**Nuestros cables coaxiales**

Muy pocos radioaficionados tienen todavía su bajada de antena formada por una línea bifilar de 300 ó 450 ohmios. Hoy en día, la práctica totalidad de nosotros, empleamos cables coaxiales, por su durabilidad, flexibilidad y facilidad de manejo.

Los cables coaxiales se utilizan masivamente desde la década de los 80, aunque las empresas de telecomunicación y distribución de señales, las estaban empleando muchos años antes . La patente de este medio de comunicación se adjudicó a ATT en 1931. (el año 2021 cumplió 90 años) y está pensado principalmente para el transporte de señales de alta frecuencia y baja potencia.

A pesar de su uso masivo, el porcentaje de radioaficionados que conocen este medio con alguna profundidad, es escaso por lo que mi propósito es arrojar algo de luz a este tipo de línea de alimentación o transmisión.

# GENERALIDADES

Dedico un apartado específico a este tipo de línea de transmisión dado que es el tipo más empleado en todos los ámbitos en los que se precisa transportar altas frecuencias, debido a su robustez y facilidad de tendido.

Aunque sin considerar formulación adicional (de momento), se considera interesante para el lector hacer una exposición de las características principales de este tipo de cable para lograr un mejor conocimiento del mismo.

Existen en la industria todos los tipos de cable necesarios para soportar los distintos ambientes en los que está prevista su ubicación.

Las características a tener en cuenta en un cable coaxial, son:

## Impedancia característica.-

La impedancia característica de un cable coaxial es su principal seña de identidad, puesto que se debe acoplar a las impedancias del generador de la potencia a transmitir y la de la carga que la debe recibir, sin ocasionar pérdidas adicionales indeseables

Los valores más frecuentes en la industria son de 50 y 75 ohmios.

¿Por qué se han elegido estos valores y no otros?.

Tres son los requisitos que se piden a un cable coaxial para transportar señales.

Ser capaz de transportar potencia, soportar suficiente voltaje entre conductores y ofrecer la mínima atenuación a las señales transmitidas.

Ante la necesidad de transportar señales a gran distancia a través de este medio, investigadores de la Bell Labs en 1929 experimentaron con diferentes impedancias características de cables coaxiales con aislamiento de aire y llegaron a las siguientes conclusiones.

La transmisión de la máxima potencia se conseguía con una impedancia de 30 ohm.

El soporte del máximo voltaje se conseguía con una impedancia de 60 ohm

La mínima atenuación de la señales, se conseguía con una impedancia de 77 ohm.

Ninguna de esas impedancias cumplía exactamente con los requisitos de envío de señales con potencia y voltaje con la mínima atenuación.

Ante esta situación y dada la necesidad de transmitir potencia a gran distancia, se optó con la elección de un cable con una impedancia de 50 ohmios (entre 30 y 60 ya que el máximo interés estaba en la transmisión de potencia y voltaje, sin perder de vista disminuir la atenuación en lo posible). Para recepción de señales débiles (de TV, telefonía, etc), dado que no se consideraba ni potencia ni voltaje, se optó por el cable de 75 ohm.

En lo que al mundo de la radio respecta, la necesidad de transmitir potencia y voltaje, prima sobre la recepción de señales. Es por esto, que el entorno del mundo de la Radio, utiliza el estándar de impedancia de 50 ohmios. Luego se ha seguido investigando para conseguir, sin la impedancia idónea de 75 ohmios, unas bajas atenuaciones.

***Impedancia de transferencia.-***

Es la relación entre la diferencia de potencial por unidad de longitud medida en la cara externa del conductor exterior (blindaje o malla) expuesta a un campo de interferencia y la corriente inducida en él en la superficie interior, ante el campo eléctrico interno.

También se considera la situación inversa. La relación entre la intensidad que recorre el exterior de la malla debido a una señal externa y la tensión inducida en el interior de esta malla por esta corriente externa.

Este valor se mide en mili-ohmios/metro y define la capacidad de blindaje del conductor externo. A menor valor, mejor capacidad de blindaje. El fabricante rara vez proporciona esta información, limitándose a dar el porcentaje de cubrimiento de malla que intuitivamente nos da una idea de la capacidad de blindaje del conductor exterior.

Sin embargo, el estudio de este fenómeno, es harto complicado y entra de lleno en el mundo del estudio de las EMC (compatibilidad electro magnética).

***Capacidad.****-*

Es la capacidad eléctrica medida entre los conductores del cable por unidad de longitud.

Se mide en picofaradios/metro y depende de las dimensiones de los conductores y del dieléctrico empleado.

***Velocidad de propagación***.-

Dato que nos es dado como la relación entre la velocidad de propagación en valores absolutos dentro del cable y la del vacío. Viene expresada en %. Solamente depende del tipo de dieléctrico empleado.

***Atenuación.-***

Es la pérdida de potencia que sufre la señal al recorrer determinada longitud del cable.

Viene expresada en dB/100 mts. o en dB/100 pies,

Este valor no es lineal ya que aumenta con la frecuencia de la señal. El fabricante suele acompañar un gráfico de atenuación vs. frecuencia en la información del cable.

***Tensión de pico.-***

Es la máxima tensión admisible entre conductores, sin que se produzcan perforaciones en el dieléctrico. Depende del espesor y de la rigidez dieléctrica del mismo.

***Pérdidas de retorno estructural.-***

Son las pérdidas por retorno debidas a defectos de construcción del cable y que provocan discontinuidad en la impedancia característica en determinados puntos del mismo. Cada discontinuidad, produce una reflexión de la señal que llegará al origen con un nivel determinado. A menor nivel, mayor pérdida y por lo tanto, mejor calidad

**Materiales empleados.-**

Los elementos a considerar, son:

### **Conductor central.-**

*Cobre plateado.-* Adecuado para el transporte de señales de muy alta frecuencia. Menor atenuación que el cobre electrolítico ya que la conducción se realiza por la capa del baño de plata (debido al “efecto piel”) que tiene mejor conductividad que el cobre.

*Cobre electrolítico.-* Cobre puro de buena resistencia a la fatiga mecánica.

*Cobre estañado.-* Se emplea para situaciones en las que las distintas conexiones del conductor debe ir soldadas con estaño. Si no, no es aconsejable ya que el estaño tiene peor conductibilidad que el cobre por lo que no es adecuado para muy altas frecuencias

*Acero cobreado*.- Se trata de alambre de acero multifilar con baño de cobre, normalmente trenzado. A altas frecuencias y debido al “efecto piel” se comporta igual que el cobre electrolítico con la ventaja de una mayor resistencia mecánica y menor capacidad de estiramiento.

## Dieléctrico.-

Los dieléctricos comúnmente empleados, son:

*Polietileno compacto o sólido*.- Es el más empleado debido a sus excelentes constante y rigidez dieléctricas (εr = 2’26 y 18 KV/ mm).

*Polietileno expandido.-* También llamado “foam” tiene una constante dieléctrica menor que el compacto (εr =1’4/1’8) debido a las “burbujas” de aire que contiene. Con este dieléctrico, se consiguen menores pérdidas en el cable que con el polietileno compacto.

*Polietileno/aire.-* Compuesto por discos de polietileno uniformemente espaciados a lo largo del cable para mantener la separación entre conductores (en cables rígidos) o por una espiral de polietileno alrededor del conductor central (en cables semirígidos). Las pérdidas con este tipo de dieléctrico también son menores que con el polietileno compacto y el foam.

*Tefzel.-* Es un copolímero (etileno-tetrafluoroetileno). Soporta temperaturas entre –50º y +155º con una constante dieléctrica εr = 2’6 y una rigidez de 80 KVC/mm.

*Teflón.-*Copolímero etileno- tetrafluoro - exafluoropropileno. Soporta temperaturas entre –70º y +200º con una constante dieléctrica εr = 2’1 y una rigidez de 50 KV/mm.

Estos dos últimos dieléctricos son los que mejor soportan la agresión de agentes externos.

***Conductor externo.***

En cables flexibles está formado por una malla (simple o doble) de hilo de cobre, que puede ser puro, estañado o plateado por los mismos criterios que hemos visto para el conductor central.

Debajo de la malla puede instalarse una cinta de aluminio o cobre para mejorar el efecto de blindaje.

En cables semirígidos o rígidos este conductor es de tubo de cobre corrugado.

***Cubierta.-***

Las cubiertas de los cables coaxiales se eligen en función del medio en el que van a ser instalados. Así tenemos el:

*Cloruro de polivinilo (PVC). -*  Es el más usado porque sus características le hacen cumplir la mayoría de las especificaciones de las condiciones de trabajo.

*Polietileno.-*  Con negro de humo convenientemente dispersado está indicado para protección ante fuerte radiación ultravioleta.

*Tefzel y Teflón.-* Indicados para ambientes agresivos (altas temperaturas y agentes químicos).

*Poliuretano.-* Cuando el cable deba estar sometido a grandes esfuerzos mecánicos.

***Formulación.-***

Este apartado lo incluyo para aquellos lectores que se interesen en hurgar en el mundo matemático de diseño de cables coaxiales.

Aquí veremos las fórmulas que definen las características físicas y eléctricas de un cable coaxial.

*Capacidad.-* Es la capacidad presente entre los conductores, por unidad de longitud

. ρF/m

Siendo

b.- diámetro interior de la malla o conductor externo

a.- diámetro del conductor interno

Debemos recordar que ε es la permitividad absoluta, esto es: εr\* εvacio

Como ejemplo de aplicación podemos determinar la permitividad absoluta del polietileno:

El fabricante nos dice que la permitividad relativa del polietileno (ϵr) es de 2’3

Por otro lado, sabemos que la permitividad del vacío (aire) (ϵo) es 8’8542 X 10-12 Farad/m.

La permitividad absoluta será el producto de los dos valores:

Farad/m

*Inductancia.-* Es la inductancia que presenta el cable por unidad de longitud

 Henrios/m

Siendo

b.- diámetro interior de la malla o conductor externo

a.- diámetro del conductor interno

Recordemos que μ es absoluta. Esto es:  y que μvacio  = 4π X 10-7 Henrios/m y para el cobre y plata, μr = 1.

*Conductancia.-* Es la inversa de la resistencia de aislamiento de los conductores

 Siemens/m

Siendo

b.- diámetro interior de la malla o conductor externo

a.- diámetro del conductor interno

σ es la conductividad del material de los conductores. En el caso del cobre electrolítico,

*Resistencia.-* Es la resistencia óhmica que presentan los conductores a las altas frecuencias (efecto piel)

 y R =  ohmios/m

Siendo

b.- diámetro interior de la malla o conductor externo

a.- diámetro del conductor interno

ω.- 2πf(herzios)

μ.- 1

σ=5’8 x 107 Siemen /m

*Impedancia característica.-* Podemos determinarla, por

Siendo

b.- diámetro interior de la malla o conductor externo

a.- diámetro del conductor interno

Conocidas la inductancia y la capacidad por unidad de longitud mediante la formulación anterior, también podemos determinar la impedancia característica por la expresión,

*Velocidad de propagación.-* Es la velocidad de propagación de una señal, por un cable con un aislante entre conductores de una constante dieléctrica determinada

Vp = ó m/seg.

Recordemos que

El coeficiente de propagación es la relación entre la velocidad de propagación en el cable y en el vacío; o sea:

Cp. = 

*Permitividad relativa o constante dieléctrica.-*  La podemos determinar si conocemos el coeficiente de propagación. Viene dada por



Normalmente, este dato, lo facilita el fabricante

*Atenuación.-* Viene dada en Nepers por

 nepers/m

Recordemos que la relación entre Neper y decibelio es: 1 neper = 8’868 decibelios

*Constante de propagación.-* Es un complejo que considera la atenuación y la constante de fase por unidad de longitud



Ya hemos determinado α y 

**RESUMEN DE FORMULACION**

| **Denominación** | **Símbolo** | **Fórmula o valor** | **Unidades** |
| --- | --- | --- | --- |
| Permitividad Vacío | εo | εo = 8’8542 X 10-12= | Faradios/m |
| Permitividad relativa | εr | εr = | Faradios/m |
| Permitividad absoluta | ε | ε = εo \* εr | Faradios/m |
| Permeabilidad Vacío | μo |  | Henrios/m |
| Permeabilidad relativa | μr | Datos del material (para cobre = 1) | Henrios/m |
| Permeabilidad absoluta | μ | μ = μo \* μr | Henrios/m |
| Conductividad | σ | Datos del material (para cobre 5’8 X 107) | Siemens |
| Inductancia | L |  | Henrios/m |
| Capacidad | C |  | pF/m |
| Resistencia | R | y R = | ohmios/m |
| Conductancia | G |  | Siemens/m |
| Impedancia característica | Zo |  | ohmios |
| Velocidad de propagación | Vp | Vp = = = | mts/seg |
| Coeficiente propagación | Cp | Cp. = |  |
| Atenuación | α |  | Neper/m |
| Constante de fase | β |  | radianes |
| Constante de propagación | γ |  |  |

**Funciones del cable coaxial**

Obviamente, la función principal de un cable coaxial es la de transportar señales entre dos puntos distantes de tal manera que la degradación de la misma durante ese transporte, sea mínima.

Pero un cable coaxial, como línea de transmisión, tiene otras funcionalidades adicionales. La más importante de ellas en la que incidiré, es su capacidad de transformar impedancias de tal manera que la impedancia de una carga, comúnmente, una antena, conectada en su extremo lejano, aparece en el origen con otro valor, que depende de la longitud del cable y su impedancia característica.

Lo vemos con más detalle.

Antes que nada debemos considerar las diferentes longitudes a las que se pueden aludir de un cable coaxial. Estas son:

Longitud física.- Como su nombre indica es la que se puede medir físicamente con un metro

Longitud eléctrica.- Esta es la longitud física, afectada por la velocidad de propagación del cable que como sabemos, depende a su vez de la constante dieléctrica del aislante que separa los conductores. Como ejemplo, sabemos que la constante dieléctrica del polietileno es de 2’3 que le corresponde una velocidad de propagación del 0’66 (66% de la velocidad de la luz). 1 metro físico de un cable con este aislante, suponen 1/0’66 = 1’515 metros eléctricos. Por el contrario, si queremos disponer de una longitud eléctrica de 1 metro, debemos cortar una longitud física de 1 X 0’66 = 66 cm. La longitud eléctrica es la que se considera en todas las fórmulas de cálculo en líneas de transmisión.

Longitud angular.- Es la longitud eléctrica, expresada en ángulos. Aquí aparece una constante, β, llamada constante de fase o número de onda que nos dice el número de grados por metro de longitud de onda, de la frecuencia de interés.

Lo explico:

Sabemos que una circunferencia tiene 360 grados y que la longitud total lineal de la misma, se corresponde con una longitud de onda λ (lamda) de la frecuencia considerada.

Su relación, nos dará la cantidad de grados que corresponden a cada metro de la longitud de onda. Bien. Eso es β y tendrá un valor para cada frecuencia con la que trabajemos. Un ejemplo:

Para una frecuencia de 14 MHz, obtenemos una longitud de onda de.

Y β valdrá

Pues la longitud angular de una porción de cable valdrá su coeficiente de onda multiplicado por su longitud eléctrica en metros y obtendremos la longitud del cable expresada en grados. Veamos un ejemplo resumen:

Tenemos un trozo de 2 metros de coaxial RG213 que sabemos que tiene una Zo de 50 ohmios y como su aislante es de polietileno, su velocidad de propagación es de 0’66.

Queremos saber sus distintas longitudes para 14 MHz

Su longitud física es de 2 metros

Su longitud eléctrica es de 2 / 0’66=3’03 m

(Ya hemos calculado β = 16’8 grados/m)

Su longitud angular, será .

Esta longitud también se expresa en radianes sustituyendo los 360 grado de la circunferencia por su equivalente “2π” de tal manera que β sería:

La expresión en radianes es la comúnmente usada en la literatura. También en varias literaturas la expresión β la cambian por la letra “*k”.*

La fórmula general que determina la impedancia de entrada de una línea de transmisión con una impedancia característica Zo y con una carga conectada en su extremo,es:

En la práctica, lo más frecuente es que la impedancia de carga en el extremo sea una reactancia capacitiva pura, por lo que la fórmula se convertiría en:

Si

De la fórmula general se derivan casos particulares:

Si la longitud eléctrica de la línea corresponde a la media onda o cualquiera de sus múltiplos, la impedancia de la carga se refleja en la entrada sin variación. La línea es transparente.

Una impedancia resistiva distinta de 50 ohmios se transforma a estos 50 ohmios a través de una línea de transmisión de ¼ de onda con una impedancia característica que sea la media geométrica de la impedancia resistiva y los 50 ohmios normalizados. O sea:

Como ejemplo de aplicación, supongamos que deseamos transformar una carga de 25 ohmios a los 50 normalizados. Deberemos usar una línea de transmisión de ¼ de onda y una Zo de:

=

Dado a que el valor necesario no se encuentra en el mercado, deberemos confeccionar una línea a propósito de 35 ohmios de impedancia característica o utilizar 2 tramos de coaxial de 75 ohmios conectados en paralelo como se ve en la figura 1

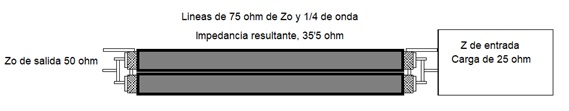


Fig 1

Con los 37´5 ohmios resultado del paralelo de los cables, nos acercamos a los 35’5 necesarios para la impedancia de transformación con las posibilidades del mercado, que para fines prácticos es sufuciente. Esta aplicación de transformador de ¼ de onda se extiende a longitudes múltiplos impares de cuartos de longitud de onda y uno de sus principales usos es el adaptador para enfasar antenas.

Tenemos un ejemplo de enfasar dos antenas cuya impedancia de entrada es de 50 ohm cada una. Si nos limitamos a derivarlas con tramos de cable de 50 ohm, en el punto de unión, tendremos 25 por su paralelo que como hemos visto, tendremos que adaptar a los 50 normalizados con los dos tramos en paralelo de cable de 75 ohm ya visto.

Si utilizamos un tramo de ¼ de onda de cable de 75 ohmios para alimentar directamente cada antena, en el punto de derivación tendremos una impedancia en cada cable de 112’5 ohmios que al unirlos se convertirán en 56’25 ohmios, suficientemente próximos a los 50 normalizados como para despreciar la diferencia a fines prácticos.

Una línea menor de ¼ de onda abierta en su extremo equivale a un condensador.

Si la cortocircuitamos, obtenemos el equivalente a una bobina.

¼ de onda abierto en su extremo equivale a un circuito resonante serie (cortocircuito teórico).

Si la cortocircuitamos, es un circuito resonante paralelo (abierto teórico).

Más allá de ¼ de onda los valores para las situaciones vistas, se invierten como se ve en la figura 2

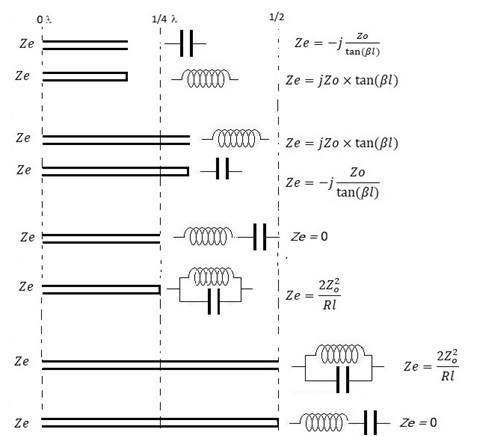


Fig 2

Como se ve, se puede utilizar una línea de transmisión, como un circuito de constantes concentradas.

Aprovechando la propiedades vistas, se pueden utilizar determinados tramos de línea para adaptar impedancias bien intercalando tramos de línea en serie o conectándolos en determinados puntos de la línea principal, en paralelo (stubs). Esta práctica constituye una ya vasta técnica de adaptar la impedancia de una antena, a los 50 ohmios normalizados de una línea coaxial.

Con este trabajo, conoceremos más nuestra instalación de bajadas de nuestras antenas y debemos tener en cuenta que todas las medidas que se hagan en nuestro shak, están influenciadas por la longitud (eléctrica), la impedancia característica del cable y su atenuación. Veamos un ejemplo (que ya he publicado en otras ocasiones)

Tenemos una bajada de cable de 50 ohmios para alimentar una antena que tiene una atenuación de 3 dB a 144 MHz. La antena está desadaptada y presenta una ROE en sus terminales de 3 lo que supone un rechazo del 25% de la potencia recibida.

Nuestro transmisor proporciona 50 watios a la entrada del cable coaxial.

Dado que el cable pierde 3 dB (la mitad de la potencia), a la entrada de la antena, final del cable, tendremos 25 W, de los cuales serán rechazados el 25%, o sea, 6’25 watios, que regresarán hacia la entrada del coaxial. Pero en su camino de vuelta, se perderá la mitad de esta potencia, por lo que en ese punto tendremos 3’12 watios.

Nuestro medidor de ROE en la salida del transmisor, relacionará los 50 watios de salida con los 3’12 de potencia reflejada indicando una ROE de:

Coeficiente de reflexión

Y la ROE,

Cuando la desadaptación real de la antena es de una ROE de 3

Como se ve, la atenuación del cable nos está enmascarando la verdadera desadaptación de la antena.

Es conveniente tener en cuenta estos puntos de interés, a la hora de evaluar nuestra instalación, conociendo un poco más las características físicas y eléctricas de nuestro cable, así como su comportamiento al uso al que sea destinado.

Bibliografía.-

Armando García Domínguez EA5ND (Ex EA5BWL) *Calculo de antenas*, Marcombo 4ª Ed

Robert A. Chipman, *Theory and Problems of Transmissión Line* , McGRAW-HILL

Johnson, H., “Why 50W?,” *EDN*, September 14, 2000.

Johnson, H., “50W Mailbag,” *EDN*, January 4, 2001.

Jordan, E. C., and K. G. Balmain, *Electromagnetic Waves and Radiating Systems*, 2nd Edition, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1968.

Kraus, J. D., and D. A. Fleisch, *Electromagnetics with Applications*, 5th Edition,

Boston: McGraw-Hill, 1999.

https://www.microwaves101.com/encyclopedias/why-fifty-ohms

EA5ND

Valencia