

Mediciones telurimétricas de las resistencias de las puestas a tierra

Aspectos teóricos y sus aplicaciones prácticas

Ing. Juan Carlos Arcioni
IRAM

La presente es una republicación del artículo homónimo incluido en la edición 320, págs. 8 a 13, a fin de corregir errores de dicha oportunidad

En esta nota técnica, tratamos los siguientes tres temas:

- » Medición de la resistencia de la puesta a tierra (R_x) de un electrodo dispersor X por el método de la caída potencial
- » Mediciones de la resistencia de puesta a tierra R_x con un telurímetro de cuatro bornes C_1 , P_1 , P_2 , C_2 para las disposiciones XPC y XCP
- » Guía de mediciones de resistencias de puesta a tierra (R_{pat}) por el método de la caída de potencial (caída de tensión)

Se trata de distinguir las mediciones de las resistencias de puesta a tierra (R_x) de electrodos X en los casos que sean: a) iguales o mayores que un ohm (1Ω); b) menores a un ohm (1Ω) tal como lo indican las normas técnicas citadas.

Medición de la resistencia de la puesta a tierra (R_x) de un electrodo dispersor X por el método de la caída de potencial

Electrodo X puntual

El electrodo X se dice "puntual" cuando sus dimensiones enterradas en el suelo (o en la roca) son muy pequeñas comparadas con las distancias a que se colocan los electrodos auxiliares P de potencial y

C de corriente, necesarios para medir R_x con un telurímetro (o con instrumental voltamperimétrico).

Principio del método

El generador produce una tensión E_g cuya forma de onda temporal $E_{g(t)}$ y su valor eficaz E_g son tales que la corriente generada I entra al electrodo a medir X (corriente +I), pasa por el suelo y retorna por el electrodo C al generador G (corriente -I que sale del suelo y vuelve al generador G).

El electrodo de corriente (C) se coloca a una distancia (D) del electrodo X cuya R_x deseamos medir. Así se tiene: $D = |XC|$

Se coloca el electrodo P de potencial a una distancia X del electrodo X tal que: $X = |XP|$.

El amperímetro (A) mide el valor eficaz de la corriente (I) y el voltímetro (V), el valor eficaz de la ddp U entre los potenciales de P y de X (que producen corrientes +I y -I en el suelo).

Las corrientes +I y -I generan los cuatro potenciales absolutos V con respecto al SEN (suelo eléctricamente neutro, IRAM 2281-1, 3 y 4) o tierra de referencia (IRAM 2282-4).

En la tabla 1 se indican los cuatro potenciales que producen la corriente +I entrante al X y la -I saliente del C.

Posición	Potencial	Significado
a	V (X; C)	Potencial que en el electrodo X causa la corriente -I que sale del electrodo auxiliar C
b	V (X; X)	Potencial que en el electrodo X causa la corriente +I que entra al electrodo X
c	V (P; C)	Potencial que en el electrodo auxiliar P causa la corriente -I que sale del electrodo auxiliar C
d	V (P; X)	Potencial que en el electrodo auxiliar P causa la corriente +I que entra al electrodo X

Tabla 1. Potenciales absolutos V de los electrodos X y P

El electrodo X se considera "puntual", como así también los electrodos auxiliares C y P.

El potencial total del electrodo X es:

$$V_x = V(X; X) + V(X; C) \quad [1]$$

Aplicando la teoría del electrodo dispersor hemisférico enterrado en un suelo (o roca) homogéneo de resistividad volumétrica ρ (Ωm) constante tendremos que es:

$$V(X; X) = R_x I \quad [2]$$

siendo R_x la resistencia de dispersión o de puesta a tierra del electrodo X que vamos a medir. Además, el electrodo C con su corriente (-I) produce en X, el potencial

$$V(X; C) = (\rho X(-I)/2\pi) (1/D) = (\rho I/2\pi) (-1/D) \quad [3]$$

En [1] reemplazamos las expresiones [2] y [3], resultando:

$$V_x = R_x I + (\rho I/2\pi) (-1/D) \quad [4]$$

El potencial total V_p del electrodo auxiliar P es:

$$V_p = V(P; C) + V(P; X) \quad [5]$$

Los potenciales componentes de V_p son los siguientes:

$$V(P; C) = (\rho (-I)/2\pi) (1/D-X) = (\rho I/2\pi) (-1/D-X) \quad [6]$$

$$V(P; X) = (\rho (+I)/2\pi) (1/X) = (\rho I/2\pi) (1/X) \quad [7]$$

Llevando [6], [7] a la [5], sale:

$$V_p = (\rho (-I)/2\pi) (1/X - 1/D-X) \quad [8]$$

La caída de potencial es la diferencia de potencial siguiente:

$$\text{La ddp } U = \text{ddp}(X; P) = V_x - V_p \quad [9]$$

Llevando los valores de los potenciales totales según [4] y [8] a la [9], resulta:

$$U = V_x - V_p = [R_x I - (\rho I/2\pi) (1/D)] - [(\rho I/2\pi) (1/X) - (\rho I/2\pi) (1/D-X)] \quad [10]$$

De la [10] hallamos la ecuación de la ley de Ohm clásica:

$$U/I = R_x - \rho I/2\pi (1/D + 1/X - 1/D-X) \quad [11]$$

Observamos que U/I difiere de R_x en la expresión del paréntesis. Si se elige X tal que se anule esa

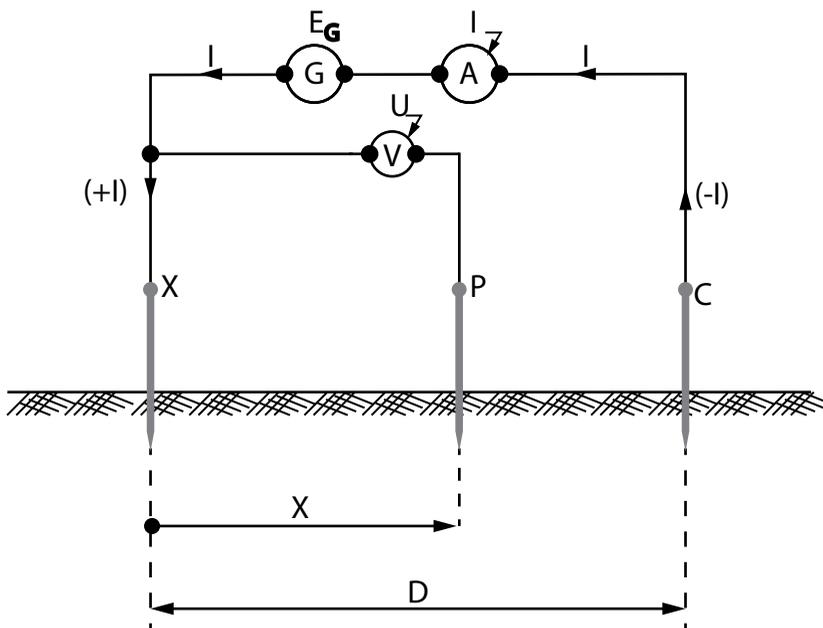


Figura 1. Esquema electrogeométrico del principio del método de la caída de potencial para la medición de la resistencia R_x de puesta a tierra del electrodo puntual X, con la disposición XPC de los electrodos puntuales X, P y C

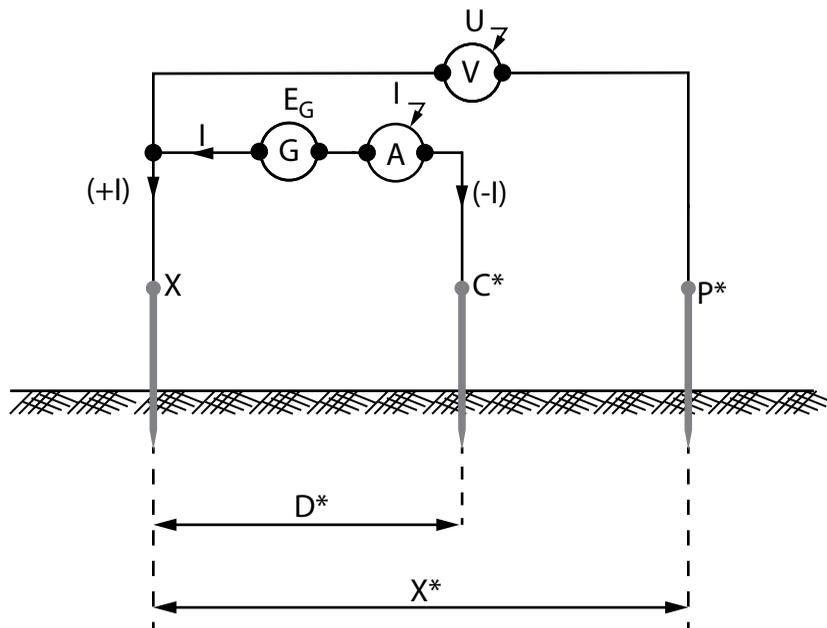


Figura 2. Disposición XCP de los electrodos puntuales X (a medir), C (corriente) y P (potencial) para medir la resistencia de puesta a tierra R_X del electrodo

expresión del paréntesis, tendremos ese caso ideal en el que se cumple que:

$$U/I = R_x \quad [12]$$

que es el valor buscado, pero observemos que siempre será U/I menor o igual que R_x en la práctica.

Resolviendo la ecuación del paréntesis de [11], ella se reduce al numerador siguiente:

$$F(X) = X^2 + DX - D^2 \quad [13]$$

Las raíces de [13] son

$$X/D = (-1 \pm \sqrt{5})/2 = 0,618; -1,618 \quad [14]$$

La raíz positiva $X/D = 0,618$ nos indica que P debe colocarse al 62 por ciento de la distancia (D) midiendo desde X hacia C, es decir, en el orden XPC.

Disposición XCP de los electrodos X (a medir), C (de corriente) y P (de potencial)

En este caso, las ecuaciones son

$$V_x = V(X; X) + V_x; C \quad [15]$$

siendo

$$V(X; X) = R_x I \quad [16]$$

$$V(X; C) = \rho (-I)/2\pi (1/D) = \rho I/2\pi (-1/D) \quad [17]$$

$$V_p = V(P; C) + V(P; X) \quad [18]$$

siendo

$$V(P; C) = \rho (-I)/2\pi (1/X-D) = \rho I/2\pi (-1/X-D) \quad [19]$$

$$V(P; X) = \rho (+I)/2\pi (1/X) = \rho I/2\pi (1/X) \quad [20]$$

$$\therefore V_p = \rho I/2\pi (-1/X-D + 1/X) \quad [21]$$

La ddp $U = V_x - V_p$ resulta la siguiente:

$$U = V_x - V_p = R_x I - \rho I/2\pi [(-1/D) - (-1/X-D) + (1/X)] = R_x I + \rho I/2\pi [(1/D) - (1/X-D) + (1/X)] \quad [22]$$

Para anular la expresión del paréntesis de [22], procedemos así:

$$1/D + (-1/X-D) + 1/X = [(X-D)X - DX + D(X-D)] / [D(X-D)X]$$

$$\therefore X^2 - DX - DX + DX - D^2 = 0$$

$$X^2 + DX - D^2 = 0$$

$$(X/D)^2 - (X/D) - 1 = 0$$

$$\therefore X/D = (1 \pm \sqrt{5}) / 2 = 1,618; -0,618$$

Mediciones de la resistencia de puesta a tierra R_x con un telurímetro de cuatro bornes $C_1; P_1; P_2; C_2$ para las disposiciones XPC y XCP

En la figura 3, representamos a los tres electrodos X (a medir), P (potencial) y C (corriente) en los dispositivos XPC (arriba) y XCP (abajo), con sus distancias y sus interpretaciones según la tabla 2.

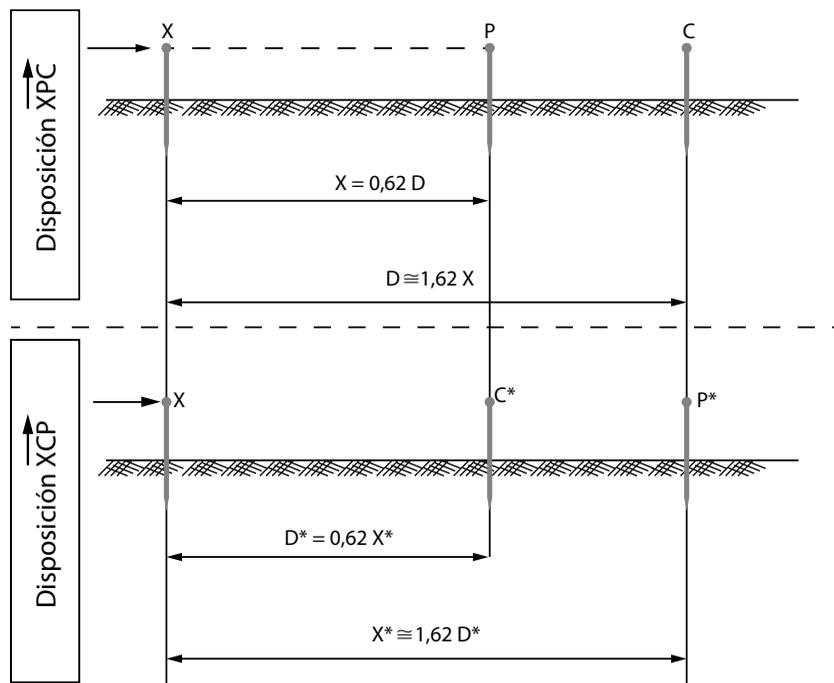


Figura 3. Mediciones de la resistencia de puesta a tierra del electrodo puntual X mediante los electrodos puntuales P (de potencial) y C (de corriente) con un telurímetro de tres o de cuatro bornes, siendo: D, la distancia entre X y C (para XCP), y X, la distancia entre X y P (para XPC)

Disposición (figura 3)	Distancia entre X y P	Distancia entre X y C
XPC (arriba)	$X = 0,62 D$	$D = 1,62 X$
XCP (abajo)	$X^* = 1,62 D^*$	$D^* = 0,62 X^*$

Tabla 2

En la figura 4, representamos a las disposiciones XPC y XCP con los conexiones del telurímetro $C_1 P_1 P_2 C_2$ correspondientes a esas disposiciones para medir R_x .

Guía de mediciones de resistencias de puesta a tierra (R_{pat}) por el método de la caída de potencial (caída de tensión)

Telurímetro de lectura directa de cuatro bornes $C_1 P_1 P_2 C_2$

En la figura 5, representamos un esquema del principio de medición de una resistencia de puesta a tierra R_x del electrodo X dibujado por su símbolo gráfico eléctrico general (una raya vertical centrada en tres rayas horizontales de largos decrecientes y equidistantes).

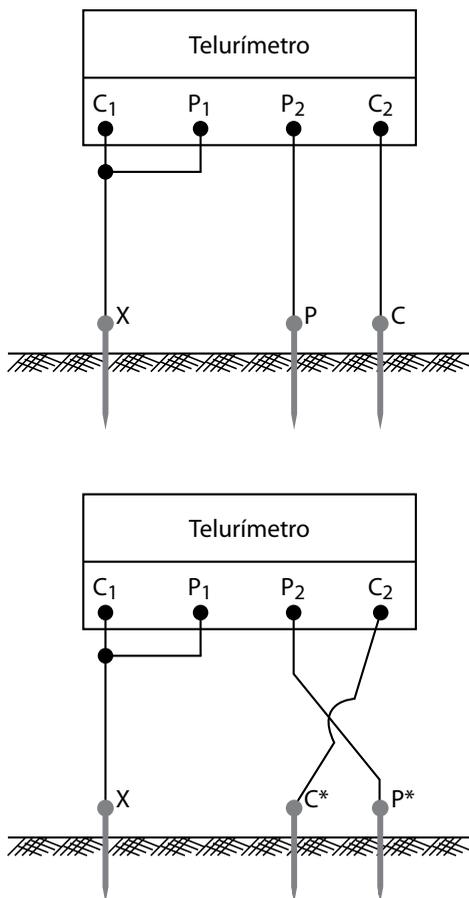
Normas técnicas aplicables a la medición de resistencia de puesta a tierra. Método de la caída de potencial (o de caída de tensión)

En la norma argentina IRAM 2281-2:2002 "Guía de mediciones de magnitudes de puesta a tierra (resistencias, resistividades y gradientes)", en su apartado 6.2.4 se trata el método de la caída de tensión (o de potencial). El apartado 6.2.4 tiene once párrafos (o puntos) 6.2.4.1-11 y las figuras 3, 4, 5 y 6.

En British Standard BS 7430:1991 "Code of practice for earthing" se trata el método de medición de la resistencia de puesta a tierra en sus apartados 16.2 (con 16.2.1 y 16.2.2, figuras 11 y 12).

Medición de la resistencia de puesta a tierra R_x de un electrodo (jabalina, cable vertical u horizontal enterrado, etcétera) siendo su resistencia mayor a un ohm, mediante telurímetro

Según BS 7430:1991 (apartado 16.2.2), para medir la R_x de un electrodo X que sea mayor a un ohm, se clava el electrodo auxiliar de corriente C a una distancia XC mayor o igual a treinta a cincuenta metros, que queda fija. Se efectúan tres mediciones



a) Disposición XCP de los electrodos X, P y C;

b) Disposición XC*P* de los electrodos X, P* y C*.

Figura 4. Disposiciones de los electrodos X, P, C y los conexiones del telurímetro C1 P1 P2 C2 para esas disposiciones.

de R_x (ver figura 6) con el electrodo P en tres ubicaciones P_1, P_2, P_3 , siendo:

R_{x1} a la distancia $XP_1 = XC/2$ [a]

R_{x2} a la distancia $XP_2 = (XC/2) + 7\text{ m}$ [b]

R_{x3} a la distancia $XP_3 = (XC/2) - 7\text{ m}$ [c]

Se calcula el promedio $R_x = (R_{x1} + R_{x2} + R_{x3}) / 3$

Si cualquier valor R_{xi} medido cumple con la condición de una aproximación al cinco por ciento de R_x , es decir, R_{xi} es menor o igual a $R_x \pm 0,05 R_x$, se da por aprobada la medición. En caso contrario, se debe aumentar XC y volver a medir R_x otra vez (u otras veces).

Mediciones de resistencia de puesta a tierra menor a un ohm

Se tratan en las normas argentina IRAM 2281-2 (apartados 6.2.4.5-11) y británica BS 7430:1991 (apartado 6.2.2 y figura 12).

Mediciones de R_x con las disposiciones XPC (figura 4a) y XCP (figura 4b)

Si los valores de R_x (XPC) y R_x (XCP) están dentro de un cinco por ciento de su promedio R_x , siendo $R_x = 1/2 \cdot [R_x(XPC) + R_x(XCP)]$, es decir, que $R_x(XPC) = R_x^2 \pm 0,05 R_x$ y que $R_x(XCP) = R_x \pm 0,05 R_x$, el resultado de ambas mediciones se considera prácticamente válido porque las distancias $X = XP$ y $D = XC$ elegidas para la medición son suficientes para que los tres electrodos X, P y C no interfieran entre sí tanto como para que perturben la medición telurimétrica cuyo principio electrofísico es que X, P y C deben ser prácticamente puntuales, lo que depende de las distancias XP y XC (para XPC) y XP y XC (para XCP).

Bibliografía

- [1] Arcioni, Juan Carlos (2006 y 2009): "Puestas a tierra de instalaciones y sistemas eléctricos de baja tensión, media y alta tensión". Jorge Sarmiento, Córdoba.
- [2] IRAM (2002) 2281-2 (2016/2017 en revisión), BSI (1991) BS 7430

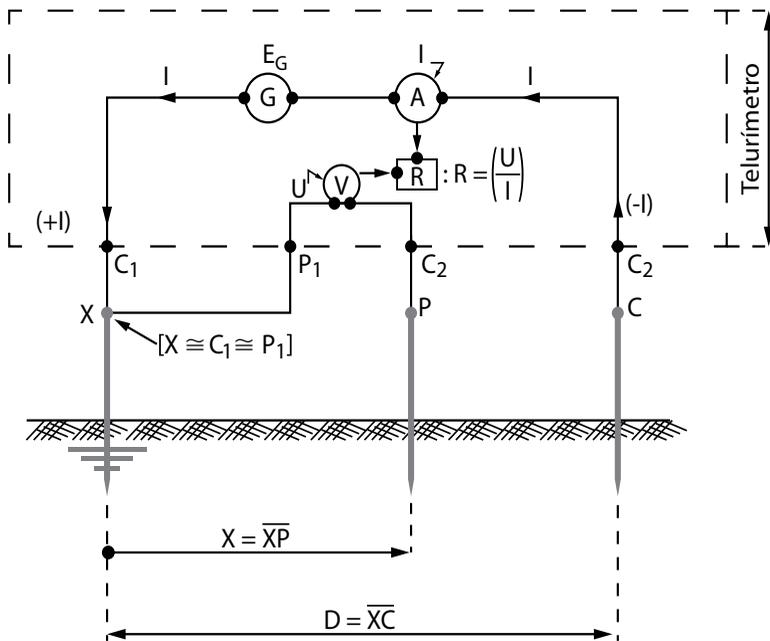


Figura 5. Esquema de principio de medición de R_x del electrodo X con un telurímetro de lectura directa con cuatro bornes C_1, P_1, P_2, C_2 para la disposición XPC de los electrodos

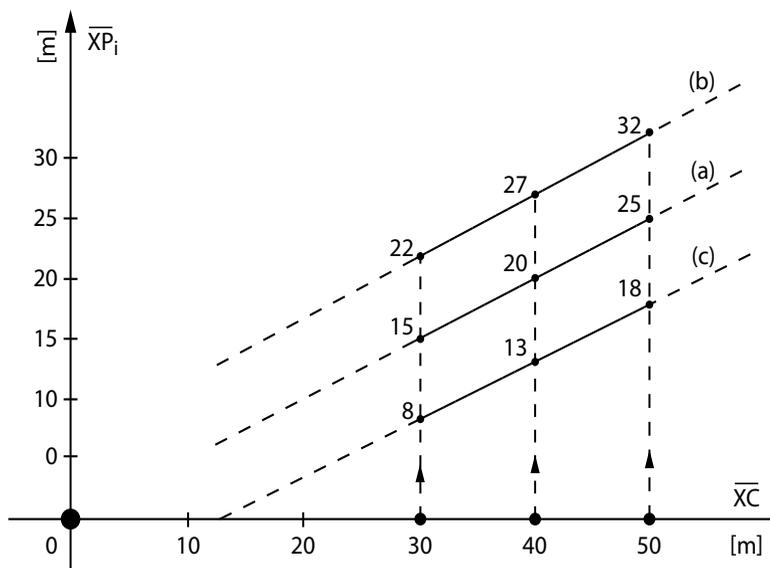


Figura 6. Ejemplo de distancias XP_i en función de la distancia paramétrica XC (fijada) para medir la resistencia de puesta a tierra $= R_x$ mayor a un ohm de un electrodo X (jabalina, cable horizontal, etcétera), siendo:
 $XP_1 = XC/2$ para medir R_{X1} (ohm) [a]
 $XP_2 = XC/2 + 7 \text{ m}$ para medir R_{X2} (ohm) [b]
 $XP_3 = XC/2 - 7 \text{ m}$ para medir R_{X3} (ohm) [c]

Nota: ver el esquema de medición de la figura 5.

Nota del autor:

El autor aprendió el método citado en el último párrafo con el querido colega Prof. Ing. Ilmar Manifesto, exjefe del Laboratorio Electromecánico de Explotación, de SEGBA (1958-92) durante sus trabajos (1961-92) en esa empresa para las mediciones de

puesta a tierra. Vaya esta nota técnica como el agradecimiento del autor y en feliz memoria a la persona del distinguido colega y amigo fallecido en esta década.