

ANEXO A
FORMULARIO PARA OBTENER LA RESISTENCIA A TIERRA - MathCAD

Por Roberto Ruelas-Gómez. RUEL, S.A. León, Gto. México 160529
r.ruelas-gomez@ieee.org

NOTA: Estos valores son válidos solamente cuando la corriente a tierra es de naturaleza estacionaria (c.d.) o casi estacionaria (50-60 Hz).

INDICE

1. ELECTRODOS TIPO VARILLA O TUBO

- 1.1 Una varilla o tubo
- 1.2 Dos varillas o tubos
- 1.3 Tres varillas o tubos en delta
- 1.4 Una varilla con intensificador
- 1.5 Porcentaje de resistencia por muchas varillas

2. CONDUCTOR ENTERRADO

- 2.1 Solera en línea recta
- 2.2 Cable en línea recta
- 2.3 Conductor en L
- 2.4 Conductor en estrella 3 puntas
- 2.5 Conductor en estrella 4 puntas
- 2.6 Conductor en estrella 6 puntas
- 2.7 Conductor en estrella 8 puntas
- 2.8 Conductor en anillo

3. CABLES EN CEMENTO CONDUCTOR

- 3.1 Contra-antena en línea recta
- 3.2 Contra-antena en L
- 3.3 Contra-antenas en paralelo
- 3.4 Contra-antenas 4 puntas
- 3.5 Contra-antenas 3 puntas
- 3.6 Contra-antenas 8 puntas
- 3.7 Contra-antenas 12 puntas
- 3.8 Contra-antenas 16 puntas

4. MALLAS SIN VARILLAS

- 4.1 Electrodo Ufer
- 4.2 Conductor en anillo
- 4.3 Malla de un cuadrado
- 4.4 Malla de 4 cuadrados
- 4.5 Malla de 9 cuadrados
- 4.6 Malla rectangular

5. MALLA CON VARILLAS

- 5.1 Caso general
- 5.2 Malla en terreno de una capa
- 5.3 Malla en terreno de dos capas

6. PLACAS

Datos del Terreno:

ρ = Resistividad ($\Omega\cdot m$)
 ρ_s = Resistividad superficial ($\Omega\cdot m$)
 H = Espesor de la capa superficial (m)

$\rho := 100 \cdot \text{ohm} \cdot \text{m}$
 $\rho_s := 10000 \cdot \text{ohm} \cdot \text{m}$
 $H := 0.2 \cdot \text{m}$

| <u>resistividad (ρ)</u> | |
|-----------------------------------------|---------------------|
| bentonita | <> 0.25 ohm-m [6.2] |
| concreto en contacto con el terreno | <> 30 ohm-m |

Datos de las varillas electrodo:

r = radio (m)
 L = largo (m)
 d = espaciamiento entre electrodos (m)
 r1 = radio (m) de la capa de material de resistividad ρ_1 ($\Omega\cdot m$), rodeando al electrodo

$r := 0.008 \cdot \text{m}$
 $L := 3 \cdot \text{m}$
 $d := 3 \cdot \text{m}$
 $r1 := 0.1524 \cdot \text{m}$
 $\rho_1 := 0.25 \cdot \text{ohm} \cdot \text{m}$

Datos del conductor enterrado:

a = radio (m)
 B = longitud total (m)
 S = profundidad (m)

$a := 0.0067 \cdot \text{m}$
 $B := 80 \cdot \text{m}$
 $S := 0.2 \cdot \text{m}$

| <u>radio del conductor (a)</u> | |
|--------------------------------|---------------|
| 250 kcm | <> 0.0073 m |
| 4/0 AWG | <> 0.0067 m |
| 3/0 AWG | <> 0.00585 m |
| 2/0 AWG | <> 0.00503 m |
| 1/0 AWG | <> 0.004725 m |
| 2 AWG | <> 0.00371 m |

Datos de la solera enterrada:

w1 = ancho (m)
 B = longitud total (m)
 S = profundidad (m)

$w1 := 0.012 \text{m}$

Datos de la placa enterrada:

A1 = Área total sumando las dos caras

$A1 := 0.72 \text{m}^2$

Datos del concreto enterrado:

w = ancho del concreto conductor
 V = Volumen de los cimientos

$w := 0.5 \text{m}$
 $V := 25 \cdot \text{m}^3$

Datos de la malla:

L1 = longitud del lado corto (m)
 L2 = longitud del lado largo (m)
 L3 = longitud de cada cuadrado (m)
 n = número de varillas dentro de A
 A = área total (m^2) encerrada dentro de la malla.

$L1 := 9 \cdot \text{m}$
 $L2 := 12 \cdot \text{m}$
 $L3 := 3 \text{m}$
 $n := 6$
 $A := 108 \cdot \text{m}^2$

1. ELECTRODOS TIPO VARILLA O TUBO

1.1 UNA VARILLA electrodo de longitud L, radio r enterrada en un terreno de resistividad ρ . Uso: General

$L = 3 \text{m}$

$r = 0.008 \text{m}$

$\rho = 100 \cdot \Omega \cdot \text{m}$

H.B.Dwight [1]

$$\frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \left(\ln \left(4 \cdot \frac{L}{r} \right) - 1 \right) = 33.493 \Omega$$

R. Rüdénberg [3]

$$\frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \ln \left(2 \cdot \frac{L}{r} \right) = 35.121 \Omega$$

$$\text{Sankosha [7]} \quad \frac{\rho}{2.73 \cdot L} \cdot \log\left(2 \cdot \frac{L}{r}\right) = 35.105 \Omega$$

1.2 DOS VARILLAS electrodo de longitud L y radio r enterradas con un espaciamiento d en un terreno de resistividad ρ , conectadas en paralelo. Uso: General

$$L = 3 \text{ m} \quad d > L \quad \frac{\rho}{4 \cdot \pi \cdot L} \cdot \left(\ln\left(4 \cdot \frac{L}{r}\right) - 1 \right) + \frac{\rho}{4 \cdot \pi \cdot d} \cdot \left(1 - \frac{L^2}{3 \cdot d^2} + \frac{2 \cdot L^4}{5 \cdot d^4} \right) = 19.576 \Omega$$

$$r = 0.008 \text{ m}$$

H.B.Dwight [1]

$$d = 3 \text{ m}$$

$$\rho = 100 \cdot \Omega \cdot \text{m} \quad d < L \quad \frac{\rho}{4 \cdot \pi \cdot L} \cdot \left(\ln\left(4 \cdot \frac{L}{r}\right) + \ln\left(4 \cdot \frac{L}{d}\right) - 2 + \frac{d}{2 \cdot L} - \frac{d^2}{16 \cdot L^2} + \frac{d^4}{512 \cdot L^4} \right) = 18.937 \Omega$$

General Electric [11]

$$\frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot L}{\sqrt{d \cdot r}}\right) = 19.399 \Omega$$

1.3 TRES VARILLAS electrodo de longitud L y radio r , colocadas en delta con una separación d entre ellas, Donde el terreno tiene una resistividad ρ .

$$L = 3 \text{ m}$$

General Electric [11]

$$r = 0.008 \text{ m}$$

$$d = 3 \text{ m}$$

$$\rho = 100 \cdot \Omega \cdot \text{m}$$

$$\frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot L}{\sqrt[3]{d^2 \cdot r}}\right) = 14.158 \Omega$$

1.4 UNA VARILLA ELECTRODO CON TRATAMIENTO O EMBEBIDA EN CONCRETO de longitud L y radio r, rodeada de material de resistividad ρ_1 y radio r1. Donde el terreno natural tiene una resistividad ρ .

$$\rho = 100 \cdot \text{ohm} \cdot \text{m}$$

$$L = 3 \text{ m}$$

Fagan - Lee [2]

$$r1 = 0.152 \text{ m}$$

$$\rho_1 = 0.25 \cdot \text{ohm} \cdot \text{m}$$

$$r = 0.008 \text{ m}$$

$$\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \left[\rho \cdot \left(\ln \left(\frac{8 \cdot L}{2 \cdot r1} \right) - 1 \right) + \rho_1 \cdot \left(\ln \left(\frac{8 \cdot L}{2 \cdot r} \right) - 1 \right) - \rho_1 \cdot \left(\ln \left(\frac{8 \cdot L}{2 \cdot r1} \right) - 1 \right) \right] = 17.897 \Omega$$

1.5 PORCENTAJE DE RESISTENCIA A TIERRA DE n VARILLAS ESPACIADAS LA MISMA DISTANCIA, COMPARADA CON UNA SOLA VARILLA.

$$n = 6$$

Durham - Durham [9]

$$\frac{1}{n} \cdot \left[2 - e^{-0.17(n-1)} \right] = 26.21 \%$$

2. CONDUCTOR ENTERRADO

2.1 SOLERA horizontal de longitud total B, ancho w1, enterrada a una profundidad S en un terreno de resistividad ρ .

$$B = 80 \text{ m}$$

$$w1 = 0.012 \text{ m}$$

$$S = 0.2 \text{ m}$$

$$\rho = 100 \cdot \Omega \cdot \text{m}$$

*Indian
Standard IS
3043 [12]*

$$\frac{\rho}{2\pi \cdot B} \cdot \ln \left(2 \cdot \frac{B^2}{w1 \cdot S} \right) = 3.082 \Omega$$

2.2 CONDUCTOR horizontal de longitud total B, radio a, enterrado a una profundidad S (s/2) en un terreno de resistividad ρ .

$$B = 80 \text{ m}$$

$$a = 0.007 \text{ m}$$

H.B.Dwight [1]

$$s := 2 \cdot S$$

$$b := \frac{B}{2}$$

S = 0.2 m
 $\rho = 100 \cdot \Omega \cdot m$

$$\frac{\rho}{4 \cdot \pi \cdot b} \cdot \left(\ln \left(4 \cdot \frac{b}{a} \right) + \ln \left(4 \cdot \frac{b}{s} \right) - 2 + \frac{s}{2 \cdot b} - \frac{s^2}{16 \cdot b^2} + \frac{s^4}{512 \cdot b^4} \right) = 2.801 \Omega$$

Tabla C.1 NMX-J-549-ANCE-2005 [6.6]

$$\frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot B} \cdot \left(\ln \left(\frac{B^2}{1.85 \cdot S \cdot 2 \cdot a} \right) \right) = 2.799 \Omega$$

Sankosha [7]

$$\frac{\rho}{2.73 \cdot B} \cdot \log \left(\frac{B^2}{2S \cdot a} \right) = 2.92 \Omega$$

Copper Development Ass [8]

$$\frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot B} \cdot \ln \left(\frac{B^2}{2S \cdot a} \right) = 2.922 \Omega$$

2.3 CONDUCTOR horizontal en "L" con longitud total B (b por brazo), radio a, enterrado a una profundidad S (s/2) en un terreno de resistividad ρ .

B = 80 m

s := 2 · S **b := $\frac{B}{2}$**

a = 0.007 m

H.B.Dwight [1]

S = 0.2 m

$\rho = 100 \cdot \Omega \cdot m$

b = 40 m

$$\frac{\rho}{4 \cdot \pi \cdot b} \cdot \left(\ln \left(2 \cdot \frac{b}{a} \right) + \ln \left(2 \cdot \frac{b}{s} \right) - 0.2373 + 0.2146 \cdot \frac{s}{b} + 0.1035 \cdot \frac{s^2}{b^2} - 0.0424 \cdot \frac{s^4}{b^4} \right) = 2.875 \Omega$$

Tabla C.1 NMX-J-549-ANCE-2005 [6]

$$\frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot B} \cdot \left(\ln \left(\frac{B^2}{1.27 \cdot S \cdot 2 \cdot a} \right) \right) = 2.874 \Omega$$

2.4 CONDUCTOR horizontal en ESTRELLA DE TRES PUNTAS, con longitud total B (b por brazo), radio a, enterrado a una profundidad S (s/2) en un terreno de resistividad ρ .

B = 80 m *H.B.Dwight [1]* **s := 2 · S** **b := $\frac{B}{3}$**

a = 0.007 m

S = 0.2 m

$\rho = 100 \cdot \Omega \cdot \text{m}$

b = 26.667 m

$$\frac{\rho}{6 \cdot \pi \cdot b} \cdot \left(\ln\left(2 \cdot \frac{b}{a}\right) + \ln\left(2 \cdot \frac{b}{s}\right) + 1.071 - 0.209 \cdot \frac{s}{b} + 0.238 \cdot \frac{s^3}{b^3} - 0.054 \cdot \frac{s^4}{b^4} \right) = 2.973 \Omega$$

Tabla C.1 NMX-J-549-ANCE-2005 [6]

$$\frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot B} \cdot \left(\ln\left(\frac{B^2}{0.767 \cdot S \cdot 2 \cdot a}\right) \right) = 2.974 \Omega$$

2.5 CONDUCTOR horizontal en ESTRELLA DE CUATRO PUNTAS, con longitud total B (b por brazo), radio a, enterrado a una profundidad S (s/2) en un terreno de resistividad ρ .

B = 80 m *H.B.Dwight [1]* **s := 2 · S** **b := $\frac{B}{4}$**

a = 0.007 m

S = 0.2 m

$\rho = 100 \cdot \Omega \cdot \text{m}$

b = 20 m

$$\frac{\rho}{8 \cdot \pi \cdot b} \cdot \left(\ln\left(2 \cdot \frac{b}{a}\right) + \ln\left(2 \cdot \frac{b}{s}\right) + 2.912 - 1.071 \cdot \frac{s}{b} + 0.645 \cdot \frac{s^3}{b^3} - 0.145 \cdot \frac{s^4}{b^4} \right) = 3.221 \Omega$$

Tabla C.1 NMX-J-549-ANCE-2005 [6]

$$\frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot B} \cdot \left(\ln\left(\frac{B^2}{0.217 \cdot S \cdot 2 \cdot a}\right) \right) = 3.226 \Omega$$

2.6 CONDUCTOR horizontal en ESTRELLA DE SEIS PUNTAS, con longitud total B (b por brazo), radio a, enterrado a una profundidad S (s/2) en un terreno de resistividad ρ .

B = 80 m *H.B.Dwight [1]* **s := 2 · S** **b := $\frac{B}{6}$**

a = 0.007 m

$$\begin{aligned}
 \mathbf{S} &= 0.2 \text{ m} \\
 \rho &= 100 \cdot \Omega \cdot \text{m} \\
 \mathbf{b} &= 13.333 \text{ m}
 \end{aligned}
 \quad \frac{\rho}{12 \cdot \pi \cdot \mathbf{b}} \cdot \left(\ln \left(2 \cdot \frac{\mathbf{b}}{\mathbf{a}} \right) + \ln \left(2 \cdot \frac{\mathbf{b}}{\mathbf{s}} \right) + 6.851 - 3.128 \cdot \frac{\mathbf{s}}{\mathbf{b}} + 1.758 \cdot \frac{\mathbf{s}^3}{\mathbf{b}^3} - 0.409 \cdot \frac{\mathbf{s}^4}{\mathbf{b}^4} \right) = 3.829 \Omega$$

Tabla C.1 NMX-J-549-ANCE-2005 [6]

$$\frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot \mathbf{B}} \cdot \left(\ln \left(\frac{\mathbf{B}^2 \cdot 10^3}{9.42 \cdot \mathbf{S} \cdot 2 \cdot \mathbf{a}} \right) \right) = 3.85 \Omega$$

2.7 CONDUCTOR horizontal en ESTRELLA DE OCHO PUNTAS, con longitud total B (b por brazo), radio a, enterrado a una profundidad S (s/2) en un terreno de resistividad ρ .

$$\begin{aligned}
 \mathbf{B} &= 80 \text{ m} & \text{H.B.Dwight [1]} & & \mathbf{s} &:= 2 \cdot \mathbf{S} & & \mathbf{b} &:= \frac{\mathbf{B}}{8} \\
 \mathbf{a} &= 0.007 \text{ m} \\
 \mathbf{S} &= 0.2 \text{ m} \\
 \rho &= 100 \cdot \Omega \cdot \text{m} \\
 \mathbf{b} &= 10 \text{ m}
 \end{aligned}
 \quad \frac{\rho}{16 \cdot \pi \cdot \mathbf{b}} \cdot \left(\ln \left(2 \cdot \frac{\mathbf{b}}{\mathbf{a}} \right) + \ln \left(2 \cdot \frac{\mathbf{b}}{\mathbf{s}} \right) + 10.98 - 5.51 \cdot \frac{\mathbf{s}}{\mathbf{b}} + 3.26 \cdot \frac{\mathbf{s}^3}{\mathbf{b}^3} - 1.17 \cdot \frac{\mathbf{s}^4}{\mathbf{b}^4} \right) = 4.511 \Omega$$

Tabla C.1 NMX-J-549-ANCE-2005 [6]

$$\frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot \mathbf{B}} \cdot \left(\ln \left(\frac{\mathbf{B}^2 \cdot 10^4}{2.69 \cdot \mathbf{S} \cdot 2 \cdot \mathbf{a}} \right) \right) = 4.557 \Omega$$

2.8 CONDUCTOR horizontal de radio a, en círculo de circunferencia B, enterrado a una profundidad S (s/2) en un terreno de resistividad ρ .

$$\begin{aligned}
 \mathbf{B} &= 80 \text{ m} & & & \mathbf{D} &:= \frac{\mathbf{B}}{\pi} & & \text{D - Diámetro} \\
 \mathbf{a} &= 0.007 \text{ m} & \text{H.B.Dwight [1]} & & & & & \\
 \mathbf{S} &= 0.2 \text{ m} \\
 \rho &= 100 \cdot \Omega \cdot \text{m}
 \end{aligned}
 \quad \frac{\rho}{2 \cdot \pi^2 \cdot \mathbf{D}} \cdot \left(\ln \left(4 \cdot \frac{\mathbf{D}}{\mathbf{a}} \right) + \ln \left(2 \cdot \frac{\mathbf{D}}{\mathbf{S}} \right) \right) = 3.018 \Omega$$

3. CABLES EN CEMENTO CONDUCTOR

Ver: www.sankosha-usa.com/calcul4.asp

3.1 CONTRA-ANTENA de B metros de largo totales y un ancho w, enterrado a una profundidad S, en un terreno de resistividad ρ . Uso: Antenas de RF

$$\mathbf{B} = 80 \text{ m}$$

$$\mathbf{w} = 0.5 \text{ m}$$

$$\mathbf{S} = 0.2 \text{ m}$$

$$\rho = 100 \cdot \text{ohm} \cdot \text{m}$$

C.L. Hallmark [4]

$$\frac{\rho}{2.73 \cdot \mathbf{B}} \cdot \log \left(2 \cdot \frac{\mathbf{B}^2}{\mathbf{S} \cdot \mathbf{w}} \right) = 2.338 \Omega$$

3.2 CONTRA-ANTENA de B metros de largo totales repartidos en DOS BRAZOS A 90 GRADOS, y un ancho w, enterrado a una profundidad S, en un terreno de resistividad ρ . Uso: Antenas de RF

$$\mathbf{B} = 80 \text{ m}$$

$$\mathbf{w} = 0.5 \text{ m}$$

$$\mathbf{S} = 0.2 \text{ m}$$

$$\rho = 100 \cdot \text{ohm} \cdot \text{m}$$

C.L. Hallmark [4]

$$\frac{\rho \cdot 1.03}{2.73 \cdot \mathbf{B}} \cdot \log \left(2 \cdot \frac{\mathbf{B}^2}{\mathbf{S} \cdot \mathbf{w}} \right) = 2.409 \Omega$$

3.3 CONTRA-ANTENA de B metros de largo totales repartidos en DOS BRAZOS EN PARALELO, con una separación d entre ellos, y un ancho w, enterrado a una profundidad S, en un terreno de resistividad ρ . Uso: Antenas de RF

$$\mathbf{B} = 80 \text{ m}$$

$$\mathbf{w} = 0.5 \text{ m}$$

$$\mathbf{S} = 0.2 \text{ m}$$

$$\rho = 100 \cdot \text{ohm} \cdot \text{m}$$

$$\mathbf{d} = 3 \text{ m}$$

Sankosha [7]

$$\mathbf{g} := \mathbf{d}$$

$$\frac{\rho}{2.73 \cdot \mathbf{B}} \cdot \left(\log \left(\frac{\mathbf{B}^2}{2 \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{w}} \right) + \log \left(\frac{\mathbf{B}}{\mathbf{g}} \right) \right) = 2.716 \Omega$$

3.4 CONTRA-ANTENA de B metros de largo totales repartidos en DOS BRAZOS EN CRUZ, de un ancho w, enterrado a una profundidad S, en un terreno de resistividad ρ . Uso: Antenas de RF

$$\mathbf{B} = 80 \text{ m}$$

$$\mathbf{w} = 0.5 \text{ m}$$

$$\mathbf{S} = 0.2 \text{ m}$$

$$\rho = 100 \cdot \text{ohm} \cdot \text{m}$$

Sankosha [7]

$$\frac{\rho \cdot 1.12}{2.73 \cdot \mathbf{B}} \cdot \log \left(2 \cdot \frac{\mathbf{B}^2}{\mathbf{S} \cdot \mathbf{w}} \right) = 2.619 \Omega$$

3.5 CONTRA-ANTENA de B metros de largo totales repartidos en TRES BRAZOS DE IGUAL LONGITUD, y un ancho w, enterrado a una profundidad S, en un terreno de resistividad ρ . Uso: Antenas de RF

$$\mathbf{B} = 80 \text{ m}$$

$$w = 0.5 \text{ m}$$

C.L. Hallmark [4]

$$\frac{\rho \cdot 1.06}{2.73 \cdot B} \cdot \log \left(2 \cdot \frac{B^2}{S \cdot w} \right) = 2.479 \Omega$$

$$S = 0.2 \text{ m}$$

$$\rho = 100 \cdot \text{ohm} \cdot \text{m}$$

3.6 CONTRA-ANTENA de B metros de largo totales repartidos en CUATRO BRAZOS DE IGUAL LONGITUD, y un ancho w, enterrado a una profundidad S, en un terreno de resistividad ρ . Uso: Antenas de RF

$$B = 80 \text{ m}$$

$$w = 0.5 \text{ m}$$

C.L. Hallmark [4]

$$\frac{\rho \cdot 1.12}{2.73 \cdot B} \cdot \log \left(2 \cdot \frac{B^2}{S \cdot w} \right) = 2.619 \Omega$$

$$S = 0.2 \text{ m}$$

$$\rho = 100 \cdot \text{ohm} \cdot \text{m}$$

3.7 CONTRA-ANTENA de B metros de largo totales repartidos en SEIS BRAZOS DE IGUAL LONGITUD, y un ancho w, enterrado a una profundidad S, en un terreno de resistividad ρ . Uso: Antenas de RF

$$B = 80 \text{ m}$$

$$w = 0.5 \text{ m}$$

C.L. Hallmark [4]

$$\frac{\rho \cdot 1.42}{2.73 \cdot B} \cdot \log \left(2 \cdot \frac{B^2}{S \cdot w} \right) = 3.321 \Omega$$

$$S = 0.2 \text{ m}$$

$$\rho = 100 \cdot \text{ohm} \cdot \text{m}$$

3.8 CONTRA-ANTENA de B metros de largo totales repartidos en OCHO BRAZOS DE IGUAL LONGITUD, y un ancho w, enterrado a una profundidad S, en un terreno de resistividad ρ . Uso: Antenas de RF.

$$B = 80 \text{ m}$$

$$w = 0.5 \text{ m}$$

C.L. Hallmark [4]

$$\frac{\rho \cdot 1.65}{2.73 \cdot B} \cdot \log \left(2 \cdot \frac{B^2}{S \cdot w} \right) = 3.858 \Omega$$

$$S = 0.2 \text{ m}$$

$$\rho = 100 \cdot \text{ohm} \cdot \text{m}$$

4. MALLAS SIN VARILLAS

4.1 MALLA DE LOS CIMIENTOS de una construcción con volumen V, en un terreno de resistividad ρ [6.8]

$$V = 25 \cdot \text{m}^3$$

Markiewicz-Klajn [8]

$$\rho = 100 \cdot \Omega \cdot \text{m}$$

$$0.2 \cdot \frac{\rho}{\sqrt[3]{V}} = 6.84 \Omega$$

4.2 MALLA EN CIRCULO horizontal de radio a, de circunferencia B, enterrado a una profundidad S (s/2) en un terreno de resistividad ρ .

$$B = 80 \text{ m}$$

$$D := \frac{B}{\pi} \quad D - \text{Diámetro}$$

$$a = 0.007 \text{ m}$$

H.B.Dwight [1]

$$S = 0.2 \text{ m}$$

$$\rho = 100 \cdot \Omega \cdot \text{m}$$

$$\frac{\rho}{2 \cdot \pi^2 \cdot D} \cdot \left(\ln \left(4 \cdot \frac{D}{a} \right) + \ln \left(2 \cdot \frac{D}{S} \right) \right) = 3.018 \Omega$$

4.3

a) MALLA de forma cuadrangular, consistente en un conductor de longitud total B enterrado a S m, encerrando una área de A m² de terreno con una resistividad ρ . Uso: Subestaciones.

$$B = 80 \text{ m}$$

Para $S < 0.25 \text{ m}$

$$A = 108 \text{ m}^2$$

Laurent-Niemann [2]

$$\frac{\rho}{4} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{\rho}{B} = 5.514 \Omega$$

$$S = 0.2 \text{ m}$$

$$\rho = 100 \cdot \Omega \cdot \text{m}$$

Para $0.25 \text{ m} < S < 2.5 \text{ m}$

J.G. Sverak [2]

$$\rho \cdot \left[\frac{1}{B} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot A}} \cdot \left(1 + \frac{1}{1 + S \cdot \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] = 5.383 \Omega$$

b) MALLA DE UN CUADRADO de L1 metros de lado, con conductor de radio a, enterrado a una profundidad S en un terreno con una resistividad ρ . Uso: Subestaciones.

$$L1 = 9 \text{ m}$$

$$s := 2 \cdot S$$

$$a = 0.007 \text{ m}$$

Seidman [5]

$$\frac{\rho}{0.2061 \cdot L1} \cdot \left(0.0304 - 0.0083 \cdot \ln \left(a \cdot \frac{s}{L1^2} \right) \right) = 6.255 \Omega$$

$$S = 0.2 \text{ m}$$

$$\rho = 100 \cdot \Omega \cdot \text{m}$$

4.4 MALLA de L1 metros de lado, DE CUATRO CUADRADOS, con conductor de radio a, enterrado a una profundidad S en un terreno con una resistividad ρ . Uso: Subestaciones.

$$L1 = 9 \text{ m}$$

$$a = 0.007 \text{ m}$$

$$s := 2 \cdot S$$

$$S = 0.2 \text{ m}$$

$$\rho = 100 \cdot \Omega \cdot \text{m}$$

Seidman [5]

$$\frac{\rho}{0.2061 \cdot L1} \cdot \left(0.0475 - 0.0054 \cdot \ln \left(a \cdot \frac{s}{L1^2} \right) \right) = 5.564 \Omega$$

4.5 MALLA de L1 metros de lado, DE NUEVE CUADRADOS, con conductor de radio a, enterrado a una profundidad S en un terreno con una resistividad ρ . Uso: Subestaciones.

$$L1 = 9 \text{ m}$$

$$a = 0.007 \text{ m}$$

$$s := 2 \cdot S$$

$$S = 0.2 \text{ m}$$

$$\rho = 100 \cdot \Omega \cdot \text{m}$$

Seidman [5]

$$\frac{\rho}{0.2061 \cdot L1} \cdot \left(0.05 - 0.0043 \cdot \ln \left(a \cdot \frac{s}{L1^2} \right) \right) = 5.087 \Omega$$

4.6 MALLA de CL cuadrados (Lado Largo), por CW cuadrados (Lado corto), con conductor de radio 0.0053 m (2/0 AWG), enterrado a una profundidad S=0.5m en un terreno con una resistividad ρ . Con cuadrados de área. Uso: Cálculo rápido de mallas para Subestaciones.

CK <> Constante

$$CL := \frac{L2}{L3}$$

$$CW := \frac{L1}{L3}$$

$$CA := L3 \cdot L3$$

$$CK := m^{0.14}$$

$$\rho = 100 \cdot \Omega \cdot \text{m}$$

Güemes [10]

$$CL = 4$$

$$CW = 3$$

$$CA = 9 \text{ m}^2$$

$$\frac{0.347\rho}{CL^{0.414} \cdot CW^{0.517} \cdot CA^{0.430} \cdot CK} = 4.306 \cdot \text{ohm}$$

5. MALLAS CON VARILLAS

5.1 MALLA consistente en el largo combinado B de conductor y varillas, enterrado todo a S m de profundidad, encerrando una área de A m² de terreno con una resistividad ρ . Uso: Subestaciones.

$$B = 80 \text{ m}$$

Para S<0.25m

$$A = 108 \text{ m}^2$$

$$S = 0.2 \text{ m}$$

Laurent-Niemann [2]

$$\frac{\rho}{4} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{\rho}{B} = 5.514 \Omega$$

$$\rho = 100 \cdot \Omega \cdot \text{m}$$

Para $0.25\text{m} < S < 2.5\text{m}$

J.G. Sverak [2]

$$\rho \cdot \left[\frac{1}{B} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot A}} \cdot \left(1 + \frac{1}{1 + S \cdot \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] = 5.383 \Omega$$

5.2 MALLA de área A, enterrada a una profundidad S, EN UN TERRENO DE UNA CAPA de resistividad ρ . Las varillas electrodo tienen un largo L y radio r, con su parte superior también a la profundidad S. La suma de las longitudes de los conductores de radio a, sin las n varillas electrodo es B. El lado más corto es L1 y el lado más largo es L2.

$$A = 108 \text{ m}^2$$

$$S = 0.2 \text{ m}$$

$$\rho = 100 \cdot \text{ohm} \cdot \text{m}$$

$$L = 3 \text{ m}$$

$$r = 0.008 \text{ m}$$

$$a = 0.007 \text{ m}$$

$$B = 80 \text{ m}$$

$$n = 6$$

$$L1 = 9 \text{ m}$$

$$L2 = 12 \text{ m}$$

Schwarz [2]

Constantes de Geometría para una profundidad $S < 0.1 \cdot \sqrt{A} = 1.039 \text{ m}$

$$K1 := -0.05 \cdot \frac{L2}{L1} + 1.2 \quad K1 = 1.133$$

$$K2 := 0.1 \cdot \frac{L2}{L1} + 4.68 \quad K2 = 4.813$$

Resistencia de los conductores de la malla (R1)

$$R1 := \frac{\rho}{\pi \cdot B} \cdot \left(\ln \left(\frac{2 \cdot B}{\sqrt{2 \cdot a \cdot S}} \right) + \frac{K1 \cdot B}{\sqrt{A}} - K2 \right) \quad R1 = 4.754 \Omega$$

Resistencia de todas las varillas electrodo (R2)

$$R2 := \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot n \cdot L} \left[\ln \left(\frac{4 \cdot L}{r} \right) - 1 + \frac{2 \cdot K1 \cdot L}{\sqrt{A}} \cdot (\sqrt{n} - 1)^2 \right] \quad R2 = 6.798 \Omega$$

Resistencia Mutua (Rm) entre conductores y varillas electrodo

$$Rm := \frac{\rho}{\pi \cdot B} \cdot \left(\ln \left(\frac{2 \cdot B}{L} \right) + \frac{K1 \cdot B}{\sqrt{A}} - K2 + 1 \right) \quad Rm = 3.536 \Omega$$

Resistencia Total del Sistema

$$\frac{R1 \cdot R2 - Rm^2}{R1 + R2 - 2 \cdot Rm} = 4.423 \Omega$$

5.3 MALLA de área A, enterrada a una profundidad S, EN UN TERRENO DE DOS CAPAS. La capa superficial tiene un espesor H y una resistividad superficial ρ_s . Las varillas electrodo tienen un largo L y su parte superior está también a la profundidad S. La suma de las longitudes de los conductores sin las varillas electrodo es B. La resistividad de la capa inferior donde está enterrada la malla es ρ . El lado más corto es L1 y el lado más largo es L2.

$$A = 108 \text{ m}^2$$

$$S = 0.2 \text{ m}$$

$$\rho_s = 1 \times 10^4 \cdot \text{ohm} \cdot \text{m}$$

$$\rho = 100 \cdot \text{ohm} \cdot \text{m}$$

$$L = 3 \text{ m}$$

$$r = 0.008 \text{ m}$$

$$a = 0.007 \text{ m}$$

$$B = 80 \text{ m}$$

$$n = 6$$

$$L1 = 9 \text{ m}$$

$$L2 = 12 \text{ m}$$

Resistividad Aparente Schwarz [2]

$$\rho_a := L \cdot \rho \cdot \frac{\rho_s}{[\rho \cdot (H - S) + \rho_s \cdot (L + S - H)]} \quad \rho_a = 100 \cdot \Omega \cdot \text{m}$$

Constantes de Geometría para una profundidad $S < 0.1 \cdot \sqrt{A} = 1.039 \text{ m}$

$$K1 := -0.05 \cdot \frac{L2}{L1} + 1.2 \quad K1 = 1.133$$

$$K2 := 0.1 \cdot \frac{L2}{L1} + 4.68 \quad K2 = 4.813$$

Resistencia de los conductores de la malla (R1). Nota: Es importante utilizar el valor de resistividad de la capa donde está la malla horizontal.

$$R1 := \frac{\rho}{\pi \cdot B} \cdot \left(\ln \left(\frac{2 \cdot B}{\sqrt{2 \cdot a \cdot S}} \right) + \frac{K1 \cdot B}{\sqrt{A}} - K2 \right)$$

$$R1 = 4.754 \Omega$$

Resistencia de todas las varillas electrodo (R2)

$$R2 := \frac{\rho_a}{2 \cdot \pi \cdot n \cdot L} \left[\ln \left(\frac{4 \cdot L}{r} \right) - 1 + \frac{2 \cdot K1 \cdot L}{\sqrt{A}} \cdot (\sqrt{n} - 1)^2 \right]$$

$$R2 = 6.798 \Omega$$

Resistencia Mutua (Rm) entre conductores y varillas electrodo

$$R_m := \frac{\rho a}{\pi \cdot B} \cdot \left(\ln \left(\frac{2 \cdot B}{L} \right) + \frac{K1 \cdot B}{\sqrt{A}} - K2 + 1 \right) \quad R_m = 3.536 \Omega$$

Resistencia Total del Sistema

$$\frac{R1 \cdot R2 - R_m^2}{R1 + R2 - 2 \cdot R_m} = 4.423 \Omega$$

6. REFERENCIAS

- [1] DWIGHT, H.B. *Calculation of Resistances to Ground*. AIEE Transactions vol 55. Dic 1936. págs. 1319-1328.
- [2] IEEE *Guide for Safety in AC Substation Grounding*. IEEE Std-80-2000.
- [3] RÜDENBERG, R. *Fundamental Considerations on Ground Currents*. Electrical Engineering. Ene 1945.
- [4] HALLMARK, C. L. Grounding Systems LLC. Graphite Sales, Inc.
- [5] SEIDMAN, A. *Handbook of Electric Power Calculations*. McGraw-Hill 1996.
- [6] NMX-J-549-ANCE-2005. Sistema de Protección contra Tormentas Eléctricas - Especificaciones, Materiales y Métodos de Medición. ANCE. 2005.
- [7] *San-Earth Technical Review - Practical Measures for Lowering Resistance to Grounding*. Sankosha Corp.
- [8] MARKIEWICZ, H & KLAJN, A. *Earthing Systems - Basic Constructional Aspects*. Copper Development Association. UK 2004.
- [9] DURHAM, M & DURHAM, R. Lightning, Grounding and Protection for Control Systems. IEEE Transactions on Industry Applications. Jan/Feb 1995. págs 45-54
- [10] GÜEMES-ALONSO, J.A et al. *A Practical Approach for Determining the Ground Resistance of Grounding Grids*. IEEE Transactions on IPower Delivery. July 2006. págs 1261-1266
- [11] GENERAL ELECTRIC. EHV Transmission Line Reference Book. 1968.
- [12] INDIAN STANDARD IS:3043.1987

