



IMPLEMENTACIÓN DE SOLUCIONES ENERGÉTICAS CON FUENTES NO CONVENCIONALES DE ENERGÍA PARA USUARIOS EN ZONAS RURALES DEL MUNICIPIO DE TEORAMA EN EL DEPARTAMENTO DE NORTE DE SANTANDER

ANEXO – MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD Y CÁLCULO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA SGSFV

DICIEMBRE 2024

TABLA DE CONTENIDO

1	MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL TERRENO	4
2	EQUIPO UTILIZADO.....	8
3	NORMAS DE REFERENCIA	9
4	REPORTE DE MEDICIONES	10
5	PROCEDIMIENTO PAR EL CÁLCULO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA.....	15
6	RESULTADOS DEL CALCULO DEL SPT	17



LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Datos de campo	5
Tabla 2 Datos de campo ejemplo	7
Tabla 3 Resultados modelando con un electrodo el SPT	17
Tabla 4 Resultados modelando con un electrodo, con suelo mejorado $R=0.05m$	18
Tabla 5 Resultados modelando con un electrodo, con suelo mejorado $R=0,1m$	18
Tabla 6 Resultados modelando con dos electrodos el SPT	19
Tabla 7 Resultados modelando una malla básica de cuatro electrodos el SPT	20
Tabla 8 Cantidades Malla básica de cuatro electrodos	21

1 MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL TERRENO

Las técnicas para medir la resistividad del terreno son esencialmente las mismas cualquiera sea el propósito de la medida. Sin embargo, la interpretación de los datos recolectados puede variar considerablemente y especialmente donde se encuentren suelos con resistividades no uniformes.

Típicamente, los suelos poseen varias capas horizontales superpuestas, cada una teniendo diferente resistividad. A menudo se presentan también cambios laterales de resistividad, pero más graduales a menos que se configuren fallas geológicas. Por tanto, las mediciones de resistividad deben ser realizadas para determinar si hay alguna variación importante de la resistividad con la profundidad.

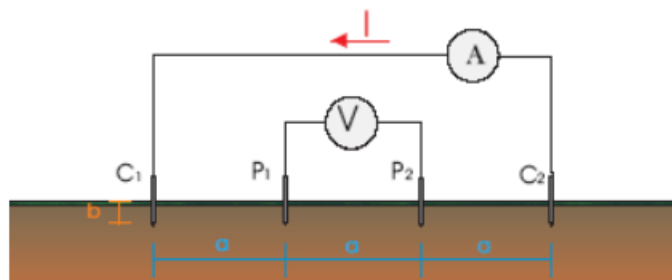
Las diferentes técnicas de medida son descritas en detalle en la IEEE Std 81-1983 "IEEE Guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and earth surface potential of a ground system".

Para este proyecto se utilizó el método de Wenner por ser el método más preciso. El método obtiene la resistividad del suelo para capas profundas sin enterrar los electrodos a dichas profundidades; no es necesario un equipo pesado para realizar las mediciones; los resultados no son afectados por la resistencia de los electrodos auxiliares o los huecos creados para hincarlos en el terreno.

El método consiste en enterrar pequeños electrodos tipo varilla en cuatro huecos en el suelo a una profundidad "b" y espaciados (en línea recta) una distancia "a" como se ilustra en la Figura 1.

Figura 1 Distribución de electrodos – Método Wenner

Método de Wenner



Una corriente "I" se inyecta entre los dos electrodos externos y el potencial "V" entre los dos electrodos internos es medido por el instrumento. El instrumento mide la resistencia $R (=V/I)$ del volumen de suelo cilíndrico de radio "a" encerrado entre los electrodos internos. La resistividad aparente del suelo ρ_a a la profundidad "a" es aproximada por la siguiente ecuación:

Ecuación Cálculo resistividad aparente del suelo

$$\rho_a = \frac{4\pi R a}{\left(1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4b^2}}\right)}$$

Dado que en la práctica la distancia "a" es mucho mayor que la profundidad de enterramiento "b", la ecuación se simplifica de la siguiente manera:

Ecuación simplificada

$$\rho a = 2\pi R a$$

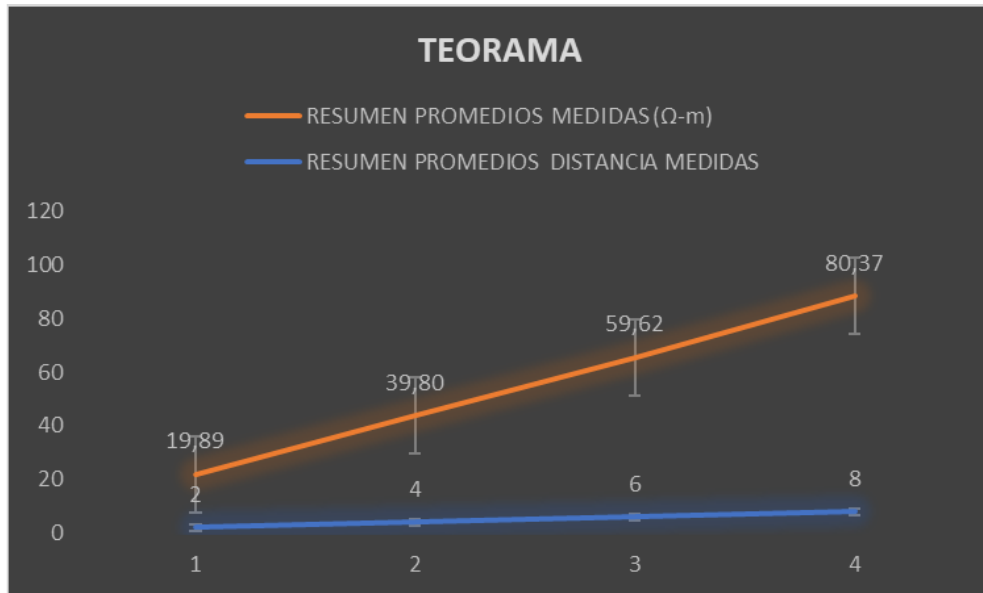
Para determinar el cambio de la resistividad del suelo con la profundidad, el espaciamento entre electrodos se varía desde unos pocos metros hasta un espaciamento igual o mayor que la máxima dimensión esperada del sistema de puesta a tierra (por ejemplo, la mayor distancia posible entre 2 puntos de una malla, o la profundidad de las varillas). El espaciamento “a” del electrodo se interpreta como la profundidad aproximada a la cual se lee la resistividad del suelo. Para caracterizar la variación de la resistividad del suelo dentro de un área específica, se deben realizar varios grupos de medidas (perfiles) en diferentes direcciones. Diferentes lecturas tomadas con varios espaciamentos alineados dan un grupo de resistividades (perfil), que cuando son graficadas contra el espaciamento, indican si hay capas diferentes de suelo y dan una idea de su respectiva profundidad y resistividad.

Los siguientes datos ilustran este concepto.

MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD									
MEDIDAS	DISTANCIA DE MEDICION EN METROS								PROMEDIO PARA CADA MEDIDA (Ω-m)
	2N	2S	4N	4S	6N	6S	8N	8S	
MEDIDA 1 (Ω-m)	20,5	19,84	41,3	39,6	61,5	59,4	82,4	79,2	50,4675
MEDIDA 2 (Ω-m)	19,13	19,79	38,2	39,4	57,3	59,3	76,5	79,1	48,59
MEDIDA 3 (Ω-m)	19,6	20,5	39,2	41,1	58,6	61,6	83,2	81,8	50,7
PROMEDIO MEDIDAS PARCIALES	19,74	20,04	39,57	40,03	59,13	60,10	80,7	80,03	
PROMEDIO EN MUNICIPIO	19,89		39,80		59,62		80,37		49,92

Tabla 1 Datos de campo
Fuente: DICO S.A.S

Gráfico 1 Curva de resistividades del terreno



Fuente: DICOMO S.A.S

En el modelado se considera un suelo como homogéneo cuando los valores definitivos y representativos de resistividad aparente obtenidos para cada espaciamento “a”, no se apartan en más de un 30% del valor máximo de los mismos. Para efectos de modelación del suelo, se asume entonces el valor promedio como la resistividad del terreno. Alternativamente puede aplicarse el método estadístico de Box Cox (ver libro “Fundamentos e ingeniería de las puestas a tierra. Respuestas ante Fallas Eléctricas y Rayos”), que busca un valor con probabilidad de 70% de ser el real, valor que se utilizará luego en los cálculos necesarios para el diseño de la puesta a tierra.

El método de Box Cox se aplica como se describe a seguir, partiendo de los datos de resistividad obtenidos de todas las lecturas:

- En una columna se tabulan los datos de resistividad aparente medida r_i .
- En otra columna se colocan los logaritmos naturales de cada una de las medidas $X_i = \ln r_i$.
- Se halla la resistividad promedio x como:

Resistividad promedio x

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

- En otra columna se coloca el resultado de $(x_i - x)^2$
- Se calcula la desviación estándar S como:

Desviación estándar S

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x)^2}{n}}$$

- f) De la distribución normal se toma Z para 70%, que da 0.524411
g) Se halla la resistividad (con probabilidad del 70% de no ser superada) por la siguiente fórmula:

Ecuación resistividad

$$\rho = \text{Anti Ln}(S * Z + x)$$

Para mayor claridad se presenta el siguiente ejemplo con los datos de campo:

Datos	ρ	$X_i = \text{Ln}(\rho)$	$S = (X_i - \bar{X})^2$
1	20,5	3,0204	0,5874
2	19,84	2,9877	0,6386
3	41,3	3,7209	0,0044
4	39,6	3,6788	0,0117
5	61,5	4,1190	0,1104
6	59,4	4,0843	0,0885
7	82,4	4,4116	0,3903
8	79,2	4,3720	0,3424
9	19,13	2,9513	0,6982
10	19,79	2,9852	0,6427
11	38,2	3,6428	0,0207
12	39,4	3,6738	0,0128
13	57,3	4,0483	0,0684
14	59,3	4,0826	0,0875
15	76,5	4,3373	0,3030
16	79,1	4,3707	0,3409
17	19,6	2,9755	0,6582
18	20,5	3,0204	0,5874
19	39,2	3,6687	0,0140
20	41,1	3,7160	0,0050
21	58,6	4,0707	0,0806
22	61,6	4,1207	0,1114
23	83,2	4,4212	0,4025
24	81,8	4,4043	0,3812
Suma	1198,06	90,8842	6,5880
Promedio	49,919	3,787	0,275
Desv. Estándar		0,5239	
Resistividad con el 70%		58,07	$\Omega.m$
<p>Z = 0,524411 Constante Distribución Normal Estándar invertida para el 70% de probabilidad.</p> <p>Se halla la resistividad (con probabilidad del 62% de no ser superada) por la siguiente fórmula: $\rho = \text{Exp}(S * Z + x)$</p>			
Resistividad Calculada $\rho =$		58,07	$\Omega.m$

Tabla 2 Datos de campo ejemplo
Fuente: DICOMO S.A.S

2 EQUIPO UTILIZADO

Las medidas de resistividad se realizaron por medio del instrumento METREL Modelo Eurotest MI 2088 con certificado de calibración vigente.

Este equipo cuenta está compuesto por:

- Equipo Smartec tierra / resistividad.
- Conexión de cable de prueba universal 4,5 m (azul).
- Conexión de cable de prueba universal 4,5 m (rojo).
- Conexión de cable de prueba universal 20 m (verde).
- Conexión de cable de prueba universal 20 m (negro).
- Picas de tierra de 30 cms, 4 uds.
- Adaptador de corriente + 6 pilas AA de NiMH.

Figura 2 Equipo utilizado para medición de la resistividad









Fuente: fabricante del equipo











3 NORMAS DE REFERENCIA









- IEEE Std 81-1983 "Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System".
- ASTM G57-95a "Standard Test Method for Field measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four Electrode- Method".
- EPM Normas técnicas 2008, "Medidas de resistividad eléctrica del suelo RAE-014"

4 REPORTE DE MEDICIONES

Se realizaron medidas en tres sitios diferentes del Municipio, según coordenadas en cuadro de Georreferenciación. En cada sitio se realizan dos (2) tomas lineales, cada una de cuatro mediciones (2, 4, 6, 8 mt) con el mismo centro y direcciones Norte - Sur, Oriente – Occidente, respectivamente para precisar una excelente cobertura en el terreno en donde se implementará la malla de Puesta a Tierra. Finalmente se promediarán los resultados finales de cada medición y se evaluará el resultado para diseñar la Malla de puesta a Tierra del presente proyecto de acuerdo a la normatividad mencionada.

Medida 1 (Coordenadas 9,0405651 -73,0227759)		
	NORTE-SUR	ORIENTE OCCIDENTE
MEDIDA A 2M		
	NORTE-SUR	ORIENTE OCCIDENTE
MEDIDA A 4M		
	NORTE-SUR	ORIENTE OCCIDENTE
MEDIDA A 6M		

MEDIDA A 8M		
Medida 2 (Coordenadas 8,4053283 73,2861205)		
	NORTE-SUR	ORIENTE OCCIDENTE
MEDIDA A 2M		
	NORTE-SUR	ORIENTE OCCIDENTE
MEDIDA A 4M		
	NORTE-SUR	ORIENTE OCCIDENTE
MEDIDA A 6M		
	NORTE-SUR	ORIENTE OCCIDENTE
MEDIDA A 8M		

Medida 3 (Coordenadas 8,5641946 -73,2581149)		
MEDIDA A 2M		
	NORTE-SUR	ORIENTE OCCIDENTE
MEDIDA A 4M		
	NORTE-SUR	ORIENTE OCCIDENTE
MEDIDA A 6M		
	NORTE-SUR	ORIENTE OCCIDENTE
MEDIDA A 8M		

- **Cálculo de la resistividad**

Figura 3. Tabla de datos recolectados en campo

RESUMEN PROMEDIOS	
DISTANCIA MEDIDAS	MEDIDAS (Ω-m)
2	19,89
4	39,80
6	59,62
8	80,37

Figura 4 Distribución de la resistividad medida

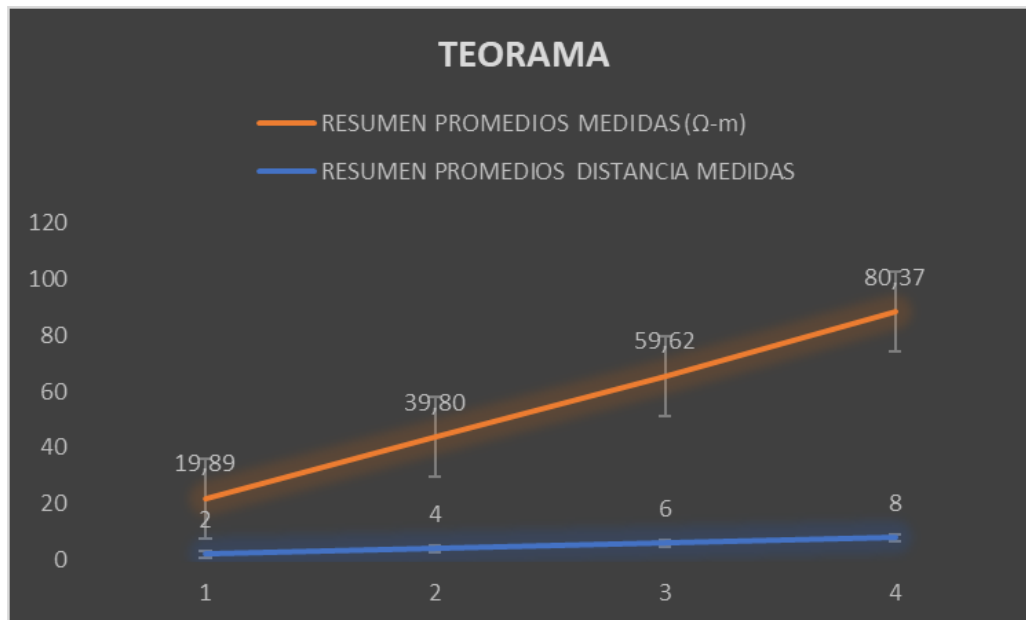


Figura 5 Cálculo probabilístico de la resistividad

Datos	p	$X_i = \text{Ln}(p)$	$S = (X_i - \bar{X})^2$
1	20,5	3,0204	0,5874
2	19,84	2,9877	0,6386
3	41,3	3,7209	0,0044
4	39,6	3,6788	0,0117
5	61,5	4,1190	0,1104
6	59,4	4,0843	0,0885
7	82,4	4,4116	0,3903
8	79,2	4,3720	0,3424
9	19,13	2,9513	0,6982
10	19,79	2,9852	0,6427
11	38,2	3,6428	0,0207
12	39,4	3,6738	0,0128
13	57,3	4,0483	0,0684
14	59,3	4,0826	0,0875
15	76,5	4,3373	0,3030
16	79,1	4,3707	0,3409
17	19,6	2,9755	0,6582
18	20,5	3,0204	0,5874
19	39,2	3,6687	0,0140
20	41,1	3,7160	0,0050
21	58,6	4,0707	0,0806
22	61,6	4,1207	0,1114
23	83,2	4,4212	0,4025
24	81,8	4,4043	0,3812
Suma	1198,06	90,8842	6,5880
Promedio	49,919	3,787	0,275
Desv. Estándar		0,5239	
Resistividad con el 70%		58,07	$\Omega\cdot m$

Z = 0,524411		Constante Distribución Normal Estándar invertida para el 70% de probabilidad.
Se halla la resistividad (con probabilidad del 62% de no ser superada) por la siguiente fórmula: $\rho = \text{Exp} (S \cdot Z + x)$		
Resistividad Calculada $\rho =$	58,07	$\Omega.m$


Finalmente se concluye que para el proyecto el valor de la resistividad de terreno será de 58,07 $\Omega.m$.

5 PROCEDIMIENTO PAR EL CÁLCULO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

El cálculo del sistema de puesta a tierra (SPT) para la protección de los equipos del sistema SSFV fue realizado mediante la aplicación del Estándar IEEE-142 2007. (*IEEE Std 142-200, IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems*).

Teniendo en cuenta que el valor recomendado de la resistencia de puesta a tierra (R_{pt} ó R_G) es de 25Ω para el punto neutro de acometida en baja tensión de acuerdo a la Tabla 15.4 del RETIE 2013, se utilizaron las fórmulas recomendadas en el estándar IEEE-142, Tabla 4-5, para diferentes tipos de configuraciones, como se muestra a continuación.

Figura 6 Ecuaciones para el cálculo de la Resistencia de Puesta a Tierra

	Hemisphere radius a	$R = \frac{\rho}{2\pi a}$
•	One ground rod length L , radius a	$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right)$
• •	Two ground rods $s > L$; spacing s	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right) + \frac{\rho}{4\pi s} \left(1 - \frac{L^2}{3s^2} + \frac{2L^4}{5s^4} \dots \right)$
• •	Two ground rods $s < L$; spacing s	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} + \ln \frac{4L}{s} - 2 + \frac{s}{2L} - \frac{s^2}{16L^2} + \frac{s^4}{512L^4} \dots \right)$
—	Buried horizontal wire length $2L$, depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} + \ln \frac{4L}{s} - 2 + \frac{s}{2L} - \frac{s^2}{16L^2} + \frac{s^4}{512L^4} \dots \right)$
└	Right-angle turn of wire length of arm L , depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} - 0.2373 + 0.2146 \frac{s}{L} + 0.1035 \frac{s^2}{L^2} - 0.0424 \frac{s^4}{L^4} \dots \right)$
└└	Three-point star length of arm L , depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{6\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} + 1.071 - 0.209 \frac{s}{L} + 0.238 \frac{s^2}{L^2} - 0.054 \frac{s^4}{L^4} \dots \right)$
+	Four-point star length of arm L , depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{8\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} + 2.912 - 1.071 \frac{s}{L} + 0.645 \frac{s^2}{L^2} - 0.145 \frac{s^4}{L^4} \dots \right)$
✳	Six-point star length of arm L , depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{12\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} + 6.851 - 3.128 \frac{s}{L} + 1.758 \frac{s^2}{L^2} - 0.490 \frac{s^4}{L^4} \dots \right)$
✳	Eight-point star length of arm L , depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{16\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} + 10.98 - 5.51 \frac{s}{L} + 3.26 \frac{s^2}{L^2} - 1.17 \frac{s^4}{L^4} \dots \right)$
○	Ring of wire diameter of ring D , diameter of wire d , depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \left(\ln \frac{8D}{d} + \ln \frac{4D}{s} \right)$
—	Buried horizontal strip length $2L$, section a by b , depth $s/2$, $b < a/8$	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} + \frac{a^2 - \pi ab}{2(a+b)^2} + \ln \frac{4L}{s} - 1 + \frac{s}{2L} - \frac{s^2}{16L^2} + \frac{s^4}{512L^4} \dots \right)$
⊗	Buried horizontal round plate radius a , depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{8a} + \frac{\rho}{4\pi s} \left(1 - \frac{7}{12} \frac{a^2}{s^2} + \frac{33}{40} \frac{a^4}{s^4} \dots \right)$
	Buried vertical round plate radius a , depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{8a} + \frac{\rho}{4\pi s} \left(1 + \frac{7}{24} \frac{a^2}{s^2} + \frac{99}{320} \frac{a^4}{s^4} \dots \right)$

Las fórmulas que más se aplican en los casos de resistividades bajas como las medidas son:
Un electrodo de longitud L y radio a

$$R = \frac{\rho}{2\pi} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right)$$

Dos o más electrodos de longitud L y radio a separados una distancia s donde $s > L$

$$R = \frac{\rho}{2\pi} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right) + \frac{\rho}{4\pi s} \left(1 - \frac{L^2}{3s^2} + \frac{2L^4}{5s^4} \dots \right)$$

Malla de conductores enterrados a profundidad s con electrodos en cuadrícula

Resistencia de los conductores de la malla (R1)	
$R1 := \frac{\rho}{\pi \cdot B} \cdot \left(\ln \left(\frac{2 \cdot B}{\sqrt{2 \cdot a \cdot S}} \right) + \frac{K1 \cdot B}{\sqrt{A}} - K2 \right)$	
Resistencia de todas las varillas electrodo (R2)	
$R2 := \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot n \cdot L} \left[\ln \left(\frac{4 \cdot L}{r} \right) - 1 + \frac{2 \cdot K1 \cdot L}{\sqrt{A}} \cdot (\sqrt{n} - 1)^2 \right]$	
$K1 := -0.05 \cdot \frac{L2}{L1} + 1.2$	
$K2 := 0.1 \cdot \frac{L2}{L1} + 4.68$	
Resistencia Mutua (Rm) entre conductores y varillas electrodo	
$Rm := \frac{\rho}{\pi \cdot B} \cdot \left(\ln \left(\frac{2 \cdot B}{L} \right) + \frac{K1 \cdot B}{\sqrt{A}} - K2 + 1 \right)$	$Rm =$
Resistencia Total del Sistema	
$\frac{R1 \cdot R2 - Rm^2}{R1 + R2 - 2 \cdot Rm} =$	

6 RESULTADOS DEL CALCULO DEL SPT

Si aplicamos la formulación descrita de cálculo de la resistencia a tierra para configuraciones con electrodos se obtiene:

- Utilizando la formulación para un Electrodo de cobre de 5/8" x 2.44 m

$$\begin{aligned} & \text{H.B.Dwight [6.1]} \quad \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \left(\ln \left(4 \cdot \frac{L}{r} \right) - 1 \right) \\ & \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \left(\ln \left(4 \cdot \frac{L}{r} \right) - 1 \right) = \end{aligned}$$

FORMULA DE DWIGHT	
LONGITUD DE LA VARILLA (L)	2,44 m
RADIO DE LA VARILLA (r)	0,0079375 m
RESISTIVIDAD DEL TERRENO (ρ)	58,07 Ωm
RESISTENCIA DE LA PUESTA A TIERRA (R)	23,1600494 Ω

$$\begin{aligned} & \text{R. Rüdénberg [6.3]} \quad \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \ln \left(2 \cdot \frac{L}{r} \right) \\ & \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \ln \left(2 \cdot \frac{L}{r} \right) = \end{aligned}$$

FORMULA DE RUDENBERG	
LONGITUD DE LA VARILLA (L)	2,44 m
RADIO DE LA VARILLA (r)	0,0079375 m
RESISTIVIDAD DEL TERRENO (ρ)	58,07 Ωm
RESISTENCIA DE LA PUESTA A TIERRA (R)	24,3223333 Ω

Tabla 3 Resultados modelando con un electrodo el SPT

- Con mejoramiento para los electrodos:

Cuando aplicamos la ecuación de Fagan Lee con mejoramiento del terreno alrededor del electrodo con base en bentonita para una varilla, utilizando Electrodo de cobre de 5/8" x 2.44m:

Profundidad de enterramiento 25 cm

Caso de radio del recubrimiento de 5 cm, diámetro de 10 cm, eso daría un volumen del cilindro de: 0,017 m³

$$\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \left[\rho \cdot \left(\ln \left(\frac{8 \cdot L}{2 \cdot r1} \right) - 1 \right) + \rho1 \cdot \left(\ln \left(\frac{8 \cdot L}{2 \cdot r} \right) - 1 \right) - \rho1 \cdot \left(\ln \left(\frac{8 \cdot L}{2 \cdot r1} \right) - 1 \right) \right] =$$

FORMULA DE FAGAN-LEE r1=0,05m		
LONGITUD DE LA VARILLA (L)	2,44	m
RADIO DE LA VARILLA (r)	0,0079375	m
RESISTIVIDAD DEL TERRENO (p)	58,07	Ωm
RESISTENCIA DE LA PUESTA A TIERRA (R)	16,4290601	Ω
RADIO DEL TERRENO TRATADO (r1)	0,05	m
RESISTIVIDAD DE LA BENTONITA (p1)	2	Ωm

Tabla 4 Resultados modelando con un electrodo, con suelo mejorado R=0.05m

Caso de radio del recubrimiento de 10 cm, diámetro de 20 cm, eso daría un volumen del cilindro de: 0,0688 m³

FORMULA DE FAGAN-LEE r1=0,1m		
LONGITUD DE LA VARILLA (L)	2,44	m
RADIO DE LA VARILLA (r)	0,0079375	m
RESISTIVIDAD DEL TERRENO (p)	58,07	Ωm
RESISTENCIA DE LA PUESTA A TIERRA (R)	13,8940113	Ω
RADIO DEL TERRENO TRATADO (r1)	0,1	m
RESISTIVIDAD DE LA BENTONITA (p1)	2	Ωm

Tabla 5 Resultados modelando con un electrodo, con suelo mejorado R=0,1m

- Dos Varillas verticales en paralelo, sin tratamiento:

Para comparar con la formulación expuesta para varios electrodos,

d > L	$\frac{\rho}{4 \cdot \pi \cdot L} \cdot \left(\ln \left(4 \cdot \frac{L}{r} \right) - 1 \right) + \frac{\rho}{4 \cdot \pi \cdot d} \cdot \left(1 - \frac{L^2}{3 \cdot d^2} + \frac{2 \cdot L^4}{5 \cdot d^4} \right) =$
d < L	$\frac{\rho}{4 \cdot \pi \cdot L} \cdot \left(\ln \left(4 \cdot \frac{L}{r} \right) + \ln \left(4 \cdot \frac{L}{d} \right) - 2 + \frac{d}{2 \cdot L} - \frac{d^2}{16 \cdot L^2} + \frac{d^4}{512 \cdot L^4} \right) =$

FORMULA DE DWIGHT $d > L$		
LONGITUD DE LA VARILLA (L)	2,44	m
RADIO DE LA VARILLA (r)	0,0079375	m
RESISTIVIDAD DEL TERRENO (p)	58,07	Ωm
RESISTENCIA DE LA PUESTA A TIERRA (R)	12,3049307	Ω
DSITANCIA ENTRE LAS VARILLAS (d)	6,1	m
FORMULA DE DWIGHT $d < L$		
LONGITUD DE LA VARILLA (L)	2,44	m
RADIO DE LA VARILLA (r)	0,0079375	m
RESISTIVIDAD DEL TERRENO (p)	58,07	Ωm
RESISTENCIA DE LA PUESTA A TIERRA (R)	23,1600494	Ω
DSITANCIA ENTRE LAS VARILLAS (d)	6,1	m

Tabla 6 Resultados modelando con dos electrodos el SPT

- Conductores enterrados a una profundidad (s)

El siguiente paso es evaluar la instalación de solo conductores en las diferentes configuraciones a una profundidad de referencia s, es muy común utilizar las formulaciones de los mismos autores de fórmulas para electrodos, sin embargo, pasamos directamente a la configuración tipo malla con conductores enterrados y electrodos.

- Malla de conductores enterrados a profundidad s con electrodos en cuadrícula

Por último, un cálculo de mallas con electrodos sin tratamiento a una distancia consecuente con el volumen de sugerido por la norma de referencia para logro de resultados óptimos:

- Malla como esta enunciada en la tabla de cálculo:

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 ps. 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 malla está enterrada mínimo 0.25m

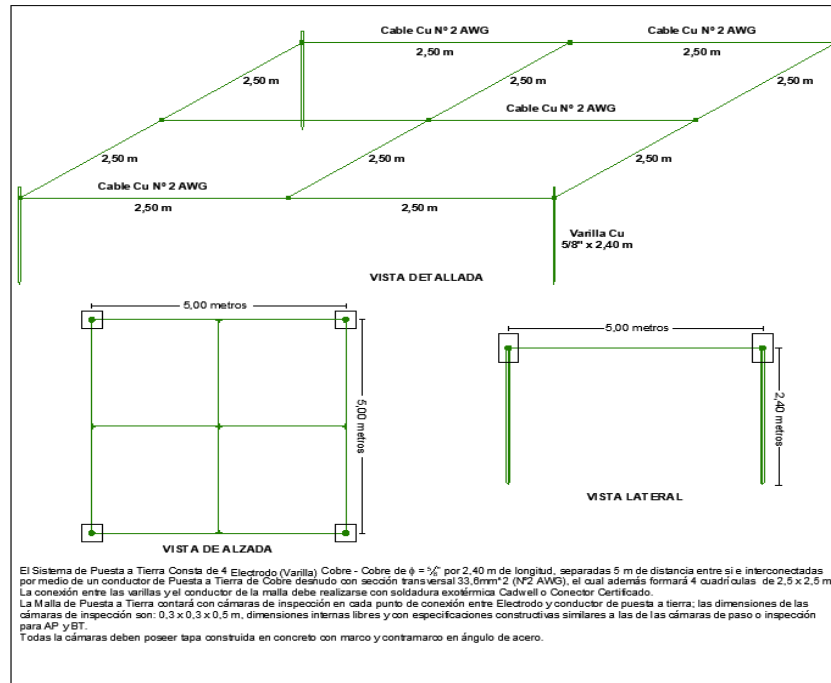
Conductor Cu calibre		2 AWG	
Electrodo Cu-Cu		5/8"	
AREA	A	25 m ²	Resistencia de los conductores de la malla (R1)
PROFUNDIDAD	S	0,25 m	$R1 := \frac{\rho}{\pi \cdot B} \cdot \left(\ln \left(\frac{2 \cdot B}{\sqrt{2 \cdot a \cdot S}} \right) + \frac{K1 \cdot B}{\sqrt{A}} - K2 \right)$
NUMERO DE VARILLAS	n	4	
RADIO VARILLA	r	0,0079375 m	Resistencia de todas las varillas electrodo (R2)
RADIO CONDUCTOR	a	0,00327 m	$R2 := \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot n \cdot L} \cdot \left[\ln \left(\frac{4 \cdot L}{r} \right) - 1 + \frac{2 \cdot K1 \cdot L}{\sqrt{A}} \cdot (\sqrt{n} - 1)^2 \right]$
LONGITUD DE LA VARILLA	L	2,44 m	
RESISTIVIDAD DEL TERRENO	p	58,07 Ωm	$K1 := -0,05 \cdot \frac{L2}{L1} + 1,2$
LADO CORTO	L1	5 m	$K2 := 0,1 \cdot \frac{L2}{L1} + 4,68$
LADO LARGO	L2	5 m	
LONGITUD DEL CONDUCTOR	B	35 m	Resistencia Mutua (Rm) entre conductores y varillas electrodo
CONSTANTES SE USAN SOLO SI S<0,1*RAIZ(A)		SI SE PUEDE	$Rm := \frac{\rho}{\pi \cdot B} \cdot \left(\ln \left(\frac{2 \cdot B}{L} \right) + \frac{K1 \cdot B}{\sqrt{A}} - K2 + 1 \right)$
CONSTANTE DE GEOMETRIA 1	K1	1,15	$Rm = \frac{R1 \cdot R2 - Rm^2}{R1 + R2 - 2 \cdot Rm}$
CONSTANTE DE GEOMETRIA 2	K2	4,78	
RESISTENCIA DE LOS CONDUCTORES DE LA MALLA	R1	5,66492325 Ω	
RESISTENCIA DE TODAS LAS VARILLAS	R2	6,85285701 Ω	
ELECTRODO			
RESISTENCIA MUTUA ENTRE CONDUCTORES Y VARILLAS	Rm	4,02771771 Ω	
RESISTENCIA TOTAL DEL SISTEMA	R	5,0642431 Ω	

Tabla 7 Resultados modelando una malla básica de cuatro electrodos el SPT

• Resultado del Diseño del SPT

El diseño del SPT más apropiado para las condiciones previstas es el mostrado a continuación en el dibujo:

Figura 7 Resultados Malla básica de cuatro electrodos



Malla con 4 electrodos de cobre, conductor desnudo en cobre No. 2 AWG, uniones con soldadura exotérmica; la longitud de conductor enterrado es de aproximadamente 35m, a esto hay que sumar las colas de tomas de tierra y conexiones.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD
1	Cable de Cobre desnudo calibre No. 2 AWG	m	35
2	Soldadura Exotérmica Dosis de 115 Gr, incluye iniciador	Ds.	16
3	Terminal Tubular Estañado de Ponchar Doble Hueco	Un.	5
4	Varilla de Cobre-Cobre de 99,9% de pureza, de 5/8"x2,44m (16mmx2,44m)	Un.	4

Tabla 8 Cantidades Malla básica de cuatro electrodos

A continuación, se describen las principales características que debe cumplir este SPT en su construcción y cuyo grafico de composición y localización está indicado en el plano general, los resultados y los cálculos se presentan en la sección o capítulo correspondiente anexado como soporte.

Materiales para la Malla de Puesta a Tierra

En la elección de los materiales de puesta a tierra, deberá considerarse su resistencia a la corrosión en distintos medios y su compatibilidad para conectarse en las uniones de conductores y varillas o conductores y estructuras u otros. En las mallas de pararrayos se usarán conductores y varillas de cobre. Los conductores deben ser continuos y cumplir la Norma Tabla 250-94 de la NTC 2050, las varillas deben tener como mínimo 2.4 metros de longitud y espesor de 5/8", según el RETIE,



garantizando una resistencia a la corrosión por lo menos de 15 años. Además, debe estar identificado con la razón social o marca registrada del fabricante y sus dimensiones.

Las conexiones que van bajo el nivel del suelo en puestas a tierra, deben ser realizadas mediante soldadura exotérmica o conectores certificados para tal uso.

Para verificar que las características de los electrodos de puesta a tierra y su unión con la red equipotencial, cumpla con las Normas, además para realizar la inspección y mantenimiento durante la vida útil de la instalación, se debe dejar al menos un punto de conexión accesible e inspeccionable. Cuando para este efecto se construya una caja de inspección, sus dimensiones deben ser al menos de 30cmx30cm, o de 30 cm de diámetro si es circular y su tapa debe ser removible.

El detalle constructivo se indica en estas memorias y se presenta en los respectivos planos del proyecto.

Pruebas

Una vez terminada la instalación de la malla a tierra y antes de conectar los equipos, deben ser realizadas las pruebas y mediciones por algún método aceptado para tal fin.

