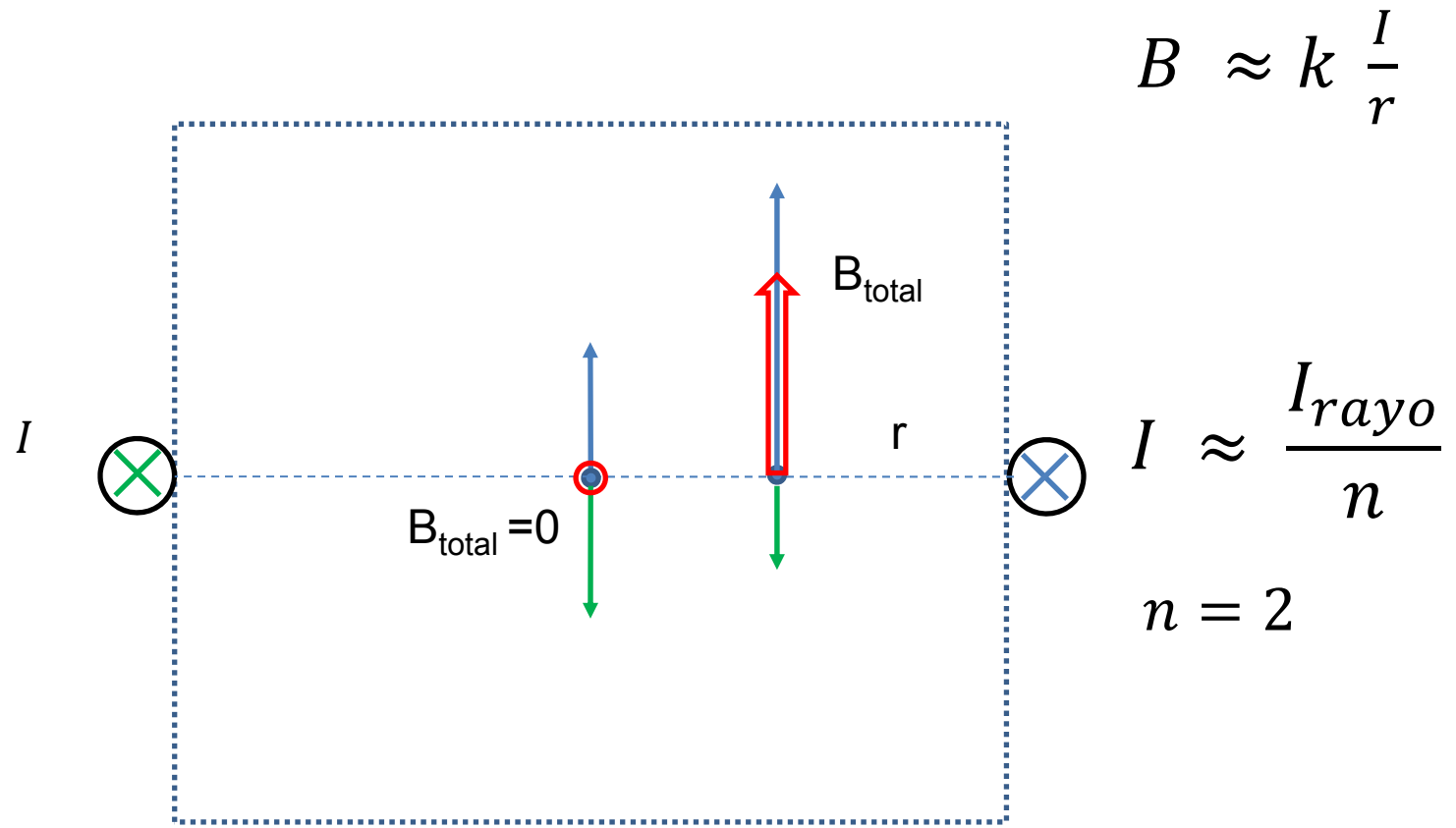
La corriente circula por el edificio, que tiene mayor resistencia pero mucho menos inductancia

# Campo magnético en el interior de una estructura debido a las bajadas (1)



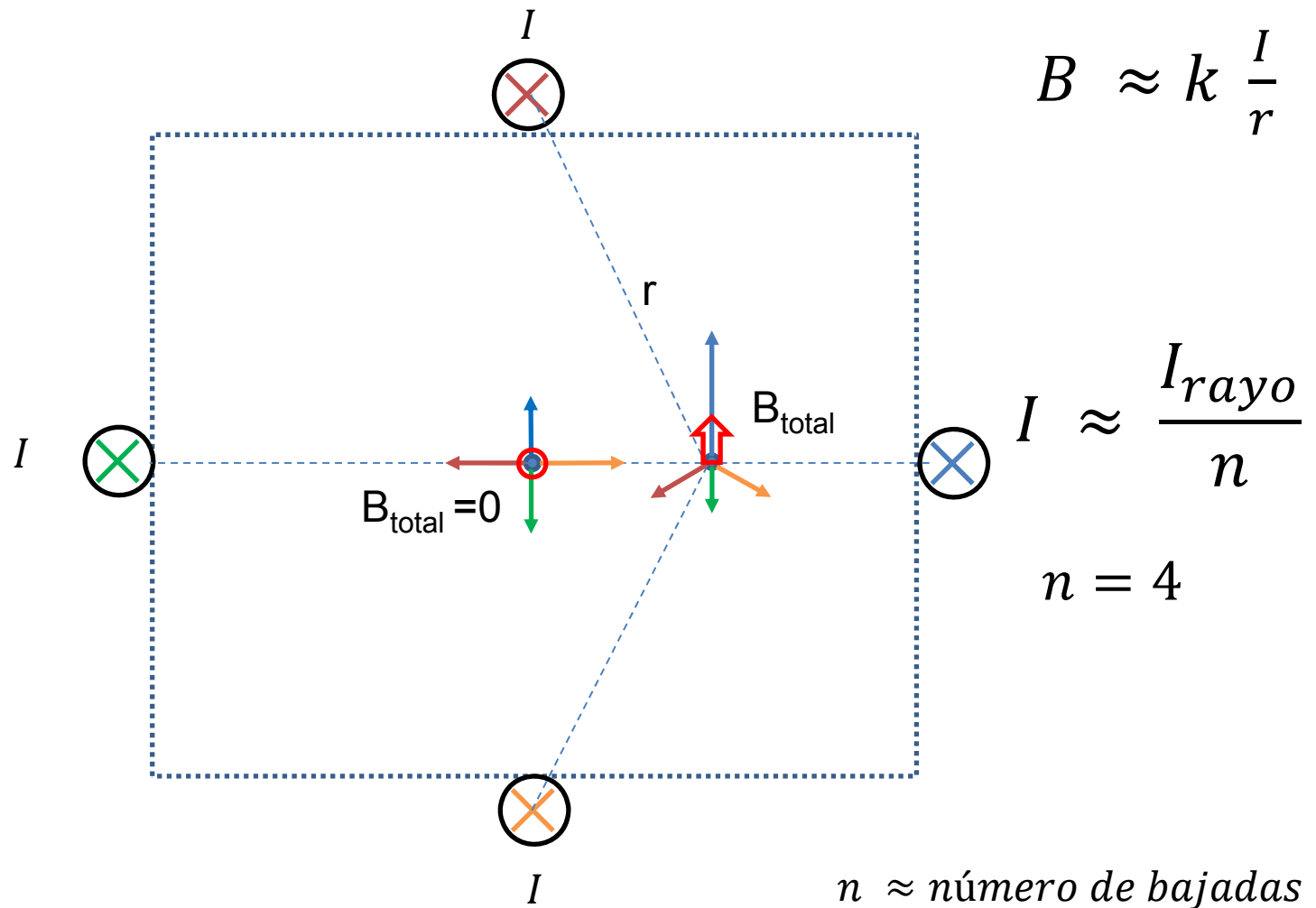
$n \approx$  número de bajadas

# Campo magnético en el interior de una estructura debido a las bajadas (2)



$n \approx$  número de bajadas

# Campo magnético en el interior de una estructura debido a las bajadas (3)



$$B \approx k \frac{I}{r}$$

$$I \approx \frac{I_{rayo}}{n}$$

$$n = 4$$

$n \approx$  número de bajadas

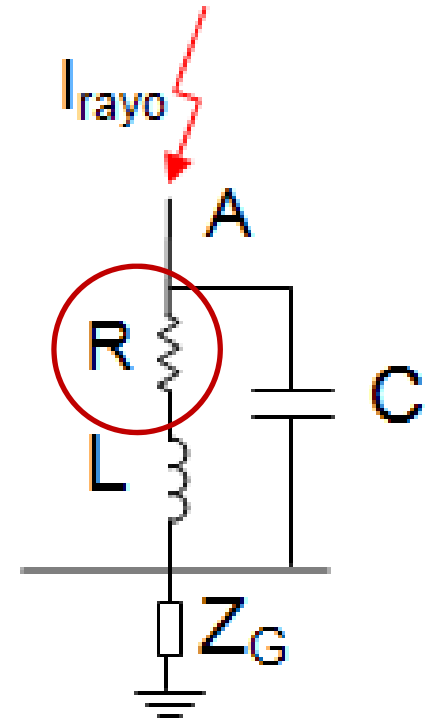
# Calentamiento

$$P(t) = R * I^2(t)$$

$$\text{Energía total } W = \int_0^{t_{total}} R * I^2(t) dt$$

$$W = R * \int_0^{t_{total}} I^2(t) dt$$

$t_{total}$  = duración total del rayo.



$$\int_0^{t_{total}} I^2(t) dt \quad \text{Energía específica del rayo ("Action integral")}$$

# Calentamiento

$$\int_0^{t_{total}} I^2(t) dt = \frac{W}{R}$$

Valores máximos esperados:

Rayos que llevan carga negativa a tierra  
 $W/R = 1 \times 10^6 \text{ A}^2\text{s}$  (Joules/ Ohm)

Rayos que llevan carga positiva a tierra  
 $W/R = 50 \times 10^6 \text{ A}^2\text{s}$  (Joules/ Ohm)

Ejemplo: Cable de acero galvanizado de 50 mm<sup>2</sup> de sección.

Resistencia: 3 mΩ / metro

Masa: 0,40 kg / metro

Calor específico 460 joule/kg.K

Calor disipado por el máximo rayo positivo:

$W/m = 3 \text{ m}\Omega / \text{metro} \times 50 \times 10^6 \text{ A}^2\text{s} = 150000 \text{ joule} / \text{metro}$

Elevación de temperatura =  $150000 / (460 \times 0,4) = 815 \text{ K} !$

# Corrosión

## Tabla:

|   | MAGNESIUM | ALUMINUM | ZINC  | IRON  | CADMIUM | NICKEL | TIN   | LEAD  | COPPER | SILVER | PALLADIUM | GOLD  |       |
|---|-----------|----------|-------|-------|---------|--------|-------|-------|--------|--------|-----------|-------|-------|
| ↑ | MAGNESIUM | 0.00     | -0.71 | -1.61 | -1.93   | -1.97  | -2.12 | -2.23 | -2.24  | -2.71  | -3.17     | -3.36 | -3.87 |
|   | ALUMINUM  | 0.71     | 0.00  | -0.90 | -1.22   | -1.26  | -1.41 | -1.52 | -1.53  | -2.00  | -2.46     | -2.65 | -3.16 |
|   | ZINC      | 1.61     | 0.90  | 0.00  | -0.32   | -0.36  | -0.51 | -0.63 | -0.64  | -1.10  | -1.56     | -1.75 | -2.26 |
|   | IRON      | 1.93     | 1.22  | 0.32  | 0.00    | -0.04  | -0.19 | -0.30 | -0.31  | -0.78  | -1.24     | -1.43 | -1.94 |
|   | CADMIUM   | 1.97     | 1.26  | 0.36  | 0.04    | 0.00   | -0.15 | -0.27 | -0.28  | -0.74  | -1.20     | -1.39 | -1.90 |
|   | NICKEL    | 2.12     | 1.41  | 0.51  | 0.19    | 0.15   | 0.00  | -0.11 | -0.12  | -0.59  | -1.05     | -1.24 | -1.75 |
|   | TIN       | 2.23     | 1.52  | 0.63  | 0.30    | 0.27   | 0.11  | 0.00  | -0.01  | -0.47  | -0.94     | -1.12 | -1.64 |
|   | LEAD      | 2.24     | 1.53  | 0.64  | 0.31    | 0.28   | 0.12  | 0.01  | 0.00   | -0.46  | -0.93     | -1.11 | -1.63 |
|   | COPPER    | 2.71     | 2.00  | 1.10  | 0.78    | 0.74   | 0.59  | 0.47  | 0.46   | 0.00   | -0.46     | -0.65 | -1.16 |
|   | SILVER    | 3.17     | 2.46  | 1.56  | 1.24    | 1.20   | 1.05  | 0.94  | 0.93   | 0.46   | 0.00      | -0.19 | -0.70 |
|   | PALLADIUM | 3.36     | 2.65  | 1.75  | 1.43    | 1.39   | 1.24  | 1.12  | 1.11   | 0.65   | 0.19      | 0.00  | -0.51 |
|   | GOLD      | 3.87     | 3.16  | 2.26  | 1.94    | 1.90   | 1.75  | 1.64  | 1.63   | 1.16   | 0.70      | 0.51  | 0.00  |
|   |           |          |       |       |         |        |       |       |        |        |           |       |       |

← LESS NOBLE →

Noble Metal Table: Accelerated corrosion can occur between unprotected joints if the algebraic difference in atomic potential is greater than  $\pm 0.3$  volts.