

# Boletín 22

## CONDUCTORES PARA LINEAS DE TRANSMISION Y DISTRIBUCION

Boletín técnico N° 22  
PARTE 1  
Ing. Gregor Rojas

Caracas - Venezuela

## CONDUCTORES LINEAS DE TRANSMISION Y DISTRIBUCION

### PARTE 1

Por:

**Ing. Gregor Rojas**  
GERENTE NACIONAL  
MERCADERO Y VENTAS  
División materiales eléctricos

#### 1. Generalidades.

La IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineer) define un sistema de potencia como: una red formada por unidades generadoras eléctricas, líneas de transmisión de potencia y cargas, incluyendo el equipo asociado, conectado eléctricamente o mecánicamente a la red.

Para comprender mejor el tema de las líneas de transmisión y distribución de energía relacionado a los aisladores, es necesario haber visto previamente el Boletín Técnico N° 4 PARTE 2 sobre las líneas de transmisión y distribución donde partimos desde principios básicos sobre esta materia.

Por su estructura, normalmente en los sistemas de potencia podemos distinguir cuatro niveles operativos: generación, transmisión, sub-transmisión y distribución.

El sistema de potencia está constituido por elementos que cumplen funciones específicas, de forma que en operación conjunta garanticen un flujo confiable y económico de electricidad, una parte importante de este sistema lo constituyen los conductores, a continuación nos extenderemos en este tema.

#### 2. Conductores para líneas de transmisión y distribución..

Los conductores son el medio utilizado para transportar la corriente eléctrica, para ello cuentan

con la propiedad de poseer conductividad, es decir, están conformados por una sustancia que puede conducir la corriente eléctrica cuando este se ve sometido a una diferencia de potencial entre sus extremos.

Los metales son los materiales más utilizados para conducir corriente eléctrica y dentro de ellos en orden de importancia están: el cobre, el aluminio, las aleaciones de cobre, aleaciones de aluminio, el hierro, el acero y otras aleaciones.

Para las líneas de transmisión y distribución los conductores que generalmente se utilizan son: los fabricados de aluminio, aleaciones de aluminio, de aluminio con refuerzo de acero, de cobre entre otros.

Adicionalmente, son del tipo multifilar conformados por varios alambres conductores que se encuentran trenzados de manera helicoidal formando capas, la razón de que sean trenzados y no solidos reside en el hecho de proporcionarle flexibilidad mecánica.

#### 3. Calibre de conductores empleados en líneas aéreas

Para especificar un conductor bien sea para aplicaciones generales o para líneas de transmisión o distribución siempre se parte de su calibre, recordemos que el calibre es el área de la sección transversal.

Internacionalmente existen dos sistemas aceptados para especificar el calibre de los conductores, los cuales son:

- Sistema AWG
- Sistema MCM

##### 3.1 Sistema AWG.

El sistema AWG está conformado por las siglas inglesas American Wire Gage, fue creado en el año de 1857 por la compañía J.R. Brown & Sharpe

de Providence (Rhode Island), por tal motivo la escala también fue conocida como la Brown and Sharpe Gauge.

En este sistema los calibres de los conductores son definidos por una escala numérica, la cual obedece prácticamente a los pasos sucesivos del proceso de estirado del alambre que existía en 1857.

Se eligieron el diámetro más grueso de 0,46 pulgadas lo que equivale a un conductor calibre 4/0 y el diámetro más fino de 0,005 pulgadas equivalente a un conductor calibre 36, se establecieron 38 dimensiones entre dichos calibres.

Observándose que la razón entre un diámetro y el siguiente está dada por la progresión geométrica:

$$\sqrt[39]{\frac{0,4600}{0,0050}} = \sqrt[39]{92} = 1,1229$$

Es decir, la razón entre dos diámetros consecutivos en el sistema o escala AWG es constante e igual a 1.1229.

Por esta razón los pasos de los calibres con respecto al diámetro son regresivos, pues corresponden en realidad a los pasos del proceso de estirado del alambre.

En el sistema AWG, mientras mayor es el número del conductor, menor es su diámetro, en este sistema existen definidos cuarenta calibres diferentes, partiendo del número 36 (diámetro de 0.005 pulgadas) hasta llegar al calibre 0, 2/0, 3/0 y 4/0 (diámetro de 0.46 pulgadas).

### 3.2 Sistema MCM.

No obstante, la clasificación de los conductores por el sistema AWG, para los calibres de mayor grosor, se optó la solución de identificarlos directamente por el área en el sistema inglés de

Ing. Gregor Rojas

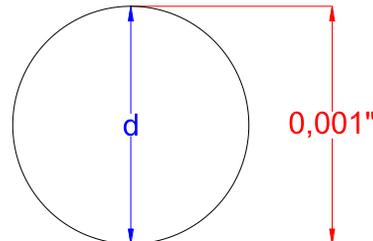
medida, siendo necesario implementar un sistema que admitiera calibres mayores de donde surge el concepto de MILS.

Para conductores de área mayor al 4/0, se utiliza una unidad denominada "Circular Mil". El Circular Mil se define como el área de una circunferencia cuyo diámetro es una milésima de pulgada es decir:

$$1 \text{ mil} = 1 / 1000 \text{ pulgadas} = 0.001 \text{ pulgada}$$

Esta escala se conoce como MCM, pero ésta nomenclatura fue sustituida por KMC.

En función de esta unidad de longitud se define el área de la sección transversal que especifican los conductores, adoptando el circular mil, que corresponde al área de una circunferencia cuyo diámetro es un mil (1/1000 pulg.) tenemos:



$$CM = \pi \times r^2$$

O en función del diámetro

$$CM = (\pi \times d^2) / 4$$

De donde se obtiene que

$$1CM = 0,78539 \times 10^{-6} \text{ pulg}^2$$

Conversión de pulgadas a milímetros se tiene que

$$1CM = 5,064506 \times 10^{-4} \text{ mm}^2.$$

Se puede apreciar claramente que el CM es una unidad muy pequeña, por lo tanto es necesario trabajar con una unidad múltiplo como el KCM = 103 CM (antiguamente conocido como MCM).

En este sistema el calibre más pequeño es 250 KCM (127 mm<sup>2</sup> de sección) y el calibre comercial más grande es de 500 KCM ( mm<sup>2</sup> de sección).

Es importante resaltar que un circular mil es una unidad de área que relaciona el calibre del conductor con su área.

El circular mil es empleado para especificar conductores sólidos y/o trenzados, tiene la especial ventaja que las secciones especificadas guardan relación directa con el diámetro.

Los conductores que transmiten grandes bloques de potencia, requieren de secciones transversales grandes, por lo que el cmil es una unidad muy reducida para la definición cotidiana de conductores, en lugar de esta se ha definido el mcmil, que corresponde a mil cmil.

$$1\text{mcmil} = 1000 \text{ cmil} = 1\text{MCM}$$

El menor calibre definido en el sistema de circular mils es de 250 MCM, siendo crecientes los calibres en pasos de 50 MCM.

#### **4. Elección de conductores para líneas de transmisión.**

Al momento de elegir un material conductor se presenta una disyuntiva esencialmente de orden económico, la cual no solo considera las propiedades eléctricas del conductor, sino también otras como: propiedades mecánicas, facilidad de hacer conexiones, su mantenimiento, la cantidad de soportes necesarios, las limitaciones de espacio, resistencia a la corrosión, entre otros.

Las principales características que debemos tener presente a la hora de tomar la decisión de elegir

los conductores que se emplearan en las líneas de transmisión son los siguientes:

1. La resistencia eléctrica. Esta debido a que mientras menor sea la resistencia, menor serán las pérdidas por calentamiento, estos debido a que las pérdidas son proporcionales a la resistencia eléctrica del conductor.
2. La resistencia mecánica. Esta debido a que en las líneas aéreas, se originan grandes esfuerzos mecánicos por peso o condiciones ambientales.
3. Otro factor es el económico, procurando el mínimo costo de la línea, lo que redundará en menor costo del transporte de energía y dando mayor rentabilidad.

Como suele suceder en la mayoría de los problemas técnicos, no existen materiales conductores que reúnan simultáneamente las tres características anteriores, pero si que combinen dos de ellas como son la conductibilidad y la resistencia mecánica.

Estos conductores estarán compuestos por un material de buenas condiciones eléctricas como lo es el cobre, aluminio o aleaciones de ambos y por otro de buenas cualidades mecánicas, generalmente el acero, ya que es el único que ofrece mejores condiciones mecánicas, aunque, en cuanto a cualidades eléctricas, sea lo contrario.

Otras características no menos importantes que se deben tener en cuenta al momento de la elección son:

1. Resistencia específica o resistividad. Es la medida de la resistencia eléctrica de una unidad de longitud para un material dado. Se define como la resistencia eléctrica de un alambre conductor de un metro de longitud y un mm<sup>2</sup> de sección.

2. Conductividad o conductancia específica. En los conductores, el valor de la resistencia eléctrica aumenta al aumentar la temperatura; y se define como coeficiente de temperatura el aumento de resistencia que experimenta un conductor al elevar su temperatura un grado centígrado.
3. Esfuerzo y deformación. Los materiales que se emplean como conductores para líneas aéreas de transmisión están sometidas a dos tipos de esfuerzos: el de tracción y el de compresión.

### **5. Metales empleados en conductores eléctricos.**

En la construcción de líneas aéreas de transmisión de energía eléctrica, se utilizan casi exclusivamente conductores metálicos desnudos, que se obtienen mediante cableado de hilos metálicos (alambres) alrededor de un hilo central. Los metales utilizados en la construcción de líneas aéreas deben poseer tres características principales:

- 1) presentar una baja resistencia eléctrica
- 2) presentar elevada resistencia mecánica, de manera de ofrecer una elevada resistencia a los esfuerzos permanentes o accidentales.
- 3) costo limitado.

Los metales más empleados en la fabricación de conductores eléctricos son:

- cobre
- aluminio
- aleación de aluminio
- combinación de metales (aluminio acero)

### **6. ALUMINIO.**

Los conductores de aluminio son utilizados en exteriores en las líneas de transmisión y

distribución, sus principales ventajas y desventajas son:

- ❖ Posee la mitad del peso del cobre para la misma capacidad de corriente.
- ❖ Presenta alta resistencia a la corrosión.
- ❖ Reducción del efecto corona por uso de diámetros mayores para la misma capacidad de corriente
- ❖ Conductividad eléctrica baja respecto al cobre.
- ❖ Formación natural de película de óxido altamente resistente al paso de la corriente ocasionando inconvenientes en juntas de contacto.
- ❖ Al estar en contacto directo con el cobre causa corrosión galvánica.

El aluminio se ha impuesto al cobre como conductor de líneas aéreas habiendo sido superadas por la técnica las desventajas que se le notaban respecto del cobre, además auxiliado por un precio sensiblemente menor, y por las ventajas del menor peso para igual capacidad de transporte.

Los conductores a base de aluminio más utilizados en líneas aéreas son:

- cables de aluminio puro (AAC)
- cables de aleación de aluminio (AAAC)
- cables mixtos aluminio acero (ACSR)
- cables mixtos aleación de aluminio acero

Independientemente de las características eléctricas y mecánicas que conducen a la elección de un tipo de conductor según sus ventajas o desventajas, no se debe pasar por alto los

siguientes principios básicos de uso de este tipo de material:

- 1) Usar conductores de aluminio siempre en forma de hilos cableados, debido a que poseen mejor resistencia a vibraciones que los conductores de un único alambre.
- 2) La dureza superficial de los conductores de aluminio es sensiblemente menor que los de cobre, manipular con cuidado, además los hilos que componen el conductor deben ser de un diámetro mayor o igual a 2 mm, para que especialmente en las operaciones de tendido no se expongan a daños.
- 3) Expuestos a la intemperie se recubren rápidamente de una capa protectora de óxido insoluble y que protege al conductor contra la acción de los agentes exteriores. Pese a esto proporcionar atención cuando hay ciertos materiales en suspensión en la atmósfera, como en zonas de caleras, cementeras, etc., lo que exige seleccionar una aleación adecuada
- 4) Algunos suelos naturales atacan al aluminio en distintas formas, por tal motivo no emplearlo para la puesta a tierra de las torres, al menos mientras no se conozca que acción puede tener del suelo sobre el aluminio.
- 5) El aluminio frente al aire marino es atacado lentamente no obstante, numerosas líneas en la vecindad del mar han exhibido un desempeño óptimo, para estos ambientes se debe extremar las precauciones en lo que respecta a la selección de la aleación y su buen estado superficial, en general el ataque será más lento cuantos menos defectos superficiales tenga.
- 6) El aluminio es electronegativo frente a la mayoría de los metales que se utilizan en la construcción de líneas y por esto se debe tener especial cuidado en las uniones.

- 7) La temperatura de fusión del aluminio es 660°C, mientras el cobre funde a 1083°C, por lo tanto los conductores de aluminio son más sensibles a los arcos eléctricos.

### **7. Cobre.**

Metal maleable color rojizo, mayormente los conductores están hechos de cobre, sus principales ventajas son:

- ❖ Conductividad eléctrica más alta después del platino.
- ❖ Debido a que es muy dúctil, fácilmente puede ser convertido por mecanizado en cable.
- ❖ Presenta buena resistencia mecánica, que puede ser incrementada mediante aleaciones.
- ❖ Puede ser recubierto mediante métodos mecánicos o electrolíticos de estaño o plateado.
- ❖ No se oxida fácilmente.
- ❖ Puede ser empalmado mediante soldadura usando equipo especial de soldadura de cobre o estaño.
- ❖ Buena conductividad térmica.

Es importante recordar, que inicialmente en la transmisión de energía eléctrica, los conductores eran de cobre, pero el aluminio ha ido sustituyendo totalmente al cobre debido a su menor costo y peso en comparación con uno de cobre.

Conviene para cada caso particular investigar el metal más adecuado, teniendo en cuenta las siguientes observaciones:

- El conductor trenzado puede realizarse con hilos del mismo metal, o de distintos metales, según cuales sean las características mecánicas y eléctricas requeridas.
- Si los hilos son del mismo diámetro, la formación obedece a la siguiente ley:

$$N_h = 3 c^2 + 3 c + 1$$

Siendo:

$N_h$  = número de hilos

$c$  = número de capas

Por lo tanto, es común encontrar formaciones de 7, 19, 37, 61 y 91 hilos, respectivamente de 1 a 5 capas. A pesar de la menor resistencia eléctrica que presenta y superiores características mecánicas del cobre ha dejado de ser empleado en líneas aéreas, esto es observado substancialmente en alta y muy alta tensión.

### 8. Características Físicas y Mecánicas de los Conductores.

Todo conductor debe poseer suficiente resistencia mecánica para soportar, sin romperse o deformarse permanentemente los esfuerzos aplicados al mismo, durante el servicio normal ni en condiciones anormales, previsibles en el diseño.

En el caso de las líneas de transmisión aéreas, los esfuerzos mecánicos normales como el peso del conductor, el efecto del viento a una velocidad límite, etc.

Por otra parte, los esfuerzos anormales comprenden: la presión de escaleras apoyadas contra las líneas, la suspensión de personal en la misma, la presión de árboles o ramas, la tensión debida a movilidad de los apoyos, con motivo a la ruptura de dos o más cables o la caída de una torre, la falla de una retenida, etc.

Es evidente que ante tan variados esfuerzos a los que son sometidos los conductores, no es posible fijar de un modo absoluto las dimensiones y características de un conductor, aun mas cuando el peso del mismo es un motivo de esfuerzo y al crecer la resistencia mecánica, también crece su peso.

Para líneas aéreas sostenidas por apoyos distantes se ha tomado como base el valor del vano para definir cuáles son las secciones de metal que llenan el requisito mecánico como se puede observar en la tabla 1.2.1.

<b>TABLA 1.2.1</b>				
<b>Calibres mínimos en milímetros cuadrados según la distancia entre apoyos</b>				
<b>Material</b>	<b>30m</b>	<b>45m</b>	<b>60m</b>	<b>90m</b>
Cobre estirado en frio	8	13	21	33
Cobre recocido	13	21	42	No
Aluminio duro		42	53	
Aluminio reforzado		13	21	

El alambre de acero recubierto de cobre o aluminio es un gran avance, lográndose bajar los costos por ser el acero barato, fuerte y accesible, no obstante, las desventajas de su poca duración y conductividad. Sin embargo, para dar al alambre de acero la conductividad y duración necesaria, se recubre con una capa de cobre.

Esta conductividad puede incrementarse haciendo cada vez más gruesa la capa de cobre o aluminio que lo recubre.

Este tipo de conductor recubierto de cobre o aluminio, se le conoce como CopperWeld o AlumoWeld, ver figura 1.

Obviamente su aplicación toma mayor influencia para vientos y como conductor en líneas rurales,

donde los tramos son largos y las intensidades de corriente son pequeñas.



Figura 1  
Vista de la sección transversal de un conductor  
cooperweld