

CRITERIOS DE SELECCIÓN DE CABLES COAXIALES

- 0. - Objetivos del documento .**
- 1.- Resistencia eléctrica de los materiales.**
- 2.- Capacidad por unidad de longitud.**
- 3.- Impedancia característica .**
- 4.- Efecto pelicular.**
- 5.- Frecuencia de corte.**
- 6.- Velocidad de propagación .**
- 7.- Longitud de fase eléctrica.**
- 8.- Apareamiento y ventana de fase.**
- 9.- Pérdidas de inserción .**
- 10.- Coeficiente de onda estacionaria.**
- 11.- Eficacia del blindaje.**
- 12.- Potencia media y Potencia de pico.**
- 13.- Tensión máxima de operación.**
- 14.- Flexibilidad.**
- 15.- Frecuencias de trabajo de los conectores .**

0.- Objetivos del documento.

Estas notas tratan de analizar las distintas propiedades eléctricas de los cables coaxiales con objeto de realizar una adecuada selección del tipo de cable a utilizar en cada aplicación concreta.

1.- Resistencia eléctrica de los materiales.

Para un conductor sólido y homogéneo, la resistencia a una temperatura determinada es función del tipo de material y de las dimensiones físicas viniendo dada por la expresión (1-1) :

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (1-1)$$

ρ = Resistividad del material en ohm. metro.

L = Longitud del cable en metros.

S = Sección del cable en metros cuadrados.

Nota:

*La resistencia de los conductores aumenta con la temperatura.

*La resistencia disminuye al aumentar el diámetro de los cables.

En la tabla 1 se indican algunos valores típicos de resistividad de algunos metales en Ω .metro :

MATERIAL	SIMBOLO	RESISTIVIDAD
Plata	Ag	$1,63. 10^{-8}$
Cobre	Cu	$1,72. 10^{-8}$
Aluminio	Al	$2,70. 10^{-8}$

Tabla 1- Resistividad del algunos materiales

2.- Capacidad por unidad de longitud.

La capacidad por unidad de longitud es la propiedad que tienen los cables para almacenar energía eléctrica cuando se establece una diferencia de potencial entre 2 conductores (conductor central / malla apantallamiento) y viene dada por la expresión (2-1):

$$C = \frac{24.13.\epsilon_r}{\log \frac{D}{d}} = \frac{3333.\epsilon_r}{Z_c} \quad (2-1)$$

ϵ_r = Constante dieléctrica (función del material).

d = Diámetro exterior del conductor central en mm.

D = Diámetro del dieléctrico en mm.

Z_c = Impedancia característica en ohms (Ver sección 3).

En la tabla 2 se indican los valores típicos de las constantes dieléctricas de algunos materiales usados como dieléctricos en la fabricación de los cables coaxiales.

MATERIAL	CONSTANTE DIELECTRICA
PTFE/FEP/PFA	2,1
ETFE	2,6
TEFLON EXPANDIDO	Entre 1,5 y 1,9

Tabla 2 – Valores de constantes dieléctricas de materiales

Valores de constante dieléctrica cercanas a la unidad (constante dieléctrica del aire) producen, mejoras en la transmisión de las señales, con la consiguiente reducción de la atenuación. Al mismo tiempo se obtienen velocidades de propagación mayores y frecuencias de funcionamiento más elevadas, sin olvidar una mejora notable en la estabilidad de fase en los latiguillos que usen esa solución , junto a un mejor comportamiento de este parámetro con la temperatura.

3.- Impedancia característica .

En alta frecuencia, la impedancia de los cables y conectores deberá ser optimizado para mejorar las características de transmisión.

La impedancia característica es la impedancia de entrada de un cable coaxial de longitud infinita y representa la relación entre la tensión y la corriente en el cable.

Este parámetro depende de la constante dieléctrica del material y de la relación de diámetros del dieléctrico y del conductor central según la expresión (3-1):

$$Z_c = \frac{138.2}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \log \left(\frac{D}{d} \right) \quad (3-1)$$

Siendo:

ϵ_r = Constante dieléctrica del material.

D = Diámetro del dieléctrico en mm.

d = Diámetro exterior del conductor central.

La impedancia característica es uno de los factores más importantes en la elección de un cable coaxial

4.-Efecto pelicular.

Fenómeno de propagación de la densidad de corriente eléctrica al atravesar el cable, por el cual esta se concentra prácticamente entre el exterior del conductor y una capa delgada dentro del mismo. El espesor de la capa disminuye al aumentar la frecuencia de la señal que se propaga.

Efecto Pelicular, depende además de la permeabilidad del material del conductor y de la resistividad del mismo.

Con la formula (4-1) podemos determinar el espesor de la capa de conductor por el que se propaga la señal .

$$\delta = \sqrt[2]{\frac{\rho}{\mu \cdot F}} \approx \frac{K}{F} \quad (4-1)$$

Siendo :

δ El espesor de la capa del conductor en micras en el cual circula el 40% de la corriente .

ρ la resistividad en $\Omega \cdot \text{cm}$.

μ la permeabilidad del material.

F la frecuencia en Ghz.

$K = 2.12$ para el cobre, 2.02 para la plata

En cables coaxiales la corriente circulará en la capa exterior del conductor central , asi como en el interior de la malla que recubre el dieléctrico.

5.- Frecuencia de corte.

En un cable coaxial, las ondas electromagnéticas se propagan longitudinalmente en el modo fundamental TEM (**T**ransversal **E**lectro **M**agnético) . Los campos eléctricos y magnéticos son perpendiculares y en el mismo plano transversal.

Por encima de cierta frecuencia denominada “ Frecuencia de corte “ (cut-off frequency en inglés) aparecen otros modos de propagación y perturban el modo fundamental.

La frecuencia de corte es la máxima frecuencia de trabajo del cable que permite una correcta transmisión de la señal.

La frecuencia de corte es función de las dimensiones del cable y de la constante dieléctrica según la expresión (5-1) :

$$f_c \text{ (Ghz)} = \frac{191}{(D+d) \cdot \sqrt{\epsilon_r}} \quad (5-1)$$

Siendo:

ϵ_r = Constante dieléctrica del material.

D = Diámetro del dieléctrico en mm.

d = Diámetro exterior del conductor central en mm.

6.- Velocidad de propagación .

La velocidad de propagación de una señal es la velocidad de propagación de las diferentes ondas electromagnéticas presentes en el dieléctrico y viene medida generalmente en % del valor de la velocidad de la luz en el vacío y es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la constante dieléctrica del material según la expresión (6-1) :

$$V_p \text{ (\%)} = 1/\sqrt{\epsilon_r} \quad (6-1)$$

Es posible calcular el tiempo de retardo de propagación de la señal (T_p) , factor clave para la fabricación de líneas de retardo , según la fórmula (6-2) :

$$T_p \text{ (ns/m)} = 3.33 \cdot \sqrt{\epsilon_r} \quad (6-2)$$

Siendo ϵ_r la constante dieléctrica del material y T_p el tiempo de retardo en nanosegundos/metro.

Nota:

La velocidad de propagación es inherente al material , que debe ser homogéneo y tener una constante dieléctrica invariable , y no depende de la frecuencia.

7.- Longitud de fase eléctrica.

La longitud de fase eléctrica (representada por Θ y expresada en $^\circ$) es la diferencia de fase originada al propagarse la señal a través del cable y puede conocerse mediante la fórmula (7-1) :

$$\Theta = \frac{360}{c} \cdot F.L.\sqrt{\epsilon_r} \quad (7-1)$$

Siendo :

F= Frecuencia de operación de la señal en Ghz.

C= Velocidad de la luz en el vacío en m/seg ($3 \cdot 10^8$ m/seg).

L = Longitud del cable del latiguillo en metros.

ϵ_r = Constante dieléctrica.

Nota :

La fase es función de la temperatura. Los cambios de fase son debidos a la dilatación del cable al aumentar la temperatura y a cambios internos en el dieléctrico.

8.- Apareamiento y ventana de fase.

El apareamiento de fase es el proceso por el que se fabrican dos latiguillos con la misma longitud física y eléctrica (igual comportamiento en fase a una determinada frecuencia), o bien dentro de un margen de tolerancia que nos pueda ser útil para el trabajo requerido.

La ventana de fase es el proceso por el que se realiza una fabricación de latiguillos referenciados a una unidad que se suele definir como “referencia”. Así se compara toda la fabricación con la unidad de referencia rechazándose las unidades que no cumplan los requisitos.

Los dos procesos resultan más complejos y difíciles conforme aumentemos la frecuencia a la que definamos el comportamiento en fase.

Los cambios de fase pueden ser originados por cambios de temperatura y por causas mecánicas (flexiones , torsiones, vibraciones , tensiones, etc).

9.- Pérdidas de inserción .

Las pérdida de inserción, comúnmente llamada atenuación , se expresa en db y representa las pérdidas de energía que se produce durante la propagación de la señal .

La atenuación viene dada por la expresión (9-1) :

$$\alpha(dB) = 10.\log \frac{P_2}{P_1} \quad (9-1)$$

Siendo :

P_1 = Potencia de entrada al cable en Watts

P_2 = **Potencia de salida del cable en Watts.**

Generalmente las pérdidas de inserción de un cable son la suma de la atenuación propia del cable debida a la resistencia, efecto pelicular, etc y las producidas por defectos en el dieléctrico.

A mayor frecuencia y longitud del cable la atenuación incrementa.

Las pérdidas de inserción disminuyen al aumentar el diámetro del cable.

La temperatura modifica las propiedades de los materiales y afecta muy directamente a las pérdidas de inserción de los cables. En estas condiciones es preciso introducir factores de corrección en el cálculo de la atenuación de los cables.

La atenuación a una temperatura determinada puede venir dada por la siguiente expresión (9-2) :

$$\alpha (\theta^{\circ} C) = 1.05.\alpha(23^{\circ}C).\sqrt{0.0038.(\theta - 23) + 1} \quad (9-2)$$

Siendo:

θ = La temperatura en $^{\circ}C$

$A(\theta^{\circ}C)$ = La atenuación en dB a la temperatura θ .

10.- Coeficiente de onda estacionaria.

Irregularidades en las dimensiones, defectos en los materiales dieléctricos y en los conductores, modifican la impedancia característica del cable produciendo perturbaciones en forma de ondas reflejadas. Estas al combinarse con las señales incidentes crean ondas estacionarias.

En las líneas de transmisión dos ondas se propagan simultáneamente la primera de amplitud V_i corresponde a la onda incidente y la segunda de amplitud V_r a la onda reflejada. La superposición de estas ondas produce una resultante de amplitud variable a lo largo de la línea.

Se define el coeficiente de onda estacionaria denominado ROE (Relación de Onda Estacionaria) como la relación de los valores extremos de estas ondas , según la expresión 10-1 :

$$\text{ROE} = \frac{V_{i+V_r}}{V_{i-V_r}} = \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma} \quad (10-1)$$

Siendo Γ el coeficiente de reflexión definido por la relación V_r / V_i .

El coeficiente de reflexión de un latiguillo depende de la desadaptación de impedancias entre todos sus componentes (calidad de los conectores y soldaduras así como las propias tolerancias de fabricación del cable) .

En el caso de cortocircuitos o circuitos abiertos puros, la potencia transmitida en esas zonas son nulas con lo que el ROE resulta infinito.

El coeficiente de onda estacionaria es una medida de la calidad de la transmisión y de la capacidad del sistema de conectarse con otros sistemas sin ocasionar riesgos.

El coeficiente de onda estacionaria en un latiguillo depende principalmente del tipo y calidad de los conectores , de la desadaptación de impedancias cable-conectores, de la longitud del cable así como de su calidad.

La tabla 3 se muestra los valores del coeficiente de reflexión , coeficiente de onda estacionaria y las pérdidas de retorno, definidas como la energía o potencia que retorna a la carga cuando la impedancia de la carga es diferente de la impedancia de la fuente . En este caso se dice que hay un desbalance de impedancia entre la carga y la fuente.

La pérdida de retorno es posible determinarla a partir de una relación logarítmica en dB, por medio de la expresión (10-2) :

$$RL(\text{dB}) = 10 \log_{10} \frac{P_i}{P_r} \quad (10-2)$$

Siendo RL las pérdidas de inserción (Return Loss en inglés) en db ,
 P_i la potencia incidente y P_r la potencia reflejada.

RL (dB)	VSWR	Γ	RL (dB)	VSWR	Γ	RL (dB)	VSWR	Γ	RL (dB)	VSWR	Γ
46.1	1.01	0.00498	25.7	1.11	0.0521	18.0	1.29	0.126	8.0	2.32	0.398
40.1	1.02	0.00990	24.9	1.12	0.0566	17.0	1.33	0.141	7.0	2.61	0.447
36.6	1.03	0.0148	24.3	1.13	0.0610	16.0	1.38	0.158	6.0	3.01	0.501
34.1	1.04	0.0196	23.7	1.14	0.0654	15.0	1.43	0.178	5.0	3.57	0.562
32.3	1.05	0.0244	23.1	1.15	0.0698	14.0	1.50	0.200	4.0	4.42	0.631
30.7	1.06	0.0291	22.6	1.16	0.0783	13.0	1.58	0.224	3.0	5.85	0.708
29.4	1.07	0.0338	21.7	1.18	0.0826	12.0	1.67	0.251	2.0	8.72	0.794
28.3	1.08	0.0385	20.8	1.20	0.0909	11.0	1.78	0.282	1.0	17.4	0.891
27.3	1.09	0.0431	20.0	1.22	0.100	10.0	1.92	0.316	0.5	Infinito	0.944
26.4	1.10	0.0476	19.0	1.25	0.112	9.0	2.10	0.355	0.0	Infinity	1.00

Tabla 3 - Comparación entre valores de pérdidas de retorno, VSWR y ROE.

11.- Eficacia del blindaje.

La eficacia del apantallamiento o blindaje de un cable es su capacidad para evitar que señales, tanto internas como externas , salgan al exterior (radiación) o entren en el mismo (inducción)

El apantallamiento de un cable suele ser uno de los factores que indican la calidad del mismo, especialmente cuando hablamos de dos o tres apantallamientos.

Si hablamos de un latiguillo completo , la eficiencia del apantallamiento del conjunto total dependerá además de lo indicado, de la frecuencia de trabajo así como de la calidad de los conectores usados y su montaje.

12.- Potencia media y Potencia de pico.

En un cable coaxial, el deterioro producido en el conductor central debido al incremento de temperatura ocasionado por la resistencia del conductor limita la potencia máxima que puede ser aplicada .

Hay 2 características que definen este fenómeno :

- . Potencia de onda continua (CW).
- . Potencia de pico instantánea.

La potencia máxima que puede soportar un cable sin producirse daños en él depende , además de las dimensiones del conductor central y dieléctrico , de varios factores tales como :

- El rango de frecuencia de trabajo.
- La temperatura ambiente .
- La altitud .

En el caso de los latiguillos, hay que considerar especialmente los conectores ya que en la mayor parte de los casos, estos limitan la potencia máxima que se puede aplicar .

13.- Tensión máxima de operación.

El máximo valor de voltaje que un cable puede soportar entre el conductor activo y masa sin que aparezca arco eléctrico es la tensión máxima de trabajo del cable .

En el caso de cables coaxiales hay dos tipos de fenómenos :

- La tensión de ruptura del dieléctrico
- El efecto Corona.

La tensión de ruptura del dieléctrico es el mínimo valor de voltaje aplicado a este que crea una descarga eléctrica entre el conductor central y el blindaje.

Este parámetro no depende de la frecuencia y varia en función de la distancia entre el conductor central y el blindaje, así como del tipo de material dieléctrico.

Se conoce como efecto Corona el fenómeno que aparece cuando se incrementa el valor del campo eléctrico aplicado a un cable . Cuando este alcanza un cierto valor, el gas encerrado en las microcavidades del dieléctrico se ioniza, estos iones chocan contra las paredes de la microcavidad originando daños en el material aislante.

Debido a su construcción cualquier cable incluye microcavidades . Por ejemplo en un cable coaxial entre el conductor y el aislante hay un gradiente de voltaje y los iones que pueden aparecer son acelerados por el campo eléctrico produciendo daños en el dieléctrico.

14.- Flexibilidad.

La flexibilidad de un cable se define como la propiedad de ser doblado o curvado sin producirse rotura mecánica o eléctrica.

Se deben considerar los siguientes parámetros desde el punto de vista de la flexibilidad a la hora de seleccionar un cable :

- Tipo de aplicación : Estática o dinámica.
- Presencia de efecto muelle y efecto memoria.
- Mínimo radio de curvatura requerido.
- Estabilidad de las propiedades eléctricas al doblar el cable.
- Número máximo de flexiones que deba soportar el cable.

El mínimo radio de curvatura es el menor valor del radio que puede ser aplicado sin deterioro de sus características eléctricas y mecánicas.

Empíricamente el mínimo radio de curvatura se calcula de la siguiente manera :

- Radio de curvatura estático $\approx 5 \Phi$
- Radio de curvatura dinámico $\approx 10 \Phi$

Siendo Φ el diámetro exterior del cable en mm

El tipo de cubierta del cable influye en la flexibilidad de este. Por ejemplo la cubierta de poliuretano es más flexible que la de FEP.

La construcción del blindaje de un cable influenciará la flexibilidad de este. Los cables de malla trenzada son más flexibles, que los de cubierta metálica o corrugada.

La naturaleza y composición del conductor central de un cable coaxial son factores importantes en la flexibilidad.

Los conductores centrales sólidos son menos flexibles que los formados por múltiples hilos aunque la atenuación del cable con conductor central sólido es menor

En la tabla 4 se muestran las propiedades de algunos materiales usados comúnmente como cubiertas exteriores de los cables coaxiales.

Como conclusión se puede decir que la elección de un cable coaxial depende del entorno en el que va a trabajar a parte de las especificaciones eléctricas requeridas . Un cable con buena resistencia mecánica será menos flexible, por otra parte un cable muy flexible tendrá un peor comportamiento eléctrico.

PROPERTIES	TEST METHOD	UNIT	PTFE	FEP	PFA	POLYIMIDE	ETFE
MECHANICAL PROPERTIES							
Density	ASTM-D-792	kg/m ³ g/cm ³	2150 2.15	2150 2.15	2150 2.15	1550 1.55	1700 1.70
Tensile strength	ASTM-D-638	N/mm ² kg/m ²	24.5 250	20.6 210	27.5 280	230 2340	44.1 450
Ultimate elongation	ASTM-D-638	%	350	300	300	70	200
Flexural modulus	ASTM-D-790	N/mm ² kg/cm ²	667 6800	667 6800	667 6800		1373 14000
Flexlife	Tests MIT 0.2 mm, 180°	Number of cycles	750000	100000	200000	285000	30000
Impact strength	ASTM-D-256		No break	No break	No break		No break
	23°C						
	-40°C	N-m/m	490	157	157		1090
Hardness	ASTM-D-785	shore D	55	55	55		75
Coefficient of dynamic friction	-	-	0.1	0.3	0.2		0.4
THERMAL PROPERTIES							
Melting point/ Transition temp.	-	°C	327	275	305	Does not melt	270
Operating temperature (20.000 h)	-	°C	260	205	260		155
Non flammability	UL - 94	-	94 V-0	94 V-0	94 V-0	94 V-0	94 V-0
Limiting oxygen index	ASTM-D-2863	%	95	95	95	37	30
Calorific value	ASTM-D-240	MJ/kg	5.0	5.0	5.0		13.8
ELECTRICAL PROPERTIES							
Dielectric constant	ASTM-D-150	(10 ³ - 10 ⁶ Hz)	2.1	2.1	2.1	3.1	2.6
Dissipation factor (tgδ)	ASTM-D-150	(10 ⁶ Hz)	0.0002	0.0007	0.0002	0.0015	0.005
Arc Resistance	ASTM-D-495 (STAINLESS STEEL ELECTRODES)	S	> 180	> 180	> 180		15
Volume resistivity	ASTM-D-257	Ohm-cm	>10 ¹⁸	>10 ¹⁸	>10 ¹⁸	>10 ¹⁷	>10 ¹⁶
Surface resistivity	ASTM-D-257	Ohm	>10 ¹⁶	>10 ¹⁶	>10 ¹⁷		>10 ¹⁴
Dielectric strength (short time)		KV/mm	24	24	24	270	16
GENERAL PROPERTIES							
Radiation resistance	-	Mrad	0.1	10	5		200
Weather resistance	Weather 0-meter (2000h)	-	No effect	No effect	No effect	No effect	No effect
Solvent resistance	ASTM-D-543	-	Excellent	Excellent	Excellent	Good	Excellent
Chemical resistance	ASTM-D-543	-	Excellent	Excellent	Excellent	Good	Excellent
Water absorption	ASTM-D-570	%	0.00	0.01	0.03	2.50	0.03

Tabla 4 Características de los materiales usados en la cubierta de los cables

15.- Frecuencias de Trabajo de los conectores.

Diversos tipos de conectores son utilizados en unión de los cables coaxiales dependiendo del sistema de fijación requerido (rosca, bayoneta, presión, etc), de la fijación del conector al cable (soldadura o crimpado) , del material del aislante el cual debe tener una buena rigidez dieléctrica y del cuerpo del conector que debe ser resistente , si las condiciones ambientales son extremas , a la corrosión y a la temperatura.

Quizás el aspecto técnico más importante a la hora de seleccionar el conector coaxial es el rango de frecuencia de utilización.

Diversos conectores se fabrican dependiendo de la frecuencia de trabajo .

En el gráfico que se muestra a continuación , aparecen los tipos de conector más importante utilizados en función del rango de frecuencia de trabajo junto con los límites de frecuencia máximos de utilización.

