



**RED DE PUESTA A TIERRA PARA ESTRUCTURA DE LÍNEAS DE
TRANSMISIÓN AÉREAS DE 69 kV A 400 kV EN CONSTRUCCIÓN**

**ESPECIFICACIÓN
CFE 00J00-52**

**MARZO 2019
REVISA Y SUSTITUYE A LA
EDICIÓN DE JUNIO 2015**

MÉXICO

P R E F A C I O

Esta **especificación** ha sido elaborada de acuerdo con el Manual de Integración y Funcionamiento del Subcomité de Normalización Técnica de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y sus Empresas Productivas Subsidiarias (EPS's) (**SCNTCFE**). La propuesta de revisión fue preparada por la **Dirección de Transmisión**.

Participaron en la elaboración de la presente **especificación** las áreas siguientes:

COORDINACIÓN DE PROYECTOS DE TRANSMISIÓN Y TRANSFORMACIÓN

GERENCIA DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

GERENCIA DEL LAPEM

El presente documento normalizado entra en vigor a partir de la fecha abajo indicada y será actualizado y revisado tomando como base las observaciones que se deriven de la aplicación del mismo. Dichas observaciones deben enviarse a la Gerencia de **LAPEM**, cuyo Departamento de Normalización y Metrología coordinará la revisión.

Esta **especificación** revisa y sustituye a la edición de junio de 2015 y a todos los documentos normalizados de CFE relacionados con red de puesta a tierra para estructuras de líneas de transmisión aéreas de 69 kV a 400 kV en construcción.

ESTE DOCUMENTO FUE AUTORIZADO POR EL "SUBCOMITÉ DE NORMALIZACIÓN TÉCNICA DE LA COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD Y SUS EMPRESAS PRODUCTIVAS SUBSIDIARIAS (SCNTCFE)", EN LA SESIÓN ORDINARIA 2/2019, CELEBRADA EL 20 DE MARZO DE 2019.

Entra en vigor a partir de: 190611

080812	Rev	110506	150611	190411								
--------	-----	--------	--------	--------	--	--	--	--	--	--	--	--

C O N T E N I D O

1	OBJETIVO	1
2	CAMPO DE APLICACIÓN	1
3	NORMAS QUE APLICAN	1
4	DEFINICIONES	1
4.1	Aluminotermia	1
4.2	Bajante	2
4.3	Cola de Rata	2
4.4	Contra-Antena (Electrodo de Puesta a Tierra Horizontal)	2
4.5	Conectores de la Red de Puesta a Tierra	2
4.6	Corriente de Descarga Atmosférica	2
4.7	Corriente de Falla	2
4.8	Electrodo de Puesta a Tierra	2
4.9	Electrodo de Puesta a Tierra Vertical	2
4.10	Estructura de una Línea de Transmisión	2
4.11	Puesta a Tierra	2
4.12	Red de Puesta a Tierra	2
4.13	Relleno	3
4.14	Resistencia de Puesta a Tierra	3
4.15	Resistividad	3
4.16	Resistividad Aparente (ρ_a)	3
4.17	Resistividad Recomendada de Diseño	3
4.18	Sondeo Eléctrico Vertical (SEV)	3
4.19	Sistema de Puesta a Tierra	3
5	CARACTERÍSTICAS Y CONDICIONES GENERALES	4
5.1	Alcance del Suministro	4
5.2	Diseño e Instalación de Redes de Puesta a Tierra en Líneas de Transmisión Aéreas en Construcción en Torres Autosoportadas	4
5.3	Diseño e Instalación de los Sistemas de Puesta a Tierra en Líneas de Transmisión Aéreas con Postes Truncocónicos en Construcción	12
6	CONDICIONES DE OPERACIÓN	23
7	CONDICIONES DE DESARROLLO SUSTENTABLE	23

8	CONDICIONES DE SEGURIDAD INDUSTRIAL	23
9	CONTROL DE CALIDAD	23
10	MARCADO	23
11	EMPAQUE, EMBALAJE, EMBARQUE, TRANSPORTACIÓN, DESCARGA, RECEPCIÓN, ALMACENAJE Y MANEJO	23
12	BIBLIOGRAFÍA	23
APÉNDICE A	(Normativo) MÉTODO DE “WENNER” O DE LOS 4 ELECTRODOS PARA LA MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL SUBSUELO	25
APÉNDICE B	(Normativo) MÉTODO DE CAÍDA DE POTENCIAL PARA LA MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA ELÉCTRICA DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA	27
APÉNDICE C	(Normativo) REQUERIMIENTOS DE CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE RESISTENCIA	30
APÉNDICE D	(Normativo) FORMATOS PARA MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD Y DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA	31
APÉNDICE E	(Informativo) CONSIDERACIONES PARA LA MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD Y RESISTENCIA	33
APÉNDICE F	(Informativo) CONCEPTOS BÁSICOS PARA LOS ARREGLOS DE LA RED DE PUESTA A TIERRA PARA CONSTRUCCIÓN	35
TABLA 1	Contra-antenas y sus electrodos para la red de puesta a tierra de líneas de transmisión en construcción	5
TABLA 2	Profundidad de las contra-antenas con relación al terreno donde se deben instalar	6
TABLA 3	Características de materiales para la construcción de la red de puesta a tierra	6
TABLA 4	Contra-antenas y sus electrodos para el sistema de puesta a tierra de líneas de transmisión de postes troncocónicos en construcción	13
FIGURA 1	Arreglo A o B, para la medición de resistividad aparente del subsuelo por el Método de “Wenner” en líneas aéreas en construcción	7
FIGURA 2	Método de medición de resistencia a tierra por caída de potencial	9
FIGURA 3	Direcciones preferentes para la medición de la resistencia de la red de tierra (vista de planta)	9
FIGURA 4	Sistema de puesta a tierra para estructura autosoportada de línea de transmisión	

	con terreno que tenga una resistividad de diseño en un intervalo de 0 $\Omega\bullet m$ a 100 $\Omega\bullet m$ _____	10
FIGURA 5	Sistema de puesta a tierra para estructura autoportada de línea de transmisión con terreno que tenga una resistividad de diseño en un intervalo de 101 $\Omega\bullet m$ a 300 $\Omega\bullet m$ _____	10
FIGURA 6	Sistema de puesta a tierra para estructura autoportada de línea de transmisión con terreno que tenga una resistividad de diseño en un intervalo de 301 $\Omega\bullet m$ a 500 $\Omega\bullet m$ _____	11
FIGURA 7	Sistema de puesta a tierra para estructura autoportada de línea de transmisión con terreno que tenga una resistividad de diseño en un intervalo de 501 $\Omega\bullet m$ a 750 $\Omega\bullet m$ _____	11
FIGURA 8	Sistema de puesta a tierra para estructura autoportada de línea de transmisión con terreno que tenga una resistividad de diseño en un intervalo de 751 $\Omega\bullet m$ a 1 000 $\Omega\bullet m$ y mayores _____	12
FIGURA 9	Arreglo para la medición de resistividad aparente del subsuelo por el método de “Wenner” en líneas aéreas en construcción con postes troncocónicos _____	14
FIGURA 10	Método de medición de resistencia a tierra por caída de potencial _____	16
FIGURA 11	Direcciones preferentes para la medición de la resistencia de la red de tierra (vista de planta) _____	16
FIGURA 12 A	Vista de perfil del sistema de puesta a tierra para un poste troncocónico ubicado en un suelo con una resistividad de diseño en un intervalo de 0 $\Omega\bullet m$ a 300 $\Omega\bullet m$ _____	17
FIGURA 12 B	Vista de planta del sistema de puesta a tierra para un poste troncocónico ubicado en un suelo con una resistividad de diseño en un intervalo de 0 $\Omega\bullet m$ a 300 $\Omega\bullet m$ _____	18
FIGURA 13 A	Vista de perfil del sistema de puesta a tierra para un poste troncocónico ubicado en un suelo con una resistividad de diseño en un intervalo de 301 $\Omega\bullet m$ a 500 $\Omega\bullet m$ _____	19
FIGURA 13 B	Vista de planta del sistema de puesta a tierra para un poste troncocónico ubicado en un suelo con una resistividad de diseño en un intervalo de 301 $\Omega\bullet m$ a 500 $\Omega\bullet m$ _____	20
FIGURA 14 A	Vista de perfil del sistema de puesta a tierra para un poste troncocónico ubicado en un suelo con una resistividad de diseño en un intervalo de 501 $\Omega\bullet m$ a 1 000 $\Omega\bullet m$ y mayores _____	21
FIGURA 14 B	Vista de planta del sistema de puesta a tierra para un poste troncocónico ubicado en un suelo con una resistividad de diseño en un intervalo de 501 $\Omega\bullet m$ a 1 000 $\Omega\bullet m$ y mayores _____	22

1 OBJETIVO

Normalizar los criterios para medir, mantener, mejorar, instalar, y corregir la red de puesta a tierra destinada a la protección de líneas de transmisión aéreas en operación contra descargas atmosféricas y fallas de corto circuito.

2 CAMPO DE APLICACIÓN

Líneas de transmisión aéreas de 69 kV a 400 kV, en torres autosoportadas y postes troncocónicos.

3 NORMAS QUE APLICAN

NOM-008-SCFI-2002	Sistema General de Unidades de Medida
NOM-063-SCFI-2001	Productos Eléctricos - Conductores-Requisitos de Seguridad
NMX-J-002-ANCE-2001	Conductores - Alambres de Cobre Duro para Usos Eléctricos – Especificaciones
NMX-J-012-ANCE-2014	Conductores - Cable de Cobre con Cableado Concéntrico para Usos Eléctricos -Especificaciones
NMX-J-035-ANCE-2001	Conductores - Alambres de Cobre Semiduro para Usos Eléctricos- Especificaciones
NMX-J-036-ANCE-2001	Conductores - Alambre de Cobre Suave para Usos Eléctricos - Especificaciones.
CFE 56100-16-2018	Electrodos para Tierra.
CFE DY700-26-2015	Conexiones de Soldadura Exotérmica para Sistemas de Puesta a Tierra de Líneas, Subestaciones Eléctricas y Redes Subterráneas de Distribución y Transmisión.
CFE E0000-32-2018	Alambre y Cable de Cobre Semiduro Desnudo.
CFE E0000-33-2016	Alambre y Cable de Acero con Recubrimiento de Cobre Soldado (ACS) o Recubrimiento Eléctrolítico.

NOTA: En caso de que los documentos anteriores sean revisados o modificados, debe tomarse en cuenta la edición en vigor en la fecha de la convocatoria de la licitación, salvo que la CFE indique otra cosa.

4 DEFINICIONES

Para efectos de esta especificación se establecen las siguientes definiciones:

4.1 Aluminotermia

Proceso por el cual se libera una gran cantidad de calor para fundir una soldadura exotérmica mediante una mezcla de pólvora y aluminio en polvo.

4.2 Bajante

Es un conductor metálico que conecta al hilo de guarda con la red de puesta a tierra.

4.3 Cola de Rata

Conductor de unión entre el hilo de guarda y la estructura.

4.4 Contra-Antena (Electrodo de Puesta a Tierra Horizontal)

Conductor metálico desnudo, enterrado y tendido en forma horizontal, con una profundidad y longitud variable, que debe estar conectado a la estructura, y sirve para drenar corrientes de descarga atmosférica o de falla.

4.5 Conectores de la Red de Puesta a Tierra

Elementos utilizados para unir dos partes metálicas en forma soldable de la red de puesta a tierra, de tal manera que se garantice el contacto permanente entre ellas.

4.6 Corriente de Descarga Atmosférica

Es la corriente provocada por un rayo que incide en la línea de transmisión aérea y que fluye por el sistema de puesta a tierra.

4.7 Corriente de Falla

Es la corriente alterna que fluye durante una falla de corto circuito de los conductores de la línea de transmisión aérea a tierra.

4.8 Electrodo de Puesta a Tierra

Cuerpo conductor o conjunto de elementos conductores agrupados y en contacto directo con el suelo y destinados a establecer una conexión con el mismo.

4.9 Electrodo de Puesta a Tierra Vertical

Conductor metálico desnudo enterrado en forma vertical, con una profundidad y longitud variable y sirve para drenar corrientes de descarga atmosférica o de falla.

4.10 Estructura de una Línea de Transmisión

La unidad principal soporte, generalmente un poste, torre o marco que soporta los aisladores, conductores y accesorios de una línea de transmisión aérea.

4.11 Puesta a Tierra

Conectar intencionalmente estructuras y/o equipos al sistema de puesta a tierra.

4.12 Red de Puesta a Tierra

Conjunto de electrodos de puesta a tierra, verticales y horizontales enterrados que drena a tierra las corrientes de descarga atmosférica y de falla, y es un punto de conexión seguro de puesta a tierra para el personal durante maniobras con líneas de transmisión aéreas energizadas o desenergizadas.

4.13 Relleno

Aportación de un material en contacto directo con los electrodos de puesta a tierra y el suelo circundante. Este relleno puede ser de material producto de la excavación o de banco de préstamo de origen orgánico, cuya función es disminuir la resistividad alrededor de los electrodos para lograr una resistencia baja de puesta a tierra.

4.14 Resistencia de Puesta a Tierra

Es la oposición al paso de la corriente eléctrica entre la red de puesta a tierra y un punto remoto, medida en $\Omega \cdot m$.

4.15 Resistividad

Es la resistencia eléctrica específica de un material medida en $\Omega \cdot m$.

Es la constante de proporcionalidad entre la caída de potencial por unidad de longitud y la densidad de corriente (corriente por unidad de área).

4.16 Resistividad Aparente (ρ_a)

Es la que se obtiene en el trabajo de campo, de acuerdo a un método de medición de resistividad (Wenner) para cada intervalo de medición.

4.17 Resistividad Recomendada de Diseño

Es la resistividad uniforme (ρ_d) equivalente que se obtiene a través de la interpretación de resultados de campo por medio de un promedio aritmético del valor máximo y mínimo de las mediciones realizadas.

$$\rho_d = \frac{\rho_{\max} + \rho_{\min}}{2}$$

Donde:

ρ_d = Resistividad recomendada de diseño (Ωm).

ρ_{\max} = Resistividad máxima medida (Ωm).

ρ_{\min} = Resistividad mínima medida (Ωm).

4.18 Sondeo Eléctrico Vertical (SEV)

Constituye una herramienta indirecta de exploración de los materiales que conforman el subsuelo para obtener modelos electroestratificados (resistividad-espesor) horizontalmente.

4.19 Sistema de Puesta a Tierra

Es el conjunto de elementos que sirven para drenar la corriente de descarga atmosférica o de falla de corto circuito de las líneas de transmisión aéreas, que incluye:

- a) Hilo(s) de guarda.
- b) Cola(s) de rata.
- c) Estructura.

- d) Bajante.
- e) Red de puesta a tierra.
- f) Tierra natural o relleno.
- g) Conectores.

5 CARACTERÍSTICAS Y CONDICIONES GENERALES

Las unidades utilizadas en esta especificación debe estar de acuerdo con lo indicado en la norma NOM-008-SCFI.

5.1 Alcance del Suministro

Diseño e instalación de redes de puesta a tierra en líneas de transmisión aéreas en construcción.

5.1.1 Ingeniería de detalle

- a) Reporte de las mediciones de la resistividad aparente del subsuelo.
- b) Diseño de la red de puesta a tierra, incluyendo memoria de cálculo.
- c) Dibujos constructivos de planta y corte de la red de puesta a tierra.
- d) Constancia de aprobación de los materiales empleados.

5.1.2 Ejecución de la obra

- a) Suministro de materiales de instalación permanente.
- b) Construcción e instalación de la red de puesta a tierra.

5.1.3 Reporte final

- a) Reporte de las mediciones de la resistencia de la red de puesta a tierra al pie de la estructura.
- b) Informe final de la ingeniería de la red de puesta a tierra, incluye los planos finales de construcción.

5.2 Diseño e Instalación de Redes de Puesta a Tierra en Líneas de Transmisión Aéreas en Construcción en Torres Autosoportadas

El diseño e instalación de las redes de puesta a tierra para todas y cada una de las estructuras se debe efectuar según lo indicado a continuación:

- a) Medir la resistividad del subsuelo en cada punto donde se vaya a localizar una estructura. Esto se debe efectuar de acuerdo con el procedimiento indicado en el inciso i) del párrafo 5.2, de este capítulo. Los resultados obtenidos debe ser reportados en el formato D1 del Apéndice D.
- b) Determinar la resistividad recomendada de diseño.
- c) Diseñar el sistema de puesta a tierra de cada torre que compone la línea, tomando en cuenta la resistividad recomendada de diseño. Como parte la red de puesta a tierra en la tabla 1, se describe la longitud de las contra-antenas y sus electrodos por pata, que debe ser instaladas en función de la “resistividad recomendada de diseño”, independientemente del arreglo instalado de acuerdo a lo indicado en la tabla 1. La resistencia de puesta a tierra medida tiene que ser menor

o igual que 10Ω excepto para cuando la resistividad recomendada de diseño exceda los $1\ 000 \Omega \cdot m$.

TABLA 1 - Contra-antenas y sus electrodos para la red de puesta a tierra de líneas de transmisión en construcción

Intervalo de resistividad recomendada de diseño ρ ($\Omega \cdot m$)	Longitud de contra-antenas y número de sus electrodos por pata		Figura No.
	Longitud de contra - antena por pata (m)	No. de electrodos verticales p/contra - antena (varillas)	
Menor que 100	3	1	1
100 a 300	6	2	2
300 a 500	12	3	3
500 a 750	24	5	4
750 a 1 000	30	6	5
Mayor que 1 000	30	6	5

- d) Elaborar lista y especificaciones de materiales a emplear.
- e) Incluir el suministro de los materiales, mano de obra, acarreo, herramientas y equipos y todos los insumos necesarios para una correcta instalación. Para el suministro de cable de la red de puesta a tierra se debe considerar el cable conductor necesario por el concepto del punto de conexión en la estructura a la red de puesta a tierra.

Las contra-antenas de la red de puesta a tierra se debe instalar en zanjas de 0.3 m de ancho, con las profundidades indicadas en la tabla 2.

TABLA 2 – Profundidad de las contra-antenas con relación al terreno donde se debe instalar

Profundidad (m)	Tipo de terreno
0.8	No cultivable
1.5	De cultivo
0.4	Rocoso

TABLA 3 - Características de materiales para la construcción de la red de puesta a tierra

Concepto	Descripción	Norma o especificación aplicable
Alambre o Cable de Cobre o Cable de acero recubierto de cobre	Alambre de cobre electrolítico, en sección circular, temple semiduro, de sección transversal de 33.62 mm ² o mayor, conductividad I.A.C.S. a 20 °C 97.66 % Cable de acero con recubrimiento de cobre soldado (30 ACS 7 No. 9) de sección transversal de 46.44 mm ² o mayor, diámetro nominal de 8.71 mm de resistencia de 1.27481 Ω/km	NOM-063-SCFI NMX-J-002-ANCE NMX-J-035-ANCE NMX-J-036-ANCE NMX-J-012-ANCE CFE E0000-32 CFE E0000-33
Electrodos de tierra	Varilla de acero con recubrimiento de cobre electrolítico de acuerdo a la especificación	CFE 56100-16
Conexiones soldables	Conexiones soldables tipo exotérmico prototipo probado de acuerdo con los requerimientos establecidos en la Especificación.	CFE DY700-26
NOTA: 1. No se acepta el uso de conectores a compresión o atornillables.		

- f) Previo a la instalación de la red de puesta a tierra, es requisito indispensable que haya sido elaborada y validada la ingeniería de detalle para cada una de las estructuras que componen la línea de transmisión. La instalación de la red de puesta a tierra se debe realizar una vez que CFE autorice la ingeniería. Esto en ningún momento libera de la responsabilidad al contratista de entregar la red de puesta a tierra, de acuerdo con lo solicitado en esta especificación.
- g) Una vez terminada la instalación de la red de puesta a tierra, se procede a la medición de la resistencia de acuerdo con lo establecido en el inciso j) del párrafo 5.2, reportando los resultados de las mediciones según lo indicado en el formato D2 del Apéndice D.
- h) El criterio de aceptación de la red de puesta a tierra debe ser el valor medido de resistencia a tierra menor o igual que 10 Ω con el hilo de guarda desconectado, excepto en el caso de que la resistividad recomendada de diseño del subsuelo sea mayor que 1 000 Ωm, en cuyo caso el contratista debe instalar el arreglo de 30 m de contra antena y 6 electrodos de tierra por pata.
- i) Medición de resistividad aparente del subsuelo en líneas aéreas en construcción.

Las mediciones de resistividad aparente del subsuelo se debe realizar en época de estiaje debido a que son las condiciones más críticas del terreno.

Una vez determinada la posición de las estructuras y por consecuencia las cimentaciones de las mismas, se procede a ejecutar la medición de la resistividad aparente del subsuelo, siguiendo el método de los cuatro electrodos o de "Wenner" indicado en el Apéndice A de esta especificación. La corriente de inyección de prueba debe ser mayor o igual que 10 mA.

La medición se debe hacer para todas las estructuras, considerando su centro como el punto base en el sentido de la línea representado en la figura 1. En aquellos casos donde no sea posible realizar la medición en ese sentido, se puede realizar en cualquier sentido conservando el centro de la estructura como base y se debe indicar en el formato D1 del Apéndice D de esta especificación.

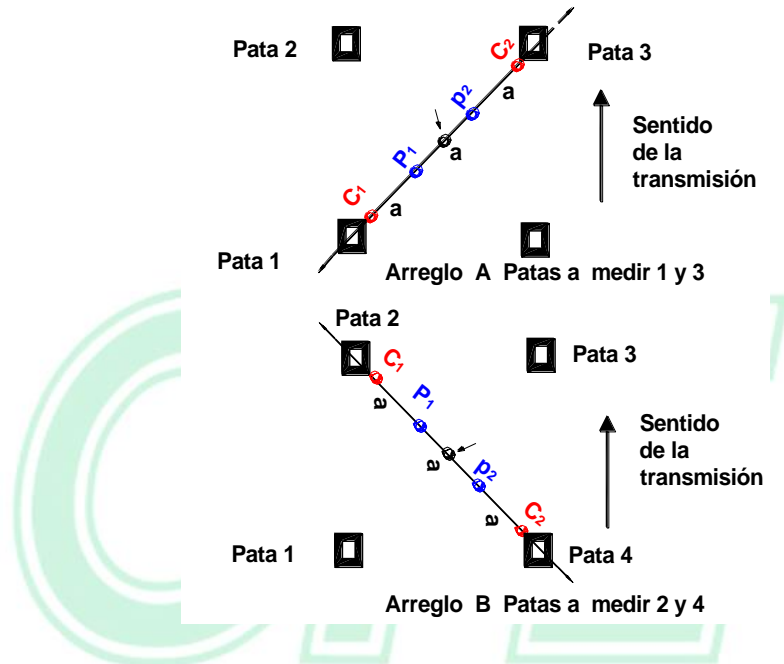


FIGURA 1 - Arreglo A o B, para la medición de resistividad aparente del subsuelo por el método de "Wenner" en líneas aéreas en construcción

En cualquiera de los arreglos A o B a emplear, las mediciones (con el método de "Wenner") se debe obtener conforme al formato D1 del Apéndice D.

- j) Medición de la resistencia de la red de puesta a tierra para líneas de transmisión aéreas en construcción.

Para la medición de la resistencia de la red de puesta a tierra, se debe utilizar el método de caída de potencial y se debe realizar en época de estiaje debido a que son las condiciones más críticas. Este método se basa en la inyección de una corriente de prueba en el electrodo bajo análisis (red de puesta a tierra). Se toman mediciones de la tensión a diferentes distancias entre el electrodo bajo análisis E y el electrodo auxiliar de potencial P, el valor representativo de la resistencia se debe tener cuando:

- La diferencia máxima ΔR entre mediciones sea menor que 1Ω para cuando el valor máximo medido sea menor que 5Ω .
- La diferencia máxima ΔR entre mediciones sea menor que el 15 % para cuando el valor máximo medido sea mayor que 5Ω .
- ΔR se determina de acuerdo al formato D2 del Apéndice D.

- Si no se cumple con lo indicado en los incisos anteriores, la distancia d_{E-C} de la figura 2 se debe duplicar al igual que las distancias del electrodo P, hasta que se cumplan las condiciones de ΔR .
- El procedimiento para la realización de las mediciones con el método de caída de potencial se debe realizar con el hilo de guarda desconectado y con un medidor de resistencia de baja frecuencia (60 Hz a 200 Hz) y la corriente de inyección de prueba debe ser mayor o igual que 10 mA, de acuerdo con lo siguiente:
- La dirección de la medición debe ser perpendicular o longitudinal a la línea aérea, como se ilustra en la figura 3.
- Instalar el electrodo auxiliar de corriente C y su cable asociado en la dirección seleccionada a 50 m del electrodo E cuando la longitud de la contra-antena sea menor o igual que 12 m y para longitudes mayores, la distancia debe ser de 75 m del electrodo E.
- Colocar el electrodo auxiliar de potencial P y su cable asociado en la dirección al electrodo de corriente, a 52 % de la distancia d_{E-C} .
- Se realiza la primera medición de la resistencia del electrodo E, conectando el medidor de resistencia de acuerdo a la figura 2 y a las instrucciones del equipo de medición empleado.
- La segunda medición se realiza instalando el electrodo P, a 62 % de la distancia d_{E-C} .
- Finalmente la tercera medición se efectúa instalando el electrodo P, a 72 % de la distancia d_{E-C} .
- Las tres mediciones se debe registrar en el formato D2 del Apéndice D.
- El valor representativo de la resistencia (R_2) de la red de puesta a tierra se considera el correspondiente a la lectura realizada cuando el electrodo de potencial se encuentre al 62 % de la distancia d_{E-C} una vez cumplido el criterio para ΔR .

k) Elaboración del informe final y entrega en forma impresa y digital (disco compacto) a CFE.

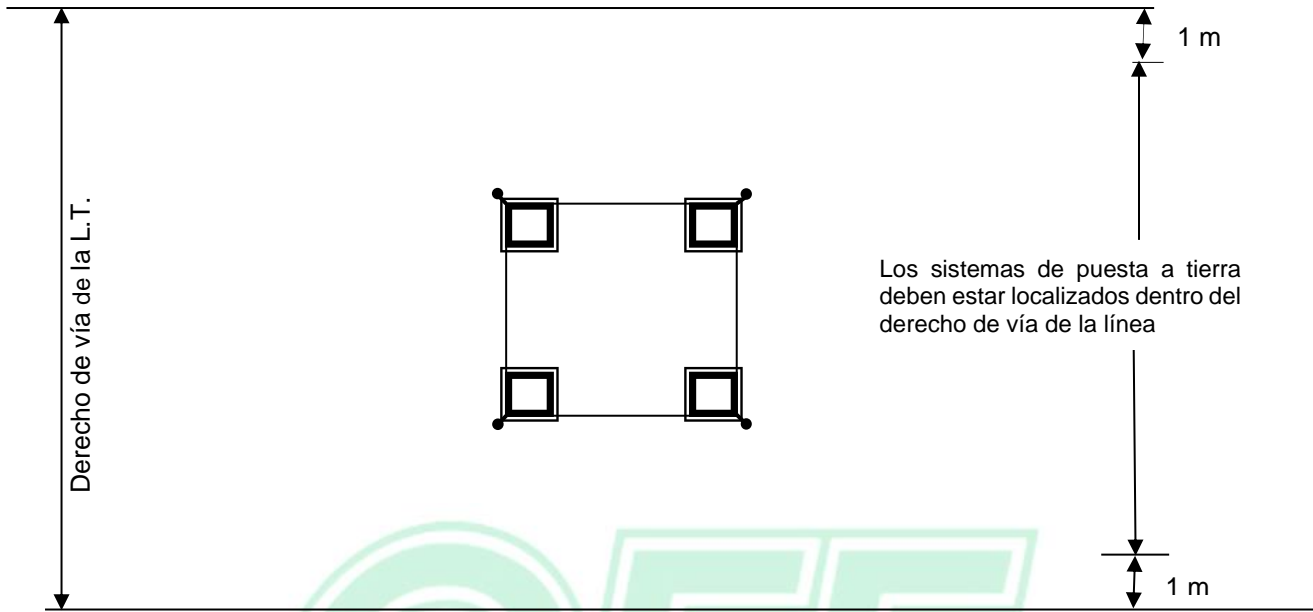


FIGURA 4 - Sistema de puesta a tierra para estructura auto soportada de línea de transmisión con terreno que tenga una resistividad de diseño en un intervalo de $0 \Omega \cdot m$ a $100 \Omega \cdot m$

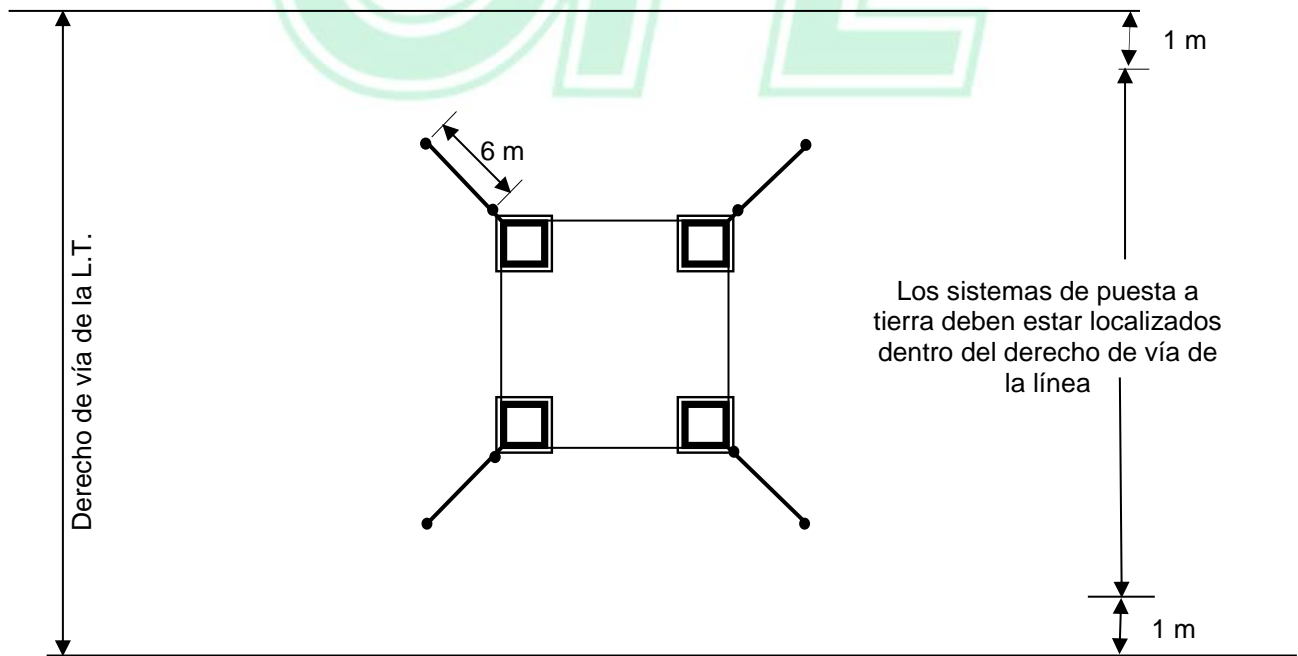


FIGURA 5 - Sistema de puesta a tierra para estructura auto soportada de línea de transmisión con terreno que tenga una resistividad de diseño en un intervalo de $101 \Omega \cdot m$ a $300 \Omega \cdot m$

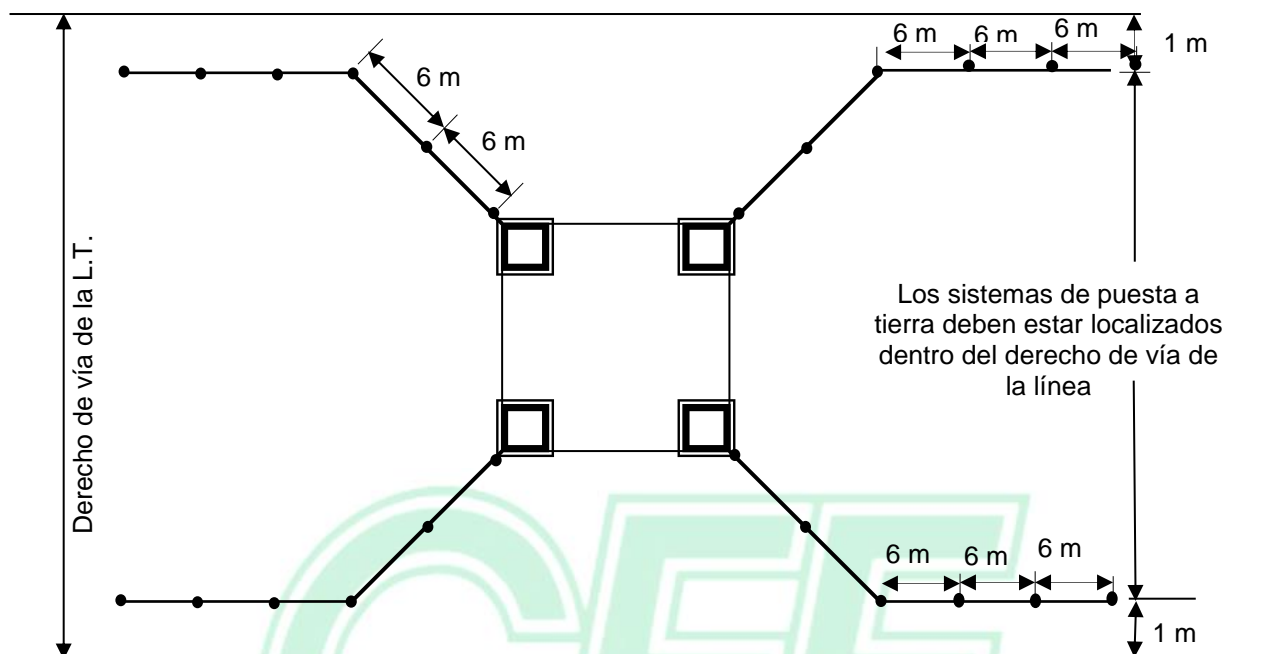


FIGURA 8 - Sistema de puesta a tierra para estructura auto soportada de línea de transmisión con terreno que tenga una resistividad de diseño en un intervalo de $751 \Omega \cdot m$ a $1\ 000 \Omega \cdot m$ y mayores

5.3 Diseño e Instalación de los Sistemas de Puesta a Tierra en Líneas de Transmisión Aéreas con Postes Troncocónicos en Construcción

El diseño e instalación de los sistemas de puesta a tierra para todos y cada uno de los postes troncocónicos se debe efectuar según lo indicado a continuación:

- Medir la resistividad aparente del subsuelo en cada punto donde se vaya a localizar una estructura. Esto debe efectuarse de acuerdo con el procedimiento indicado en el inciso j) del párrafo 5.3. Los resultados obtenidos deben ser reportados en el formato D1 del Apéndice D.
- Determinar la resistividad recomendada de diseño.
- Diseñar el sistema de puesta a tierra de cada poste que compone la línea, tomando en cuenta la resistividad recomendada de diseño. Como parte del sistema de puesta a tierra en la tabla 1 se describe la longitud de las contra-antenas y sus electrodos, que deben ser instaladas en función de la "resistividad recomendada de diseño", independientemente del arreglo instalado de acuerdo a lo indicado en la tabla 4. La resistencia de puesta a tierra medida tiene que ser menor o igual que 30Ω excepto para cuando la resistividad recomendada de diseño exceda los $1\ 000 \Omega \cdot m$.

TABLA 4 - Contra-antenas y sus electrodos para el sistema de puesta a tierra de líneas de transmisión de postes troncocónicos en construcción

Intervalo de resistividad recomendada de diseño ρ ($\Omega \cdot m$)	Sistema de puesta tierra de poste troncocónico
Menor que 300	Figura 12A - Vista de perfil Figura 12B - Vista de planta
301 a 500	Figura 13A - Vista de perfil Figura 13B - Vista de planta
501 A 1 000	Figura 14A - Vista de perfil Figura 14B - Vista de planta
Mayor que 1 000	Figura 14A - Vista de perfil Figura 14B - Vista de planta

- d) Elaborar lista y especificaciones de materiales a emplear, los cuales debe cumplir con las características descritas en la tabla 3.
- e) Incluir el suministro de los materiales referidos en la tabla 3, mano de obra, acarreo, herramientas, equipos y todos los insumos necesarios para una correcta instalación. Para el suministro de cable de la red de puesta a tierra debe considerarse el cable conductor necesario por el concepto del punto de conexión entre la estructura y la red de puesta a tierra.
- f) Las contra-antenas de la red de puesta a tierra se debe instalar en zanjas de 0.3 m de ancho a una profundidad de 0.8 m, excepto en terrenos rocosos donde la profundidad debe ser de 0.4 m, cuidando de no afectar las instalaciones subterráneas existentes.
- g) Todas las conexiones del sistema de puesta a tierra debe ser del tipo exotérmico y cumplir con lo establecido en la Especificación CFE DY700-26, por ningún motivo se permite el uso de cualquier otro tipo de conexión (mecánica, atornillada, a compresión, etc.)
- h) Previo a la instalación de la red de puesta a tierra, es requisito indispensable que haya sido elaborada y validada la ingeniería de detalle para cada una de las estructuras que componen la línea de transmisión. La instalación de la red de puesta a tierra se debe realizar una vez que CFE autorice la ingeniería. Esto en ningún momento libera de la responsabilidad al contratista de entregar la red de puesta a tierra, de acuerdo con lo solicitado en esta especificación.
- i) Una vez terminada la instalación de la red de puesta a tierra, se procede a la medición de la resistencia de acuerdo con lo establecido en el inciso k) del párrafo 5.3, reportando los resultados de las mediciones según lo indicado en el formato D2 del Apéndice D.
- j) El criterio de aceptación de la red de puesta a tierra debe ser el valor medido de resistencia a tierra menor o igual que 30Ω con el hilo de guarda desconectado, excepto en el caso de que la resistividad recomendada de diseño del subsuelo sea mayor que $1\ 000 \Omega m$, en cuyo caso el contratista debe instalar el arreglo presentado en las figuras 14 A y 14 B.
- k) Medición de resistividad aparente del subsuelo en líneas aéreas en construcción.

Las mediciones de resistividad aparente del subsuelo se debe realizar en época de estiaje debido a que son las condiciones más críticas del terreno.

Una vez determinada la posición de las estructuras y por consecuencia las cimentaciones de las mismas, se procede a ejecutar la medición de la resistividad aparente del subsuelo, siguiendo el método de los cuatro electrodos o de “Wenner” indicado en el Apéndice A de esta especificación.

La medición se debe hacer para todas las estructuras, considerando su centro como el punto base en el sentido de la línea representado en la figura 9. En aquellos casos donde no sea posible realizar la medición en ese sentido, se puede realizar en cualquier sentido conservando el centro de la estructura como base y se debe indicar en el formato D1 del Apéndice D de esta especificación.

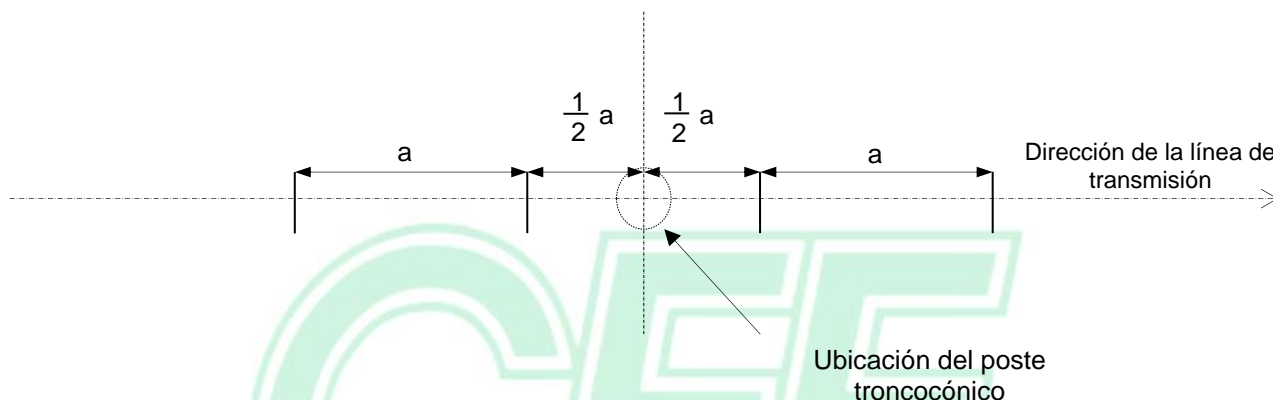


FIGURA 9 - Arreglo para la medición de resistividad aparente del subsuelo por el método de “Wenner” en líneas aéreas en construcción con postes troncocónicos

Las mediciones (con el método de “Wenner”) se debe obtener conforme al formato D1 del Apéndice D.

I) Medición de la resistencia de la red de puesta a tierra para líneas de transmisión aéreas en construcción.

Para la medición de la resistencia de la red de puesta a tierra, se debe utilizar el método de caída de potencial y se debe realizar en época de estiaje debido a que son las condiciones más críticas.

Este método se basa en la inyección de una corriente de prueba en el electrodo bajo análisis (red de puesta a tierra). Se toman mediciones de la tensión a diferentes distancias entre el electrodo bajo análisis E y el electrodo auxiliar de potencial P, el valor representativo de la resistencia se tendrá cuando:

- La diferencia máxima ΔR entre mediciones sea menor que 1Ω para cuando el valor máximo medido sea menor que 5Ω .
- La diferencia máxima ΔR entre mediciones sea menor que el 15 % para cuando el valor máximo medido sea mayor que 5Ω .

ΔR se determina de acuerdo al formato D2 del Apéndice D

Si no se cumple con lo indicado en los incisos anteriores, la distancia d_{E-C} de la figura 2 se debe duplicar al igual que las distancias del electrodo P, hasta que se cumplan las condiciones de ΔR .

El procedimiento para la realización de las mediciones con el método de caída de potencial se debe realizar con el hilo de guarda desconectado y con un medidor de resistencia de baja frecuencia (60 Hz a 200 Hz) y la corriente de inyección de prueba debe ser mayor o igual que 10 mA, de acuerdo con lo siguiente:

- La dirección de la medición debe ser perpendicular o longitudinal a la línea aérea, como se ilustra en la figura 3.
 - Instalar el electrodo auxiliar de corriente C y su cable asociado en la dirección seleccionada a 50 m del electrodo E cuando la longitud de la contra-antena sea menor o igual que 12 m y para longitudes mayores, la distancia debe ser de 75 m del electrodo E.
 - Colocar el electrodo auxiliar de potencial P y su cable asociado en la dirección al electrodo de corriente a 52 % de la distancia d_{E-C} .
 - Se realiza la primera medición de la resistencia del electrodo E, conectando el medidor de resistencia de acuerdo a la figura 2 y a las instrucciones del equipo de medición empleado.
 - La segunda medición se realiza instalando el electrodo P a 62 % de la distancia d_{E-C} .
 - Finalmente la tercera medición se efectúa instalando el electrodo P a 72 % de la distancia d_{E-C} .
 - Las tres mediciones se deben registrar en el formato D2 del Apéndice D.
 - El valor representativo de la resistencia (R_2) de la red de puesta a tierra se considera el correspondiente a la lectura realizada cuando el electrodo de potencial se encuentre al 62 % de la distancia d_{E-C} una vez cumplido el criterio para ΔR .
- m) Elaboración del informe final y entrega en forma impresa y digital (disco compacto) a CFE.

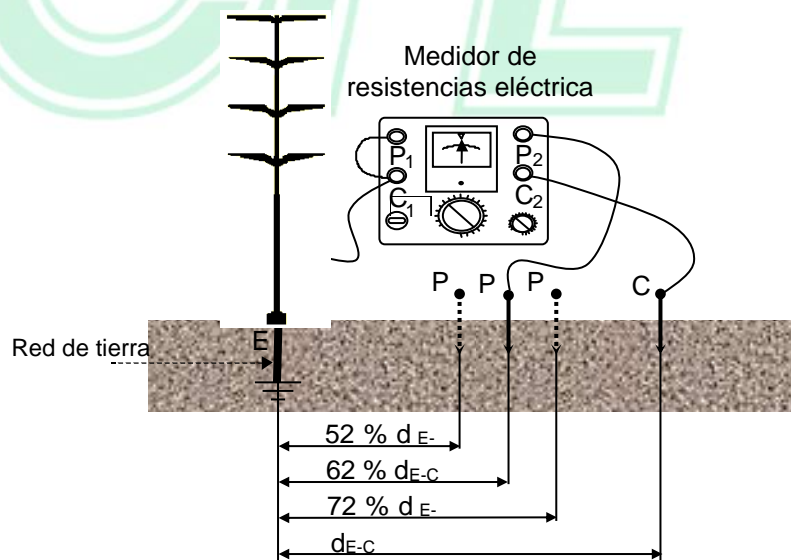


FIGURA 10 - Método de medición de resistencia a tierra por caída de potencial

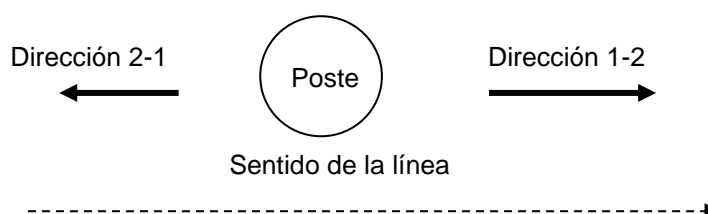


FIGURA 11 - Direcciones preferentes para la medición de la resistencia de la red de tierra (vista de planta)

080812	Rev	110506	150611	190411						
--------	-----	--------	--------	--------	--	--	--	--	--	--

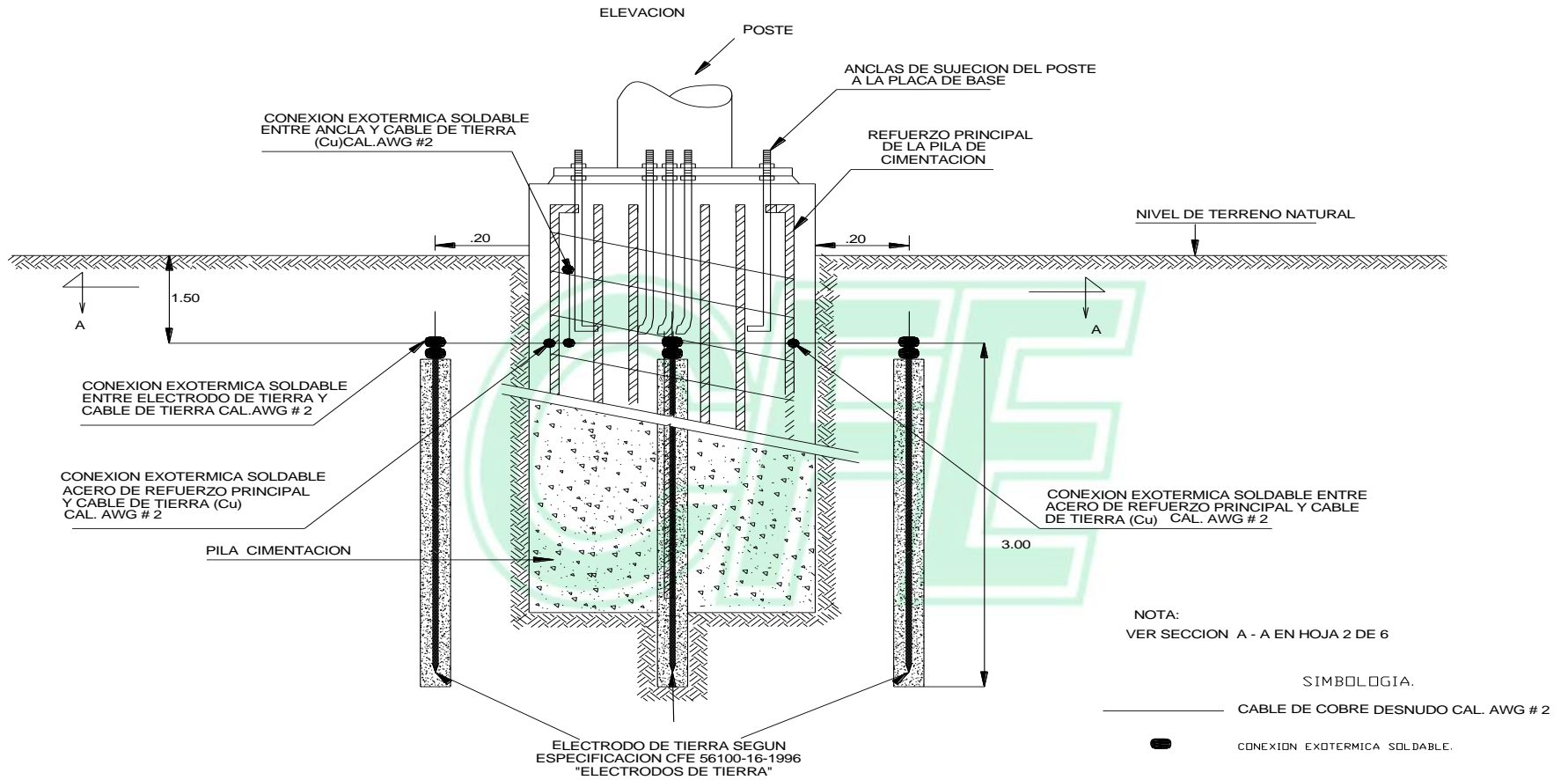


FIGURA 12A - Vista de perfil del sistema de puesta a tierra para un poste troncocónico ubicado en un suelo con una resistividad de diseño en un intervalo de $0 \Omega \cdot m$ a $300 \Omega \cdot m$

080812	Rev	110506	150611	190411						
--------	-----	--------	--------	--------	--	--	--	--	--	--

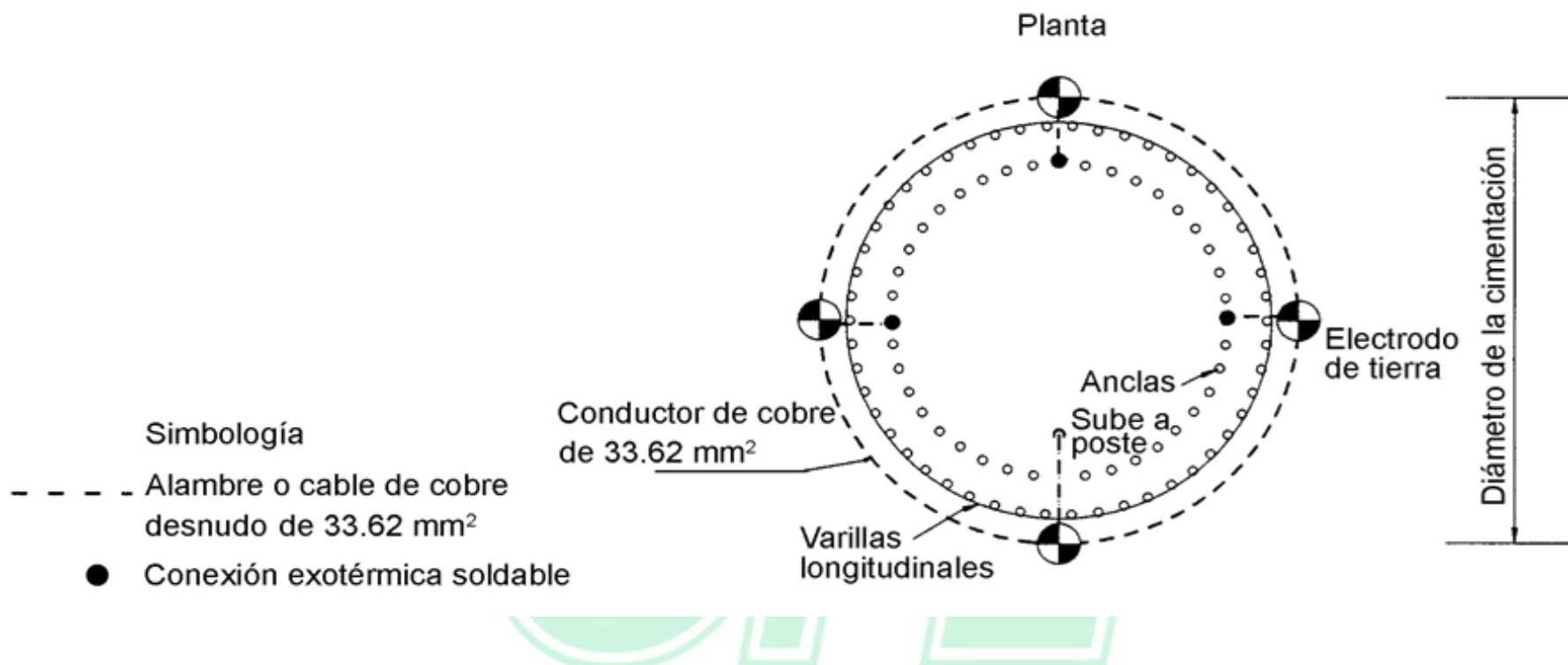


FIGURA 12B - Vista de planta del sistema de puesta a tierra para un poste troncocónico ubicado en un suelo con una resistividad de diseño en un intervalo de 0 Ω•m a 300 Ω•m

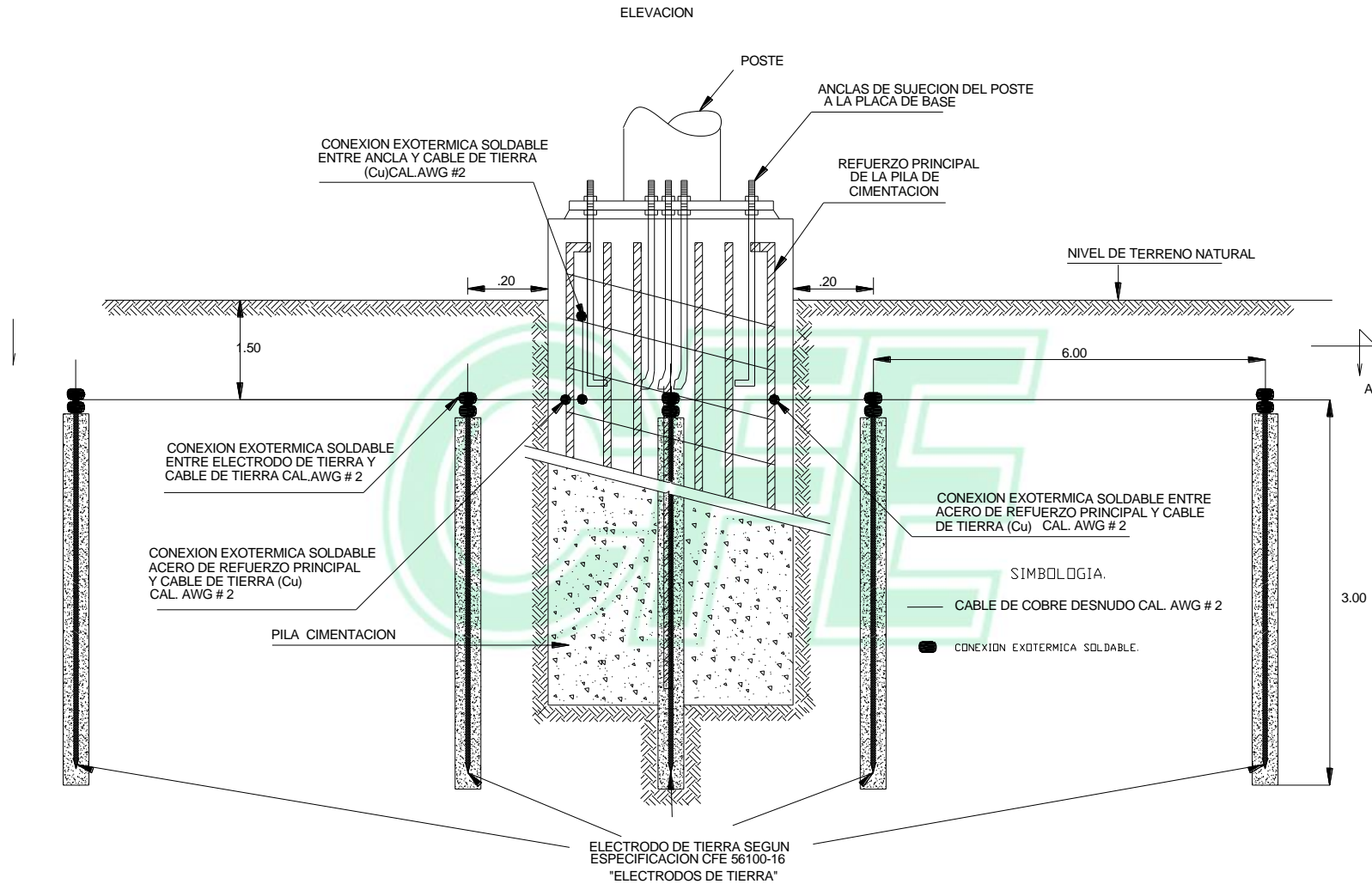


FIGURA 13A - Vista de perfil del sistema de puesta a tierra para un poste troncocónico ubicado en un suelo con una resistividad de diseño en un intervalo de 301 $\Omega \cdot m$ a 500 $\Omega \cdot m$

080812	Rev	110506	150611	190411						
--------	-----	--------	--------	--------	--	--	--	--	--	--

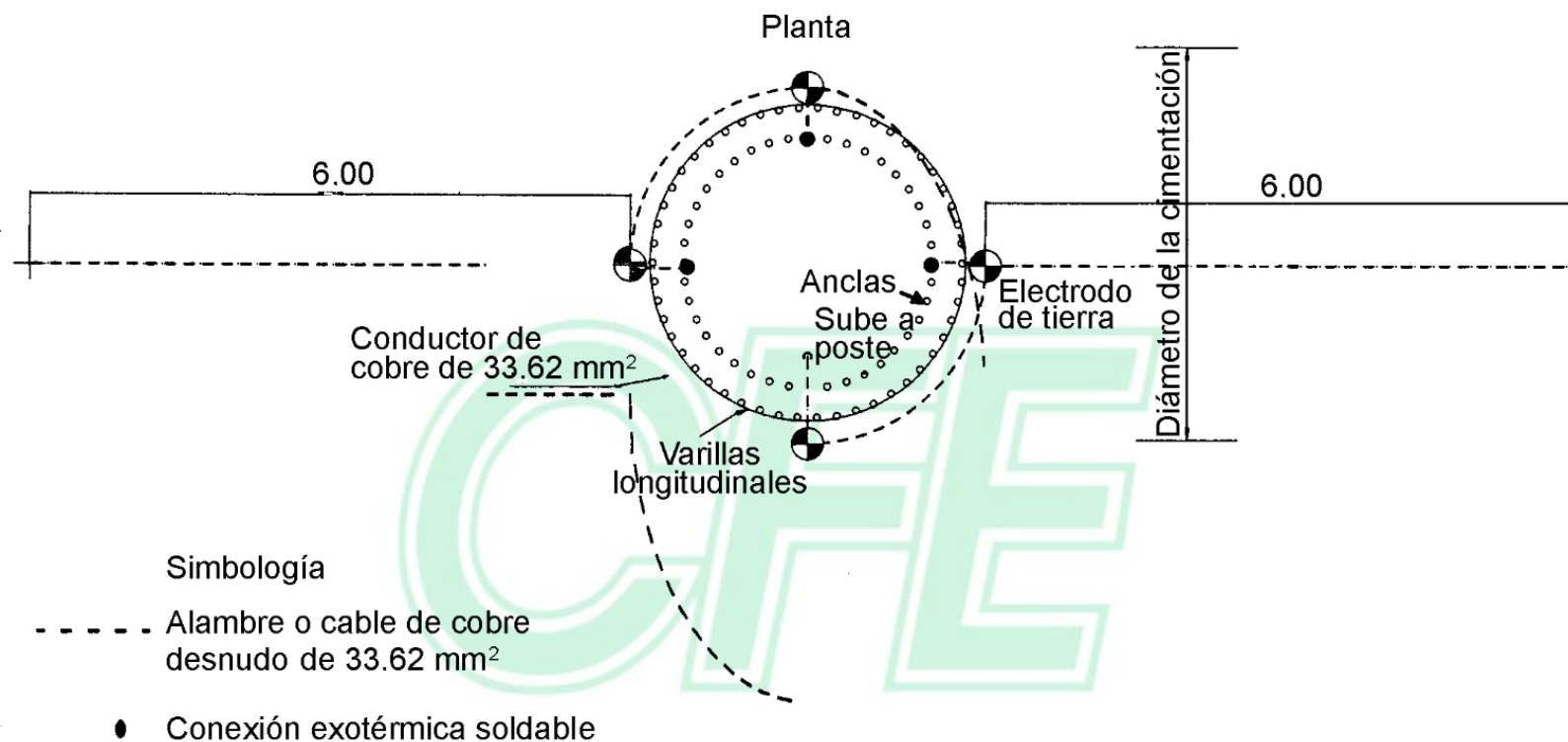


FIGURA 13B - Vista de planta del sistema de puesta a tierra para un poste troncocónico ubicado en un suelo con una resistividad de diseño en un intervalo de 301 $\Omega \cdot m$ a 500 $\Omega \cdot m$

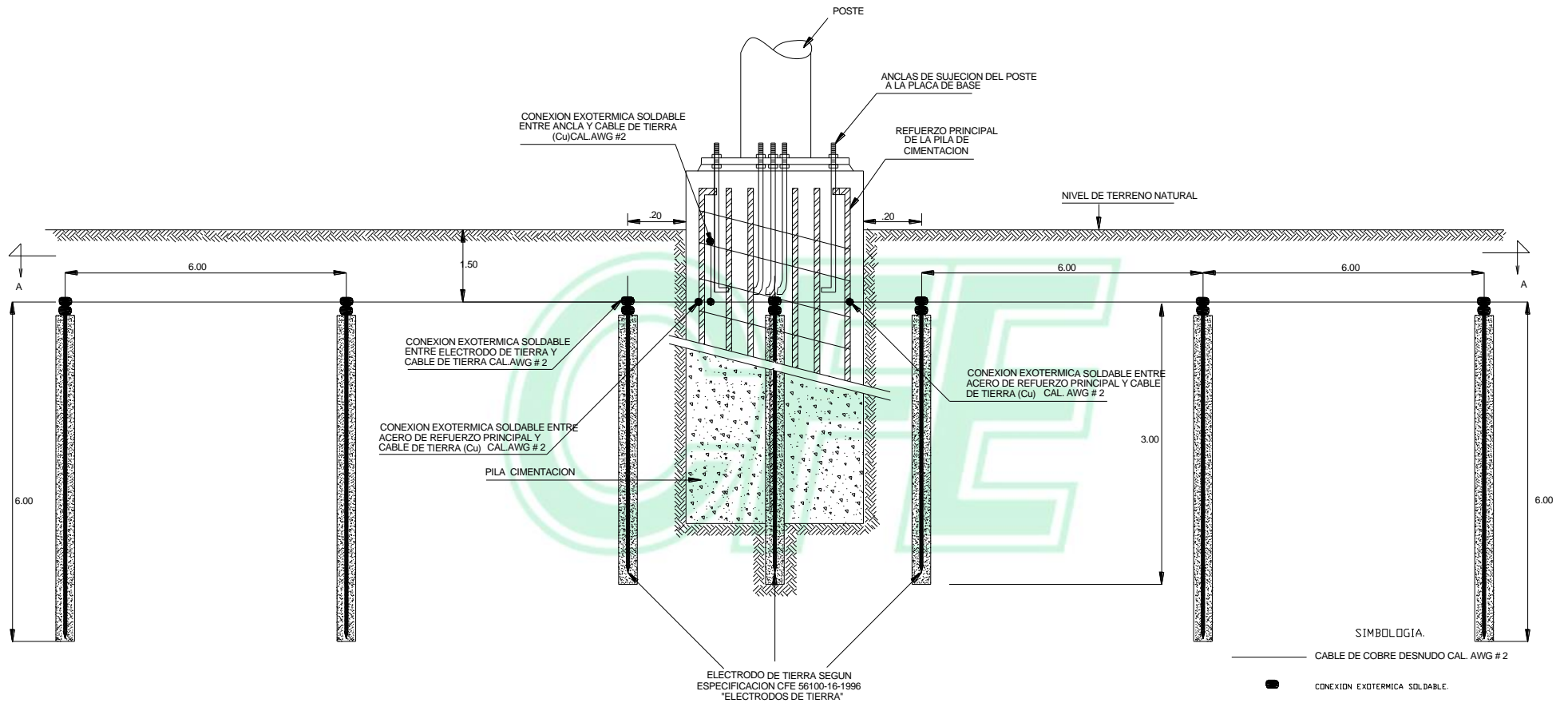


FIGURA 14A - Vista de planta del sistema de puesta a tierra para un poste troncocónico ubicado en un suelo con una resistividad de diseño en un intervalo de $501 \Omega \cdot m$ a $1000 \Omega \cdot m$ y mayores

080812	Rev	110506	150611	190411						
--------	-----	--------	--------	--------	--	--	--	--	--	--

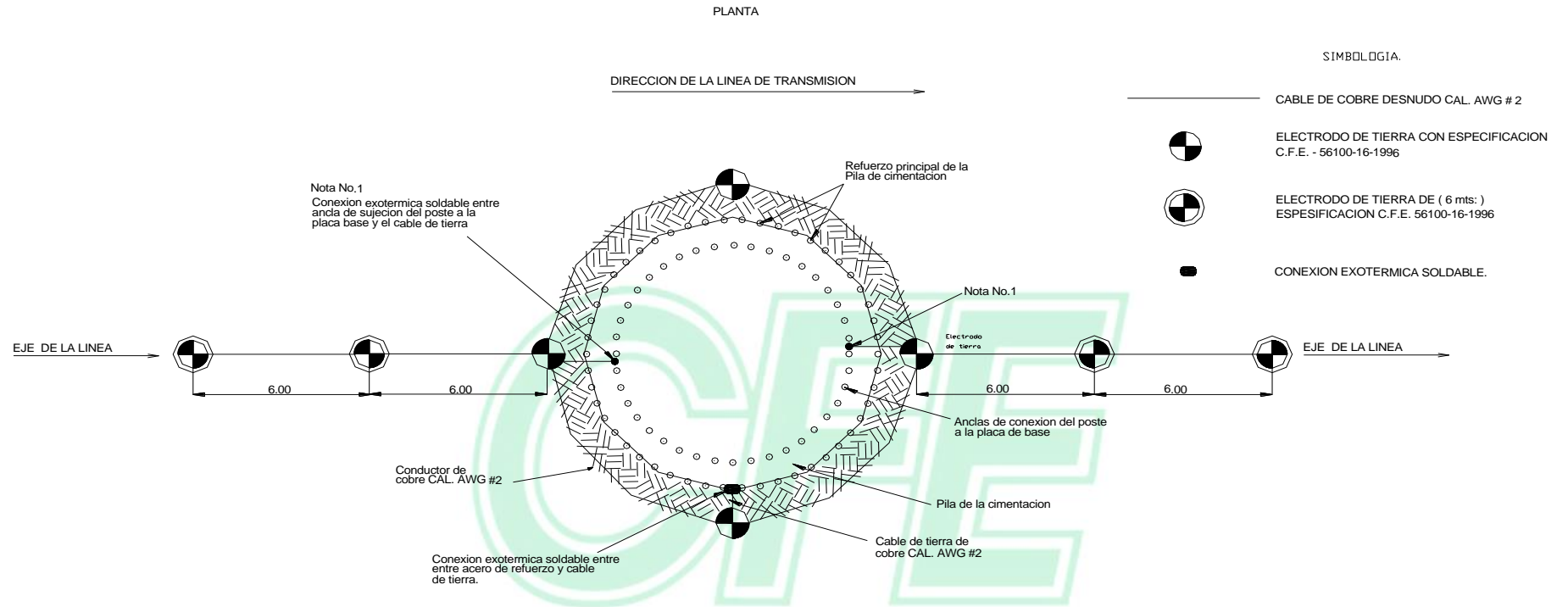


FIGURA 14B - Vista de planta del sistema de puesta a tierra para un poste troncocónico ubicado en un suelo con una resistividad de diseño en un intervalo de $501 \Omega \cdot m$ a $1\ 000 \Omega \cdot m$ y mayores

080812	Rev	110506	150611	190411						
--------	-----	--------	--------	--------	--	--	--	--	--	--

6 CONDICIONES DE OPERACIÓN

El sistema de puesta a tierra aplica en cualquier tipo de terreno bajo cualquier condición ambiental y a cualquier altura sobre el nivel del mar.

7 CONDICIONES DE DESARROLLO SUSTENTABLE

El sistema de puesta a tierra no debe causar daños al medio ambiente, subsuelo y evitar erosión superficial.

8 CONDICIONES DE SEGURIDAD INDUSTRIAL

Los sistemas de puesta a tierra de las líneas de transmisión no debe causar afectación a instalaciones cercanas y evitar perjuicio a los seres vivos.

9 CONTROL DE CALIDAD

Los materiales utilizados en la construcción del sistema de puesta a tierra debe cumplir con las características especificadas en la tabla 3 y cumplir con los valores de aceptación de resistencia de puesta a tierra indicados en el capítulo 5.

El procedimiento de diseño, instalación y documentación del sistema de puesta a tierra se debe apegar a un sistema de calidad que permita la rastreabilidad y garantice su buen comportamiento.

10 MARCADO

No aplica.

11 EMPAQUE, EMBALAJE, EMBARQUE, TRANSPORTACIÓN, DESCARGA, RECEPCIÓN, ALMACENAJE Y MANEJO

No aplica.

12 BIBLIOGRAFÍA

- [1] ISBN 3-7905-0559-5,1989, "Handbuch fur Blitzschutz und Erdung", Pflaum Verlag Munchen, VDE-Verlag Berlin, Offenbach, Hasse P, Wiesinger.
- [2] IEEE-SM 80-1986 "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding", 345 East 47th Street, New York, 10017 USA, ISBN 471-85393-3.
- [3] IEEE Green Book, "IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems", ANSI/IEEE Std 142-1991, New York, 1996, USA. ISBN I-55937-141-2.
- [4] ISBN O-486-64575-4, "Lightning", Dover Publications Inc., New York, 1984, ISBN O-486-64575-4. Uman M,
- [5] Lara Zúñiga Carlos A, "Pruebas de Electrodo y Rellenos para Sistemas de Tierras de Líneas de Transmisión (primera parte) ", LAPEM, CFE, Reporte K3044-13-1996, Expediente K4RP-5006, 30 de Abril de 1996.

- [6] 1988, ISBN 0-8247-7908-8, "Power System Grounding and Transients; an Introduction", Mar & Dekker, Inc., New York and Basel, Sakis Meliopoulos A.P.
- [7] EPRI EL-2699, "Transmission Line Grounding, Volume 1", RP1494-1, Final Report, October 1982, Palo Alto, California, USA.
- [8] EPRI EL-2699, "Transmission Line Grounding, Volume 2: Design Curves", RP1494-1, Final Report, October 1982, Palo Alto, California, USA.
- [9] CFE-GPTT. Catálogo de Torres: 400 kV, 230 kV y 115 kV", 1991.
- [10] NOM-001-SEMP-1994; "Relativo a las Instalaciones al Suministro y Uso de la Energía Eléctrica".
- [11] Cortes, Ignacio y Lara, Carlos "Selección de Electroodos y Rellenos Químicos para Sistemas de Tierra de Líneas de Transmisión" LAPEM, CFE, Reporte K3044-38-1997, Expediente K4RP-5006, 23 de mayo de 1997.
- [12] CFE-CPTT; "Catalogo de Cimentaciones Normalizadas para Estructuras de 400; 230 y 115 kV". 1998.
- [13] IEEE STD 837-2002 Standard for Qualifying Permanent Connections Used in Substation Grounding.
- [14] NOM-001-SEDE-2012 Instalaciones Eléctricas - Utilización.
- [15] CFE 01J00-01-2015 Sistema de Tierra para Plantas y Subestaciones Eléctricas.
- [16] D8CME-07-2018 Protección Anticorrosivo para Cimentación de Estructuras Autosoportadas de Líneas de Transmisión.

- g) Si el equipo cuenta con una terminal de tierra (G), se debe conectar a un quinto electrodo o electrodo vertical, instalado a la mitad de la distancia entre los electrodos verticales de potencial (P1 y P2).
- h) Efectuar la medición con equipo de baja frecuencia y tomar el valor de la resistencia en ohms.
- i) Calcular la resistividad del subsuelo mediante la siguiente fórmula:

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

Donde:

R = Resistencia medida en Ω
 a = Separación entre electrodos en m.
 ρ = Resistividad del subsuelo en $\Omega \cdot m$.
 $\pi = 3.1416$

Para a = 1.6 m $\Rightarrow \rho \approx 10 R (\Omega \cdot m)$

Para a = 3.2 m $\Rightarrow \rho \approx 20 R (\Omega \cdot m)$

- j) Los valores obtenidos se debe asentar en el formato D1 del Apéndice D.

A.4 ERRORES

Los errores más frecuentes que se pueden tener durante la medición se dan en el Apéndice E de esta especificación.

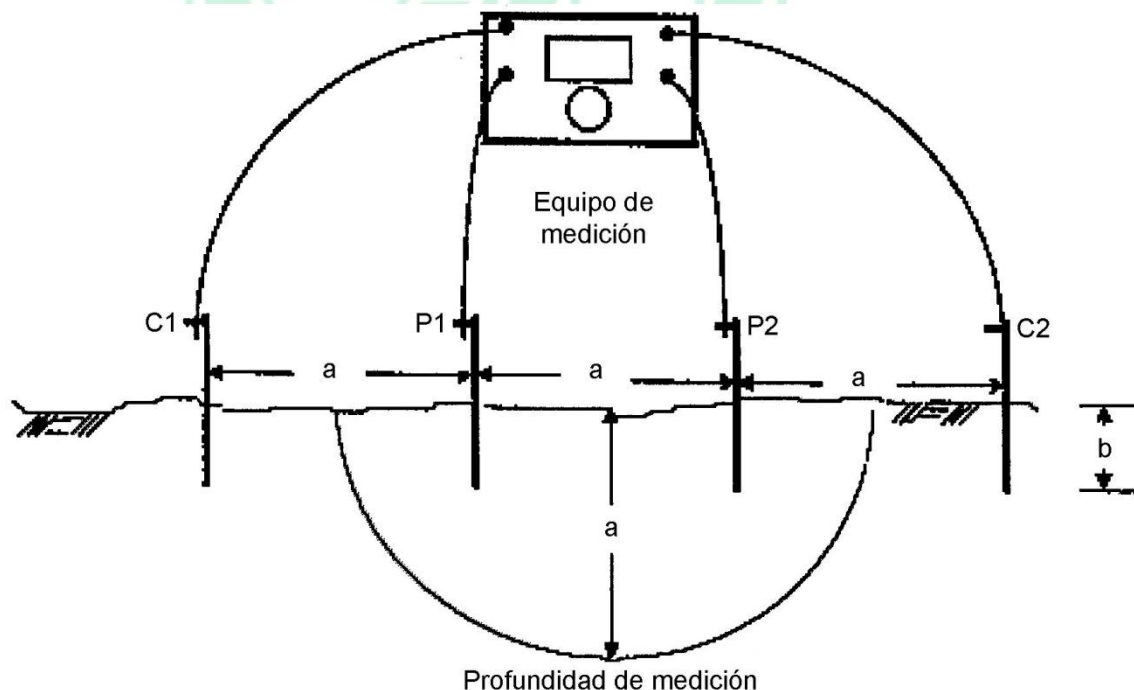


FIGURA A1 - Medición de resistividad por el método "Wenner"

APÉNDICE B
(Normativo)

MÉTODO DE CAÍDA DE POTENCIAL PARA LA MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA ELÉCTRICA DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

B.1 GENERALIDADES

El objetivo principal de este método es determinar de la manera más simple y práctica, el valor de la resistencia entre la estructura de la línea de transmisión y el terreno en que se encuentra.

Esta medición se basa en la Ley de Ohm ($R = V / I$), en la cual se requiere de la medición de la diferencia de potencial V y de la corriente eléctrica I .

B.2 MATERIAL Y EQUIPO

- a) Medidor de resistencia que cumpla con los requerimientos de calibración indicados en el Apéndice C de esta especificación:
 - De baja frecuencia de 60 Hz a 200 Hz y con una inyección de corriente de prueba de 10 mA como mínimo.
 - De alta frecuencia mayor o igual que 25 kHz.
- b) Electrodo verticales de acero inoxidable, galvanizado o con revestimiento de cobre soldado, de 40 cm a 60 cm de longitud por 6 mm de diámetro mínimo, con punta en un extremo.
- c) Cables de cobre aislado para conexión de sección transversal mínima de 2 mm², con caimanes en un extremo y en el otro, la terminal adecuada al medidor de resistencia que se utilice, siendo la más común la del tipo "banana". Para el medidor de alta frecuencia el cable de corriente (más largo) debe tener pantalla.

B.3 PRINCIPIO DE MEDICIÓN

Se clavan dos electrodos verticales, llamados también sondas o electrodos a ciertas distancias de la pata de la estructura. Se aplica una corriente entre la pata y el electrodo vertical C y se mide con un amperímetro y la diferencia de potencial se mide con un voltímetro entre la pata y el electrodo vertical P, (véase la figura B1).

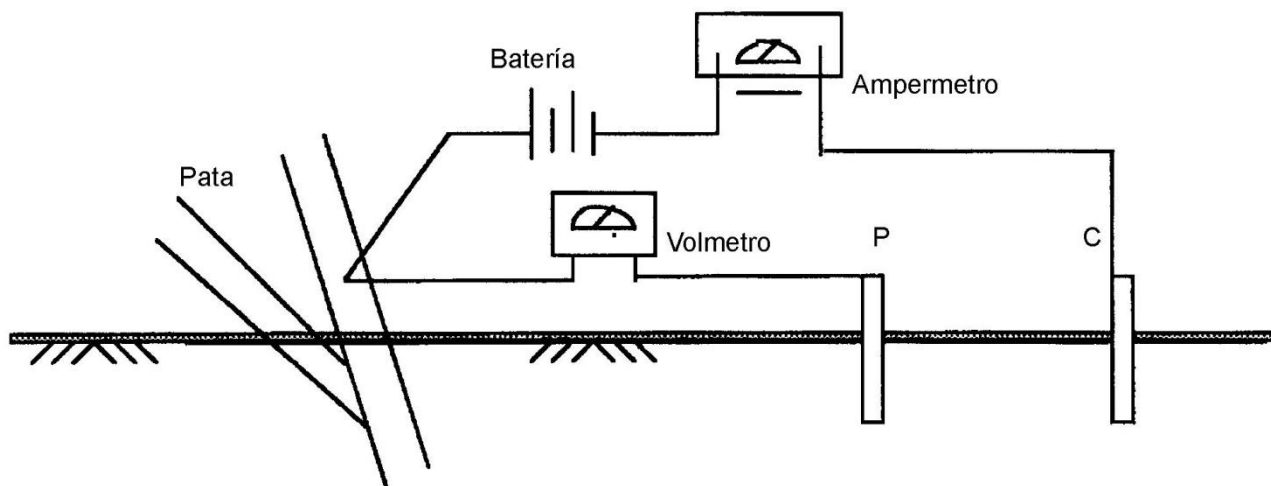


FIGURA B1 - Colocación de los electrodos verticales de corriente C y potencial P

080812	Rev	110506	150611	190411						
--------	-----	--------	--------	--------	--	--	--	--	--	--

Si el electrodo vertical P se coloca en varios puntos entre la pata y el electrodo vertical C de preferencia en línea recta, se pueden obtener una serie de lecturas de tensión y por la Ley de Ohm, se determina la resistencia eléctrica en cualquier punto medido; por ejemplo si la tensión “V” medida entre la pata y el electrodo vertical P es de 3 V y la corriente aplicada “I” es de 0.3 A, la resistencia eléctrica en ese punto es de 10 Ω.

Moviendo el electrodo vertical P, de la pata de la estructura hacia el electrodo vertical C, se puede obtener una serie de valores de resistencia a tierra, los cuales pueden ser trazados en una gráfica, tal como se muestra en la figura B2.

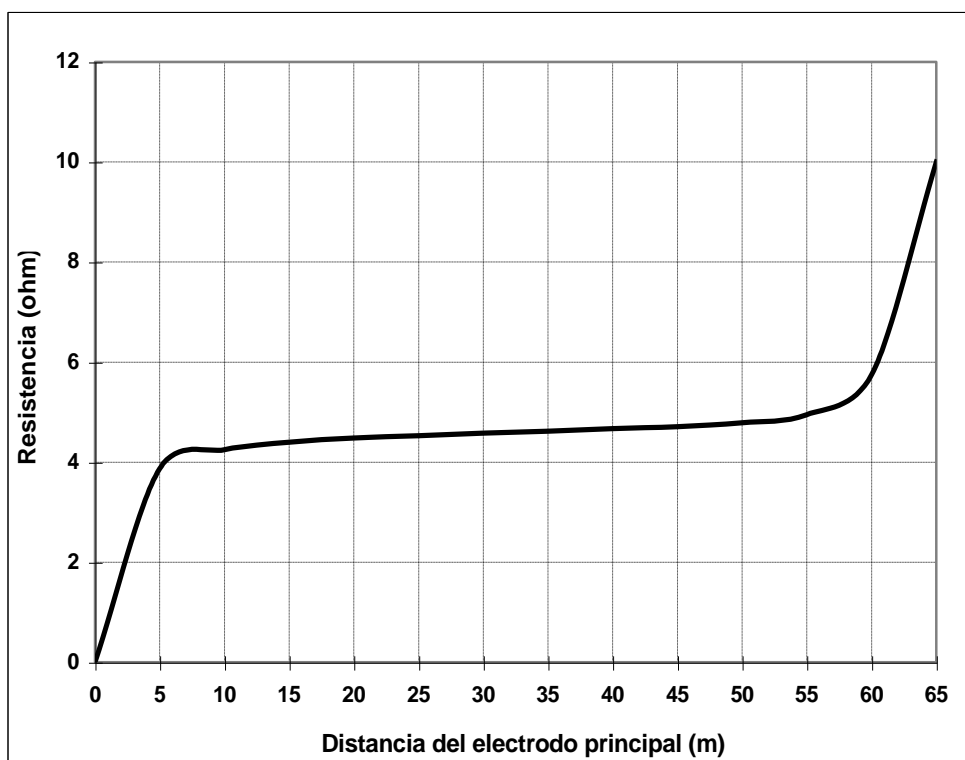


FIGURA B2 – Resistencia a diferentes distancias entre el electrodo vertical P y la pata de la estructura

A medida que el electrodo vertical P se aleja de la pata de la estructura, los valores de la resistencia se van incrementando hasta un punto en donde la variación de la resistencia es relativamente pequeña, si se continúa moviendo el electrodo vertical P hacia la C, se debe observar nuevos incrementos en los valores de resistencia.

El valor correcto de la resistencia se encuentra cuando el electrodo vertical P se coloca en el punto de menor variación de resistencia, esto es generalmente a un 62 % de la distancia entre el electrodo de tierra (pata) y el electrodo vertical de corriente C, lo cual se conoce como la regla del 61.8 %.

B.4 ERRORES

Los errores más frecuentes que se pueden tener durante la medición se dan en el Apéndice E de esta especificación.

APÉNDICE C
(Normativo)

REQUERIMIENTOS DE CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE RESISTENCIA

Los medidores de resistencia de tierra existentes en las áreas de CFE, excepto los de tipo gancho, son:

- a) Medidores de baja frecuencia (analógicos o digitales).
- b) Medidores de alta frecuencia (analógicos o digitales).

Los medidores de baja frecuencia (de 60 Hz a 200 Hz), deben tener un error máximo del 2 % y los de alta frecuencia (igual o mayor de 25 kHz) deben tener un error máximo del 5 % y deben ser calibrados anualmente por un laboratorio acreditado ante el sistema nacional de acreditación, como el LAPEM dentro de la propia CFE.

Antes de cada medición se debe verificar el funcionamiento correcto del equipo de resistencia de tierra. Para el caso del medidor de baja frecuencia se debe utilizar una resistencia externa no inductiva de valor conocido para cada intervalo de escala del medidor.

Cada área es responsable de mantener los equipos de medición calibrados.

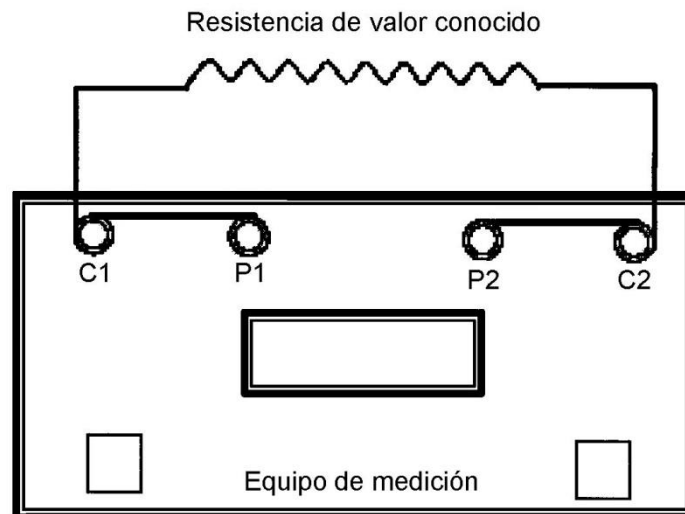


FIGURA C1 - Verificación del funcionamiento del medidor de resistencia de baja frecuencia

APÉNDICE D
(Normativo)

FORMATOS PARA MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD Y DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

FORMATO D1 - Medición de la resistividad del subsuelo para líneas de transmisión en construcción

LT: Estructura número: Fecha: H7

Equipo de medición

Marca: Modelo Núm. de serie Frecuencia de medición

Datos de calibración del equipo de medición

Folio Núm. de identificación Fecha de calibración Fecha de vencimiento

Dirección de la medición
(para estructuras autoportadas)

Arreglo A Involucra patas 1 y 3 Arreglo B Involucra patas 2 y 4

Descripción del suelo

Superficie del terreno: Mojado Húmedo Seco Muy seco
 Uso del suelo: Cultivo Cerril Bosque Otros
 Tipo de suelo: Roca Grava Arena Arcilla Limo

Resultado de las Mediciones

Pata No:

A (m)	R (Ω)	$2 \pi a$ (m)	$\rho = 2 \pi a R$ (Ω m)	Observaciones
1.6		10		
3.2		20		
4.8		30		
6.4		40		
8.0		50		
9.6		60		
11.2		70		
15.0		10		
20.0		20		
25.0		30		

Donde: a : separación entre electrodos
 R : resistencia medida
 ρ : resistividad del subsuelo

NOTA: En la medición con la distancia a = 1.6 m, la profundidad máxima de los electrodos verticales debe ser de 16 cm y para las otras mediciones debe ser, de preferencia, menor a 32 cm.

**FORMATO D2 - Medición de la resistencia eléctrica del sistema de puesta a tierra
de las líneas de transmisión en construcción**

LT: Estructura número: Fecha:

Equipo de Medición

Marca: Modelo Núm. de serie Frecuencia de medición Hz

Datos de Calibración del Equipo de Medición

Folio Núm. de identificación Fecha de calibración Fecha de vencimiento

Descripción del suelo

Superficie del terreno: Mojado Húmedo Seco Muy seco

Uso del suelo: Cultivo Cerril Bosque Otros

Tipo de suelo: Roca Grava Arena Arcilla Limo

Resultado de las Mediciones

Distancia del electrodo "E" al electrodo "C" = 75 m

Lectura No.	Distancia del electrodo "P" (m)	Lectura del equipo	Escala	Resistencia (Ω)
1	39			R1=
2	46.5			R2=
3	54			R3=

PORCIENTO DE VARIACIÓN

$$\Delta R_{2-1} = \frac{(R_2 - R_1)}{R_2} \times 100 = \text{_____}\%$$

$$\Delta R_{3-2} = \frac{(R_3 - R_2)}{R_2} \times 100 = \text{_____}\%$$

Si no se cumple cualquiera de las siguientes dos condiciones:

- La diferencia máxima ΔR entre mediciones sea menor que 1 Ω para cuando el valor máximo medido sea menor que 5 Ω .
- La diferencia máxima ΔR entre mediciones sea menor que el 15 % para cuando el valor máximo medido sea mayor que 5 Ω .

Entonces la distancia entre el electrodo E y el electrodo C se debe duplicar, repitiendo las mediciones de R1, R2 y R3.

APÉNDICE E
(Informativo)

CONSIDERACIONES PARA LA MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD Y RESISTENCIA

Durante la medición se deben considerar los puntos siguientes:

- a)** Revisar si está vigente la última calibración o si hay una indicación de “USO LIMITADO” o de “NO USARSE” en la calcomanía de calibración pegada al medidor.
- b)** Falso contacto entre el caimán de conexión y el electrodo vertical.

Limpiar el caimán y el electrodo vertical hasta eliminar la capa de óxido en las superficies del contacto.
- c)** Baterías del instrumento bajas.

Reemplazarlas por baterías nuevas o en su caso, recargarlas.
- d)** Algún cable de medición está abierto.

Verificar la continuidad del cable y si está abierto repararlo o reemplazarlo.
- e)** No se ajustó el cero mecánico del instrumento para equipo analógico.

Antes de realizar cualquier medición, se debe colocar la aguja en el cero de la carátula del equipo, por medio del tornillo de ajuste.
- f)** Tomar un valor equivocado del multiplicador de la escala de resistencia para equipo analógico.

Considerar siempre el valor del multiplicador que éste indique.
- g)** Valor fuera del intervalo del instrumento.

Realizar una nueva medición humedeciendo ligeramente y solamente alrededor de cada varilla.
- h)** La lectura o la aguja no se estabilizan.

Existe mucha interferencia o ruido eléctrico. Medir en otro sitio cercano donde no haya interferencia o utilizar un equipo que cuente con filtro o cambiar la orientación de la alineación de las varillas o medir en otra ocasión.

APÉNDICE F
(Informativo)

CONCEPTOS BÁSICOS PARA LOS ARREGLOS DE LA RED DE PUESTA A TIERRA PARA CONSTRUCCIÓN

F.1 INTRODUCCIÓN

El diseño de las redes de puesta a tierra para construcción debe ser para obtener un valor menor o igual que 10 Ω para torres y 30 postes de la resistencia de tierra medida en campo, tomando como base la resistividad del subsuelo determinada de acuerdo a lo expresado en esta especificación.

El cálculo aproximado de la resistencia de puesta a tierra de estructuras de líneas aéreas tiene la finalidad de servir de herramienta para poder visualizar rápidamente los valores esperados de una configuración típica. Los elementos básicos en la instalación de un sistema de puesta a tierra en estructuras de líneas aéreas son:

- a) Electrodo verticales.
- b) Contra-antenas.
- c) Patas de las torres.

F.2 RESISTENCIA DE LOS ELEMENTOS BÁSICOS

F.2.1 Electrodo Vertical

La resistencia de conexión a tierra de un electrodo vertical, de acuerdo con la referencia [3] del capítulo 12, está dada por la siguiente fórmula:

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

Donde:

R = Resistencia, Ω.

ρ = Resistividad del terreno, Ω·m.

L = Longitud del electrodo vertical, m.

r = Radio del electrodo vertical, m.

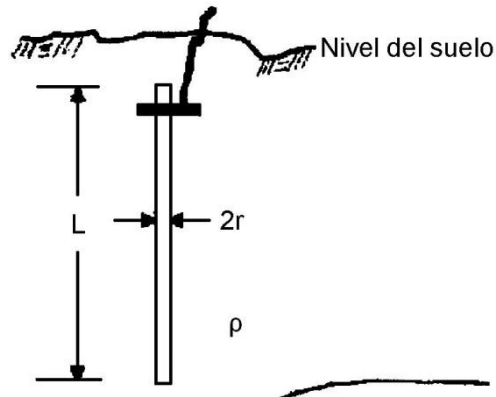


FIGURA F1 - Esquema de un electrodo vertical

Para efectos prácticos se puede simplificar por la relación (2), la cual considera que hay muy poca variación en la resistencia para los diferentes diámetros de los electrodos verticales comerciales (13 mm , 16 mm y 19 mm) y para la longitud típica de 3.05 m. Esta poca dependencia del radio, se observa porque dicho radio influye solamente en el término logarítmico, el cual requiere muy grandes variaciones para que pueda afectar en el resultado total.

$$R = \frac{\rho}{L} = \frac{\rho}{3} \quad (2)$$

F.2.2 Contra-Antena (Electrodo Horizontal)

Para contra-antenas se aplica la siguiente fórmula (referencia [3] del capítulo 12):

$$R = \frac{\rho}{\pi L} \left(\ln \frac{2L}{r} \right) - 1 \quad (3)$$

y simplificando esta fórmula para $L \gg r$, se tiene que:

$$R = \frac{2\rho}{L} \quad (4a)$$

Es decir, para la misma longitud de conductor, el conductor horizontal tendrá el doble de resistencia que el conductor vertical.

Para conductores de 6m de longitud, se tiene

$$R = \frac{\rho}{3} \quad (4b)$$

Esta aproximación es mayor entre 5 % y 15 % al calculado por la fórmula (3). Sin embargo, cuando se colocan varias contra-antenas, debe haber efectos mutuos y la resistencia equivalente debe aumentar respecto al valor que resulta cuando se considera un circuito paralelo de las resistencias de cada contra-antena.

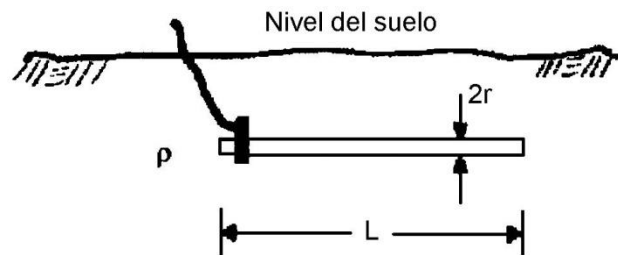


FIGURA F2 - Esquema de un electrodo tipo contra-antena

F.2.3 Patas de la Torre o Estructura

Todas las estructuras autoportadas de líneas de transmisión tienen 4 patas como cimentación, pudiendo ser que estén embebidas en concreto, conocida como cimentación de concreto o enterradas directamente en el suelo, conocida como cimentación de acero.

F.2.3.1 Cimentación de acero

Podemos aproximar cada una de las patas, considerando un modelo de un electrodo enterrado con las siguientes dimensiones:

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

$$r = 0.10 \text{ m.}$$

Estas dimensiones son muy similares a las torres tipo 1M1, para 115 kV (Referencias [9] y [12] del capítulo 12).

Si consideramos un valor de resistividad de $1\,200 \Omega \cdot \text{m}$ y aplicamos la fórmula (1) se obtiene:

$$R = \frac{1\,200}{6 \pi} \left(\ln \frac{12}{0,1} - 1 \right) = 241 \Omega \quad \text{por pata} \quad (5)$$

El equivalente de las cuatro patas en paralelo nos daría $R' = 241/4 = 60.25 \Omega$. Según, el reporte (referencia [5] del capítulo 12), se han medido valores de entre 50Ω y 60Ω , para resistividades entre $1\,100 \Omega \cdot \text{m}$ y $1\,600 \Omega \cdot \text{m}$.

Tomando en cuenta diferentes resistividades de terreno y utilizando este modelo obtenemos los valores aproximados de la resistencia a tierra de las patas de una torre de línea aérea cuando están enterradas directamente, sin concreto.

$\rho = 100 \Omega \cdot m$	$R' = 5 \Omega$	(6a)
$\rho = 300 \Omega \cdot m$	$R' = 15 \Omega$	(6b)
$\rho = 500 \Omega \cdot m$	$R' = 25 \Omega$	(6c)
$\rho = 750 \Omega \cdot m$	$R' = 37.7 \Omega$	(6d)
$\rho = 1\ 000 \Omega \cdot m$	$R' = 50 \Omega$	(6e)

F.2.3.2 Cimentación en concreto

Cuando las patas de la torre están embebidas en concreto, se utiliza la siguiente relación obtenida de la referencia [2] del capítulo 12, donde se sugiere que el concreto puede tener resistividades entre $30 \Omega \cdot m$ y $90 \Omega \cdot m$, dependiendo del contenido de humedad y las diversas soluciones salinas del subsuelo:

$$R = \frac{I}{2\pi L} \left[\rho_c \left(\ln \frac{D}{d} \right) + \rho \left(\ln \frac{8L}{D} - 1 \right) \right] \quad (7)$$

Donde:

- D = Diámetro del envolvente de concreto, m.
- d = Diámetro del conductor (equivalente) embebido en el concreto, m.
- ρ_c = Resistividad del concreto, $\Omega \cdot m$.
- ρ = Resistividad del terreno, $\Omega \cdot m$.
- L = Profundidad del concreto enterrado y/o longitud de la varilla, m.

Considerando que la longitud es de 3 m, el diámetro del conductor es de 0.2 m el diámetro del concreto que envuelve la estructura de la pata es de 0.7 m y la resistividad de dicho concreto es de $100 \Omega \cdot m$ tenemos:

$$R = \frac{1}{6\pi} [(125,3) + \rho(2,53)] \quad (8)$$

Así que para ciertas resistividades de interés, tenemos los siguientes valores totales de la resistencia a tierra de la torre de línea aérea considerando las cuatro patas:

$\rho = 100 \Omega \cdot m$	$R' = 5 \Omega$	(9a)
$\rho = 300 \Omega \cdot m$	$R' = 12 \Omega$	(9b)
$\rho = 500 \Omega \cdot m$	$R' = 19 \Omega$	(9c)
$\rho = 750 \Omega \cdot m$	$R' = 26.8 \Omega$	(9d)
$\rho = 1\ 000 \Omega \cdot m$	$R' = 35 \Omega$	(9e)

Estos resultados consideran $100 \Omega \cdot m$ como resistividad del concreto con cierta humedad, sin embargo, puede aumentar dicha resistividad en caso de disminuir drásticamente la humedad. Así que, se debe tomar con reserva el uso de estas formulaciones en condiciones especiales de poca hidratación.

Comparando los valores **(6)** y **(9)** observamos que la resistencia de las patas embebidas en concreto resultan menores que las enterradas directamente. Esto se debe a que la resistividad del concreto se consideró relativamente baja (en condiciones de humedad). Si revisamos la relación **(7)** observamos que la resistencia total está compuesta en una porción debida al concreto y otra debida a la resistividad del terreno.

F.3 CÁLCULOS DEL NÚMERO DE ELECTRODOS ADICIONALES A LAS PATAS DE LAS TORRES

Para obtener el valor especificado de 10 Ω de resistencia a tierra de las torres, se requiere una resistencia adicional en paralelo con la resistencia de las patas. Esta resistencia adicional, simbolizada como R_{ad}, se logra con la instalación de contra-antenas y electrodos verticales. Para las resistividades equivalentes del subsuelo y resistencias dadas en (6a), (6b), (6c) y (6d) se tiene:

$\rho = 100 \Omega \cdot m$	(no requiere electrodos adicionales para cimentaciones de acero)	(10a)
$\rho = 300 \Omega \cdot m$	R _{ad} = 30 Ω	(10b)
$\rho = 500 \Omega \cdot m$	R _{ad} = 16.7 Ω	(10c)
$\rho = 750 \Omega \cdot m$	R _{ad} = 13.6 Ω	(10d)
$\rho = 1\ 000 \Omega \cdot m$	R _{ad} = 12.5 Ω	(10e)

Considerando despreciable la reducción en la resistencia del sistema de puesta a tierra de la cimentación de concreto de la estructura y normalizando la separación entre electrodos verticales a 6 m, se realiza el diseño para diferentes intervalos de resistividad equivalente del subsuelo.

F.3.1 Para $\rho_{\epsilon} < 100 \Omega \cdot m$

Para cimentaciones de acero no se requieren electrodos adicionales y para cimentaciones de concreto se requieren por pata una contra-antena de 3 m de longitud con un electrodo vertical conectado al final de dicha contra-antena, ya que si el concreto está muy seco, la resistencia puede aumentar sustancialmente.

F.3.2 Para $100 \Omega \cdot m < \rho_{\epsilon} < 300 \Omega \cdot m$

a) Para cimentaciones de concreto (véase figura 5).

- 6 m de contra-antena en cada pata, 24 m en total.
- 2 electrodos verticales por cada contra-antena, separados 6 m, dando un total de 8.

El electrodo vertical más cercano se debe instalar en la base y al lado de la cimentación de concreto.

El valor esperado de resistencia es:

- Por cada 6 m de contra-antena (o de un electrodo de 3 m), considerando la fórmula 4b se tiene: $300 / 3 = 100.0 \Omega$.
- Para 24 m de conductor horizontal. $(100) / (24 / 6) = 25.0 \Omega$.
- Para 8 electrodos verticales. $100 / 8 = 12.5 \Omega$.
- El paralelo de ambos elementos. $[(25) (12.5)] / 37.5 = 8.33 \Omega$.

b) Para cimentaciones de acero (véase figura 5).

- 6 m de contra-antena en cada pata, 24 en total.
- 1 electrodo vertical por cada contra-antena dando un total de 4.

El electrodo vertical más cercano se debe instalar a 6 m de la pata.

080812	Rev	110506	150611	190411						
--------	-----	--------	--------	--------	--	--	--	--	--	--

F.3.3 Para $300 \Omega \cdot m < \rho_{\epsilon} < 500 \Omega \cdot m$

a) Para cimentaciones de concreto (véase figura 6).

- 12 m de contra-antena en cada pata, 48 m en total.
- 3 electrodos verticales por cada contra-antena, separados 6 m, dando un total de 12.

El electrodo vertical más cercano se debe instalar en la base y al lado de la cimentación de concreto.

El valor esperado de resistencia es:

- Por cada 6 m de contra-antena (o de un electrodo de 3 m), considerando la fórmula 4b se tiene: $500 / 3 = 166.67 \Omega$.
- Para 48 m de conductor horizontal $(166.67) / (48 / 6) = 20.83 \Omega$.
- Para 12 electrodos verticales $166.67 / 12 = 13.89 \Omega$.
- El paralelo de ambos elementos $[(20.83) (13.89)] / 34.72 = 8.33 \Omega$.

b) Para cimentaciones de acero (véase figura 6).

- 12 m de contra-antena en cada pata, 48 en total.
- 2 electrodos verticales por cada contra-antena dando un total de 8.

El electrodo vertical más cercano se debe instalar a 6 m de la pata.

F.3.4 Para $500 \Omega \cdot m < \rho_{\epsilon} < 750 \Omega \cdot m$

a) Para cimentaciones de concreto (véase figura 7).

- 24 m de contra-antena en cada pata, 96 m en total.
- 5 electrodos verticales por cada contra-antena, separados 6 m, dando un total de 20.

El electrodo vertical más cercano se debe instalar en la base y al lado de la cimentación de concreto.

El valor esperado de resistencia es:

- Por cada 6 m de contra-antena (o de un electrodo de 3 m), considerando la fórmula 4b se tiene: $750 / 3 = 250.0 \Omega$.
- Para 96 m de conductor horizontal. $(250) / (96 / 6) = 15.63 \Omega$.
- Para 20 electrodos verticales. $250 / 20 = 12.50 \Omega$.

- El paralelo de ambos elementos. $[(15.63) (12.5)] / 28.13 = 6.94 \Omega$.

b) Para cimentaciones de acero (véase figura 7).

- 24 m de contra-antena en cada pata, 96 en total.
 - 4 electrodos verticales por cada contra-antena dando un total de 16.
- El electrodo vertical más cercano se debe instalar a 6 m de la pata.

F.3.5 Para $750 \Omega \cdot m < \rho < 1000 \Omega \cdot m$

a) Para cimentaciones de concreto (véase figura 8).

- 30 m de contra-antena en cada pata, 120 m en total.
 - 6 electrodos verticales por cada contra-antena, separados 6 m, dando un total de 24.
- El electrodo vertical más cercano se debe instalar en la base y al lado de la cimentación de concreto.

El valor esperado de resistencia es:

- Por cada 6 m de contra-antena (o de un electrodo de 3 m), considerando la fórmula 4b se tiene: $1000 / 3 = 333.33 \Omega$.
- Para 120 m de conductor horizontal. $(333.33) / (120 / 6) = 16.67 \Omega$
- Para 24 electrodos verticales. $333.33 / 24 = 13.89 \Omega$.
- El paralelo de ambos elementos. $[(16.67) (13.89)]/30.56 = 7.58 \Omega$.

b) Para cimentaciones de acero (véase figura 8).

- 30 m de contra-antena en cada pata, 120 en total.
- 5 electrodos verticales por cada contra-antena, separados 6 m, dando un total de 20.
- El electrodo vertical más cercano se debe instalar a 6 m de la pata.

F.4 LONGITUD EFECTIVA DE UNA CONTRA-ANTENA ANTE DESCARGAS ATMOSFÉRICA

La caída de tensión producida por una descarga atmosférica se acentúa intensamente en las secciones por donde se inyecta la corriente y tiende a disminuir rápidamente hacia las secciones donde debe avanzar posteriormente dicha corriente. Esta distribución la causa principalmente la inductancia propia del conductor. Al darse dicha distribución de tensiones, la corriente se debe drenar en mayor cantidad en las primeras secciones del conductor y debe tender rápidamente a disminuir hacia las secciones más alejadas del punto de inyección de corriente.

Como resultado, debe haber secciones de conductor (las más alejadas) que prácticamente no deben colaborar para la dispersión de la corriente al subsuelo. El punto en el cual estas secciones de conductores prácticamente ya no deben drenar corriente va a depender de la distribución del potencial. Esta distribución debe estar principalmente definida por el efecto conjunto del frente de onda de la corriente y la inductancia del conductor, así como por la resistividad equivalente del subsuelo.

Para calcular la longitud efectiva de una contra-antena se utiliza la siguiente relación (referencia [1] del capítulo 12):

080812	Rev	110506	150611	190411							
--------	-----	--------	--------	--------	--	--	--	--	--	--	--

$$L_{ef} = 1.3\sqrt{T_f \rho_e} \quad (11)$$

Donde:

L_{ef} = Longitud efectiva, en m.

T_f = Tiempo de frente, en μs .

ρ_e = Resistividad equivalente del subsuelo, en $\Omega \cdot m$.

La tabla F1 y la figura F3 ilustran la aplicación de la relación (11).

Para el diseño o instalación de un sistema de puesta a tierra, no se debe exceder la longitud efectiva de una contra-antena para un tiempo de frente de onda de 5 μs considerando el valor de resistividad equivalente del subsuelo.

TABLA F1 - Longitud efectiva de una contra-antena para diferentes valores de frente de onda y resistividad del subsuelo

Frente de onda (μs)	Resistividad equivalente ρ_e ($\Omega \cdot m$)	Longitud efectiva (m)
3	100	23
3	300	39
3	500	50
3	750	62
3	1 000	71
5	100	29
5	300	50
5	500	65
5	750	80
5	1 000	92

FIGURA F3 - Longitud efectiva de la contra-antena en función del tiempo de frente de la corriente de descarga atmosférica para diversas resistividades de terreno

