

Boletín 85

PUESTA A TIERRA

**LINEAS DE
TRANSMISION Y
DISTRIBUCION**

Boletín técnico N°85

PARTE 2

Ing. Gregor Rojas

Caracas - Venezuela

LINEAS DE TRANSMISION Y DISTRIBUCION PUESTA A TIERRA

PARTE 2

Por:

Ing. Gregor Rojas
GERENTE NACIONAL
MERCADEO Y VENTAS
División materiales eléctricos

Generalidades.

Las líneas de transmisión y distribución eléctricas transportan y distribuyen la energía eléctrica, se dividen en líneas de transmisión aéreas y líneas de transmisión subterráneas.

Las líneas aéreas son el tema abordado en este boletín técnico, están constituidas por conductores en el aire apoyados en estructuras metálicas denominadas torres y sujetas por medio de aisladores. El aislamiento entre conductores lo proporciona el aire y el aislamiento entre los conductores y tierra se obtiene por medio de las cadenas de los aisladores.

Para comprender lo que trataremos es este boletín es recomendable haber consultado el boletín técnico 84 donde se abordaron tópicos referidos al aislamiento y sobre las cadenas de aisladores, entre otros.

Dentro de este sistema la parte más vulnerable es la línea de transmisión, debido al efecto de las descargas atmosféricas que producen el mayor porcentaje de interrupciones de servicio, esto implica que las líneas pierdan continuidad en el suministro, reflejándose en los índices de confiabilidad del sistema.

Un sistema de tierras para líneas de transmisión es un conjunto de conductores, apartarrayos, electrodos, accesorios, etc, que interconectados eficazmente tienen por objeto conectar a tierra las cubiertas y otras partes metálicas de los equipos eléctricos, así como aquellos elementos de los

circuitos que lo requieran y que resultan altamente expuestos a descargas y sobretensiones peligrosas.

3. Sistema de puesta a tierra de las torres.

La finalidad de los sistemas de puesta a tierra tanto en bajo como en alto voltaje es la seguridad de las personas y la confiabilidad del sistema eléctrico ante cualquier tipo de falla.

A continuación, se describe su funcionamiento ante una descarga atmosférica: Cuando un rayo impacta sobre el cable de guarda este debe conducir la corriente eléctrica hacia la torre y por medio de la bajante hacia el electrodo del sistema de puesta a tierra de manera de disipar la descarga en la tierra.

Cuando el montaje del sistema de puesta a tierra está terminado se mide la resistencia de puesta a tierra de la torre, para ello existen varios métodos, la cual no debe superar el valor establecido en la Tabla 1.

Aplicación	Valor máximo ohmios
Torres de líneas de transmisión	20
Subestación de alta y extra alta tensión	1
Subestación de media	10
Protección contra rayos	5
Neutro de acometida baja tensión	25
Descargas electrostáticas	25
Redes para equipos electrónicos sensible	5

Esta información permite identificar inexactitudes en el momento del análisis y toma de datos físicos en el sistema.

Según las normas generales para proyectos de líneas de transmisión a 230 KV y 115KV de

CORPOELEC la resistencia de puesta a tierra de cada estructura o torre no debe superar los 20 ohm, tal como se indico en la tabla 1 del boletín técnico 84 y comentada en el mismo.

Uno de los elementos principales de una instalación de un sistema de tierra es el electrodo de puesta a tierra. La resistencia de este electrodo de puesta a tierra, denominado barra de tierra, tiene tres componentes:

- ❑ Uno es su propia resistencia eléctrica, la cual puede ser despreciable para efectos de cálculo, esto debido a que idealmente es cero, así el drenado de corriente será mediante él como es deseado. No obstante, con el tiempo las conexiones entre electrodo y conductor de bajada pueden llegar a tener una resistencia desmedida.
- ❑ Otro componente es la resistencia eléctrica de contacto entre el electrodo o barra de tierra y el suelo, cuando el electrodo está libre de cualquier sustancia como grasa o pintura es despreciable. No obstante, en terrenos o suelos muy secos esta resistencia de contacto se incrementa significativamente, aumentando rápidamente cada vez que el contenido de humedad disminuye por debajo de un 15%.
- ❑ El último elemento lo representa la resistividad del suelo circundante al electrodo. Cuando se introduce un electrodo en un suelo uniforme, la corriente se dispersará uniformemente alrededor del electrodo. La resistividad del suelo varía ampliamente dependiendo de su composición y zonas climáticas, también varía estacionalmente debido a que la resistividad se determina en gran proporción por el contenido de electrolito, consistente de agua, minerales y sales. De igual forma, también se ve afectada por la temperatura.

Algunos valores típicos de resistividades de suelos se resumen en la tabla 2.

TABLA 2	
Resistividad de suelos	
Tipo de suelo	Resistividad Ω-m
Terrenos vegetales húmedos	10 - 50
Arcilla, grava, limos	20 - 60
Arena y grava	50 - 1.000
Arenas arcillosas	80 - 200
Fangos, turbas	150 - 300
Piedra caliza de superficie	100 - 10.000
Piedra caliza	5 - 4.000
Pizarra	5 - 100
Piedra arenisca	20 - 2.000
Granito, basalto	1.000
Rocas	1.000 - 10.000
Arenas	250 - 500
Suelos pedregosos poca vegetación	300 - 400

2.1 Tipos de Puesta a Tierra

2.1.1 Puesta a Tierra para Protección

En este tipo de puesta a tierra, es necesario conectar eléctricamente al suelo todas aquellas partes de las instalaciones eléctricas que en condiciones normales no se encuentren sujetas a voltaje, no obstante, pueden presentar diferencias de potencial por una falla, como por ejemplo: las estructuras de las torres de transmisión, los apartarrayos, etc.

2.1.2 Puesta a Tierra para operación

Para suministrar una mayor seguridad, un mejor funcionamiento y eventualmente una mayor confiabilidad respecto a la operación, es necesario establecer una conexión a tierra en determinados puntos del sistema, para ello, se requiere conectar a tierra ciertos puntos del sistema como son los siguientes: la conexión a tierra de los apartarrayos, los neutros de generadores y transformadores con devanados conectados en estrella, la conexión a tierra de los cables de guarda, las estructuras, etc.

2.1.3 Definiciones básicas

Para una mejor comprensión de lo tratado en este boletín técnico definiremos lo siguiente:

❑ **Tensión de Paso (Vp):**

Es la tensión que resulta entre los pies de una persona apoyada en el suelo a la distancia de un metro. Ver figura 11



Figura 11. Voltaje de paso

❑ **Tensión de Contacto (Vc):**

Voltaje al cual se puede someter el cuerpo humano por contacto con una estructura metálica, aparato eléctrico o estructura de torres, que en condiciones normales no se encuentra con voltaje. Ver figura 12.

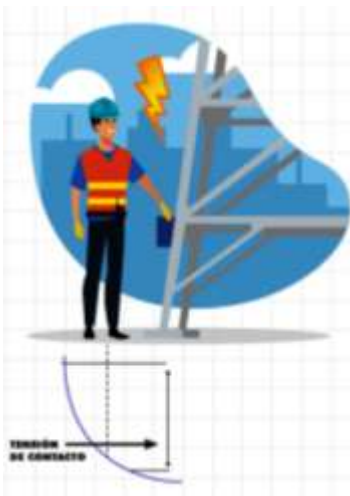


Figura 12. Voltaje de contacto

❑ **Resistencia eléctrica del cuerpo humano:**

La resistencia interna del cuerpo humano es de aproximadamente de 200 Ω . La resistencia de contacto entre una mano y un conductor o una parte metálica bajo voltaje varía dentro de límites muy amplios, según sea la extensión y naturaleza de la superficie de contacto, de la naturaleza de la piel de las personas, del grado de humedad de la piel, etc.

La resistencia de contacto entre el pie y el suelo puede variar considerablemente según sean las condiciones del calzado y del suelo.

❑ **Tensiones de Seguridad:**

Se recomienda que en ningún punto de una instalación eléctrica se presenten voltajes de paso o de contacto superiores a los siguientes valores:

- ✓ 60 V cuando no se prevé la eliminación rápida de una falla de línea a tierra.
- ✓ 120 V cuando la falla se elimine en un período de un segundo.

2.4.1 Resistencia de puesta a tierra.

La resistencia de puesta a tierra está directamente relacionada con la composición natural del suelo, tanto de sus características físicas y químicas, es decir, que el suelo será de resistencia baja cuando sea altamente húmedo, con composición arcillosa y con un alto contenido de minerales conductores.

Al contrario se presentará una alta resistencia de puesta a tierra cuando el suelo sea de composición seca y altamente rocosa, lo que implica que la resistencia de puesta a tierra puede variar con la época del año.

Lo anterior tiene lógica, pues la corriente asociada con la descarga atmosférica al llegar a la base de la estructura encuentra o no, según la composición del suelo un medio propicio para disipar la energía de la descarga atmosférica.

Cuando una línea de transmisión tiene continuas salidas debido a flameos inversos por altas resistencias de puesta a tierra en las estructuras, se debe buscar mejorar bajando la resistencia que la corriente asociada a la descarga atmosférica encuentra al llegar al suelo.

Sabiendo el nivel cerámico de la zona por donde pasa la línea de transmisión, podemos por medio de una gráfica probabilística de distribución de descargas atmosféricas, calcular el valor de la corriente de la descarga atmosférica que nos produce flameo inverso, esta decisión, se tomara dependiendo del grado de confiabilidad que deseamos dar a la línea de transmisión, con dicha corriente y con el voltaje de flameo de la cadena de aisladores podemos buscar el valor necesario de la resistencia de puesta a tierra.

En la realidad una línea de transmisión no tiene un valor constante de resistencia de puesta a tierra, sino que presenta una variedad de valores según la ubicación en que se encuentre cada torre, en tal sentido, lo primero que debemos hacer al querer mejorar las puestas a tierra de una línea de transmisión es medir los valores de resistencia a tierra que posea cada torre.

Otra solución para resolver el problema de las descargas atmosféricas que técnicamente podría aplicarse sería colocar una malla de puesta a tierra en la base de cada estructura o torre, debido a que estas mallas de tierra disiparían las corrientes asociadas con las descargas atmosféricas, no obstante esta solución tiene una fuerte limitante desde el punto de vista económico.

Por lo anterior, los procedimientos seguidos en la práctica son:

a) Cables de contrapeso

La utilización de cables de contrapeso es una práctica común, se fundamenta en enterrar de manera horizontal cables conductores conectados a las estructuras de las torres, estos cables son

guayas de acero galvanizadas de distintos diámetros según el requerimiento, su aplicación permite la disminución del valor de la resistencia de puesta a tierra en la medida en que se incrementa la longitud y el diámetro del contrapeso.

Es importante resaltar que generalmente se piensa que el comportamiento del sistema de puesta a tierra en líneas de transmisión responde de igual forma tanto para bajas frecuencias como para altas frecuencias, lo cual no es así, a continuación veremos esto en detalle.

Basado en lo establecido en la norma IEEE 1100 donde indica que una carga lineal es cualquier carga que consume una corriente que es proporcional al voltaje suministrado, como lo son: resistencias, inductores y condensadores, junto con motores, luces incandescentes y elementos de calefacción resistivos, son todos cargas lineales.

Tenga presente que cada uno de los componentes básicos de la impedancia de carga (pasiva) tiene una variación distinta con la frecuencia.

Tal es el caso de la resistencia denominada R, idealmente no cambia con la frecuencia. Por lo tanto, su curva es simplemente una línea recta horizontal, con una magnitud de R ohmios por encima del eje de frecuencia, esta curva se puede apreciar en la figura 13 y corresponde a la Figura 4-44 de la IEEE 1100.

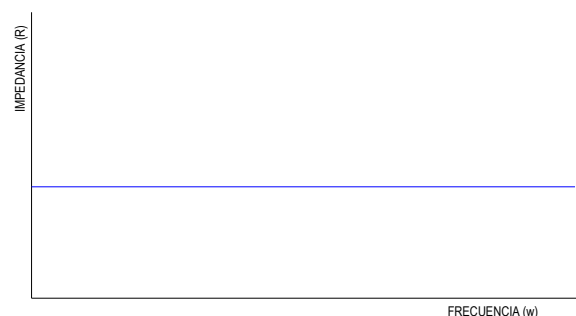


Figura 13. Comportamiento de la resistencia

La reactancia inductiva denominada X_L , aumenta linealmente con la frecuencia de la forma $y = mx + b$.

El comportamiento la reactancia inductiva vs frecuencia se puede apreciar en la curva de la figura 14 y corresponde a la Figura 4-45 de la IEEE 1100. En ella se representa en una línea con una pendiente igual a la inductancia L del inductor y la intersección en el origen es $X_L = \omega L + 0$.

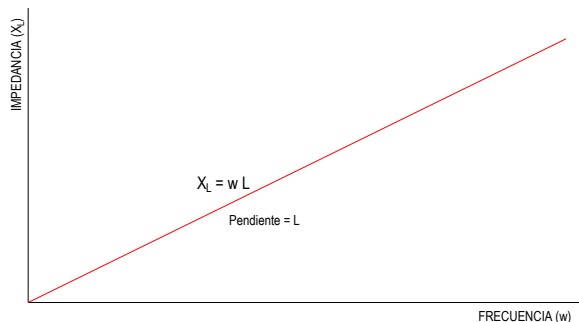


Figura 14. Comportamiento de la inductancia

La reactancia capacitiva denominada X_C , es una función hiperbólica de frecuencia de la forma $yx = k$, donde la frecuencia ω , es la variable independiente y $-1/C$ es la constante.

La reactancia capacitiva frente a la frecuencia es $X_C = -1/(\omega C)$ y es representada en la figura 15 y corresponde a la Figura 4-46 de la IEEE 1100.

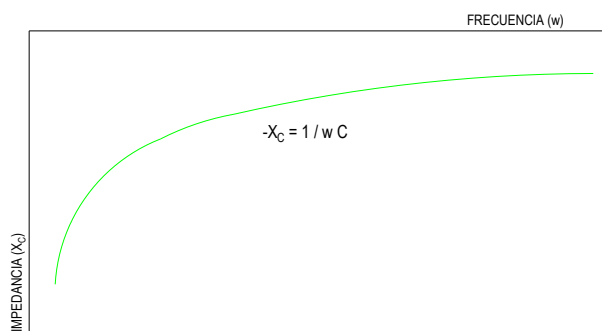


Figura 15. Comportamiento de la resistencia

En la figura 14 y 15 se puede observar como a medida que aumenta la frecuencia la reactancia inductiva se convierte en el factor determinante.

Recuerde que $w = 2 \pi f$, por lo tanto cuando la frecuencia y la inductancia se incrementan también se incrementa la reactancia inductiva lo cual es nocivo en una malla a de puesta a tierra porque al momento en que caiga una descarga atmosférica los sobrevoltajes que se van a generar a nivel del aislador serán muy elevados y podemos estar sobrepasando el BILL del aislador con lo cual se producirá un arco que es un contorno inverso denominado backflashover que degenerara en una salida de la línea.

Si estas tasas de salidas de la línea por efectos del backflashover son altas se tendrá constantes salidas de línea con pérdida de carga con la correspondiente afectación del usuario, como estos efecto no son deseables existen normativas que regulan las tasas de salidas de líneas por efectos del backflashover en función del voltaje.

El sistema de puesta a tierra se comporta como una impedancia transitoria, variando desde su valor inicial hasta el valor de resistencia de dispersión.

En la figura 16 están indicadas las curvas que muestran esta variación para una determinada configuración de contrapesos.

Un cable de contrapeso tiene una impedancia inicial de impulso, dependiendo de las condiciones del suelo, normalmente de 150 a 200 ohmios.

Con la propagación de la onda de corriente a través del contrapeso, esta impedancia de impulso es reducida a su resistencia de dispersión en un período de tiempo dependiendo de la longitud del cable y de la velocidad de propagación de impulso.

- Z 150Ω – Impedancia de impulso. (Inicial)
- R 10 Ω – Resistencia de dispersión
- N Número de cables de contrapeso.

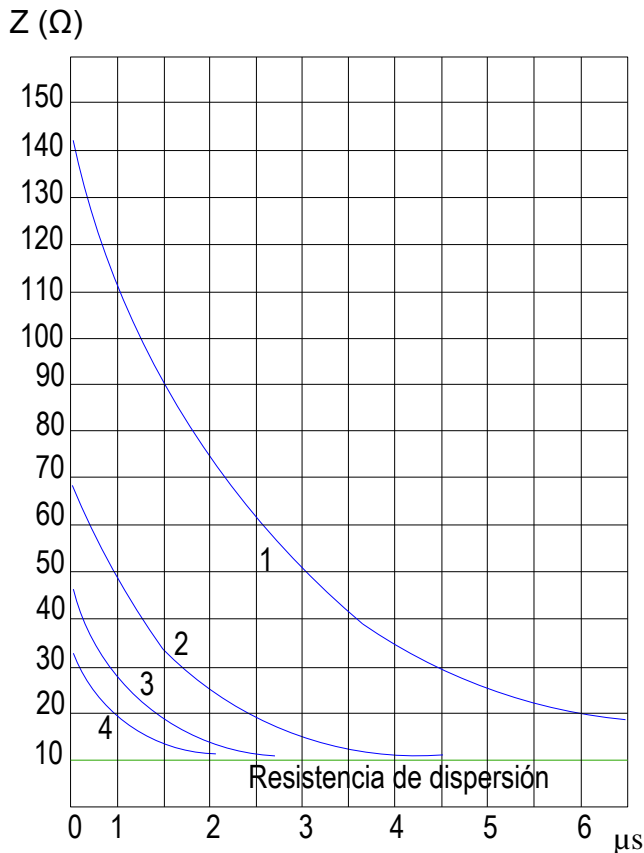


Figura 16. Variación de la impedancia transitoria y efecto del número de contrapesos.

En la figura 16 podemos observar que al colocar más cantidad de cables de contrapesos bajamos el valor total de la impedancia transitoria inicial, de manera análoga, es como si colocáramos resistencias de aproximadamente 145 ohmios en paralelo.

No obstante, como lo mencionamos anteriormente la impedancia depende de la reactancia inductiva que a su vez esta proporcionalmente afectada por la frecuencia, por lo tanto, la colocación de más cable puede ser contraproducente, quizás se logre bajar la resistencia en baja frecuencia pero no así para alta frecuencia, tenga presente, que las descargas atmosféricas son corrientes de alta frecuencia y la topología del sistema de puesta a tierra podría causar efectos de backflashover sobre los aisladores generando salidas de línea.

A continuación veremos cómo disminuye la impedancia inicial en la medida que colocamos más cables de contrapeso.

Cantidad de contrapeso	Impedancia inicial
1 cable	145 ohms
2 cables	$\frac{145 \times 145}{145 + 145} = 72$ ohms
3 cables	$\frac{72 \times 145}{72 + 145} = 48$ ohms
4 cables	$\frac{48 \times 145}{48 + 145} = 36$ ohms

Los impulsos atmosféricos se propagan en una estructura con una velocidad aproximada del 80% de la velocidad de la luz, es decir:

$$V_{pt} = 0,8 \times 300.000 \frac{\text{Km}}{\text{seg}} \times \frac{1 \text{ seg}}{10^6 \mu s} \times \frac{1.000 \text{ m}}{1 \text{ Km}}$$

$$V_{pt} = 240 \text{ Km/seg}$$

Donde V_{pt} es la velocidad de propagación de la corriente de una descarga atmosférica en una torre o estructura.

De igual forma, los impulsos atmosféricos se propagan en un contrapeso con una velocidad del orden de un tercio de la velocidad de la luz, es decir:

$$V_{pc} = \frac{300.000 \text{ Km}}{3 \text{ seg}} \times \frac{1 \text{ seg}}{10^6 \mu s} \times \frac{1.000 \text{ m}}{1 \text{ Km}}$$

$$V_{pc} = 100 \text{ Km/seg}$$

Donde V_{pc} es la velocidad de propagación de la corriente de una descarga atmosférica en un contrapeso.

Según lo anterior un contrapeso de 300m, con una impedancia de impulso de aproximadamente 150 ohms, tardaría 6 microsegundos para que su resistencia efectiva sea reducida a su resistencia de dispersión.

Del mismo modo, un cable de contrapeso de 75m, con una impedancia de impulso de aproximadamente 150 ohms, solo necesitará 1.5 microsegundos para reducir su resistencia efectiva a su resistencia de dispersión.

Lo anteriormente descrito, sirve para demostrar que desde el punto de vista de respuesta transitoria (fenómenos muy rápidos), es mejor la utilización de varios cables de contrapesos con longitudes menores que un cable contrapeso con longitud muy grande.

La impedancia de impulso inicial de los contrapesos, depende de las condiciones del suelo que normalmente son de 150 a 200 ohms y no depende directamente de la longitud del cable.

Por tal motivo, la longitud del cable de contrapeso debe ser tal que el tiempo que tarde el impulso en ir a la punta y volver, sea superior al tiempo de crecimiento del fenómeno.

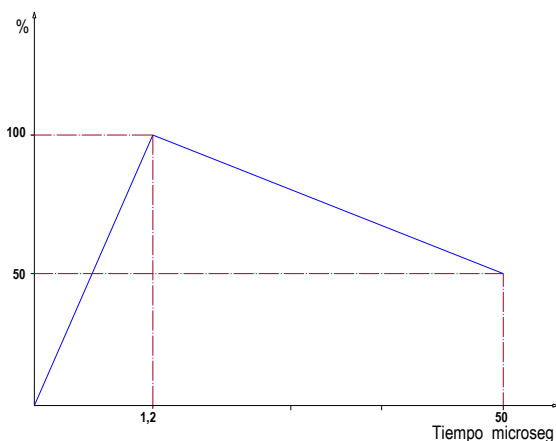


Figura 17. Onda normalizada para descargas atmosféricas

Como estamos hablando de una descarga atmosférica, la cual es normalizada por una onda de $1,2 \times 50 \mu s$ o superior garantizándonos que cuando la onda vuelve, el fenómeno ya se encuentra decreciendo.

En la figura 17 se puede observar la onda normalizada para descargas atmosféricas en la cual vemos que a partir de los 1,2 microsegundos la onda comienza a descender hasta alcanzar en los 50 microsegundos posteriores el 50% de su valor máximo.

Como conocemos las velocidades de propagación del impulso en la torre de transmisión y en los contrapesos, además del tiempo de crecimiento del fenómeno, esto nos permite que podamos calcular la longitud del cable de contrapeso.

En la figura 18 podemos observar la distancia que deberá de recorrer el impulso o frente de onda producido por la descarga atmosférica, la cual está compuesta por el valor de la altura de la torre de transmisión denominada LT y el largo que tendrá el cable de contrapeso denominado Lc para conformar entre ambas la longitud total Lt.

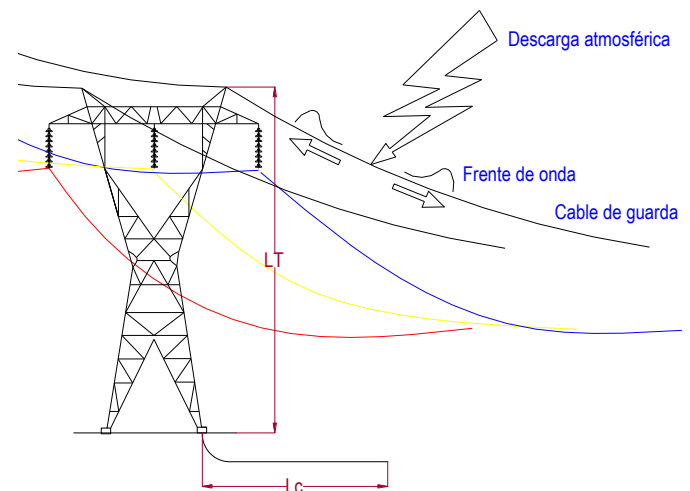


Figura 18. Distancia que recorre el impulso

Estableciendo que la transición es prácticamente completa en el tiempo necesario para la onda retornar del extremo remoto del cable de contrapeso.

$$L_{total} = l_t + l_c + l_c + l_t$$

$$L_{total} = 2 \times (l_t + l_c)$$

Ilustremos lo anterior con un ejemplo, en tal sentido vamos a suponer que se tiene una torre de 30m de altura. De acuerdo a lo visto hasta ahora el tiempo que transcurre mientras recorre la estructura será:

T_t = Tiempo en la torre

T_c = Tiempo en el contrapeso

S = Espacio

V = Velocidad

T = Tiempo

Donde

$$t_T = \frac{2L_t}{V_{PT}} = \frac{60 \text{ m}}{240 \text{ m}/\mu\text{s}} = 0,25 \mu\text{s}$$

También sabemos que:

$$t_{total} = t_T + t_c$$

$$t_c = 1,5 \mu\text{s} - 0,25 \mu\text{s} = 1,25 \mu\text{s}$$

$$s = v \times t = 100 \text{ m}/\mu\text{s} \times 1,25 \mu\text{s} = 125 \text{ m}$$

Como se trata del espacio de ida y de vuelta, el contrapeso debe tener una longitud de aproximadamente 62 mts.

Obtendríamos un valor un poco más corto de la longitud de contrapesos, si asumimos un tiempo total más cercano al pico de la onda normalizada de 1.2 μs o en su defecto si dispusiéramos de una estructura o torres de transmisión más alta.

Si el cable de contrapeso es muy largo, la parte crítica de la descarga en este caso el ascenso ya pasó y el impulso no ha llegado a la punta del contrapeso.

Algunos tipos de arreglos de cables contrapesos, utilizados para el mejoramiento de las puestas a tierra de las estructuras de una línea de transmisión son mostrados en las figuras 19 hasta la 25.

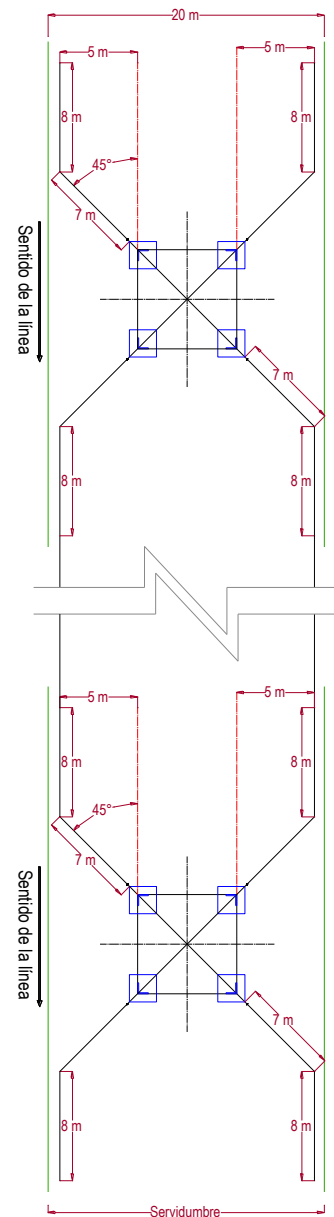


Figura 19. Contrapesos

La configuración de contrapesos mostrada en la figura 19 es muy costoso y solo presenta ventajas para fenómenos de baja frecuencia del orden de 60Hz, es el caso de los contrapesos muy largos.

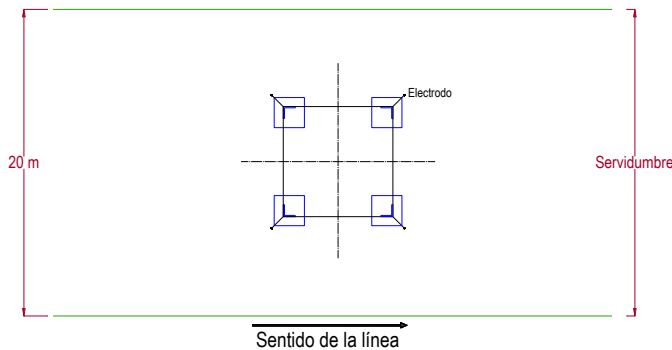


Figura 20 . Sistema de PAT para torre en terreno con resistividad entre 0 Ω m a 100 Ω m

La configuración de contrapesos mostrada en la figura 20 es la aplicable a un sistema de puesta a tierra para una torre de línea de transmisión con terreno que tenga una resistividad de diseño en un intervalo de 0 Ω m hasta los 100 Ω m.

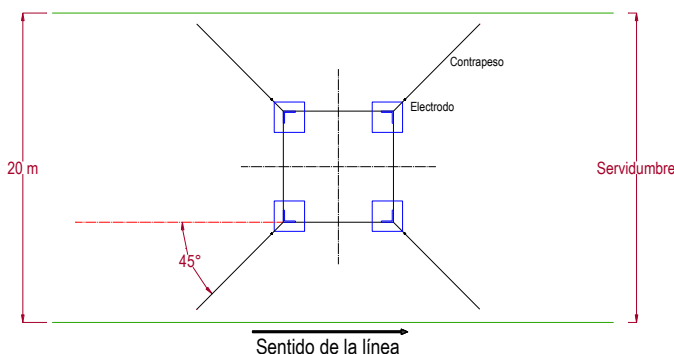


Figura 21. Sistema de PAT para torre en terreno con resistividad entre 100 Ω m a 300 Ω m

La configuración de contrapesos mostrada en la figura 21 es la aplicable a un sistema de puesta a tierra para una torre de línea de transmisión con terreno que tenga una resistividad de diseño en un intervalo de más de 100 Ω m hasta los 300 Ω m.

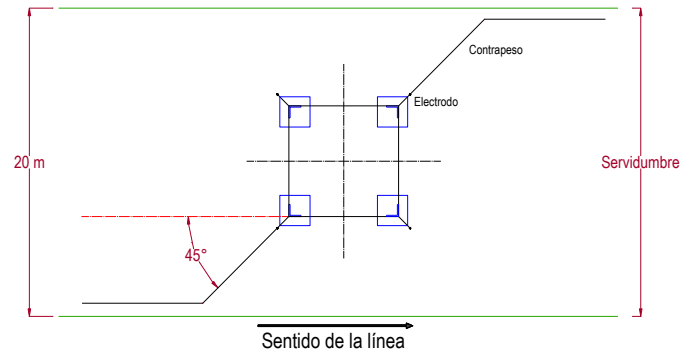


Figura 22. Sistema de PAT para torre en terreno con resistividad entre más de 300 Ω m a 500 Ω m

La configuración de contrapesos mostrada en la figura 22 es la aplicable a un sistema de puesta a tierra para una torre de línea de transmisión con terreno que tenga una resistividad de diseño en un intervalo mayor a 300 Ω m hasta los 500 Ω m.

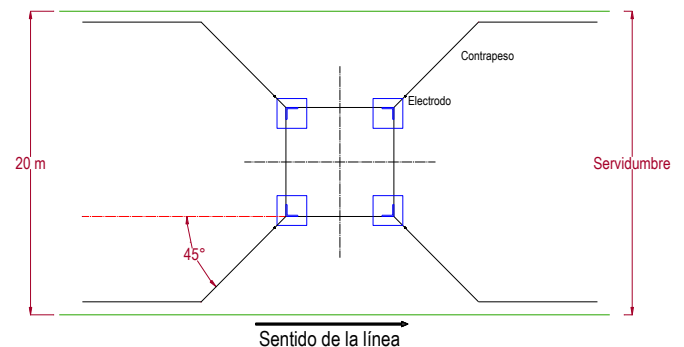


Figura 23. Sistema de PAT para torre en terreno con resistividad mayor a 500 Ω m hasta 750 Ω m

La configuración de contrapesos mostrada en la figura 23 es la aplicable a un sistema de puesta a tierra para una torre de línea de transmisión con terreno que tenga una resistividad de diseño en un intervalo mayor a 500 Ω m hasta los 750 Ω m.

Tenga siempre presente que los contrapesos teóricamente no tienen que ser colocados demasiado profundos, estos pueden ir a una profundidad mínima de 0,5 m, con excepción de los terrenos de cultivo donde la excavación debe ser de al menos 1 m para prevenir cualquier daño por arados o implementos agrícolas y de alrededor

de 0,4 m para terrenos rocosos. No obstante, cuando están instalados muy superficiales habitualmente están expuestos al robo con facilidad.

Tenga presente que los contrapesos deben conectarse a cada pata de la estructura de la torre de transmisión y estar dispuestos a 45° con relación a la trayectoria de la línea.

b) Electrodo de contrapeso

Los electrodos de contrapeso son las típicas barras copperweld o las denominadas jabalinas, son empleadas primordialmente para realizar conexiones a tierra los descargadores de sobrevoltaje, los electrodos de contrapeso o barras copperweld como se dijo anteriormente son enterados verticalmente en las cercanías de las estructuras de las torres, de manera análoga a los cables de contrapeso, la resistencia disminuirá con el incremento de su longitud enterrada y diámetro, pero esta disminución llega hasta un límite.

El empleo de electrodos de contrapeso o barras copperweld se fundamenta en el principio de que la resistencia del suelo disminuye con la profundidad, premisa que no aplica para todos los suelos debido a que depende del tipo y composición del suelo.

Tenga presente que si bien es cierto que a mayor profundidad se entierren las barras copperweld o electrodos de contrapeso, mejor será su comportamiento, no obstante, mayor complejidad y costo tendrá su implementación.

En países como Canadá, entierran estas barras copperweld a profundas de hasta 10m, haciéndolo por etapas, van ensamblando cuando la anterior está enterrada, haciendo una analogía podíamos compararla con el entierro de tuberías para posos profundos donde van ensamblando en la medida que introducen la tubería. No obstante, este método solo es posible en suelos blandos como

los arcillosos, partiendo del hecho que son clavadas estas barras.

No existe nada establecido sobre los arreglos de electrodos de contrapeso, no obstante, en la medida que más distanciadas se coloquen las barras copperweld más bajo será el valor de la resistencia de puesta a tierra obtenido, esto se debe a que mientras la distancia entre electrodos sea mayor a la longitud de los mismos, estos no producirán el efectos mutuos.

En el próximo boletín técnico continuaremos con este interesante tema siguiendo con la combinación de cables y electrodos de contrapeso.