



EVALUACION DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA DE SERVICIO EN REDES DE DISTRIBUCION DE ENERGIA ELECTRICA

J.M. Astorga¹

¹Instituto Tecnológico, Universidad de Atacama, Copiapó, Chile
juan.astorga@uda.cl

RESUMEN

La resistencia de puesta a tierra es uno de los factores más influyentes en el diseño de proyectos de redes de distribución eléctrica. En el norte de Chile, lograr valores bajos de resistencia es muy complejo debido a la caracterización de los suelos. En este trabajo se muestran los resultados de las mediciones de la resistencia de puesta a tierra realizada a 120 mallas a tierra instaladas en distintas zonas de la ciudad de Copiapó. Los datos obtenidos de las mediciones de campo son ajustados a la distribución de probabilidad Log Normal. Con este modelo, se calcula un valor representativo de la resistencia de puesta a tierra.

Palabras clave: mallas a tierra, redes de distribución eléctrica, distribución Log Normal

ABSTRACT

The grounding resistance is one most influential factors in project design of electrical distribution networks. There are not low values of grounding resistance in northern Chile, by soil type. In this work, 120 grounding resistance measurements in Copiapó city, are shown. The data set of measurements are fitted to the log normal distribution. Finally, the grounding resistance is calculated with the Log normal distribution.

Keywords: earthing grid, electrical distribution networks, Log Normal distribution

1. INTRODUCCION

En las redes eléctricas de distribución de baja tensión que son alimentadas por transformadores de distribución de media tensión, es necesario disponer de un sistema de puesta a tierra de servicio que garantice la seguridad y la calidad del suministro de energía eléctrica a los usuarios. Para ello, normalmente se instalan mallas a tierra en distintos puntos de la red de distribución, de modo tal que el valor de la resistencia resultante no exceda de 5Ω [1]. Esta exigencia muchas veces complica el diseño del proyecto eléctrico, ya que uno de los principales factores que incide en el diseño de una adecuada malla a tierra es el valor de la resistividad aparente del suelo [2], factor que en la ciudad de Copiapó alcanza magnitudes altas que desfavorece el resultado de la resistencia de puesta a tierra de servicio. No obstante lo anterior, la resistividad aparente del suelo puede reducirse en un 40% del valor original [2] con la aplicación de productos de origen químico que tienen como finalidad compactar las capas del subsuelo, haciéndolo más

homogéneo y conductor, alcanzando valores bajos de resistencia eléctrica. En este trabajo se estudia el comportamiento de la resistencia de puesta a tierra de servicio en la ciudad de Copiapó, basándose en mediciones realizadas a 120 mallas a tierra de baja tensión distribuidas en distintos puntos de la ciudad, el resultado de este análisis permite ajustar una distribución de probabilidad que se utiliza posteriormente para evaluar el diseño de la malla a tierra y establecer acciones correctivas tendientes a la mejora.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Equipo utilizado para la medición

Para realizar las mediciones de campo a las 120 mallas a tierra, se utilizaron los elementos descritos en la tabla 1 y el instrumento que se indica en la figura 1. Este instrumento cumple con la certificación requerida para la medición.

Tabla 1: Equipamiento utilizado para las mediciones de campo.

Cantidad	Descripción
01	Instrumento de medición marca MEGGER modelo DET2/2
04	Placas de cobre (electrodos)
01	Cable 50mts conexión electrodo de corriente
01	Cable 30mts conexión electrodo de corriente
02	Electrodos de potencial
01	Placa plástica de medir de 50mts
01	Trípode



Figura 1: Instrumento de medición Megger DET2/2

2.2. Malla a tierra tipo

La malla a tierra tipo utilizada en este trabajo tiene las siguientes características:

- Dimensiones: tres metros de largo por un metro de ancho
- Conductor: cobre desnudo n°2 AWG
- Uniones: soldadas por termofusión tipo cadweld
- Profundidad de enterramiento: 0,6 m.

En la figura 2, se muestran las zonas de medición de la resistencia de puesta a tierra

de servicio en la ciudad de Copiapó, mientras que en la figura 3 se muestra la instalación de una de las malla a tierra en el Instituto Tecnológico de la Universidad de Atacama.

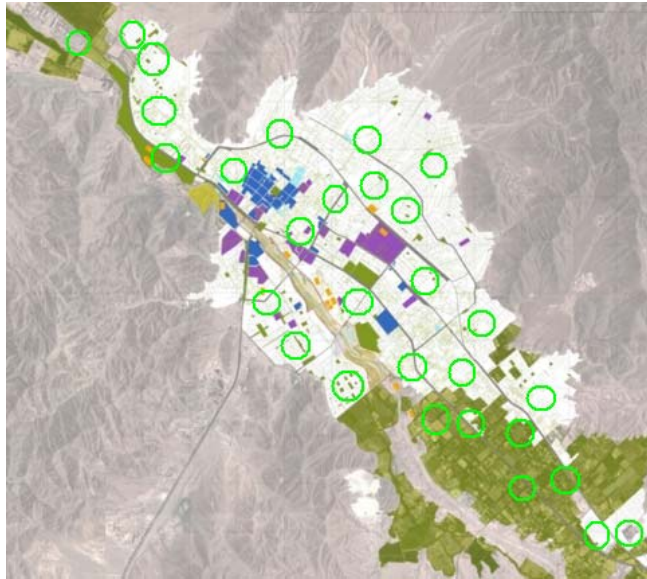


Figura 2: Zonas de medición de resistencia de puesta a tierra en Copiapó.



Figura 3: Instalación de malla a tierra tipo.

2.3. Método de medición de resistencia

Para la medición de la resistencia de puesta a tierra se utilizó el método del 61,8% descrito en el estándar IEEE "Proceeding of the IEEE vol 111 N°12". El método de medición se aplica de la siguiente manera [3]:

- a) Aislar la malla a tierra del resto del sistema.
- b) Calcular la diagonal de malla (D).
- c) Ubicar el electrodo de corriente C2 del instrumento, a una distancia igual a 6,5 veces el valor D. Dejar fijo este electrodo.
- d) Conectar los terminales P1 y C1 del instrumento, directamente a la malla a tierra.
- e) Ubicar el electrodo P2 del instrumento, a una distancia igual al 52% del valor 6,5 veces D; medir y registrar la medida.
- f) Ubicar el electrodo P2 del instrumento, a una distancia igual al 61,8% del valor 6,5 veces D; medir y registrar la medida.
- g) Ubicar el electrodo P2 del instrumento, a una distancia igual al 72% del valor 6,5 veces D; medir y registrar la medida.
- h) Calcular la resistencia de la puesta a tierra como el valor medio de los registros de los pasos e,f y g.

2.4. Cálculo de la resistencia de puesta a tierra de la malla

El valor de la resistencia de puesta a tierra de la malla a tierra depende de la forma geométrica de la malla, de la resistividad del terreno, de la profundidad de enterramiento de la malla, del área que cubre la malla y del largo total del conductor de cobre que se utiliza en toda la grilla [4].

$$R_g = \rho_e \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1+h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (1)$$

Donde,

R_g: Resistencia de puesta a tierra de la malla (Ω)

ρ_e: Resistividad equivalente del terreno en (Ωm)

L_T: Largo total de los conductores de la malla (m)

h: Profundidad de enterramiento de la malla (m)

A: Sección de la malla puesta a tierra en (m²)

2.5. Cálculo de la tensión de contacto y tensión de paso

La seguridad que debe proporcionar el sistema de puesta a tierra se ve reflejado en el control de las tensiones de paso y contacto. La tensión de contacto representa el voltaje entre una estructura de puesta a tierra y el centro de uno de los reticulados de la malla [4]. Este valor se calcula mediante la ecuación (2):

$$V_{\text{contacto}} = \frac{\rho_e \cdot I_f \cdot K_m \cdot K_i}{L_c} \quad (2)$$

Donde,

ρ_e: Resistividad equivalente del terreno en (Ωm)

I_f: Corriente de falla (A)

K_m: Factor de espaciado para tensión de contacto

K_i: Factor de corrección por geometría de la malla

L_c: Largo total de los conductores de la malla sin incluir barras (m)

Por otro lado, la tensión de paso representa la tensión a la que queda sometida una persona al desplazarse por encima de una malla a tierra justo cuando ocurre una falla [4]. La distancia de paso se aproximadamente a un metro. La tensión de paso se calcula mediante la ecuación (3):

$$V_{\text{paso}} = \frac{K_s \cdot K_i \cdot \rho_e \cdot I_f}{L_s} \quad (3)$$

Donde,

K_s: Factor de espaciado para tensión de paso.

K_i: Factor de corrección por geometría de la malla

ρ_e: Resistividad equivalente del terreno en (Ωm)

I_f : Corriente de falla (A)
 L_s : Largo efectivo para la tensión de paso (m)

$$\text{Mediana}(X) = \exp(\mu) \quad (6)$$

2.6. Distribución Log Normal

La distribución Log Normal es un modelo ampliamente usado en las ciencias de la ingeniería. En la ecuación (4) se describe su función de densidad de probabilidad [5].

$$f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} \cdot \exp\left(-\frac{(\log x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right), x > 0 \quad (4)$$

Donde,

μ : Es la media del logaritmo de x .
 σ : Es la desviación estándar del logaritmo de x .

El valor esperado o esperanza del modelo Log Normal se calcula según la ecuación (5), mientras que la mediana se obtiene a partir de la ecuación (6).

$$E(X) = \exp\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right) \quad (5)$$

3. RESULTADOS

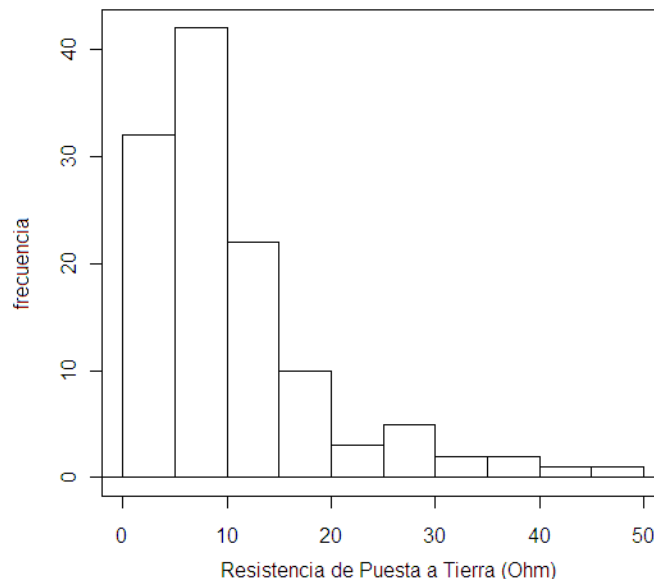
Luego de medir la resistencia de puesta a tierra de servicio de las 120 mallas instaladas en distintos sectores de la ciudad de Copiapó, todos ellos representativos del sistema de distribución eléctrico, se hizo un análisis estadístico descriptivo de la muestra para posteriormente realizar el ajuste de la distribución estadística a los datos, usando el paquete MASS del software R [6].

La tabla 2 muestra el análisis descriptivo de los resultados de las mediciones de puesta a tierra de servicio para la muestra de tamaño 120.

En el histograma de la figura 4, se puede apreciar el sesgo positivo de la distribución de los datos.

Tabla 2: Análisis descriptivo de los resultados de las mediciones de resistencia de puesta a tierra.

Media	Desviación Estándar	Mediana	Coefficiente de Variación	Asimetría	Curtosis
10,615 Ω	8,817 Ω	7,655 Ω	83,07 %	1,680	2,903



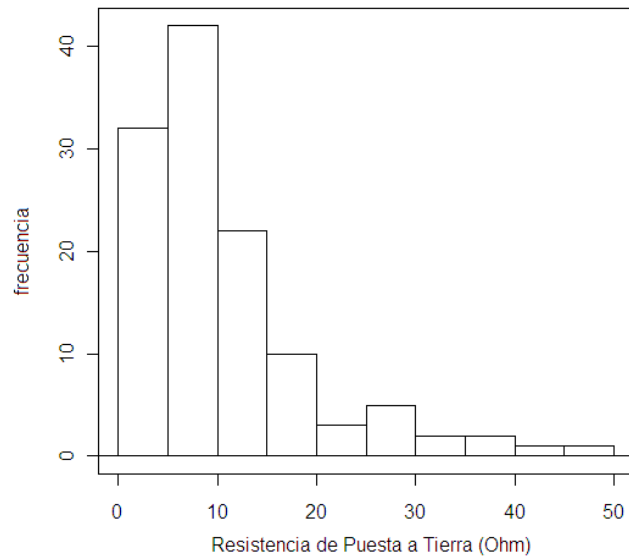


Figura 4: Histograma para la resistencia de puesta a tierra de servicio.

Para ajustar los datos de la muestra a una distribución de probabilidad, se probaron los modelos Weibull, Gamma y Log Normal, ya que estos modelos se utilizan con frecuencia

para ajustar datos con sesgo positivo. La tabla 3, muestra los resultados de las pruebas para la selección del modelo.

Tabla 3: Resultados de las pruebas para la selección del modelo.

Distribución	p-value (valor p)	Log Verosimilitud	AIC (criterio de Información de Akaike)
Weibull	0,619188	-396,643	797,29
Gamma	0,599149	-394,495	792,99
Log Normal	0,970965	-393,738	791.48

De la tabla 3, se puede apreciar que el modelo Log Normal es el que tiene mejor ajuste, ya que el valor AIC es menor que el de los otros dos modelos [7]. El ajuste de la

distribución Log Normal a los datos de la muestra, se presenta en forma gráfica en la figura 5.

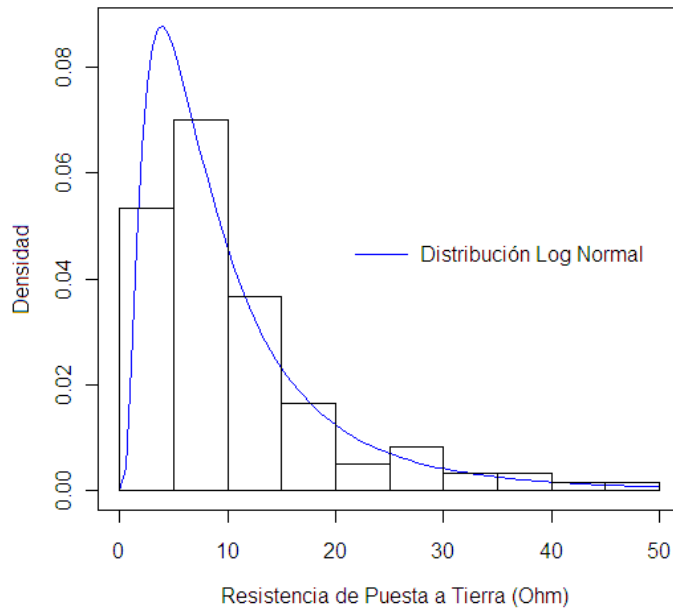


Figura 5: Ajuste de los datos a la distribución Log Normal.

Los parámetros de la distribución Log Normal, la esperanza de la muestra y la mediana de la muestra calculados con el

modelo Log Normal se muestran en la tabla 4.

Tabla 4: Resultados del ajuste de los datos a la distribución Log Normal.

Parámetros de la distribución Log Normal		Valor esperado o esperanza	Mediana
Media del logaritmo (μ)	Desviación estándar del logaritmo (σ)		
2,04349021	0,83418663	9,184 Ω	7,718 Ω

Un indicador adecuado de tendencia central para distribuciones con sesgo positivo es la mediana [8], por lo tanto, y de acuerdo a los resultados de la tabla 3, la resistencia de puesta a tierra para la ciudad de Copiapó (usando la mediana) sería 7,718 Ω , valor que no cumple con las exigencias de la norma eléctrica chilena de baja tensión Nch. Elec. 4/2003. Sin embargo, y según lo explicado en la sección 1 de este trabajo, la aplicación de productos químicos para el mejoramiento del suelo reduciría la resistencia de puesta a tierra a valores cercanos a 4,6 Ω , cumpliendo con el valor máximo permitido de resistencia de puesta a tierra de servicio que fija la norma técnica Nch. Elec. 4/2003.

4. CONCLUSIONES

Según los resultados se concluye lo siguiente. La distribución Log Normal es un buen modelo de la medida de la resistencia de puesta a tierra de servicio para la ciudad de Copiapó, ya que al comparar su ajuste con otras distribuciones típicas de sesgo positivo como las distribuciones Weibull y Gamma, el modelo Log Normal entrega un mejor ajuste. La resistencia de puesta a tierra obtenida por la mediana del modelo Log Normal es 7,718 Ω , valor que es mucho más representativo que la media muestral de 10,615 Ω , ya que la mediana es calculada por el modelo Log Normal.

Para evaluar el diseño de un sistema de puesta a tierra se recomienda utilizar la mediana del modelo Log Normal como indicador de tendencia central.

De acuerdo al modelo Log Normal, la probabilidad que una puesta a tierra de servicio sea menor o igual que 5Ω es igual 0,301417, por tanto, se recomienda agregar productos químicos para el mejoramiento de suelos en todo montaje de mallas a tierra de servicio en la ciudad de Copiapó, de este modo, la resistencia de puesta a tierra promedio disminuirá a valores aceptados por la norma eléctrica de baja tensión vigente en Chile y las tensiones de paso y contacto quedarán controladas.

5. REFERENCIAS

- [1] Norma Eléctrica Chilena NCh. Elec. 4/2003, "Electricidad. Instalaciones de consumo en baja tensión", Superintendencia de Electricidad y Combustibles S.E.C., Santiago de Chile, Octubre de 2003.
- [2] G. Kindermann, J.M. Campagnolo, *Aterramiento eléctrico*, 3ª edición, Sagra-DC-Luzzatto, Porto Alegre, Brasil, 1995.
- [3] G.F. Tagg, Measurement of earth-electrode resistance with particular reference to earth-electrode systems covering a large area; *Proceedings of the IEEE*, Vol. 111, N° 12 (1964), p. 2118– 2130.
- [4] Norma ANSI / IEEE Standard 80-1986, *Guide for Safety in AC Substations Grounding*, New York, USA, 1986.
- [5] J. Devore, *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*, 7ª edición, Cengage Learning, México, 2008.
- [6] The R Project for Statistical Computing, R Development Core Team, (disponible en: <http://www.r-project.org>)
- [7] H. Akaike, A new look at the statistical model identification; *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol.19, N° 6 (1974), p. 716-723.
- [8] L. Alwan, *Statistical Process Analysis*, 2nd edition, M^c Graw Hill / Irwin, USA, 1999.