

# ANÁLISIS DE PUESTAS A TIERRA DE PRIMARIOS URBANOS DE 22.8 KV Y 6.3KV DE LA EEQ S.A.

Tapia Luis, Ing.  
Gaibor Álvaro, Ing.  
Valdivieso Álvaro, Ing.  
Escuela Politécnica Nacional

## INTRODUCCIÓN

El estudio de sistemas de puesta a tierra (SPT) de alimentadores primarios, ha considerado la evaluación del cumplimiento de los requisitos mínimos de un SPT en base al estudio estadístico de una muestra en la cual se pueda obtener características generales de los equipos aéreos de la zona urbana de la ciudad de Quito; además de revisar características geológicas de la zona que determinen el grado de corrosividad y el valor de la resistencia de puesta a tierra.

En el presente proyecto, se ha llevado a cabo un adecuado proceso de análisis del estado de los sistemas de puesta a tierra de la EEQ S.A., complementado con un diagnóstico zonificado de las mediciones realizadas y de las anomalías observadas, lo cual ha permitido realizar una propuesta para el diseño y construcción de sistemas de puesta a tierra, en base a la aplicación de estándares internacionales y técnicas actualizadas debidamente justificadas.

La guía realizada permitirá a la empresa y contratistas estandarizar los criterios para la elaboración de sistemas de puesta a tierra.

## RESUMEN

El presente proyecto, pretende tomar en cuenta todos los parámetros de evaluación de Sistemas de Puesta a Tierra y resumirlos en una guía práctica que sea de utilidad tanto para empresas eléctricas de distribución e ingenieros contratistas.

Para el efecto se procedió a revisar las metodologías de diseño y construcción de puestas a tierra en sistemas de distribución, además de identificar las condiciones actuales de los equipos, realizando un análisis zonificado de nueve alimentadores primarios de la EEQ S.A.

La muestra se obtuvo del número total equipos aéreos existentes en el sistema de distribución de la EEQ, basándose en un estudio estadístico, que permitió establecer condiciones generales del sistema.

Las mediciones de resistencia de puesta a tierra, de resistividad del suelo y las inspecciones realizadas del estado actual de las conexiones de puesta a tierra son

las bases para el análisis desarrollado en este proyecto.

En el análisis del sistema de puesta a tierra del sistema de distribución de la EEQ S.A. se consideró necesario realizar las siguientes fases:

- Propiedades del suelo que intervienen en la corrosión del electrodo de puesta a tierra.
- Análisis estadístico para la obtención de la muestra.
- Análisis de mediciones de RPT.
- Análisis de mediciones de resistividad del suelo.
- Evaluación de las configuraciones indicadas en las norma de la EEQ S.A.
- Influencia de la resistencia de puesta a tierra en los equipos de protección contra sobrevoltaje.

### **Propiedades del suelo que intervienen en la corrosión del electrodo de puesta a tierra.**

Es importante considerar que tipo de suelo existe en el sitio de instalación de

un sistema de puesta a tierra, y que características de conducción posee.

El factor más importante al diseñar un sistema de puesta a tierra es la resistividad del terreno, esta indica la dificultad que tienen los electrones para circular en este medio; sin embargo este parámetro depende de ciertas propiedades que tiene el terreno y que condicionan el grado de corrosividad al que esta expuesto el electrodo de puesta a tierra., como son:

- PH (potencial Hidrógeno)
- Potencial Red-Ox

**PH.-** El potencial hidrógeno es un índice del grado de acidez del terreno, y por lo tanto un factor determinante en la degradación de electrodos metálicos.

**Potencial Red-Ox.-** El potencial de oxidación-reducción permite predecir el riesgo de corrosión anaerobia que puede sufrir una estructura enterrada.

En manera general las condiciones para las cuales se tiene un alto riesgo de corrosión del electrodo de puesta a tierra, se muestran en la Tabla 1.

Resistividad	< 100 Ω.m
Potencial Hidrógeno	<6.5
Potencial RED-OX	<400mV

Tabla 1.- Condiciones de riesgo de corrosión

### Análisis estadístico para la obtención de la muestra.

Al ser la población grande y no poder ser estudiada en su integridad, las conclusiones obtenidas se basaron en el análisis de una parte de ésta, Como conocemos el total de la población y deseásemos saber cuántos del total tendremos que estudiar para que la muestra sea valida, se hizo uso de la siguiente expresión.

$$n = \frac{N \cdot Z_{\alpha}^2 \cdot p \cdot q}{d^2(N-1) - Z_{\alpha}^2 \cdot p \cdot q}$$

Donde:

- N** = Total de la población
- $Z_{\alpha}^2$**  = Coeficiente de seguridad
- p** = proporción esperada
- q** = 1 – p
- d** = precisión

El coeficiente de  $Z_{\alpha}$  varía, de la siguiente manera:

Nivel de seguridad	Coeficiente de Seguridad ( $Z_{\alpha}$ )
0.800	1.282
0.850	1.440
0.900	1.645
0.950	1.960
0.975	2.240
0.990	2.576

Tabla 2.- Coeficiente de seguridad  $Z_{\alpha}$  en función del nivel de seguridad

El método utilizado para la selección de la muestra es el de **muestreo simple** debido a que se tomará solamente un tipo de muestra de nuestro universo o población (los equipos que deben estar arrizados) por este motivo el tamaño de la muestra es lo suficientemente grande para lograr extraer una conclusión.

Los parámetros con los cuales realizamos el cálculo del tamaño de la muestra fueron:

- N = 58110 equipos
- Nivel de confianza del 95% que tiene un coeficiente de seguridad  $Z_{\alpha} = 1.96$
- p = proporción esperada de falla en equipos debido a problemas con la puesta a tierra 0.2
- q = (1 – p) Proporción esperada de no falla en equipos debido a problemas con la puesta a tierra 0.8
- d = Nivel de precisión deseado para este estudio es 7 %.

El número escogido de equipos en los cuales se va ha desarrollar las mediciones de resistencia de puesta a tierra es **125**.

## Análisis de mediciones de RPT.

Las mediciones de resistencia de puesta a tierra se las efectuó en 125 equipos aéreos entre transformadores y pararrayos, observándose que los sistemas de puesta a tierra de estos dos equipos presentan valores similares de RPT, razón por la cual la mayoría de las mediciones se realizaron en transformadores aéreos de distribución.

En la tabla 3 se muestra un resumen de las mediciones realizadas en los diferentes equipos discriminándolos por alimentadores.

# Total de Primarios			
Primarios	# Mediciones	#Cumplen	%
18A	18	6	33.3
19B	25	6	24.0
28A	8	3	37.5
9E	12	5	41.7
12A	6	3	50.0
15B	9	3	33.3
4B	11	4	36.4
21D	10	3	30.0
59B	26	14	53.8
<b>Total</b>	<b>125</b>	<b>47</b>	<b>37.6</b>

Tabla 3.- Porcentaje de mediciones que cumplen la norma

Se observa que del total de mediciones (125), 47 equivalente al 37.6% del total cumplen con el valor establecido en la norma es decir 25  $\Omega$  o menor.

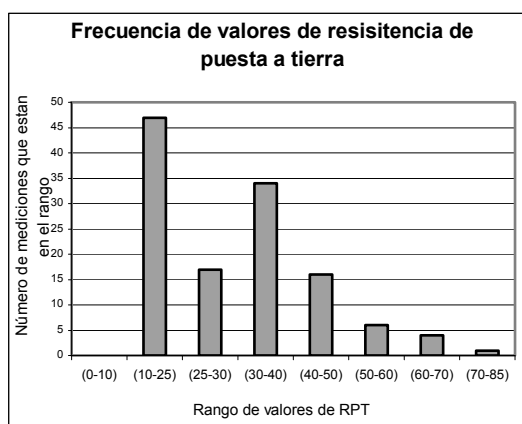


Figura 1.- Frecuencia de valores de RPT

En la figura 1, se puede observar que las medidas se distribuyen en los siguientes rangos de valores.

CLASE	FRECUENCIA
(0-10)	0
(10-25)	47
(25-30)	17
(30-40)	34
(40-50)	16
(50-60)	6
(60-70)	4
(70-85)	1

Tabla 4.- Resumen de frecuencia de mediciones de RPT.

Del total de las mediciones realizadas, 114 se encuentran por debajo de los 50 $\Omega$ , las cuales se pueden reducir a un valor cercano a la mitad mediante la interconexión de los sistemas de puesta a tierra de los pararrayos y los transformadores, evitando además que se originen diferencias de potencial que atenten contra el bobinado primario del transformador.

## Análisis de mediciones de resistividad del suelo.

Las mediciones de resistividad se las realizó tomando como referencia los mismos alimentadores que se usó para la medición de la resistencia de puesta a tierra.

Inicialmente se realizaron mediciones casi simultaneas de resistividad en diferentes puntos, a lo largo de los alimentadores con la finalidad de comparar dichos valores; procediendo después a escoger el sitio con valor de resistividad mas alta, la cual nos indicará la característica más desfavorable del terreno para la cual se deberá realizar el diseño.

En dicho punto se tomaron medidas de resistividad en diferentes intervalos de tiempo en horas del día donde existía mayor influencia del sol con la finalidad de encontrar la curva patrón de resistividades de esta zona.

El mismo procedimiento se aplicó en cada alimentador, para de esta manera obtener una distribución de zonas en función de la resistividad del terreno.

En la Tabla 5 se muestra un resumen de las mediciones de resistividad obtenidas.

Zona	hora	$\rho$ min. (Ω.m)	$\rho$ máx. (Ω.m)
Pomasqui	12:30-14:30	173.4	215.6
Pusuquí	11:30-13:30	188.5	209.6
Cotocollao	12:00-14:30	84.4	126.7
Cmte. Pueblo	10:15-12:40	69.4	126.7
Iñaquito	10:15-14:15	55.8	96.5
La Floresta	11:10-15:30	72.4	110.1
La Comuna	10:30-14:10	72.4	137.2
Miraflores	11:20-14:50	81.4	123.7
El Bosque	11:00-14:00	60.3	101.0
Ferroviaria	12:00-15:00	93.5	111.6
El Recreo	11:30-14:30	76.9	122.2
E.Espejo	12:00-14:50	69.4	99.5
San Bartolo	10:30-14:50	58.8	99.5
Epiclachima	12:00-15:45	92.0	129.7

Tabla 5- Resumen de medidas de resistividad

El procedimiento realizado no permite definir un mapa de resistividades (oficial), ya que es necesario realizar mediciones en diferentes épocas del año para encontrar la curva patrón de cada zona; sin embargo los resultados presentados son una buena aproximación debido a que las mediciones fueron realizadas en época seca, en condiciones en las cuales la resistividad del suelo es la más alta.

**Evaluación de las configuraciones indicadas en las norma de la EEQ S.A.**

Para el diseño de la puesta a tierra la norma establece que el proyectista deberá seleccionar una de las disposiciones tipo para la conexión a tierra, que se muestra en la parte "B" sección B-50, de acuerdo al valor de la resistividad del terreno, a fin de obtener un valor de resistencia de puesta a tierra inferior a 25Ω.

Las Disposiciones Tipo para líneas y redes de distribución son las siguientes:

**Disposición I (T1-1)** Se utiliza cuando la resistividad del terreno es de 100 Ω.m.

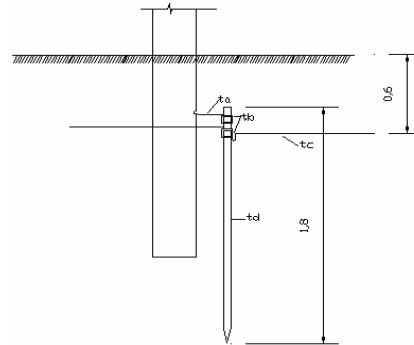


Figura 2.- Vista frontal de disposición T1-1

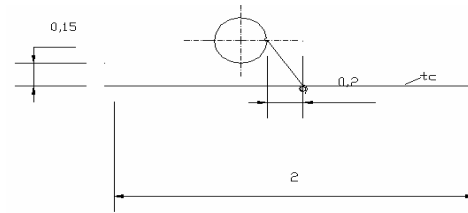


Figura 3.- Vista superior de disposición T1-1

**Disposición II (T1-2)** Se utiliza cuando la resistividad del terreno es de 130 Ω.m.

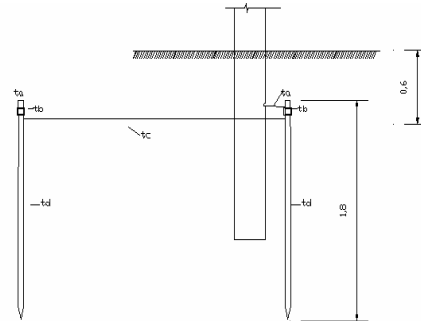


Figura 4.- Vista frontal de disposición T1-2

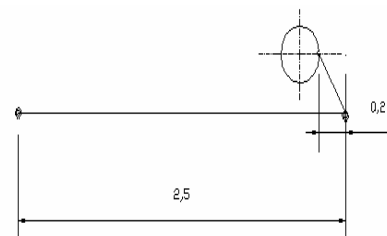
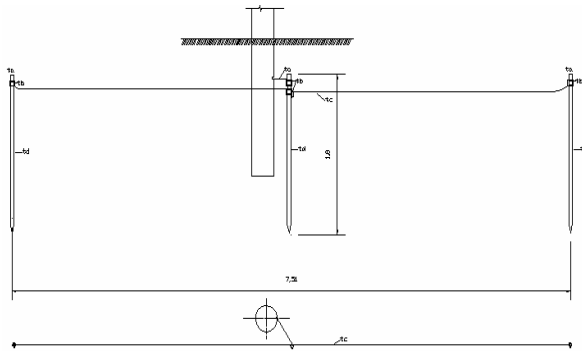


Figura 5.- Vista superior de disposición T1-2

**Disposición III (T1-3)** Se utiliza cuando la resistividad del terreno es de 200 Ω.m.



**Figura 6.- Vista frontal y superior de disposición T1-3**

Mediante el uso de expresiones matemáticas se evaluó las configuraciones propuestas en la norma de la Empresa Eléctrica Quito, obteniéndose los siguientes resultados:

- La disposición Tipo T1-1 utilizada para suelos con resistividad inferior a 100 Ω.m permite obtener un valor de RPT inferior a 25 Ω
- La disposición Tipo T1-2 utilizada para suelos con resistividad inferior a 130 Ω.m no permite obtener un valor de RPT inferior a 25 Ω
- La disposición Tipo T1-3 utilizada para suelos con resistividad inferior a 200 Ω.m no permite obtener un valor de RPT inferior a 25 Ω

Se sugiere los siguientes mecanismos para reducir el valor de la resistencia de puesta tierra para las disposiciones Tipo T1-2 y Tipo T1-3:

- Mejoramiento del suelo mediante el uso de geles químicos.
- Inclusión de 2 metros. de conductor contrapeso horizontal para las dos configuraciones.
- Inclusión de una varilla copperweld a una separación de 2.5m y 3.75m para las disposiciones T1-2 y T1-3 respectivamente.

La inclusión de 2 metros de contrapeso en las disposiciones T1-2 y T1-3, garantiza un valor de resistencia de puesta a tierra inferior a 25Ω, además de permitir una mejor disipación de las corrientes de falla en el suelo.

### Influencia de la resistencia de puesta a tierra en los equipos de protección contra sobrevoltaje.

Para efecto de que el pararrayos cumpla la función de descargar la corriente es necesario que el circuito este cerrado por la resistencia de puesta a tierra, lo cual produce una caída de potencial en esta, que incrementa el voltaje residual.

El valor de resistencia de puesta a tierra del pararrayos deberá ser seleccionado de tal forma que no se sobrepase el margen de protección sugerido.

El margen de protección de un equipo se encuentra entre 10% y 35%; utilizando los valores superiores para protección de descargas atmosféricas, y valores menores, para protección contra impulsos de maniobra.

La expresión que relaciona el margen de protección del sistema, en función del nivel de aislamiento y nivel de protección del pararrayos, se obtuvo del manual Cooper sección B, protección contra sobrevoltajes:

$$MP = \left( \frac{NA}{NP} - 1 \right) \quad (ec.5.11)$$

Donde :

MP = Margen de protección (10% – 30%)

NA = Nivel de aislamiento del equipo a proteger (kV)

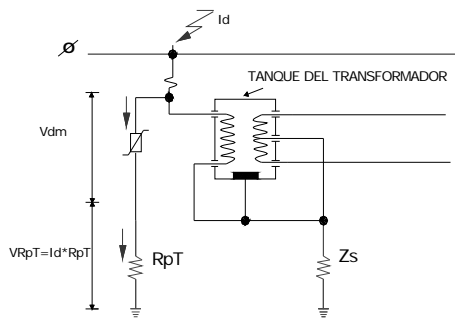
NP = Nivel de protección del pararrayos (kV)

Al momento de la descarga, el pararrayos deberá proteger al sistema de una elevación de voltaje superior al nivel de aislamiento de los equipos.

El nivel de protección del pararrayos (NP) está limitado por la resistencia de puesta a tierra como se indica en la siguiente expresión:

$$NP = Id * RpT + Vdm$$

El voltaje de descarga del pararrayos (Vdm), depende del valor en ohmios de la resistencia no lineal en el instante en que la corriente de descarga es máxima (Id); al igual que la caída de voltaje presentada en la resistencia de puesta a tierra (RpT).



**Figura 2.- Influencia de la RPT del pararrayos**

Para encontrar el valor de resistencia de puesta a tierra adecuado para que el sobrevoltaje no supere el BIL del equipo se sugiere utilizar la expresión (ec.1)

$$NP = \left( \frac{NA}{MP + 1} \right)$$

$$RPT = \frac{NPT - Vdm}{Id}$$

$$RPT = \frac{\left( \frac{NA}{MP + 1} \right) - Vdm}{Id} \quad (ec. 1)$$

Los valores de RPT que garantizarán una adecuada operación del pararrayos están en el orden de los 9 y 11  $\Omega$  tanto para sistemas de 6.3 kV y 22.8kV.

## REFERENCIAS

[L1] TIERRAS Soporte de la Seguridad Eléctrica 2ed., Favio Casas Ospina, Bogota Colombia, 2003

[L2] <http://www.procainsa.com/noticias/iberia-actualidad.html> "La corrosion.htm"

[L3] "Determinación del tamaño muestral Fistera.com"

[L4] [http://www.procobreperu.org/publicaciones .htm](http://www.procobreperu.org/publicaciones.htm) "Medida de parámetros eléctricos aplicados a puestas a tierra puntuales"

[L5] Normas para sistemas de distribución de la EEQ SA parte A "Guía para diseño de las redes de distribución" y B referente a "Estructuras Tipo".- Construcción de los sistemas de distribución

[L6] IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding

[L7] Código eléctrico nacional (ecuador) INEN

[L8] Datos tomados del Departamento de Ingeniería de Distribución

[L9] Revista CIEEPI, febrero 2004 Ediciones CEAC, sa.- Estaciones de Transformación y Distribución Protección de Sistemas eléctricos

[L10] Artículo 250-84 del NEC

[L11] IEEE recommended practice for grounding of industrial and commercial power systems (Std 142-1982)

[L12] Engineering Electromagnetic Compatibility; Principle, Measurement, and Technologies; V.Prasad.Kodali; IEEE Electromagnetic Compatibility Society,Sponsor, 1996

[L13] Manual Cooper; Protección Eléctrica en Sistemas de Distribución; sección B Protección de Sobrevoltajes, 2003, Quito-Ecuador.