

FORMULARIO PARA OBTENER LA RESISTENCIA A TIERRA - MathCAD

Por Roberto Ruelas-Gómez. RUEL, S.A. León, Gto. México 100704

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).

Datos del Terreno:

ρ = Resistividad ($\Omega\cdot m$)

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

ρ_s = Resistividad superficial ($\Omega\cdot m$)

$$\rho_s := 10000 \cdot \text{ohm} \cdot \text{m}$$

H = Espesor de la capa superficial (m)

$$H := 0.60 \cdot \text{m}$$

Datos de las varillas electrodo:

r = radio (m)

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

L = largo (m)

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

d = espaciamiento (m)

$$d := 10 \cdot \text{m}$$

r1 = radio (m) de la capa de material de resistividad ρ_1 ($\Omega\cdot m$), rodeando al electrodo

$$r_1 := 0.1524 \cdot \text{m}$$

bentonita => 0.25 ohm*m [6.2]

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

concreto enterrado => 30 ohm*m

Datos del conductor enterrado:

a = radio (m)

$$a := 0.0064 \cdot \text{m}$$

4/0 AWG => 0.0064 m

B = longitud total (m)

$$B := 20 \cdot \text{m}$$

S = profundidad (m)

$$S := 0.5 \cdot \text{m}$$

w = ancho del concreto conductor

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

D = diámetro del anillo descrito

$$D := 10 \cdot \text{m}$$

g = separación entre electrodos de concreto

$$g := 5 \cdot \text{m}$$

V = Volumen de los cimientos

$$V := 10 \cdot \text{m}^3$$

Datos de la malla:

L1 = longitud del lado corto (m)

$$L_1 := 20 \cdot \text{m}$$

L2 = longitud del lado largo (m)

$$L_2 := 30 \cdot \text{m}$$

n = número de varillas dentro de A

$$n := 6$$

A = área total (m²) encerrada dentro de la malla.

$$A := 600 \cdot \text{m} \cdot \text{m}$$

L1 * L2 solo en mallas rectangulares.

1. VARILLAS ELECTRODO

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

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

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

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

H.B. Dwight [6.1]

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

R. Rüdenberg [6.3]

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

$$\text{Sankosha [6.7]} \quad \frac{\rho}{2.73 \cdot L} \cdot \log\left(2 \cdot \frac{L}{r}\right) = 35.105 \Omega$$

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

$$L = 3 \text{ m} \quad d > L \quad \frac{\rho}{4 \cdot \pi \cdot L} \cdot \left(\ln\left(4 \cdot \frac{L}{r}\right) - 1 \right) + \frac{\rho}{4 \cdot \pi \cdot d} \cdot \left(1 - \frac{L^2}{3 \cdot d^2} + \frac{2 \cdot L^4}{5 \cdot d^4} \right) = 17.521 \Omega$$

$$r = 0.008 \text{ m} \quad \text{H.B.Dwight [6.1]}$$

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

$$\rho = 100 \Omega \cdot \text{m} \quad d < L \quad \frac{\rho}{4 \cdot \pi \cdot L} \cdot \left(\ln\left(4 \cdot \frac{L}{r}\right) + \ln\left(4 \cdot \frac{L}{d}\right) - 2 + \frac{d}{2 \cdot L} - \frac{d^2}{16 \cdot L^2} + \frac{d^4}{512 \cdot L^4} \right) = 17.796 \Omega$$

1.3 UNA VARILLA ELECTRODO CON TRATAMIENTO O EMBEBIDA EN CONCRETO de longitud L y radio r , rodeada de material de resistividad ρ_1 y radio r_1 . Donde el terreno natural tiene una resistividad ρ .

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

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

$$\text{Fagan - Lee [6.2]}$$

$$r_1 = 0.152 \text{ m}$$

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

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

$$\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \left[\rho \cdot \left(\ln\left(\frac{8 \cdot L}{2 \cdot r_1}\right) - 1 \right) + \rho_1 \cdot \left(\ln\left(\frac{8 \cdot L}{2 \cdot r}\right) - 1 \right) - \rho_1 \cdot \left(\ln\left(\frac{8 \cdot L}{2 \cdot r_1}\right) - 1 \right) \right] = 17.897 \Omega$$

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

$$n = 6$$

$$\text{Durham - Durham [6.9]}$$

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

2. CONDUCTOR ENTERRADO

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

$$B = 20 \text{ m}$$

$$a = 0.006 \text{ m}$$

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

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

H.B.Dwight [6.1]

$$s := 2 \cdot S$$

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

$$\frac{\rho}{4 \cdot \pi \cdot b} \cdot \left(\ln \left(4 \cdot \frac{b}{a} \right) + \ln \left(4 \cdot \frac{b}{s} \right) - 2 + \frac{s}{2 \cdot b} - \frac{s^2}{16 \cdot b^2} + \frac{s^4}{512 \cdot b^4} \right) = 8.339 \Omega$$

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

$$\frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot B} \cdot \left(\ln \left(\frac{B^2}{1.85 \cdot S \cdot 2 \cdot a} \right) \right) = 8.298 \Omega$$

Sankosha [6.7]

$$\frac{\rho}{2.73 \cdot B} \cdot \log \left(\frac{B^2}{2S \cdot a} \right) = 8.784 \Omega$$

Copper Development Ass [6.8]

$$\frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot B} \cdot \ln \left(\frac{B^2}{2S \cdot a} \right) = 8.788 \Omega$$

2.2 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 .

$$B = 20 \text{ m}$$

$$a = 0.006 \text{ m}$$

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

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

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

H.B.Dwight [6.1]

$$s := 2 \cdot S$$

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

$$\frac{\rho}{4 \cdot \pi \cdot b} \cdot \left(\ln \left(2 \cdot \frac{b}{a} \right) + \ln \left(2 \cdot \frac{b}{s} \right) - 0.2373 + 0.2146 \cdot \frac{s}{b} + 0.1035 \cdot \frac{s^2}{b^2} - 0.0424 \cdot \frac{s^4}{b^4} \right) = 8.617 \Omega$$

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

$$\frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot B} \cdot \left(\ln \left(\frac{B^2}{1.27 \cdot S \cdot 2 \cdot a} \right) \right) = 8.597 \Omega$$

2.3 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 .

$B = 20 \text{ m}$
 $a = 0.006 \text{ m}$
 $S = 0.5 \text{ m}$
 $\rho = 100 \Omega \cdot \text{m}$
 $b = 6.667 \text{ m}$

H.B.Dwight [6.1] $s := 2 \cdot S$ $b := \frac{B}{3}$

$$\frac{\rho}{6 \cdot \pi \cdot b} \cdot \left(\ln \left(2 \cdot \frac{b}{a} \right) + \ln \left(2 \cdot \frac{b}{s} \right) + 1.071 - 0.209 \cdot \frac{s}{b} + 0.238 \cdot \frac{s^3}{b^3} - 0.054 \cdot \frac{s^4}{b^4} \right) = 8.97 \Omega$$

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

$$\frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot B} \cdot \left(\ln \left(\frac{B^2}{0.767 \cdot S \cdot 2 \cdot a} \right) \right) = 8.999 \Omega$$

2.4 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 .

$B = 20 \text{ m}$
 $a = 0.006 \text{ m}$
 $S = 0.5 \text{ m}$
 $\rho = 100 \Omega \cdot \text{m}$
 $b = 5 \text{ m}$

H.B.Dwight [6.1] $s := 2 \cdot S$ $b := \frac{B}{4}$

$$\frac{\rho}{8 \cdot \pi \cdot b} \cdot \left(\ln \left(2 \cdot \frac{b}{a} \right) + \ln \left(2 \cdot \frac{b}{s} \right) + 2.912 - 1.071 \cdot \frac{s}{b} + 0.645 \cdot \frac{s^3}{b^3} - 0.145 \cdot \frac{s^4}{b^4} \right) = 9.835 \Omega$$

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

$$\frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot B} \cdot \left(\ln \left(\frac{B^2}{0.217 \cdot S \cdot 2 \cdot a} \right) \right) = 10.004 \Omega$$

2.5 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 .

$$\begin{array}{l}
 B = 20 \text{ m} \\
 a = 0.006 \text{ m} \\
 S = 0.5 \text{ m} \\
 \rho = 100 \Omega \cdot \text{m} \\
 b = 3.333 \text{ m}
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 \text{H.B.Dwight [6.1]} \\
 \underline{s} := 2 \cdot S \\
 \underline{b} := \frac{B}{6}
 \end{array}
 \quad
 \frac{\rho}{12 \cdot \pi \cdot b} \cdot \left(\ln \left(2 \cdot \frac{b}{a} \right) + \ln \left(2 \cdot \frac{b}{s} \right) + 6.851 - 3.128 \cdot \frac{s}{b} + 1.758 \cdot \frac{s^3}{b^3} - 0.409 \cdot \frac{s^4}{b^4} \right) = 11.779 \Omega$$

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

$$\frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot B} \cdot \left(\ln \left(\frac{B^2 \cdot 10^3}{9.42 \cdot S \cdot 2 \cdot a} \right) \right) = 12.5 \Omega$$

2.6 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 .

$$\begin{array}{l}
 B = 20 \text{ m} \\
 a = 0.006 \text{ m} \\
 S = 0.5 \text{ m} \\
 \rho = 100 \Omega \cdot \text{m} \\
 b = 2.5 \text{ m}
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 \text{H.B.Dwight [6.1]} \\
 \underline{s} := 2 \cdot S \\
 \underline{b} := \frac{B}{8}
 \end{array}
 \quad
 \frac{\rho}{16 \cdot \pi \cdot b} \cdot \left(\ln \left(2 \cdot \frac{b}{a} \right) + \ln \left(2 \cdot \frac{b}{s} \right) + 10.98 - 5.51 \cdot \frac{s}{b} + 3.26 \cdot \frac{s^3}{b^3} - 1.17 \cdot \frac{s^4}{b^4} \right) = 13.707 \Omega$$

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

$$\frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot B} \cdot \left(\ln \left(\frac{B^2 \cdot 10^4}{2.69 \cdot S \cdot 2 \cdot a} \right) \right) = 15.33 \Omega$$

2.7 CONDUCTOR horizontal de radio a, en círculo de diámetro D, enterrado a una profundidad S (s/2) en un terreno de resistividad ρ .

$$\begin{array}{l}
 D = 10 \text{ m} \\
 a = 0.006 \text{ m} \\
 S = 0.5 \text{ m} \\
 \rho = 100 \Omega \cdot \text{m}
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 \underline{s} := 2 \cdot S \\
 \text{H.B.Dwight [6.1]}
 \end{array}
 \quad
 \frac{\rho}{4 \cdot \pi^2 \cdot D} \cdot \left(\ln \left(8 \cdot \frac{D}{a} \right) + \ln \left(4 \cdot \frac{D}{s} \right) \right) = 3.324 \Omega$$

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

$$B = 20 \text{ m}$$

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

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

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

C.L. Hallmark [6.4]

$$\frac{\rho}{2.73 \cdot B} \cdot \log\left(2 \cdot \frac{B^2}{S \cdot w}\right) = 6.42 \Omega$$

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

$$B = 20 \text{ m}$$

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

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

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

C.L. Hallmark [6.4]

$$\frac{\rho \cdot 1.03}{2.73 \cdot B} \cdot \log\left(2 \cdot \frac{B^2}{S \cdot w}\right) = 6.612 \Omega$$

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

$$B = 20 \text{ m}$$

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

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

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

$$g = 5 \text{ m}$$

Sankosha [6.7]

$$\frac{\rho}{2.73 \cdot B} \cdot \left(\log\left(\frac{B^2}{2 \cdot S \cdot w}\right) + \log\left(\frac{B}{g}\right) \right) = 6.42 \Omega$$

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

$$B = 20 \text{ m}$$

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

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

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

Sankosha [6.7]

$$\frac{\rho \cdot 1.12}{2.73 \cdot B} \cdot \log\left(2 \cdot \frac{B^2}{S \cdot w}\right) = 7.19 \Omega$$

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

$$B = 20 \text{ m}$$

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

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

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

C.L. Hallmark [6.4]

$$\frac{\rho \cdot 1.06}{2.73 \cdot B} \cdot \log\left(2 \cdot \frac{B^2}{S \cdot w}\right) = 6.805 \Omega$$

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

$$B = 20 \text{ m}$$

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

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

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

C.L. Hallmark [6.4]

$$\frac{\rho \cdot 1.12}{2.73 \cdot B} \cdot \log\left(2 \cdot \frac{B^2}{S \cdot w}\right) = 7.19 \Omega$$

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

$$B = 20 \text{ m}$$

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

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

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

C.L. Hallmark [6.4]

$$\frac{\rho \cdot 1.42}{2.73 \cdot B} \cdot \log\left(2 \cdot \frac{B^2}{S \cdot w}\right) = 9.116 \Omega$$

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.

$$B = 20 \text{ m}$$

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

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

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

C.L. Hallmark [6.4]

$$\frac{\rho \cdot 1.65}{2.73 \cdot B} \cdot \log\left(2 \cdot \frac{B^2}{S \cdot w}\right) = 10.592 \Omega$$

4. MALLAS SIN VARILLAS

4.1 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 = 20 m
 A = 600 m²
 S = 0.5 m
 ρ = 100 Ω·m

Para S < 0.25 m

Laurent-Niemann [6.2]

$$\frac{\rho}{4} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{\rho}{B} = 6.809 \Omega$$

Para 0.25 m < S < 2.5 m

J.G. Sverak [6.2]

$$\rho \cdot \left[\frac{1}{B} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot A}} \cdot \left(1 + \frac{1}{1 + S \cdot \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] = 6.749 \Omega$$

4.2 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 = 20 m
 a = 0.006 m
 S = 0.5 m
 ρ = 100 Ω·m

Seidman [6.5]

$s := 2 \cdot S$

$$\frac{\rho}{0.2061 \cdot L1} \cdot \left(0.0304 - 0.0083 \cdot \ln \left(a \cdot \frac{s}{L1^2} \right) \right) = 2.961 \Omega$$

4.3 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 = 20 m
 a = 0.006 m
 S = 0.5 m
 ρ = 100 Ω·m

Seidman [6.5]

$s := 2 \cdot S$

$$\frac{\rho}{0.2061 \cdot L1} \cdot \left(0.0475 - 0.0054 \cdot \ln \left(a \cdot \frac{s}{L1^2} \right) \right) = 2.599 \Omega$$

4.4 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 = 20 m
 a = 0.006 m
 S = 0.5 m
 ρ = 100 Ω·m

Seidman [6.5]

$s := 2 \cdot S$

$$\frac{\rho}{0.2061 \cdot L1} \cdot \left(0.05 - 0.0043 \cdot \ln \left(a \cdot \frac{s}{L1^2} \right) \right) = 2.365 \Omega$$

5.5 Malla de los cimientos de una construcción con volumen V, en un terreno de resistividad ρ [6.8]

$$V = 1 \times 10^4 \text{ L}$$

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

Markiewicz-Klajn [6.8]

$$0.2 \cdot \frac{\rho}{\sqrt[3]{V}} = 9.283 \Omega$$

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.

$$B = 20 \text{ m}$$

$$A = 600 \text{ m}^2$$

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

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

Para $S < 0.25 \text{ m}$

$$\text{Laurent-Niemann [6.2]} \quad \frac{\rho}{4} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{\rho}{B} = 6.809 \Omega$$

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

J.G. Sverak [6.2]

$$\rho \cdot \left[\frac{1}{B} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot A}} \cdot \left(1 + \frac{1}{1 + S \cdot \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] = 6.749 \Omega$$

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.

$$A = 600 \text{ m}^2$$

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

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

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

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

$$a = 0.006 \text{ m}$$

$$B = 20 \text{ m}$$

Schwarz [6.2]

Constantes de Geometría para una profundidad $S < 0.1 \cdot \sqrt{A} = 2.449 \text{ m}$

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

$$K1 = 1.125$$

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

$$K2 = 4.83$$

Resistencia de los conductores de la malla (R1)

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

$$n = 6$$

$$L1 = 20 \text{ m}$$

$$L2 = 30 \text{ m}$$

$$R1 = 3.666 \Omega$$

Resistencia de todas las varillas electrodo (R2)

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

$$R2 = 6.094 \Omega$$

Resistencia Mutua (Rm) entre conductores y varillas electrodo

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

$$Rm = -0.511 \Omega$$

Resistencia Total del Sistema

$$\frac{R1 \cdot R2 - Rm^2}{R1 + R2 - 2 \cdot Rm} = 2.048 \Omega$$

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.

Schwarz [6.2]

$$A = 600 \text{ m}^2$$

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

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

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

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

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

$$a = 0.006 \text{ m}$$

$$B = 20 \text{ m}$$

$$n = 6$$

$$L1 = 20 \text{ m}$$

$$L2 = 30 \text{ m}$$

Resistividad Aparente

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

$$\rho_a = 103.413 \Omega \cdot \text{m}$$

Constantes de Geometría para una profundidad $S < 0.1 \cdot \sqrt{A} = 2.449 \text{ m}$

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

$$K1 = 1.125$$

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

$$K2 = 4.83$$

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

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

$$R1 = 3.666 \Omega$$

Resistencia de todas las varillas electrodo (R2)

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

$$R2 = 6.302 \Omega$$

Resistencia Mutua (Rm) entre conductores y varillas electrodo

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

$$Rm = -0.529 \Omega$$

Resistencia Total del Sistema

$$\frac{R1 \cdot R2 - Rm^2}{R1 + R2 - 2 \cdot Rm} = 2.07 \Omega$$

6. REFERENCIAS

- [6.1] DWIGHT, H.B. *Calculation of Resistances to Ground*. AIEE Transactions vol 55. Dic 1936. págs. 1319-1328.
- [6.2] IEEE *Guide for Safety in AC Substation Grounding*. IEEE Std-80-2000.
- [6.3] RÜDENBERG, R. *Fundamental Considerations on Ground Currents*. Electrical Engineering. Ene 1945.
- [6.4] HALLMARK, C. L. Grounding Systems LLC. Graphite Sales, Inc.
- [6.5] SEIDMAN, A. *Handbook of Electric Power Calculations*. McGraw-Hill 1996.

[6.6] NMX-J-549-ANCE-2005. Sistema de Protección contra Tormentas Eléctricas - Especificaciones, Materiales y Métodos de Medición. ANCE. 2005.

[6.7] *San-Earth Technical Review - Practical Measures for Lowering Resistance to Grounding*. Sankosha Corp.

[6.8] MARKIEWICZ, H & KLAJN, A. *Earthing Systems - Basic Constructional Aspects*. Copper Development Association. UK 2004.

[6.9] DURHAM, M & DURHAM, R. Lightning, Grounding and Protection for Control Systems. IEEE Transactions on Industry Applications. Jan/Feb 1995. págs 45-54

