

Componentes pasivos

Departamento de Electrónica, I.T.S. Arias – Balparda

Introducción

Un *resistor* no es una resistencia pura de valor exacto. Un resistor real tiene una inductancia en serie y una capacidad parásita en paralelo. Las mismas afectan el comportamiento del resistor, particularmente en alta frecuencia.

Un *capacitor* no es simplemente una capacidad, posiblemente con algunas pérdidas. Tanto el valor de la capacidad como asimismo las pérdidas dependen de la frecuencia y de la temperatura, a veces de manera muy significativa. Un capacitor real tiene una inductancia en serie, una resistencia en serie y una resistencia en paralelo. A altas frecuencias, los capacitores se comportan como sistemas resonantes complejos. Por encima de su frecuencia de resonancia serie, un capacitor se comporta como una inductancia.

Las características de los diversos tipos de capacitores difieren mucho entre sí y dependen del dieléctrico y de la tecnología usada en su fabricación. Para elegir el capacitor apropiado para una determinada aplicación, es sumamente importante comprender las características específicas del material y de la tecnología usada.

Un *inductor* no es simplemente una inductancia con pérdidas, representadas éstas por una resistencia en serie. Desde principios del siglo XX se conoce el efecto de la capacidad distribuida del inductor y la frecuencia de auto-resonancia resultante. Sin embargo, el viejo modelo que consta de una capacidad en paralelo con un inductor con pérdidas, tampoco representa fielmente al inductor real.

Las páginas siguientes son una compilación de información básica relativa a las características de los distintos tipos de componentes pasivos.

1. Resistores y sus características

Los resistores son los componentes electrónicos pasivos más comúnmente usados. Las características a considerar cuando se escoge un resistor son: valor de la resistencia, tolerancia, estabilidad, coeficiente de temperatura, coeficiente de tensión, disipación de potencia, efectos de la humedad, efectos de la frecuencia, ruido, fiabilidad, tamaño, packaging, disponibilidad y costo. Para ello, debemos familiarizarnos con los materiales y la construcción de los distintos tipos de resistores.

Tolerancia

La tolerancia es la máxima desviación de la resistencia nominal especificada por el fabricante y se da como un porcentaje del valor nominal. La variabilidad *a largo plazo* del valor de un resistor, se compone de factores tales como la tolerancia al momento de la compra, envejecimiento, stress (montaje, potencia disipada, etc) y variaciones de corto plazo debidas al medio ambiente (temperatura, humedad, etc). Se puede seleccionar un resistor cuya *tolerancia especificada* es del 10% para que esté por ej. dentro de $\pm 1\%$ del valor requerido al momento de instalarlo en el circuito, pero el valor de dicho resistor puede muy bien variar dentro del $\pm 10\%$ especificado (y a menudo fuera de él) durante el servicio. Por eso, si en un circuito se requiere un valor de resistencia *muy exacto* o *estable*, se debe elegir un resistor de la tolerancia correcta, o sea, con una tolerancia más estricta que la requerida al final de su vida útil.

Valores preferentes y décadas de valores

La estandarización implica seleccionar valores *preferentes* dentro de las gamas disponibles. En 1963, la IEC estandarizó las series de números preferentes para resistores y capacitores. Estos valores pueden parecer extraños, pero detrás de ellos hay una lógica dictada por los márgenes de tolerancia disponibles.

La *progresión por décadas* de los valores preferentes está basada en los números preferentes generados por una progresión geométrica, los cuales se repiten en las décadas sucesivas. Como cada miembro de una progresión geométrica es la media geométrica de sus vecinos, es posible espaciar linealmente valores sobre una escala logarítmica de modo tal, que de un cambio porcentual del valor resulte un cambio lineal en la escala logarítmica.

Cada término a_n de una progresión geométrica se define por: $a_n = a_1 \cdot r^{n-1}$
 donde r es la razón y a_1 es el término inicial. Las series E
 de valores preferentes se definen mediante la progresión: $a_n = (\sqrt[k]{10})^{n-1}$
 La cantidad de valores de dicha progresión que habrá en cada década queda determinada por k . $k \in \mathbb{Z} \cap [0; n-1)$

Ejemplo: Para $k = 6$ tenemos que $\sqrt[6]{10} \approx 1,468$. Redondeando los términos de la progresión a 2 cifras significativas, se obtiene: 1 1,5 2,2 3,3 4,7 6,8.
 Estos mismo valores se repiten en las décadas sucesivas.

Ahora determinaremos cual es la tolerancia $\pm \delta$ admisible.

Para tener una mínima superposición de los márgenes de variación de cada valor: $a_n(1 + \delta) = a_{n+1}(1 - \delta) \Rightarrow \frac{a_{n+1}}{a_n} = \frac{1 + \delta}{1 - \delta}$

Por la definición de progresión geométrica, el cociente a_{n+1}/a_n es la razón r , sustituyendo: $\sqrt[k]{10} = \frac{1 + \delta}{1 - \delta} \Rightarrow \delta = \frac{\sqrt[k]{10} - 1}{\sqrt[k]{10} + 1}$

En nuestro ejemplo, para $k = 6$ obtenemos $\delta = 18,95\%$ y en consecuencia se fija la tolerancia para la serie E6 en 20 %.

$100 \pm 20\% = 80 \text{ a } 120$	$330 \pm 20\% = 264 \text{ a } 396$
$150 \pm 20\% = 120 \text{ a } 180$	$470 \pm 20\% = 376 \text{ a } 564$
$220 \pm 20\% = 176 \text{ a } 264$	$680 \pm 20\% = 544 \text{ a } 816$

La norma IEC 60063 define las series E3, E6, E12, E24, E48, E96 y E192. Como las series E3, E6, E12 y E24 fueron definidas en 1948 y 1950 y por lo tanto preceden a dicha norma, los valores de 2,7 a 4,7 y 8,2 no obedecen las reglas de redondeo, pero no fueron modificados debido a su gran difusión.

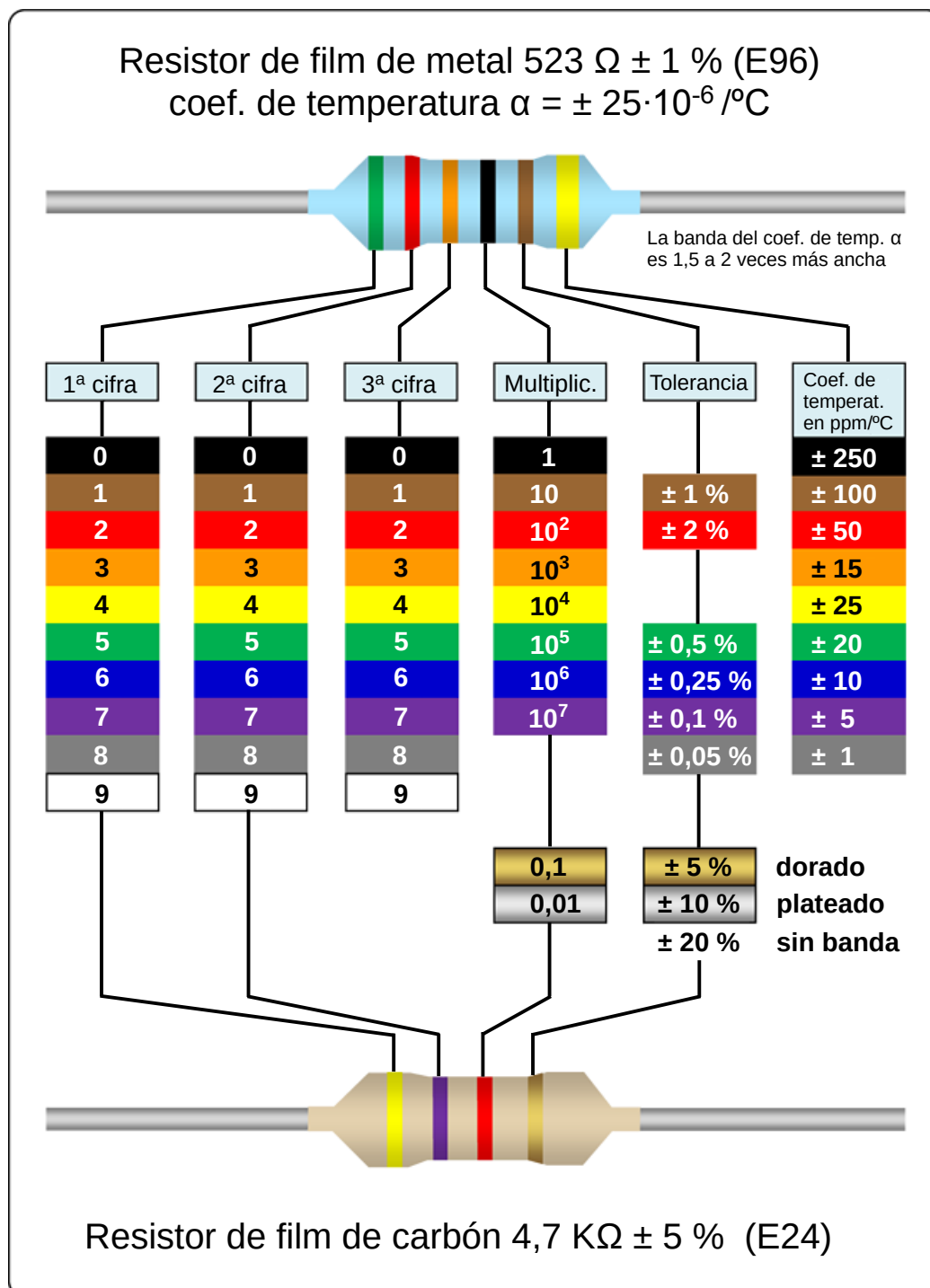
Valores standard de las series E en una década según IEC 60063

E192	E96	E48	E192	E96	E48	E192	E96	E48	E192	E96	E48	E192	E96	E48
100	100	100	169	169	169	287	287	287	487	487	487	825	825	825
101			172			291			493			835		
102	102		174	174		294	294		499	499		845	845	
104			176			298			505			856		
105	105	105	178	178	178	301	301	301	511	511	511	866	866	866
106			180			305			517			876		
107	107		182	182		309	309		523	523		887	887	
109			184			312			530			898		
110	110	110	187	187	187	316	316	316	536	536	536	909	909	909
111			189			320			542			920		
113	113		191	191		324	324		549	549		931	931	
114			196			328			556			942		
115	115	115	196	196	196	332	332	332	562	562	562	953	953	953
117			198			336			569			965		
118	118		200	200		340	340		576	576		976	976	
120			203			344			583			988		
121	121	121	205	205	205	348	348	348	590	590	590			
123			208			352			597					
124	124		210	210		357	357		604	604		E24	E12	E6
126			213			361			612			E3		
127	127	127	215	215	215	365	365	365	619	619	619	100	100	100
129			218			370			626			110		
130	130		221	221		374	374		634	634		120	120	
132			223			379			642			130		
133	133	133	226	226	226	383	383	383	649	649	649	150	150	150
135			229			388			657			160		
137	137		232	232		392	392		665	665		180	180	
138			234			397			673			200		
140	140	140	237	237	237	402	402	402	681	681	681	220	220	220
142			240			407			690			240		
143	143		243	243		412	412		698	698		270	270	
145			246			417			706			300		
147	147	147	249	249	249	422	422	422	715	715	715	330	330	330
149			252			427			723			360		
150	150		255	255		432	432		732	732		390	390	
152			259			437			741			430		
154	154	154	261	261	261	442	442	442	750	750	750	470	470	470
156			264			448			759			510		
158	158		267	267		453	453		768	768		560	560	
160			271			459			777			620		
162	162	162	274	274	274	464	464	464	787	787	787	680	680	680
164			277			470			796			750		
165	165		280	280		475	475		806	806		820	820	
167			284			481			816			910		

E3 40 % tolerancia
 E6 20 % tolerancia
 E12 10 % tolerancia,
 E24 5 % tolerance (y usualmente 2 % tolerancia)
 E48 2 % tolerancia
 E96 1 % tolerancia
 E192 0.5, 0.25, 0.1 % y tolerancias superiores.

Códigos de marcado

El standard IEC 60062 especifica como se deben marcar los valores de los resistores y capacitores. Para los resistores fijos con terminales, se usa el código de colores que se muestra a continuación.



El código de colores indica la resistencia mediante tres o cuatro bandas de color, seguidas de una banda que indica la tolerancia. La banda del coeficiente de temperatura, si existe, está a la derecha de la banda de la tolerancia y es usualmente una banda ancha dispuesta cerca del extremo del resistor.

El código incluye las dos o tres primeras cifras significativas del valor de la resistencia, seguidas por un multiplicador. Las cifras significativas se deben multiplicar por ese factor para obtener el valor real de la resistencia en ohms.

Que se representen dos o tres cifras significativas depende de la tolerancia del resistor: para $\pm 5\%$ y tolerancias más laxas se requieren 2 bandas; para $\pm 2\%$ y tolerancias más estrictas se requieren 3 bandas.

Los resistores en chip de montaje en superficie (SMT) se marcan usualmente con un número de tres o cuatro dígitos. Para $R > 10\ \Omega$, los dos o tres primeros dígitos son las cifras significativas y el último dígito es el exponente del multiplicador. Para $R < 10\ \Omega$, una letra R marca el lugar de la coma decimal.

223	223 = 22×10^3 = 22,000 Ohm = 22K Ohm	8202	8202 = $820 \times 10^2\ \text{Ohm}$ = 82,000 Ohm = 82 KOhm
4R7	4R7 = 4.7 Ohm	0R22	0R22 = 0.22 Ohm

La norma IEC 60062 indica que en los diagramas circuitales las cifras significativas se deben escribir como tales, pero que se debe reemplazar el punto decimal por el prefijo SI del multiplicador, como se ejemplifica en la tabla adjunta.

Valor resistor	Rótulo IEC
0,1 Ω	0R1
1 Ω	1R0
22 Ω	22R
3,3 $\text{K}\Omega$	3K3
100 $\text{K}\Omega$	100K
1,5 $\text{M}\Omega$	1M5

Estabilidad

La estabilidad se refiere al cambio en el valor de la resistencia, expresado en % o en partes por millón (ppm, o sea 10^{-6}), debido a la exposición a determinadas condiciones ambientales o stress: alta o baja temperatura, envejecimiento, máxima potencia nominal, humedad, temperatura de soldadura, breves sobrecargas, radiación. Los resistores de alambre bobinado son los más estables, seguidos en orden por los de film metálico, en chip y de film de carbón.

Coefficiente de temperatura

Se define el coeficiente de temperatura como $\Delta R / (R \cdot \Delta T)$ y se expresa en %/ $^{\circ}\text{C}$ o en ppm/ $^{\circ}\text{C}$. El peor coeficiente lo tienen los resistores de composición de carbón; para los resistores de film de carbón en general es negativo, -200 a -500 ppm/ $^{\circ}\text{C}$. El mejor lo tienen los resistores en chip o de film metálico, ± 20 a 100 ppm/ $^{\circ}\text{C}$.

Los resistores de alambre bobinado pueden tener un coeficiente de casi cero. Se bobinan usando aleaciones especiales como el Constantán (55% cobre y 45% níquel), el cual tiene un coeficiente de temperatura de 1 a 5 ppm/ $^{\circ}\text{C}$.

Por ej: Si la resistencia nominal de un resistor es $R = 1\text{K}$ a 25°C y su coeficiente de temperatura entre -55°C y $+155^{\circ}\text{C}$ es ± 200 ppm/ $^{\circ}\text{C}$, el valor de la resistencia a 100°C será:

$$1000\ \Omega \pm (75 \times 200 \times 10^{-6}) \times 1000\ \Omega = 1015\ \Omega \text{ o } 985\ \Omega$$
Coefficiente de tensión

Al aplicar tensión a un resistor, puede haber una ligera disminución en el valor de la resistencia (además de los cambios debidos a la temperatura). El coeficiente de tensión se expresa en %/V o en ppm/V. Puede ser grande para los resistores de composición de carbón (-500 ppm/V), alrededor de 5 a 30 ppm/V para los de film de carbón y de 0,05 a 10 ppm/V para resistores de film de metal o en chip.

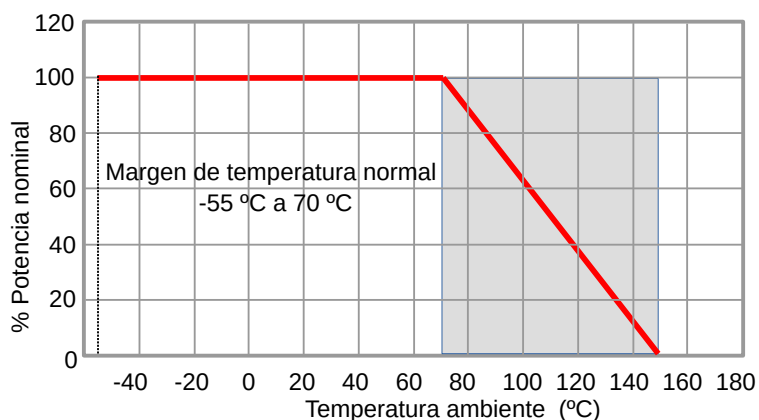
Efectos de la humedad

En los resistores de valores altos, la condensación en la superficie puede crear un camino de baja resistencia y dar lugar a corrientes de fuga. Si la humedad penetra el recubrimiento, puede reaccionar químicamente con el material resistivo y alterarlo. El peligro existe sobre todo cuando los resistores están fríos por estar almacenados o cuando el equipo no se usa. El efecto de la humedad prolongada también se expresa como cambio en %/ $^{\circ}\text{C}$ o en ppm/ $^{\circ}\text{C}$.

Disipación de potencia

Los resistores deben usarse dentro de los límites de temperatura especificados para evitar un daño permanente. El límite de temperatura se define en base a la *potencia nominal* y a la *derating curve* o curva de reducción del valor. La potencia nominal es la máxima potencia en Watts que el resistor puede disipar. La misma es función del material del resistor, la tensión nominal máxima, las dimensiones del resistor y la máxima temperatura de punto caliente admisible. La máxima temperatura de punto caliente, es la temperatura de la parte más caliente del resistor cuando disipa su potencia nominal a una temperatura ambiente dada.

La mayoría de los fabricantes especifican la potencia nominal a 70 °C y en condiciones de libre circulación del aire. La *derating curve* indica la máxima potencia admisible en función de la temperatura ambiente. Especifica hasta que temperatura vale la potencia nominal (70°C) y a que temperatura la potencia disipada debe reducirse a cero (150°C), siendo ésta además la temperatura máxima de almacenamiento.



Derating: Cuando un componente trabaja por debajo de sus valores de máxima especificados, aumenta el margen de seguridad entre los límites del diseño y el stress aplicado. Esto da un margen de diseño para acomodar variaciones en la fuente de alimentación, temperatura de operación, falla en la ventilación y otros factores ambientales. Se recomienda que los resistores fijos disipen como máximo un 50 % de la potencia admisible a esa temperatura.

Tensión nominal

Los resistores discretos están disponibles para potencias nominales que van desde 1/20 W hasta 2 W o más. No obstante, para los valores altos de resistencia la *tensión* es un factor más limitante que la *potencia*, variando desde 150 V para los tamaños más pequeños hasta unos 750 V para resistores de 2 W. El valor crítico de resistencia que marca la frontera entre ambos límites, es $R = V^2/P$, siendo V la tensión nominal y P la disipación de potencia.

Así, se puede calcular un valor de resistencia crítica para una combinación dada de tensión y potencia nominales. Para los valores de resistencia menores nunca se alcanzará la tensión máxima, mientras que para los valores mayores la disipación de potencia será menor que la potencia nominal.

Efectos de la frecuencia

La resistencia de un resistor permanece constante sólo en frecuencias bajas. La respuesta de frecuencia se ve afectada por la capacidad distribuida y la inductancia en el cuerpo resistivo, la inductancia de los terminales, capacidad respecto a tierra, efecto pelicular y pérdidas dieléctricas. El modelo más simple para un resistor en frecuencias altas es un circuito resonante paralelo. En general, la respuesta de frecuencia es mejor para los resistores de valores bajos, pequeños y que no tengan forma de espiral.

Ruido

Todos los resistores generan *ruido térmico* (o de Johnson), causado por el movimiento aleatorio de los electrones. El mismo es proporcional a la temperatura absoluta T, tendiendo a cero cuando T tiende a 0°K y tiene una distribución Gaussiana alrededor de 0 V. La tensión eficaz de ruido se puede calcular mediante la fórmula adjunta:

$$V_n = \sqrt{4k \cdot T \cdot R \cdot \Delta f}$$

V_n – tensión de ruido RMS

k – constante de Boltzman
($1,38 \times 10^{-23}$ J/K)

T – temperatura absoluta

R – resistencia en ohms

Δf – ancho de banda en Hz sobre el cual se mide el ruido

El ruido térmico es *blanco*, o sea, su valor rms por unidad de ancho de banda es constante desde corriente continua hasta altas frecuencias.

Además del ruido térmico, la mayoría de los resistores generan ruido *debido al pasaje de corriente* a través del mismo (ruido de Bernamont). Éste depende del valor de la corriente, del material resistivo, de la construcción física del resistor y

es dependiente del rango de frecuencias utilizado. Una forma de especificarlo es a través del *índice de ruido*, el cual se especifica para cada tipo de resistor.

Se define el *índice de ruido* como la relación de la tensión eficaz de ruido causada por un flujo de corriente cuando el resistor tiene una tensión continua entre sus extremos, medido sobre una década de frecuencia (ancho de banda) a un punto caliente (hot spot) especificado por el fabricante. La unidad es en mV/V o en dB, donde

$$0 \text{ dB es } 1 \text{ V.} \quad \text{Índice de ruido}_{\text{dB}} = 20 \cdot \log \frac{\text{Tensión de ruido} [\mu \text{ V}]}{\text{Tensión de continua} [\text{ V}]} = 20 \cdot \log \frac{E(\text{rms})}{V_{\text{CC}}}$$

La tensión de ruido para un rango de frecuencias f_1 a f_2 está dada por:

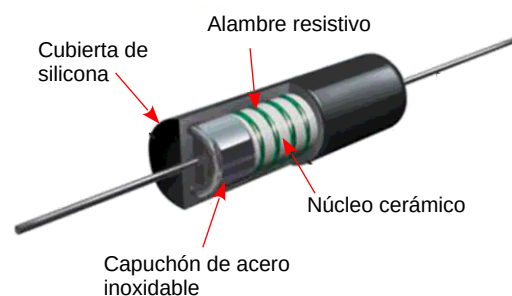
$$E(\text{rms}) = V_{\text{CC}} \cdot 10^{\frac{\text{Índice de ruido}_{\text{dB}}}{20}} \cdot \sqrt{\log \frac{f_2}{f_1}}$$

1.1 Tipos de resistores

Los resistores presentan grandes diferencias en sus características, las cuales dependen de los materiales y métodos constructivos que se emplearon en su fabricación. Examinaremos brevemente los diferentes tipos de resistores.

1.1.1 Resistores de alambre bobinado

Fueron de los primeros tipos en fabricarse. Están constituidos por un alambre conductor bobinado en forma helicoidal sobre un sustrato cerámico o de vidrio. El diámetro del alambre depende de la resistencia y de la potencia a disipar. Las aleaciones más



comúnmente usadas son: Nicromo para altas temperaturas y Constantan, Karma y Manganina para resistores de muy bajo coeficiente térmico.

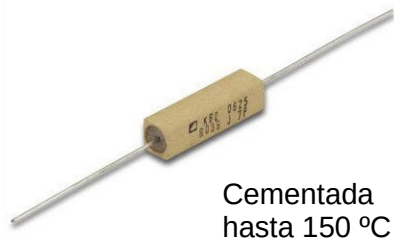
Por su construcción, este tipo de resistor presenta inductancia, lo cual limita la frecuencia de trabajo a unos 20 KHz. Para evitar esto, se fabrican resistores anti-inductivos devanando sobre la forma dos espirales en sentidos opuestos, con el objeto de que los flujos magnéticos de ambas bobinas se cancelen.

Los *resistores de potencia* pueden disipar hasta 300 W, tienen una resistencia comprendida entre 0,1 ohms y 180 K y presentan tolerancias de $\pm 5\%$ y $\pm 10\%$.

Los *resistores de precisión* pueden disipar hasta 15 W, tienen una resistencia

comprendida entre 0,1 ohms y 500 K con tolerancias de $\pm 0,1\%$ y $\pm 0,01\%$.

Los resistores de alambre tienen un bajo nivel de ruido y pueden tener o no un recubrimiento protector, algunos incluso tienen un encapsulado epóxico que los hace parecerse a los resistores de composición.



Cementada
hasta 150 °C



Cubierta de
silicona
hasta 200 °C



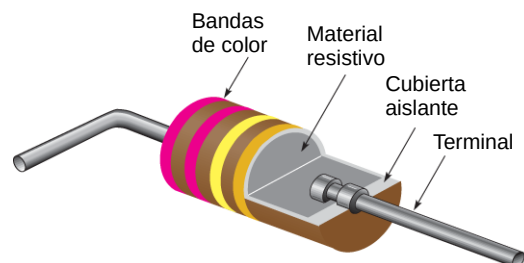
Esmaltada
hasta 300 °C



Carcasa de aluminio
hasta 275 °C

1.1.2 Resistores de composición de carbón

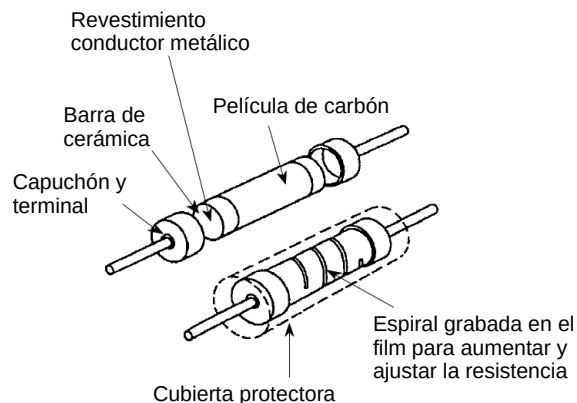
Estos resistores consisten en un cuerpo resistivo uniforme moldeado, hecho a base de polvo de carbón o grafito mezclado con un compuesto resistivo como silicato de calcio u óxido de sílice y un aglomerante fenólico. Dosificando convenientemente el polvo de carbón y el compuesto resistivo, se logran distintos valores de resistencia con igual tamaño



del cuerpo. Esta tecnología es de las más antiguas, la tolerancia inicial de los resistores de composición no es mejor que $\pm 5\%$ y su estabilidad a largo plazo no es mejor que $\pm 20\%$. Estos resistores tienen baja inductancia y poseen una gran capacidad para soportar sobrecargas transitorias, pero tienen una figura de ruido alta y son susceptibles a la absorción de humedad, la cual hacer variar considerablemente su resistencia. Se los usa por ej. en circuitos supresores de transitorios de tensión (snubber).

1.1.3 Resistores de film de carbón

Mediante descomposición térmica de un hidrocarburo gaseoso, se deposita sobre una pequeña barra de cerámica una película de carbono puro, sin ningún relleno o aglomerante. Se logra así una capa cristalina muy delgada, con un espesor inferior a una micra, de color gris metálico y muy dura, que actúa como elemento resistivo. En los extremos de la barra se colocan capuchones metálicos, a los que se sueldan los terminales.



Para obtener el valor correcto de resistencia se hace en el film un hendidura hasta el sustrato en forma de espiral, que alarga el camino eléctrico y reduce el ancho del elemento resistivo. Una vez completos, los resistores son recubiertos con una resina para proteger el elemento resistivo contra el desgaste mecánico, la humedad y otros contaminantes. La tolerancia standard es $\pm 5\%$, estando disponibles también con tolerancias de $\pm 2\%$ y $\pm 10\%$. Como el elemento resistivo forma una bobina, estos resistores tienen inductancia y ello puede afectar su desempeño en circuitos de RF. Aunque existen tipos de baja inductancia, ésta puede llegar a algunos μH en los resistores de film de carbón comunes y la capacidad distribuida puede ser de $0,5 \text{ pF}$. El uso de carbón puro hace que estos resistores tengan un coeficiente de temperatura negativo y que además produzcan mucho menos ruido que los resistores de composición. Se fabrican para potencias de hasta 2 W . A los valores de baja resistencia les corresponde una película más gruesa, lo que les da una excelente capacidad para trabajar con pulsos, especialmente si el film no ha sido espiralado. Se los usa en equipos electrónicos de consumo y otras aplicaciones no críticas.

1.1.4 Resistores de film metálico

Es el tipo de resistor más comúnmente usado hoy en día. Se construyen depositando, por evaporación o al vacío, metales preciosos o aleaciones resistivas sobre una barra de cerámica. Son comunes las aleaciones de nicromo (CrNi) o de nitruro de tantalio (Ta_2N) a las que se adiciona aluminio, silicio o titanio. El valor de la resistencia se ajusta mediante un corte en espiral hecho a láser.



Esta técnica permite construir resistores moderadamente inductivos, de muy alta exactitud, muy estables y de bajo ruido. A los valores más altos de resistencia les corresponden los films más delgados, aproximándose a espesores moleculares y afectando la capacidad de conducción sin ruido de los metales. Por eso, el ruido aumenta para el margen de valores altos. La tolerancia standard es $\pm 1\%$ y se fabrican con tolerancias de hasta $\pm 0,05\%$. Se fabrican para potencias de hasta 2 W y como el aumento de temperatura reduce la estabilidad, usualmente los resistores de potencia tienen una tolerancia de $\pm 5\%$. El coeficiente de temperatura es bajo y generalmente positivo.

Los resistores de película metálica son sensibles a los pulsos de potencia. El disipar potencia calienta la pista resistiva muy rápidamente y en consecuencia, aún con pulsos cortos, se arriesga quemarla o elevar su temperatura comprometiendo la estabilidad. Se utilizan en aplicaciones de precisión, como por ejemplo en las redes de realimentación de los amplificadores operacionales y en filtros RC y también en equipos de alta confiabilidad en general.

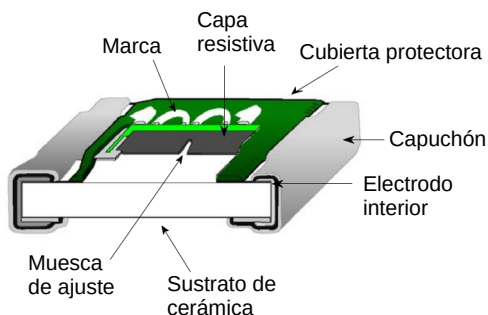
1.1.5 Resistores de metal vidriado

El film de los resistores *metal glaze* está compuesto por polvo de vidrio mezclado con partículas metálicas. La mezcla se deposita sobre un sustrato cerámico y se los calienta a 800°C . El valor de la resistencia se ajusta haciendo un corte helicoidal. Tienen un buen comportamiento ante sobrecargas de corriente, que pueden soportar mejor gracias a la inercia térmica que confiere el vidrio. Tienen un coeficiente térmico del orden de 150 a $250 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$.

1.1.6 Resistores en chip

Los resistores en chip son componentes de montaje en superficie (SMD), fabricados ya sea en thick-film o en thin-film.

Los resistores en thin-film se hacen depositando al vacío el material resistivo sobre un sustrato aislante creando un film metálico uniforme con un espesor de alrededor de $0,1\ \mu\text{m}$. Se graba luego un patrón sobre la capa metálica, a láser o fotoquímicamente, para ajustar el valor de la resistencia y se aplica una cubierta protectora. Tienen un bajo coeficiente de temperatura, tolerancias estrictas y bajo ruido. Su comportamiento en alta frecuencia es mejor que el de los resistores thick-film, Se emplean usualmente en aplicaciones de precisión.



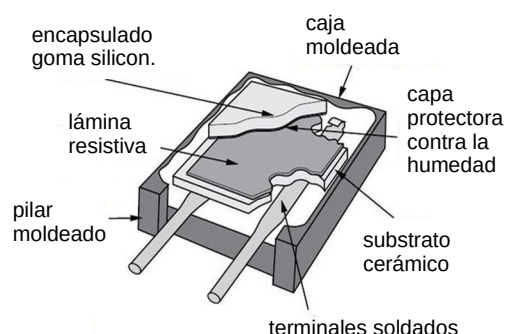
En la tecnología de thick-film, una pasta de óxidos metálicos es serigrafiada sobre un cuerpo cerámico, secada y luego cocida. El espesor de la capa es de unos $100\mu\text{m}$ y la composición de los óxidos metálicos determina aproximadamente el valor del resistor. Se le agregan los terminales metálicos, se ajusta el valor final mediante láser y se aplica una cubierta protectora. Tienen una tolerancia de $\pm 1\%$ a $\pm 5\%$ y son más económicos que los resistores thin-film. Además, pueden disipar más potencia, se fabrican en una gama más amplia de valores y pueden soportar grandes pulsos de corriente.

La tabla adjunta muestra las dimensiones standard de los componentes de montaje en superficie. La capacidad de disipación de potencia de los resistores depende del tamaño de los pads.

Tamaño	largo x ancho x alto en mm	Power (W)
0201	0,6 x 0,3 x 0,25	0,05
0402	1,0 x 0,5 x 0,25	0,062
0603	1,6 x 0,8 x 0,45	0,10
0805	2,0 x 1,25 x 0,5	0,125
1206	3,2 x 1,6 x 0,6	0,25
1210	3,2 x 2,6 x 0,6	0,5
2010	5,1 x 2,5 x 0,6	0,75
2512	6,5 x 3,2 x 0,6	1,0

1.1.7 Resistores “metal foil” (o de lámina de metal)

Estos resistores de precisión consisten en una lámina metálica grabada con un patrón en serpentina y aislada, que está adherida firmemente sobre un material de alta conductividad térmica. Los coeficientes de expansión térmica de la lámina de aleación resistiva y del substrato son diferentes, lo cual resulta



en un esfuerzo de compresión sobre la lámina cuando la temperatura aumenta, el cual compensa el cambio en la resistencia de la lámina debido a la temperatura. Se logra así una excelente estabilidad y un bajo coeficiente de temperatura. Estos resistores tienen además baja inductividad y buena capacidad para soportar pulsos. Se fabrican tanto para montaje tradicional *trough hole* como para montaje en superficie.

1.2 Resumen de características de los resistores

RESISTORS	CARBON FILM	METAL FILM	THICK FILM	METAL FOIL	CARBON COMPOSITION	WIREWOUND
Resistance Value	10 Ω to 22 M Ω	0.22 Ω to 22 M Ω	1 Ω to 100 M Ω	2 m Ω to 1 M Ω	1 Ω to 20 M Ω	0.1 Ω to 300 k Ω
Tolerance [%]	± 2 to ± 10	± 0.1 to ± 2	± 1 to ± 5	± 0.005 to ± 5	± 5 to ± 20	± 0.1 to ± 10
Temperature Coefficient [ppm/K]	- 200 to - 1500	± 5 to ± 50	± 50 to ± 200	± 2 to ± 50	- 200 to - 1500	± 1 to ± 200
Maximum Operating Temperature [°C]	+ 155	+ 155	+ 155	+ 150	+ 150	+ 400
Rated Dissipation P_{70} [W]	0.25 to 2	0.063 to 1	0.063 to 0.25	0.25 to 10	0.25 to 1	0.25 to 100
Stability at P_{70} (1000 h) $\Delta R/R$ [%]	± 0.8 to ± 3	± 0.15 to ± 0.5	± 1 to ± 3	± 0.05	+ 4/- 6 (typical - 3)	± 1 to ± 10
Operating Voltage U_{max} [V]	200 to 1000	50 to 500	50 to 200	200 to 500	150 to 350	25 to 1000
Current Noise [$\mu V/V$]	< 1	< 0.1	< 10	< 0.025	2 to 6	negligible
Non-linearity A_3 [dB]	> 100	> 110	> 50	negligible	~ 60	negligible

2. Capacitores y sus características

Los capacitores son el segundo componente electrónico pasivo más comúnmente usado. Un capacitor está compuesto por dos conductores próximos separados por un aislante y se define su *capacidad* C como la relación entre la carga y la diferencia de potencial entre ambos.

$$C = \frac{q}{v} \Rightarrow v(t) = \frac{q}{C} = \frac{1}{C} \int i dt$$

Existe una gran variedad de tipos con diferencias sustanciales entre sus características, las cuales dependen del dieléctrico y de la tecnología usada.

Las características y prestaciones a considerar cuando se escoge un capacitor son: capacidad nominal, tolerancia, tensión de funcionamiento, sobre-tensión, corriente de fuga, resistencia de aislación, corriente máxima, velocidad de crecimiento del pulso de tensión, corriente de ripple.

Capacidad nominal y tolerancia

Al igual que los resistores, cada capacitor tiene un valor nominal de capacidad y un % de tolerancia respecto a dicho valor. Los valores normalizados se eligen, dependiendo de la tolerancia, en base a las mismas series E usadas para los resistores. Un capacitor de precisión con una estricta tolerancia en su valor, también será más *estable en el tiempo* y tendrá un bajo *coeficiente de temperatura*.

Tensión nominal

Es la máxima tensión de trabajo de un capacitor, es la suma de la tensión de DC más el pico de tensión AC que se puede aplicar continuamente a sus terminales. Operar un capacitor a una tensión menor que el valor máximo de trabajo, prolonga su vida.

Sobre-tensión instantánea

Existe una máxima tensión segura a la cual se puede someter a un capacitor, para cualquier combinación de circunstancias y durante un corto período de tiempo. Por encima de esta sobre-tensión, el dieléctrico se perfora. Normalmente, la prueba de sobre-tensión implica aplicar una señal varios volts por encima de la tensión de trabajo. Se la aplica a través de un resistor de 1 K en serie, en ciclos repetidos de 0,5 minutos “on” y 5 minutos “off”.

Corriente de fuga

Cuando se aplica una tensión sobre un capacitor, fluye una corriente directa relativamente pequeña a través del mismo.

Resistencia de aislación

La resistencia de aislación es el cociente de una tensión continua especificada aplicada al capacitor sobre a la corriente que circula por él, a una temperatura especificada. Es una medida de la habilidad del capacitor cargado de oponerse a una fuga de corriente DC.

Corriente máxima de utilización

Exceder la corriente máxima especificada que puede circular por el capacitor, puede llevar a que se fundan los terminales o los electrodos del mismo.

Velocidad de crecimiento del pulso de tensión

La corriente a través del capacitor es la derivada de la carga:

Existe por lo tanto *un límite para la velocidad de subida de la tensión aplicada al capacitor*, $dv/dt|_{\max}$. Si se excede la misma, la gran corriente resultante puede dañar los terminales o los electrodos del capacitor.

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{dv}{dt}$$

Corriente de ripple

Los capacitores electrolíticos se usan a menudo como filtros de rectificadores, donde están sujetos a una tensión de AC superpuesta a la de DC. Debido a las pérdidas óhmicas y a las del dieléctrico, la corriente de AC aumenta la temperatura del capacitor. La máxima corriente de ripple está limitada por la capacidad del condensador de disipar el calor generado y se especifica en general a 100Hz y al máximo de temperatura de trabajo. A mayor corriente de ripple, más corta es la vida del capacitor.

2.1 Tipos de dieléctricos

Un capacitor real disipa energía además de almacenarla. Dicha pérdida de energía tiene lugar en forma de calor y es el resultado de varios efectos: la *conductividad finita de los terminales y de los electrodos*, la *resistividad finita del dieléctrico*, de la cual resulta la *corriente de fuga de DC* y las *pérdidas de AC* del

dieléctrico, las cuales están determinadas por el mecanismo de polarización dentro del dieléctrico y son dependientes de la frecuencia.

Se llama *absorción dieléctrica* al efecto por el cual un capacitor, tras haber sido cargado durante un tiempo significativo, no se descarga por completo al ser descargado momentáneamente.

Los materiales del dieléctrico se pueden clasificar en *no polares*, en los cuales no hay dipolos antes de aplicar el campo eléctrico y *polares*, en los cuales los dipolos existen antes de la aplicación del campo eléctrico. La *permitividad dieléctrica relativa* ϵ_r es una medida de la *polarizabilidad* del dieléctrico.

Dieléctricos no polares

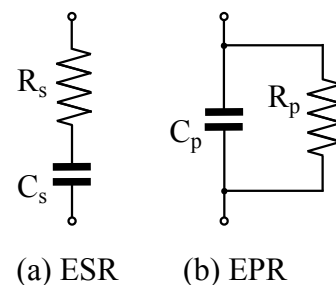
Cuando se aplica un campo eléctrico a un dieléctrico no polar, sus átomos o moléculas se deforman y aparece un momento dipolar inducido. En estos dieléctricos las pérdidas son muy pequeñas hasta frecuencias muy elevadas.

Dieléctricos polares

Los materiales dieléctricos polares contienen dipolos cuya orientación, en ausencia de un campo, es aleatoria. La presencia de un campo eléctrico alinea los dipolos y cargas eléctricas son atraídas hacia la superficie del material. Cuando se aplica un campo eléctrico de AC, los dipolos son reorientados en cada ciclo y la fricción interna de los dipolos dentro del material produce pérdidas de energía. Los dieléctricos polares producen en general las pérdidas más grandes en AC, las cuales aumentan considerablemente con la frecuencia.

2.2 Modelos del capacitor

En el modelo (a), para representar las pérdidas en AC del capacitor, todas las resistencias en serie del mismo han sido concentradas en el resistor R_s . Esta *Equivalent Series Resistance* (ESR) representa las pérdidas en las placas conductoras, los terminales y la disipación en el dieléctrico. El modelo (b) es útil para



representar las pérdidas de AC en el dieléctrico y la corriente de fuga de DC, R_p es la *Equivalent Parallel Resistance* (EPR). Nótese que C_s no es igual a C_p .

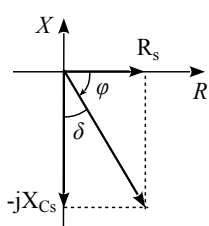
Factor de calidad

El *factor de calidad* Q de una red es una medida de la eficiencia con que la misma almacena la energía cuando es recorrida por una corriente alterna senoidal y se define como:

$$Q = \omega \frac{\text{max. energía almacenada}}{P \text{ media disipada}}$$

Para un capacitor, Q queda definido entonces como: $Q_C = \frac{1}{\omega C_s R_s} = \omega C_p R_p$

A menudo, los puentes de medición indican el *Factor*



de Disipación DF del capacitor. $DF = \frac{1}{Q} = \tan \delta = \omega C_s R_s$

El mismo es el inverso de Q y suele expresarse en %. El *ángulo de pérdida* δ es la desviación del ángulo de la impedancia del capacitor con respecto a los 90° de la impedancia de un capacitor ideal.

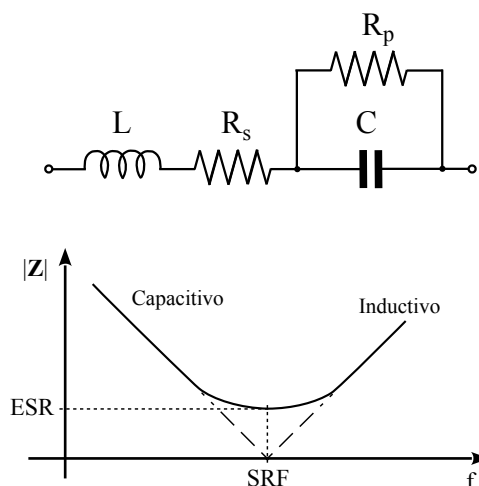
Resistencia Equivalente en Serie (ESR)

La ESR es un parámetro importante cuando el capacitor se usa para desacoplamiento. La misma se puede obtener de:

$$ESR = \frac{\tan \delta}{\omega C_s}$$

Frecuencia de auto-resonancia en serie (SRF)

Los modelos vistos más arriba, describen adecuadamente el comportamiento del capacitor en baja frecuencia. En frecuencias altas es necesario también tener en cuenta la inductancia parásita del capacitor, la cual es debida a la estructura del mismo y a los terminales de conexión. L y C conforman un circuito resonante serie y sus valores determinan la frecuencia de auto-resonancia del capacitor. Por encima de la misma, el capacitor se comporta como un inductor. Dentro de una misma familia de capacitores (igual construcción), la SRF es menor cuanto mayor es la capacidad.

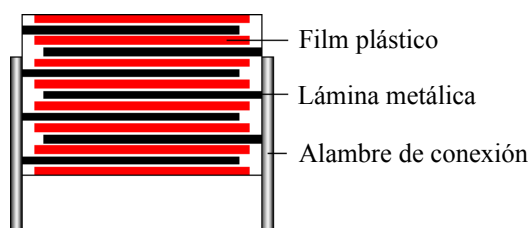
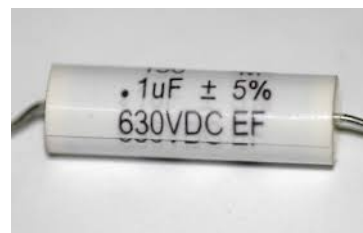
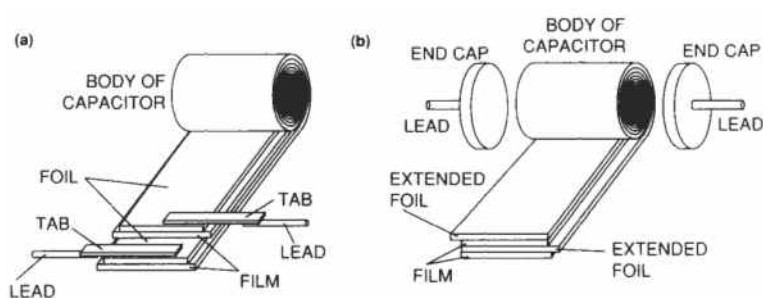


2.3 Capacitores de film (o película)

La disponibilidad de películas extremadamente delgadas y la diversidad de materiales, permite construir capacitores para una amplia variedad de aplicaciones que incluyen: filtrado, acoplamiento, bypass, temporización y supresión de ruido. Los capacitores de film son no polarizados, pueden operar a temperaturas relativamente altas, tienen alta resistencia de aislación, buena estabilidad y están disponibles con una precisión de hasta 0,5 %. La propiedad de auto-reparación (self-healing) de los films metalizados es útil en algunas aplicaciones en las que pueden aparecer ocasionalmente picos de tensión.

2.3.1 Capacitores de film enrollado

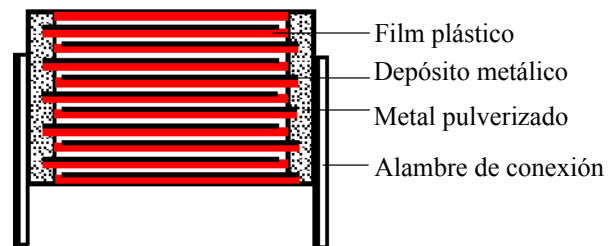
Un capacitor de film enrollado consta de dos láminas de aluminio separadas por hojas de dieléctrico y enrolladas en un cilindro compacto. Los contactos con las láminas se hacen por soldadura o insertando lengüetas durante el arrollado como en la fig. (a) o, en el tipo de láminas extendidas, permitiendo que las láminas se extiendan más allá del dieléctrico en los extremos opuestos fig. (b). Luego del enrollado, los terminales se conectan a las lengüetas o a los bordes expuestos de las láminas. Una vez que los terminales están conectados, el conjunto es moldeado y sumergido en una cubierta de resina protectora o sellado en un recipiente metálico.



2.3.2 Capacitores de film metalizado

Los capacitores de film metalizado se fabrican depositando al vacío una capa de aluminio de $0,1\ \mu\text{m}$ directamente sobre la película de dieléctrico. Luego de enrollarlo, se hacen los contactos a cada extremo del rollo mediante un fino spray de metal fundido, al cual luego se sueldan los terminales.

Este tipo de construcción reduce el volumen de los capacitores de baja tensión y gran capacidad y provee una propiedad conocida como “self-healing”. Durante la fabricación, se somete al capacitor



a su tensión nominal y si hay un defecto en el dieléctrico, la corriente de descarga a través del defecto genera suficiente calor como para vaporizar el metal de los electrodos. Esto aísla el defecto y restaura la aislación.

El self-healing también ocurre cuando durante la operación normal se producen picos de tensión moderados. Como el self-healing requiere una cierta energía mínima, los capacitores de bajo valor usados en circuitos de baja tensión y alta impedancia pueden quedar en cortocircuito en lugar de auto-repararse.

2.3.3 Capacitores de film apilado (stacked film)

La película metalizada es enrollada en un gran cilindro, el cual es cortado en secciones rectangulares. En los extremos opuestos se hacen conexiones a electrodos alternados, resultando así una pila de película metalizada conectada en paralelo. La estructura es similar a la de los capacitores cerámicos multicapa.



2.3.4 Propiedades básicas de los dieléctricos para capacitores de film

El factor de disipación (DF) de los capacitores de film es menos del 1 % a 25 °C. Los films con bajo DF a temperatura ambiente tienen generalmente un DF bajo dentro de todo el margen de temperatura. La resistencia de aislación decrece generalmente con la temperatura, a veces hasta dos o tres órdenes de magnitud a 125 °C. Dependiendo de su construcción, tamaño y del largo de los terminales, los capacitores de film se pueden usar a altas frecuencias.

Dieléctrico	Código	DF 1 KHz 25 °C, %	DF 1 MHz 25 °C, %	Máxima temp. °C	$\Delta C/C @$ -40 °C, %	$\Delta C/C @$ 100 °C, %
Papel	P	0,5	3	100	-8	4
Poliéster (Mylar)	KT	0,5	2	125	-4	3
Polycarbonato	KC	0,12	1,1	125	-0,7	1
Poliestireno	KS	0,02	0,04	85	0,8	-0,4 (70°C)
Polipropileno	KP	0,02	0,04	100	1	-1,5
Sulfuro de polifenileno	KI	0,1	0,18	150	0,6	-0,7
Teflón	PTFE	0,02		150	1	-2

Según el dieléctrico usado se pueden distinguir estos tipos comerciales:

FKS: formados por láminas de metal y dieléctrico de poliestireno (styroflex).

FKP: formados por láminas de metal y dieléctrico de polipropileno.

MKP: placas de metal vaporizado y dieléctrico de polipropileno.

MKT: placas de metal vaporizado y dieléctrico de poliéster (Mylar, polietileno).

MKC: placas de metal vaporizado y dieléctrico de polycarbonato.

Algunas características típicas

Tipo	Capacidad	Tolerancia	Tensión	Temperatura
FKS	2pF - 330nF	+/-0,5% +/-5%	25V - 630V	-55 °C a 70 °C
FKP	2pF - 100nF	+/-1% +/-5%	63V - 1KV	-55 °C a 100 °C
MKP	1,5nF - 4,7 μ F	+/-5% +/-20%	0,25KV - 2,5KV	-40 °C a 100 °C
MKT	680pF - 10 μ F	+/-5% +/-20%	25V - 630V	-55 °C a 100 °C
MKC	1nF - 1 μ F	+/-5% +/-20%	25V - 630V	-55 °C a 100 °C

La tolerancia se indica mediante una letra, algunas de ellas son:

	Código	B	C	D	F	G	J	K	M	Z
Tolerancia	C < 10 pF $\pm$ pF	0,1	0,25	0,5	1	2				
	C > 10 pF $\pm$ %			0,5	1	2	5	10	20	+80 -20

2.3.5 Aplicaciones recomendadas para los capacitores de film

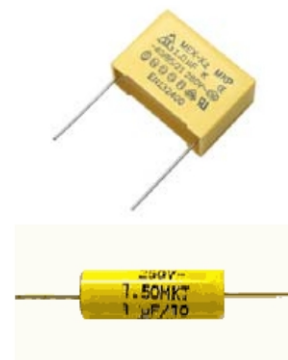
Los dieléctricos que presentan las menores pérdidas a altas frecuencias y la mejor estabilidad frente a las variaciones de temperatura son poliestireno, polipropileno, policarbonato y PTFE (Teflón).

Film de poliestireno (FKS) Se usan en aplicaciones analógicas de precisión como ser temporizadores, integradores y circuitos sintonizados de baja potencia. Tienen excelentes características de absorción dieléctrica, excelente estabilidad, alta resistencia de aislación y bajo coeficiente de temperatura. El ángulo de pérdidas de estos capacitores es bajo dentro de un margen amplio de frecuencias, pero la performance se degrada para las capacidades grandes a medida que la frecuencia aumenta. Para un dispositivo de menos de 1 nF, sube típicamente desde $\tan \delta < 1 \times 10^{-4}$ a 1 KHz a menos de 1×10^{-3} a 1 MHz. Para valores entre 10 y 100 nF, el factor de disipación típico será tan bajo como 1×10^{-4} a 1 KHz, pero a 1 MHz dicho factor puede subir a 5×10^{-3} .

Como desventaja mayor, la máxima temperatura ambiente de los capacitores FKS es de sólo 85 °C. Además, los capacitores de más de 10 nF tienden a ser algo voluminosos. Los solventes afectan a la película, por lo que a veces se necesita un encapsulado sellado.



Film de polipropileno (FKP y MKP) Los FKP se usan en aplicaciones de precisión como temporizadores, integradores y circuitos sintonizados. Los MKP se usan para bloqueo de DC. Tienen excelentes características de alta frecuencia, alta resistencia de aislación, ajustada tolerancia, alta estabilidad y excelentes características de absorción dieléctrica. El factor de disipación puede ser menor que 1×10^{-3} aún encima de los 10 MHz. Pueden ser más pequeños que los FKS y su temperatura de operación es mayor.

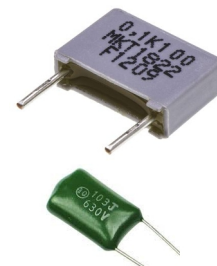


Las películas de poliestireno y de polipropileno son la primera elección para alta frecuencia, alta precisión, o aplicaciones de alto voltaje. Para circuitos de la misma categoría, que operan a frecuencias de más de 1 hasta unos 10 MHz, probablemente sean preferibles los capacitores cerámicos de clase 1.

Film de polycarbonato (FKC y MKC) Están siendo reemplazados por los tipos FKP y MKP. Tienen un ángulo de pérdidas relativamente bajo, que aumenta un poco más con la frecuencia que para las películas arriba mencionadas. Se usan para bloqueo de DC, filtrado, bypass, acoplamiento y supresión de transitorios. Tienen buena tolerancia, buenas características de alta frecuencia (40-400 KHz) y alta resistencia de aislación. No son adecuados para el uso en circuitos de “sample and hold”, amplificadores de respuesta rápida, o filtros debido a sus características de absorción dieléctrica.



Film de poliéster (KT y MKT) Tienen mayores pérdidas y son menos estables que los otros capacitores de film, pero son más baratos y pequeños, debido a una permitividad relativa ligeramente mayor. Se usan para bloqueo de DC, filtrado, bypass, acoplamiento y supresión de transitorios. No son adecuados para aplicaciones de RF. La ventaja más importante es la alta capacidad por volumen.



Los dieléctricos de poliéster y de polycarbonato se usan en aplicaciones de propósito general, donde son usuales una baja tensión de polarización de DC y pequeñas tensiones de AC a bajas frecuencias. Los capacitores de película de poliéster se recomiendan principalmente para acoplamiento de audio o videofrecuencias, bypass, o filtros pasabajos o pasaaltos simples, donde la tolerancia y la estabilidad no son críticas.

Film de Teflon (PTFE) Tiene una resistencia de aislación extremadamente alta, hasta altas temperaturas y es por eso excelente cuando se requieren bajas pérdidas. También mantiene bajas pérdidas dieléctricas hasta las frecuencias de microondas. Estos capacitores son más caros que los otros capacitores de film y se usan principalmente en aplicaciones específicas como ser microondas, altas temperaturas o cuando se requieren fugas extremadamente bajas, donde otras películas no son una alternativa.



Film de sulfuro de polifenileno (MKI) Estos capacitores, de tipo metalizado, son adecuados para el uso en circuitos en donde determinan la frecuencia y para aplicaciones de alta temperatura. El PPS tiene aproximadamente la misma estabilidad y pérdidas tan bajas como el policarbonato y es un reemplazo ideal para el mismo. Su alto punto de fusión permite usarlo en capacitores SMD no encapsulados, pues soportan el calor de la soldadura sin necesidad de una caja protectora.



Los *capacitores de papel (P y MP)* tienen las desventajas de una gran variación de la capacidad con los cambios de temperatura y de una corta vida de servicio comparada con la mayoría de los otros tipos. Todavía se los usa para valores medios de capacidad de 1 nF a 1 μ F, principalmente a la frecuencia de línea. Son adecuados como capacitores Clase X y Clase Y para filtros de supresión de interferencias RFI, por su baja ESR, resistencia a los picos de tensión y excelentes características de auto-healing. Tienen una confiabilidad particularmente alta contra la inflamabilidad pasiva y activa.



2.4 Capacitores cerámicos

Los dieléctricos cerámicos y los capacitores cerámicos que usan dichos dieléctricos se dividen en tres clases.

Clase 1 - dieléctricos cerámicos con una permitividad relativamente baja ($\epsilon_r = 6$ a 600), buen control de las tolerancias, excelente estabilidad y características de envejecimiento, bajo DF y muy buen Q hasta frecuencias muy altas. La característica capacidad versus temperatura está bien controlada y es básicamente lineal, con *coeficientes de temperatura especificados*. Se los usa en aplicaciones tales como osciladores y filtros, donde se requieren bajas pérdidas, compensación de la variación de la capacidad y alta estabilidad.

Clase 2 - dieléctricos cerámicos con una permitividad alta ($\epsilon_r = 250$ a 100.000), permiten una eficiencia capacidad/volumen mucho mayor, pero presentan altas pérdidas y tienen una característica capacidad/temperatura no lineal; la capacidad depende además de la tensión y están sujetos a envejecimiento. Se los usa para acoplamiento y desacoplamiento, sobre todo en circuitos de pulsos y en alta frecuencia, donde su baja inductancia en serie es invaluable.

Clase 3 - dieléctricos cerámicos que ofrecen una eficiencia volumétrica aún mayor, pero a expensas de baja precisión y estabilidad y un pobre factor de disipación. Usualmente tampoco soportan tensiones altas. La capacidad de un capacitor clase 3 típico cambiará de -22% a +50% dentro del margen de temperatura de +10 °C a +55°C. También puede tener un factor de disipación de 3 a 5%. Tendrá una exactitud pobre (usualmente 20%, o -20%/+80%). Por eso, los capacitores de cerámica clase 3 se usan típicamente para desacoplamiento, o en otras aplicaciones de fuentes de alimentación donde la exactitud no sea importante. No se los puede usar en aplicaciones donde haya picos de tensión presentes, ya que estos pueden dañar al capacitor si se excede su tensión nominal.

Código EIA para los coeficientes de temperatura

Para caracterizar fácilmente el comportamiento de los capacitores cerámicos, la Electronic Components Industry Association (ECIA) ha definido un conjunto de códigos conocidos como los standards de la Electrical Industries Association (EIA). Los mismos permiten especificar en forma sencilla el comportamiento de los capacitores cerámicos, pero son diferentes para la Clase 1 y para la Clase 2.

Códigos para capacitores Clase 1

El código EIA consta de tres caracteres

1. El primer carácter es una letra que indica los dígitos significativos del cambio de la capacidad en función de la temperatura en ppm/°C.
2. El 2° es un número que indica el multiplicador
3. El 3° es una letra que indica el máximo error en ppm/°C

Dígitos significativos		Multiplicador		Tolerancia	
C	0.0	0	-1	G	±30
B	0.3	1	-10	H	±60
L	0.8	2	-100	J	±120
A	0.9	3	-1000	K	±250
M	1.0	4	+1	L	±500
P	1.5	5	+10	M	±1000
R	2.2	6	+100	N	±2500
S	3.3	7	+1000		
T	4.7	8			
V	5.6				
U	7.5				

Por ejemplo, un tipo común de capacitor clase 1 es el C0G, el cual tiene una variación de 0 con un error de ±30 ppm/°C.

La industria también usa un código obsoleto, pero más intuitivo, donde la “N” indica un coeficiente negativo de temperatura y la “P” un coeficiente positivo.

Por ejemplo, un capacitor clase P100 tiene un coeficiente de temperatura de +100 ppm/°C , mientras que un N470 tiene -470 ppm/°C.

El C0G equivale al NP0.

Códigos para capacitores Clase 2

El código EIA consta de tres caracteres

1. El primero es una letra, la cual indica la temperatura de operación más baja.
2. El 2° es un número, el cual indica la temperatura de operación más alta.
3. El 3° es una letra, la cual indica el cambio de capacidad dentro de esa gama de temperaturas.

Temperatura más baja		Temperatura más alta		Variación	
X	-55 °C	2	+45 °C	D	±3.3 %
Y	-30 °C	4	+65 °C	E	±1.7 %
Z	+10 °C	5	+85 °C	F	±7.5 %
		6	+105 °C	P	±10 %
		7	+125 °C	R	±15 %
				S	±22 %
				T	+22 % / -33 %
				U	+22 % / -56 %
				V	+22 % / -82 %

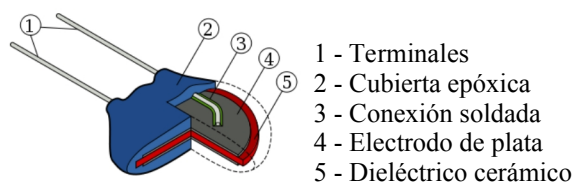
Por ejemplo, los capacitores X7R operarán de -55 °C a +125 °C con una variación de la capacidad de ±15 %.

2.4.1 Estructura de los capacitores cerámicos

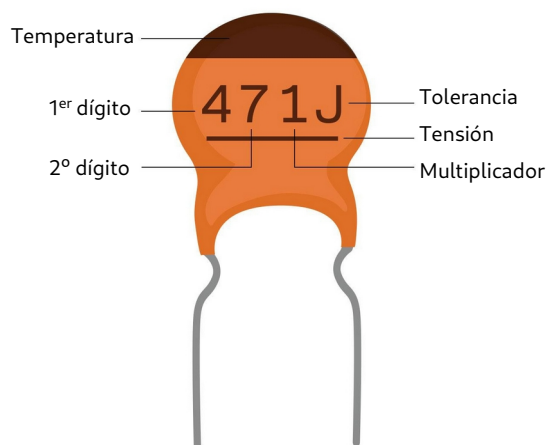
Los capacitores cerámicos se construyen en forma de disco o de placa cuadrada, en forma tubular, o como capacitores monolíticos multicapa. El material del dieléctrico es en general titanato de bario, titanato de calcio o dióxido de titanio con pequeñas cantidades de aditivos.

Capacitores de disco – Se fabrican a base de compuestos formulados, en polvo finamente molido. El polvo se comprime en forma de un disco delgado o una placa cuadrada, el cual es cocido a alta temperatura (1200 a 1400 °C) para fundir el material. Los electrodos son serigrafiados en cada cara del disco y se los cocina a unos 800 °C. Los terminales se sueldan con una soldadura de alto punto de fusión y luego el capacitor es laqueado o sumergido en una resina epóxica para darle una cubierta protectora. El valor de la capacidad y el coeficiente de temperatura, o la dependencia de la misma, se marcan en el

cuerpo mediante un texto, o a veces por medio de un código de colores. Los capacitores de disco tienen una gama limitada de áreas de electrodos y de espesor. Variando la formulación del dieléctrico, se obtiene una amplia gama de valores de capacidad.



Los capacitores cerámicos de disco usualmente se marcan mediante un código que consta de tres cifras seguidas por una letra. La capacidad nominal se indica en pF, las dos primeras cifras son los 2 dígitos significativos y la 3ª cifra es el exponente del multiplicador $\times 10^n$. La letra indica la tolerancia, según la tabla siguiente:



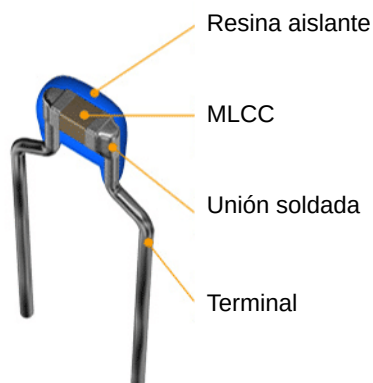
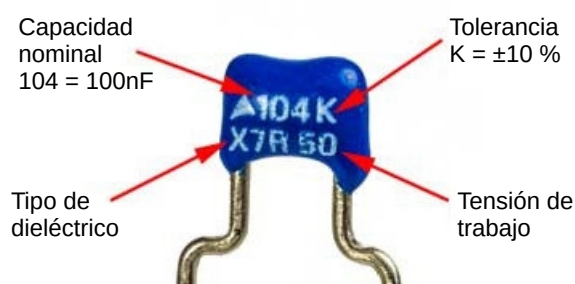
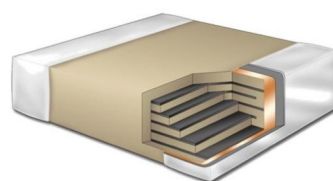
Tolerancia

C	D	F	G	J	K	M	Z
$\pm 0,25$ pF	$\pm 0,5$ %	± 1 %	± 2 %	± 5 %	± 10 %	± 20 %	$+80/-20$ %

En los capacitores color marrón, la tensión de trabajo puede estar escrita debajo de la marca de la capacidad, o pueden tener una línea debajo de la misma que significa 50V/100V. Si no hay ninguna línea, la tensión de trabajo es entonces 500V, asumiendo que el fabricante haya respetado el esquema de marcado. Los recubiertos con resina epóxica tienen usualmente la inscripción 1KV para indicar 1000V, etc. Una marca negra en la parte superior, representa una temperatura de operación de -25°C a $+85^{\circ}\text{C}$.

Capacitores cerámicos multicapa (MLCC) – Primero, un compuesto acuoso de polvo dieléctrico, un aglutinante y un solvente es depositado formando una fina hoja sobre una cinta de acero inoxidable o de plástico. Luego del secado, los electrodos se imprimen sobre las hojas, las cuales entonces son apiladas y comprimidas. Las pilas son luego cortadas en forma de capacitores individuales, tratadas con calor y cocinadas a alta temperatura. Finalmente, se aplican terminales en ambos extremos y se encapsula el dispositivo.

Para un determinado dieléctrico, los distintos valores de capacidad se logran cambiando el área de los electrodos y la cantidad de capas en la pila. Estos dispositivos están disponibles en tecnología SMD y trough-hole .



Los capacitores MLCC SMD suelen no llevar marca. Si la tienen, ésta consta de 3 caracteres: El 1^{er} carácter indica el fabricante, el 2^o es una letra que da las cifras significativas y el 3^o es el multiplicador de la capacidad expresada en pF.

Símbolo	Cifras	Símbolo	Cifras	Símbolo	Cifras	Símbolo	Cifras
A	1,0	J	2,2	S	4,7	a	2,5
B	1,1	K	2,4	T	5,1	b	3,5
C	1,2	L	2,7	U	5,6	d	4,0
D	1,3	M	3,0	V	6,2	e	4,5
E	1,5	N	3,3	W	6,8	f	5,0
F	1,6	P	3,6	X	7,5	m	6,0
G	1,8	Q	3,9	Y	8,2	n	7,0
H	2,0	R	4,3	Z	9,1	l	8,0

2.4.2 Aplicaciones de los capacitores cerámicos

Los *dieléctricos cerámicos Clase 1* se usan en circuitos que requieren estabilidad y bajas pérdidas (alto Q), particularmente a frecuencias altas por encima de 0,1 a 1 MHz, dentro de toda la gama de temperatura. El dieléctrico más usado es el C0G, con 0 ppm/°C nominales, que en realidad garantiza estar entre ± 30 ppm/°C. Su factor de disipación es menor a 0,1% dentro de toda la gama de temperaturas y hasta varias decenas de MHz. Su coeficiente de tensión es esencialmente cero.

Principales ventajas de los capacitores cerámicos clase 1 sobre los de film:

- generalmente un menor costo
- un mejor control y una más amplia gama de coeficientes de temperatura
- menor inductancia y buenas características de alta frecuencia

Principales desventajas sobre los capacitores de film:

- mayores pérdidas que el film de poliestireno, polipropileno o policarbonato
- menor resistencia de fuga que la mayoría de los capacitores de film

Los *dieléctricos cerámicos Clase 2* se usan en aplicaciones de propósito general, donde importa el pequeño tamaño y donde la estabilidad y la tolerancia son menos importantes. La capacidad es fuertemente dependiente de la temperatura, la frecuencia y la tensión. El factor de disipación es típicamente del 1% al 10% y muy dependiente de la temperatura (disminuye a altas temperaturas) así como de la frecuencia (aumenta a más del 30% a 1 MHz). Se usan para el filtrado del ripple, bloqueo de DC, como elementos de acoplamiento y desacoplamiento en circuitos donde la estabilidad no es un criterio importante, pero sí importan una baja inductancia y una alta frecuencia de auto-resonancia.

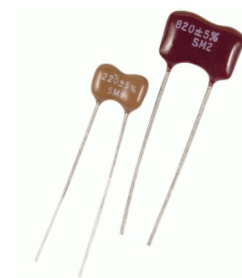
Principales ventajas de los capacitores cerámicos clase 2 en aplicaciones de propósito general:

- menor costo para valores hasta 10 nF
- costo comparable entre 10 nF y 1 μ F
- menor inductancia y mejores características de alta frecuencia, especialmente en comparación con los capacitores electrolíticos.

2.5 Capacitores de mica

Los capacitores de mica-plata se construyen metalizando los electrodos de plata directamente sobre un dieléctrico de mica. Se usan varias capas para obtener la capacidad deseada. Se agregan los terminales de conexión y luego se encapsula el conjunto como protección.

Estos capacitores tienen muy altos niveles de exactitud, estabilidad y bajas pérdidas. En consecuencia, los capacitores de mica-plata son muy usados en aplicaciones de radiofrecuencia, en particular en osciladores y circuitos de filtrado. Aunque su uso no está tan extendido en la actualidad, todavía se recurre a ellos donde su estabilidad, exactitud y bajas pérdidas (que implican un alto Q) son necesarias, pues ofrecen en algunas áreas un desempeño muy superior al de cualquier otro tipo de capacitor.



Principales características:

- *Gran exactitud:* Disponibles con una tolerancia de $\pm 1\%$, mucho mejor que virtualmente cualquier otro tipo de capacitor disponible hoy en día.
- *Coeficiente de temperatura:* El coeficiente de temperatura es mucho mejor que la mayoría de los otros tipos de capacitores. El coeficiente de temperatura es positivo y está normalmente entre 35 a 75 ppm/°C, siendo un valor promedio +50 ppm/°C .
- *Gama de valores:* Los valores de capacidad están normalmente dentro de la gama de unos pocos pF hasta 2 o 3 nF
- *Poca variación de la capacidad con la tensión:* Exhiben muy poca dependencia de la capacidad respecto a la tensión
- *Alto Q:* Muy altos niveles de Q, casi independientes de la frecuencia

2.6 Capacitores de vidrio

Se construyen con una fina cinta de vidrio con un alto contenido de plomo y potasio, la cual se apila alternadamente con láminas de aluminio. Se sueldan las láminas alternadamente a alambres de conexión, se agrega un recubrimiento de vidrio y se sella el conjunto a alta temperatura.

Los capacitores con dieléctrico de vidrio ofrecen niveles de desempeño muy altos, aunque su costo es alto cuando se lo compara con otros tipos de capacitor. Sus valores de capacidad van desde fracciones de pF hasta 2 o 3 nF y se los usa sobre todo en radiofrecuencia (RF). Hay sólo un pequeño número de fabricantes.



Principales ventajas de los capacitores de vidrio sobre otros tipos de capacitor:

- *Bajo coeficiente de temperatura:* Tienen un coeficiente de temperatura bajo, se obtienen a menudo valores de poco más de 100 ppm/°C
- *Sin histéresis:* Algunos tipos de capacitores presentan histéresis en su característica de temperatura. Los capacitores de vidrio siguen la misma curva temperatura/capacidad cuando la temperatura sube o baja.
- *Sin muestras de envejecimiento:* Varios componentes electrónicos cambian su valor con la edad, debido a procesos químicos que tienen lugar en su interior. Este no es el caso de los capacitores de vidrio.
- *Sin ruido piezoeléctrico:* Algunos capacitores exhiben un cierto grado de efecto piezoeléctrico, lo cual puede dar lugar a microfonía en los osciladores. Donde eso sea un problema, el uso de capacitores de vidrio puede ayudar a solucionarlo.
- *Pérdidas extremadamente bajas /alto Q:* Estos capacitores tienen muy bajas pérdidas, pues virtualmente no hay pérdidas en el dieléctrico. Esto posibilita construir circuitos de muy alto Q, suponiendo que los otros componentes, por ej. los inductores, tengan bajas pérdidas.
- *Capacidad de trabajar con altas corrientes de RF:* Algunos capacitores no soportan valores altos de corriente. Los capacitores de vidrio son adecuados para el uso en amplificadores de alta potencia de RF.
- *Soportan altas temperatura:* Pueden operar a temperaturas muy altas, hasta unos 200 °C, sin riesgo de daño o pérdida de performance.

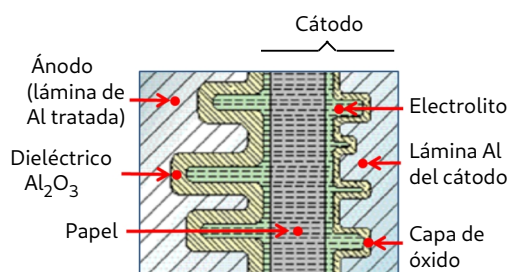
2.7 Capacitores electrolíticos

Estos capacitores se dividen en dos grupos principales: aluminio y tantalio.

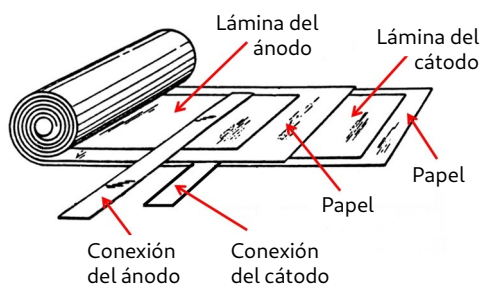
2.7.1 Capacitores electrolíticos de aluminio

Son del tipo de lámina de metal, con un electrolito que puede ser acuoso, en pasta o seco. El ánodo está hecho de una lámina de aluminio de alta pureza, con un espesor de 25 a 100 μm . Usualmente, se somete la lámina a un grabado electroquímico para incrementar su superficie por un factor de 8 a 30 o más. Luego la lámina es anodizada para producir electroquímicamente una capa de óxido de Aluminio (Al_2O_3), el cual es el dieléctrico.

La tensión usada para la etapa final de anodizado (llamada *tensión de formación*) determina el espesor de la capa de óxido y la tensión nominal de funcionamiento (alrededor de $\frac{2}{3}$ de la tensión de formación, que puede ser tan alta como 600 V)



Capacitores electrolíticos de aluminio polarizados no sólidos – La estructura más común usa como conexión para el cátodo una segunda *lámina de aluminio no oxidada*. Esta lámina de aluminio del cátodo sólo sirve como contacto eléctrico para el electrolito (por ej. borato de glicol), el cual es el verdadero cátodo. Para evitar un contacto metálico directo entre ambas láminas, se las separa mediante un papel poroso, el cual sirve al mismo tiempo como depósito para el electrolito líquido. Se sueldan terminales a las láminas del ánodo y del cátodo y se las enrolla formando un capacitor compacto. En construcciones más modernas se apilan las láminas, con una lengüeta en cada lámina, para reducir la ESR y la inductancia.



Los capacitores electrolíticos de aluminio están disponibles en valores de 1 μF a 1 F y tensiones de 3 V a 475 V. Como la película de óxido ha de ser más gruesa, una mayor tensión implica una menor capacidad por unidad de volumen. La tolerancia típica actual es $\pm 20\%$ (antiguamente era -20% a $+80\%$, pues para aplicaciones de acoplamiento y desacoplamiento se debe garantizar una capacidad mínima y una capacidad mayor no suele causar problemas).

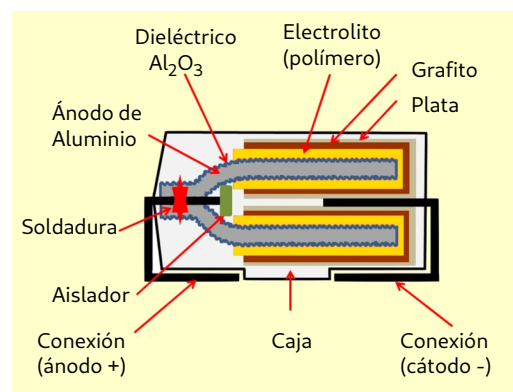
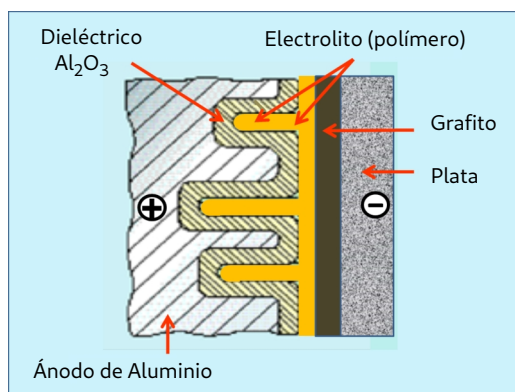
Los capacitores electrolíticos de aluminio polarizados pueden soportar una tensión inversa de hasta 1,5 V sin un efecto notable sobre sus características. Un exceso de tensión aplicado por períodos breves producirá algún cambio en la capacidad, pero no provocará una falla. La exposición a una tensión inversa o a una tensión directa excesiva por un tiempo mayor, produce un calentamiento rápido del capacitor y su ruptura. Cuando se usan como filtro en las fuentes de alimentación con rectificador de AC, para evitar el sobrecalentamiento no se debe exceder la *corriente de ripple de AC* máxima especificada. Las construcciones modernas tienen incorporado un mecanismo para reducir lentamente la presión interna, que puede aumentar si el capacitor se recalienta durante la operación. Los capacitores de hasta 18 mm de diámetro tienen un punto de ruptura en su caja de aluminio y los más grandes disponen de una válvula especial.

La capacidad de los capacitores electrolíticos es altamente dependiente de la temperatura, decreciendo significativamente con las temperaturas bajas. Sobre períodos extensos (años), los capacitores electrolíticos de aluminio sufren una disminución gradual de su capacidad debida a la pérdida de electrolito a través de los sellos (se secan). La capacidad también disminuye significativamente al aumentar la frecuencia, a partir de 1 a 10 KHz. El factor de disipación también aumenta rápidamente para frecuencias mayores a 10 KHz. Estos efectos limitan su uso como capacitores de acoplamiento a frecuencias ≤ 20 KHz. Las pérdidas, expresadas como ESR, aumentan a bajas temperaturas.

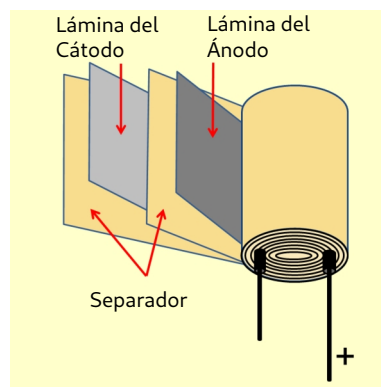
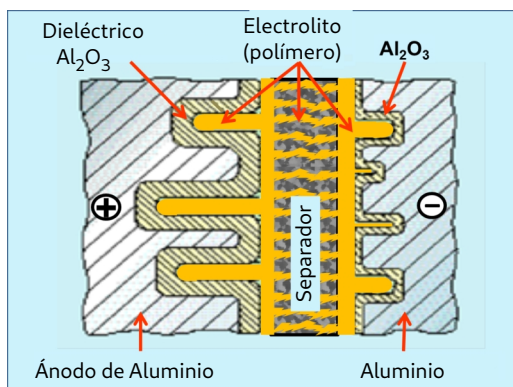
Como la película de óxido no es perfecta, la corriente de fuga es bastante grande, a 25°C va de uno a algunos μA y depende en el tiempo de la aplicación de tensión de DC. La corriente de fuga aumenta significativamente con la tensión aplicada y con la temperatura. Tras largos períodos sin uso, la capa de óxido puede disolverse parcialmente en el electrolito y las fugas volverse catastróficas. Para restaurar el óxido, se debe “reformular” el capacitor aplicando muy gradualmente tensión de DC hasta alcanzar el valor especificado.

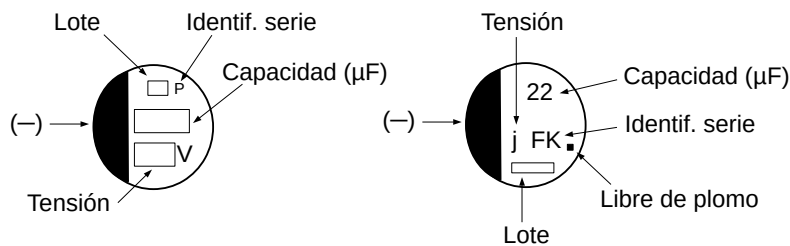
Capacitores electrolíticos de aluminio polarizados sólidos – El cátodo del capacitor está constituido por un electrolito sólido, hecho de un polímero conductor que se amolda a la estructura geométrica del ánodo de aluminio. Estos capacitores tienen una ESR particularmente baja y soportan altas corrientes de ripple, lo cual los hace competitivos con los MLCC, ofreciendo además valores de capacidad más altos e independientes de la tensión y no padecer de microfonismo.

Capacitores electrolíticos de Aluminio-Polímero en chip SMD – Su ánodo consta de una o más láminas de aluminio apiladas, conectadas entre sí a uno de los lados. El contacto con el electrolito de polímero se hace mediante capas de grafito y plata.



Capacitores electrolíticos de Aluminio-Polímero cilíndricos – Se construyen en forma similar a los condensadores de aluminio con electrolito líquido, sólo que en este caso el electrolito es un polímero conductor.





Marcado de los capacitores electrolíticos de aluminio-polímero

Código de tensión	
j	6.3 V
A	10 V
C	16 V
E	25 V
V	35 V
H	50 V
J	63 V
K	80 V
2A	100 V

Aplicaciones de los capacitores electrolíticos de aluminio

Estos dispositivos brindan alta capacidad en poco espacio y a bajo costo. Son polarizados y si se conectan al revés la película de óxido aislante no se forma, causando eventualmente que se recalienten y fallen.

Principales ventajas:

- bajo costo
- gran capacidad por unidad de volumen
- capacidades muy grandes disponibles, hasta 1 F
- impedancia y ESR pueden ser bajas hasta algunos MHz para $C < 100 \mu\text{F}$

Principales desventajas:

- una tolerancia típica de $\pm 20\%$ (antes -20% a $+80\%$)
- capacidad muy dependiente de la temperatura, frecuencia y tiempo de uso/almacenamiento
- altas pérdidas, especialmente a frecuencias $\geq 20 \text{ KHz}$
- alta corriente de fuga (μA), fuertemente dependiente de la temperatura, la tensión y el tiempo
- básicamente, los capacitores electrolíticos son polarizados - el pico de la componente de tensión de AC debe ser menor que la tensión de polarización DC *para asegurarse de que en todo instante el ánodo sea positivo con respecto al cátodo*

Principales aplicaciones:

- filtrado en fuentes de alimentación
- acoplamiento, efectivo hasta unos 20 KHz
- desacoplamiento, bypass, efectivo hasta algunos MHz para $C < 100 \mu\text{F}$

2.7.2 Capacitores electrolíticos de tantalio

Este tipo de capacitor tiene una muy alta densidad de capacidad, hasta tres veces mejor relación capacidad/volumen que los capacitores electrolíticos de aluminio. Se usan ampliamente en equipos electrónicos de producción masiva en los que se requiera pequeño tamaño y gran capacidad.

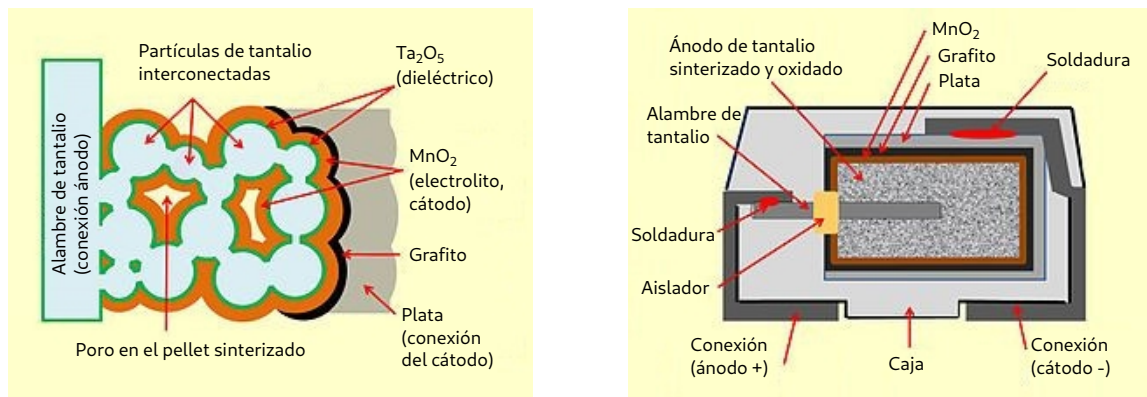
Existen tres tipos de capacitores electrolíticos de tantalio: lámina, electrolito líquido y electrolito sólido.

Capacitores de lámina de tantalio – Se construyen de la misma manera que los capacitores electrolíticos de aluminio. El dieléctrico es pentóxido de tantalio. Están disponibles en capacidades de 0,1 a 3000 μF , a tensiones de hasta 450V. La capacidad es menos dependiente de la temperatura que en los electrolíticos de Al, pero las pérdidas y las fugas, aunque menores en uno o dos órdenes de magnitud que en los de Al, tienen una dependencia de la temperatura similar. Este tipo se usa sólo en la gama de tensiones altas, como una alternativa de mayor calidad pero más costosa a los electrolíticos de Al. Para aplicaciones de baja tensión (< 100 V) se prefieren los otros dos tipos de capacitores electrolíticos de tantalio, que usan ánodos sinterizados.

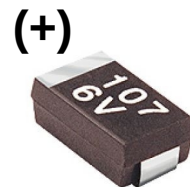
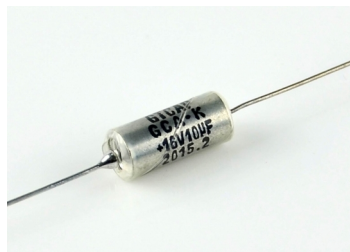
Capacitores de tantalio con electrolito líquido – Tienen la mayor eficiencia volumétrica de cualquier tipo de capacitor. Esto se debe a la superficie muy grande que puede tener un ánodo hecho con un pellet poroso de tantalio. El pellet del ánodo se produce sinterizando tantalio en polvo alrededor de un alambre de tantalio, lo cual asegura un conjunto ligero y poroso. El pellet se anodiza para producir una fina capa de óxido de Ta. El ánodo se encierra en una carcasa, plateada con plata y platino y rellena con un electrolito que actúa como cátodo. Debido a la baja reactividad del óxido de tantalio, se pueden usar electrolitos de alta conductividad y la ESR es baja.

Su principal aplicación es como filtros de fuentes de alimentación. La tensión máxima típica es 125V y la capacidad abarca de 1 a 2000 μF . Aunque tienen una eficiencia volumétrica mucho mayor, los capacitores de tantalio con electrolito líquido tienen dos grandes desventajas respecto a los de tantalio sólidos: la posibilidad de una fuga de electrolito corrosivo y la necesidad de prevenir la aplicación, aún breve, de una tensión inversa (puede producir cortocircuitos catastróficos y a veces explosiones).

Capacitores de tantalio sólidos – Es la variedad más comúnmente usada. El ánodo se fabrica igual que para los capacitores de electrolito líquido. Después de anodizar el pellet, se producen varias películas de material de cátodo sólido mediante pirólisis de nitrato de manganeso en dióxido de manganeso. El MnO_2 es un conductor razonablemente bueno que sirve como primera capa del cátodo, el cual es extendido con grafito coloidal y luego pintado con plata para obtener una buena conexión con el metal del cátodo.

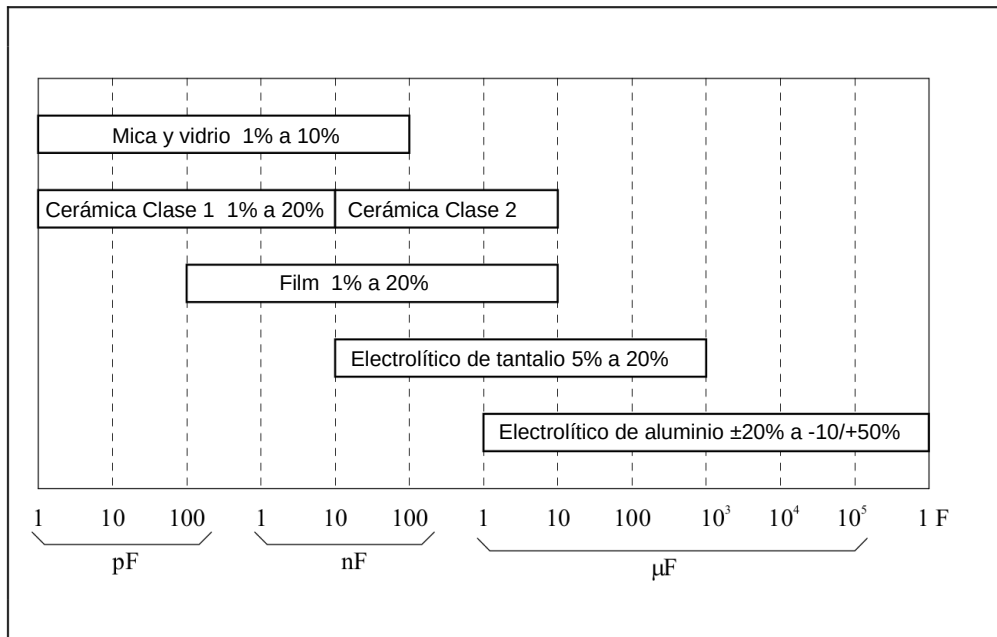


Más del 90% de los capacitores de tantalio producidos son del tipo chip SMD. La polaridad invertida, la tensión demasiado alta o una sobrecarga por corriente de ripple muy alta pueden destruir el dieléctrico y por lo tanto el capacitor, con riesgo de consecuencias catastróficas (cortocircuito, fuego). Los capacitores de tantalio son también sensibles a los flancos de conmutación muy rápidos. Un tipo muy especial de capacitores de tantalio en chip SMD incluye un fusible interno. Esta versión fue desarrollada para, en caso de cortocircuito, desconectar rápidamente al capacitor de la tensión y reducir el riesgo de fuego.

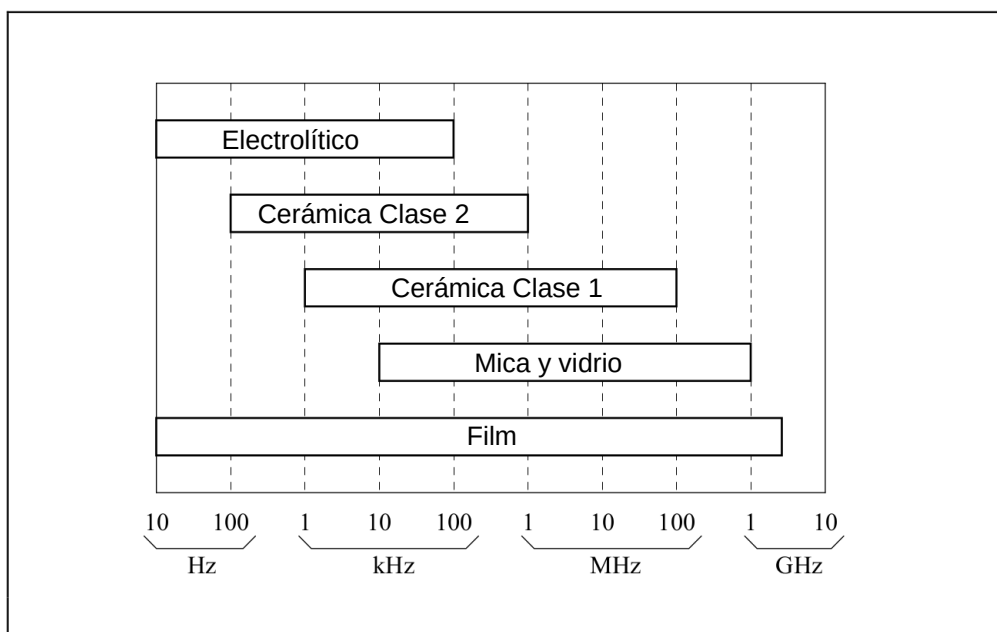


Selección de capacitores

Los siguientes diagramas facilitan la selección del tipo de capacitor adecuado para una aplicación específica, en base a la capacidad, el margen de tolerancia y la gama de frecuencias.



Gamas de capacidades y tolerancias para los distintos tipos de capacitores



Gamas de frecuencias de uso para los distintos tipos de capacitores

Tipo	Ventajas	Desventajas
Poliestireno	Bajo costo Bajo DF Amplia gama de valores Buena estabilidad Tolerancia hasta 0,5%	Temperatura < +85°C Voluminoso para C > 10 nF Inductancia relativamente alta
Polipropileno	Bajo costo Bajo DF Amplia gama de valores Buena estabilidad Tolerancia hasta 1%	Temperatura < +105°C Relativamente voluminoso Inductancia relativamente alta
Policarbonato	Bajo costo Buena estabilidad Amplio margen de temperaturas	Voluminoso Inductancia alta
Sulfuro de polifenileno	Bajo costo Buena estabilidad Amplio margen de temperaturas	Voluminoso Inductancia alta
Teflón	Buena estabilidad Temperatura > +125°C Amplia gama de valores Tolerancia hasta 1%	Voluminoso Inductancia alta Alto costo
Poliéster	Bajo costo Pequeño tamaño	Estabilidad moderada Dependiente frecuencia y temp. Mayor DF de los capacit. de film
Cerámica clase 1	Pequeño tamaño Bajo costo Buena estabilidad Amplia gama de valores Tolerancia hasta 1% Baja inductancia	El DF es mayor que para los capacitores de película a frecuencias <10 KHz
Cerámica clase 2	Amplia gama de valores Baja inductancia	Pobre estabilidad Pobre DF
Mica	Bajas pérdidas en HF Baja inductancia Muy estable Tolerancia hasta 1%	Algo voluminoso Valores bajos (< 10 nF) Alto costo
Electrolítico aluminio	Valores grandes Pequeño tamaño Tensiones altas	Fugas altas Usualmente polarizado Pobre precisión Pobre estabilidad Inductivo
Electrolítico tantalio	Valores grandes Muy pequeño tamaño Inductancia media Fiable	Fugas algo altas Usualmente polarizado Alto costo Pobre estabilidad Pobre exactitud

3. Inductores y sus características

Faraday descubrió que el campo magnético variable de un conductor atravesado por una corriente variable, induce en el mismo conductor una tensión o fuerza electromotriz que se opone a las variaciones de dicha corriente. Mostró además, que esa f.e.m. es proporcional a la velocidad de variación de la corriente que produce dicho campo magnético. Se puede aumentar considerablemente dicha f.e.m. de autoinducción arrollando el alambre conductor en forma de bobina y haciendo que la mayor parte del campo magnético pase a través de la misma.

Se denomina *flujo magnético* Φ al conjunto de las líneas de fuerza, siendo su unidad de medida el Weber. Se define la *densidad de flujo* B , también llamada inducción magnética, como la cantidad de líneas de fuerza que atraviesan una unidad de superficie perpendicular a Φ .

$$B = \mu \frac{N \cdot I}{l}$$

La *permeabilidad magnética* μ depende de que tan buen conductor o no del campo magnético sea el material que sirve como núcleo a la bobina, l es la longitud de la misma, N es el número de espiras e I es la corriente que la recorre. La permeabilidad del vacío es $\mu_0 = 1$.

Un inductor es un componente electrónico pasivo que tiene la propiedad de almacenar energía en su campo magnético y de oponerse a los cambios en la corriente que lo atraviesa. Está compuesto por un alambre conductor arrollado helicoidalmente y se define a su *inductancia* L como la constante de proporcionalidad entre la velocidad de variación de la corriente y la f.e.m. autoinducida.

En un inductor ideal, la relación entre la corriente que lo atraviesa y la tensión presente entre sus terminales es:

$$v = L \frac{di}{dt}$$

Existe una gran variedad de tipos con diferencias sustanciales entre sus características, las cuales dependen de la forma física, del material del núcleo y del alambre conductor usado y su sección.

Las características y prestaciones a considerar cuando se escoge un inductor son: inductancia nominal, tolerancia, resistencia de DC, corriente nominal, corriente de saturación, corriente incremental, capacidad distribuida, frecuencia de auto-resonancia, factor de calidad Q , margen de temperatura de operación.

Inductancia nominal

Un inductor real incluye, además de inductancia, componentes parásitos de resistencia y capacidad que alejan su comportamiento del de un inductor ideal. La inductancia nominal del inductor, es el valor medido a una frecuencia de prueba f_L especificada. Se expresa en Henry y sus submúltiplos mH, μ H y nH.

Tolerancia

La tolerancia indica la máxima variación en el valor de la inductancia, medida a la frecuencia de prueba y a temperatura ambiente.

Resistencia de DC – DCR

Es la resistencia del bobinado del inductor, medida con corriente continua y usualmente a una temperatura de 25°C. Normalmente se especifica el valor máximo DCR_{max} . La corriente usada para la medición debe ser bastante menor que la corriente nominal del inductor.

Corriente nominal

Es el valor de corriente DC o AC al cual puede operar constantemente el inductor bajo condiciones normales de operación. Se basa en el máximo aumento admisible de temperatura del inductor a la máxima temperatura ambiente especificada.

Corriente de saturación - I_{sat}

En un inductor con núcleo de aire existe una relación lineal entre la corriente que lo atraviesa y la densidad del flujo magnético. En los inductores con núcleo ferromagnético, cuando la densidad del flujo magnético **B** sobrepasa un cierto valor crítico, para lograr un mismo incremento ΔB se hace necesario un aumento de la corriente mucho mayor del necesario a valores bajos de **B**. A este fenómeno se lo llama *saturación* y se manifiesta como una disminución en el valor de la inductancia. La *corriente de saturación* es aquel valor de la corriente DC para el cual la inductancia L disminuye 10% o 20%, según se especifique. Se recomienda dimensionar el inductor de modo que I_{sat} sea al menos 1,5 veces la máxima corriente a la que se verá expuesto en el circuito.

Corriente incremental

Es la corriente de polarización DC que al circular por el inductor, hace que el valor de la inductancia caiga un 5% de su valor inicial con polarización cero.

Capacidad parásita

Cuando dos conductores están próximos, existe un acoplamiento electrostático entre ellos. En un inductor, el acoplamiento entre sus espiras da lugar a capacidades parásitas distribuidas a lo largo del mismo. Su efecto se puede representar mediante una capacidad conectada en paralelo con el inductor.

Frecuencia de auto-resonancia – SRF

La capacidad parásita y la inductancia L conforman un circuito resonante paralelo. A esta frecuencia, el componente se comporta como una resistencia muy alta. A frecuencias superiores a la SFR, el componente se comporta como un capacitor. Por ello, se lo debería usar a frecuencias muy por debajo de la SRF.

Factor de calidad Q

El Q de un inductor es una medida de la eficiencia con que el mismo almacena energía cuando es recorrido por una corriente alterna senoidal y se lo define como:

$$Q_L = \frac{X_L}{R} = \frac{2\pi f L}{R}$$

Tanto X_L como R son función de la frecuencia, por lo que se debe indicar a que frecuencia se especifica el Q . Típicamente, X_L aumenta con la frecuencia más rápidamente que R para las frecuencias bajas y viceversa a las frecuencias altas. El resultado es que la curva del Q en función de la frecuencia, tiene forma de campana. R comprende fundamentalmente la resistencia de DC, las pérdidas en el núcleo y el efecto pelicular en el alambre.

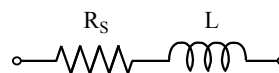
Temperatura de operación

Se define la máxima temperatura de operación, como la máxima temperatura del inductor para cualquier combinación de temperatura ambiente más el aumento de temperatura debido al calentamiento por el paso de la corriente.

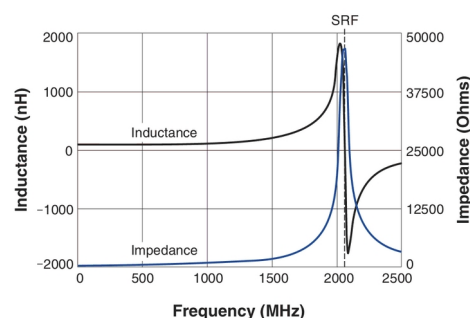
3.1 Modelos del inductor

El inductor es el componente electrónico pasivo aparentemente más simple, pero es al mismo tiempo el menos ideal y por lo tanto el más difícil de modelar.

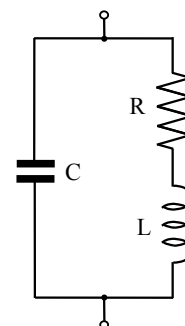
En baja frecuencia, es posible modelar al inductor real como un inductor ideal L con una resistencia en serie R_S de valor igual a la resistencia DC del alambre.



En alta frecuencia se debe tener en cuenta el aumento de la resistencia debido a los efectos pelicular y de proximidad, así como también la capacidad parásita, que se combina con la inductancia nominal para formar un circuito resonante paralelo. La figura muestra la inductancia en función de la frecuencia para un inductor típico. La inductancia *aparente* aumenta hasta alcanzar un pico, es cero a la SRF y por encima de ella, el inductor se vuelve capacitivo.

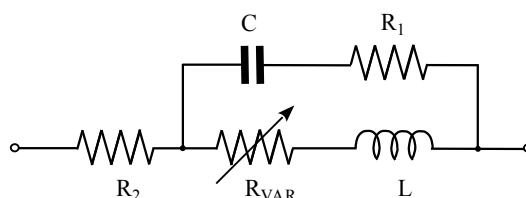


Al incluir en el modelo la capacidad distribuida C , se refleja correctamente que la inductancia medida aumentará al aproximarse la frecuencia a la SRF. La resistencia R no es la resistencia DC, si no que es un valor diferente que refleja el comportamiento del inductor a la frecuencia de trabajo.



Este modelo suele ser adecuado para la mayoría de los usos prácticos.

Para modelar un inductor dentro de un margen amplio de frecuencias, es necesario representar la dependencia de R de la frecuencia. Los fabricantes de inductores han desarrollado modelos más complejos para ser usados con simuladores como SPICE. En la figura se ve un ejemplo de estos modelos. La constante k se relaciona con el efecto pelicular y otras pérdidas del inductor.



$$R_{VAR} = k \cdot \sqrt{f}$$

3.2 Inductores con núcleo de aire

Son inductores bobinados en el aire (auto-soportados), o sobre formas de material aislante (porcelanas, cerámicas, etc.) las que pueden tener aristas para disminuir los puntos de contacto, o también estar fileteadas para asegurar la estabilidad mecánica de las espiras.

Inductores de una sola capa

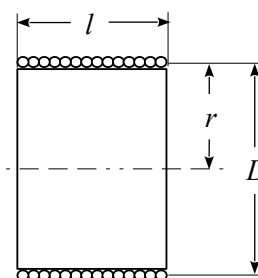
Se caracterizan por la constancia del valor de su inductancia, que se puede calcular con buena aproximación. El rango de utilización aproximado es de 1,5 a 200 MHz. Se trata, en general, de bobinas de ejes rectos, construidas con alambre macizo, o en algunos casos con caño de cobre plateado. La capacidad distribuida es mínima dado que un extremo está separado del otro y la separación entre espiras puede hacerse grande. Además el efecto de proximidad es muy bajo, de modo que se pueden obtener Q elevados y utilizarlos en altas frecuencias.

La inductancia de estos inductores se puede calcular mediante la fórmula de Wheeler:

Esta fórmula tiene un error cercano al 1% cuando se cumple la condición: $l > 0,8 \cdot r$

$$L = \frac{0,394 \cdot r^2 \cdot N^2}{9r + 10l}$$

L - inductancia en μH
 N - número de espiras
 r - radio en cm
 l - longitud en cm



Si las espiras están bobinadas juntas, $l > r$ y f es la frecuencia de trabajo en Hz, es posible estimar¹ el Q como:

$$Q = 0,075 \frac{D \cdot \sqrt{f}}{1 + 0,45 \frac{D}{l}}$$

La capacidad parásita depende del diámetro del inductor y se la puede estimar² como:
 Cuando $0,7 < l/D < 1,5 \Rightarrow H \approx 0,46$

$$C_d = H \cdot D$$

$$H = 0,1126 \frac{l}{D} + 0,08 + \frac{0,27}{\sqrt{l/D}}$$

Es usual elegir el alambre para una densidad de corriente de 1 a 4 A/mm²

¹ The Q-factor of Single-layer Coils, Wireless Engineer June 1949

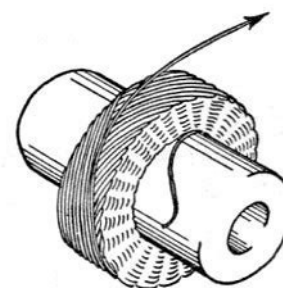
² HF Resistance and Self-capacitance of Single-layer Solenoids, Wireless Engineer March 1947

Inductores multicapa

Se construyen para inductancias superiores a 150 μH y frecuencias inferiores a 1,5 MHz. Para evitar aumentar la capacidad parásita, se debe evitar que las espiras eléctricamente distantes estén juntas. Ello lleva a 3 tipos de bobinados:



El devanado universal se caracteriza porque el conductor se enrolla transversalmente. Durante el proceso de arrollamiento, un guía-hilos conduce al conductor de un lado a otro de la bobina. El conductor generalmente es delgado o de varios hilos (Litz) aislado con seda, o, para facilitar la adherencia, con algodón ó nylon. Las pérdidas por corrientes inducidas

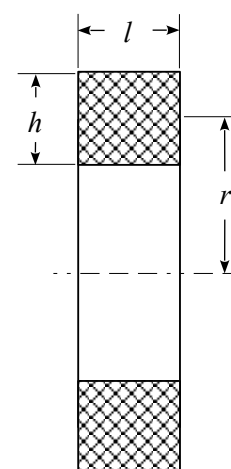


en un conductor por el que circula una corriente AC, se pueden reducir dividiendo al cable en conductores aislados entre sí, incrementando la resistencia a las corrientes inducidas al eliminar la proximidad. En el alambre Litz, se entrelaza y retuerce los alambres aislados de modo que cualquier par de ellos sean sucesivamente transpuestos relativamente al campo magnético producido por las corrientes inducidas.

La inductancia de los inductores multicapa se puede calcular usando la 2ª fórmula de Wheeler: La misma tiene un error cercano al 1% cuando la bobina tiene aproximadamente la forma de la figura, de modo tal que los tres términos en el denominador sean aproximadamente iguales.

$$L = \frac{0,315 \cdot r^2 \cdot N^2}{6r + 9l + 10h}$$

L - inductancia en μH
 N - número de espiras
 r - radio en cm
 l - longitud en cm
 h - altura en cm



Es usual elegir el alambre para una densidad de corriente de 2 A/mm²

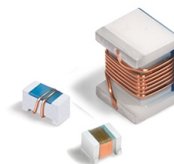
3.3 Inductores con núcleo de otros materiales

Todas las sustancias son conductoras del flujo magnético en mayor o menor grado. Las llamadas sustancias diamagnéticas tienen un μ pequeño comparado con 1 ($\mu < \mu_0$), las paramagnéticas tienen un μ levemente mayor que 1 ($\mu > \mu_0$) y las ferromagnéticas tienen un μ mucho mayor que 1 ($\mu \gg \mu_0$).

3.3.1 Inductores con núcleo cerámico

La cerámica es uno de los materiales más comúnmente usados como núcleo de inductores. Su principal propósito es servir de soporte al bobinado y eventualmente a los terminales. La cerámica tiene un coeficiente de expansión térmica muy bajo, lo cual permite una estabilidad relativamente alta de la inductancia. La cerámica no tiene propiedades magnéticas, por lo que no hay un incremento en la permeabilidad debido al material del núcleo. Por ello, a menudo se alude a los inductores de núcleo cerámico como “de núcleo de aire”.

Estos inductores se emplean sobre todo en aplicaciones de alta frecuencia, donde se requieren bajos valores de inductancia, pérdidas en el núcleo muy bajas y altos valores de Q.



3.3.2 Inductores con núcleo laminado

Se construyen apilando láminas una sobre la otra. Estas láminas suelen ser de hierro al silicio y su superficie está aislada. Su uso principal es como filtros o bobinas de choque. Su campo de aplicación se extiende desde los 10 Hz a los 50 KHz.



3.3.3 Inductores con núcleo de ferrite

El ferrite es un material magnético que consiste en una mezcla de óxido de hierro y otros elementos, a la cual se le da una estructura molecular cristalina. Dicha estructura cristalina se logra cociendo el material a muy alta temperatura durante un tiempo y con un perfil específicos.

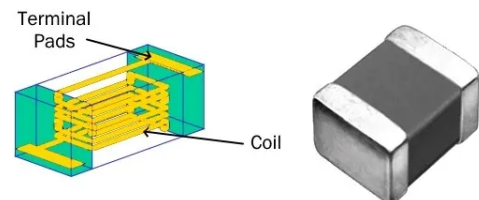


3.3.4 Inductores SMD multi-layer

Estos inductores tienen múltiples capas de trazas conductoras bobinadas una sobre la otra y montadas dentro de un cuerpo. Si el cuerpo es de ferrite, éste blindará al componente magnéticamente, reduciendo significativamente la interferencia y el cross-talk externos. La capacidad parásita aumenta con el número de espiras por lo que, dependiendo del valor de la inductancia, pueden usarse a frecuencias desde algunos MHz hasta unos pocos cientos de MHz. Las pérdidas en el núcleo de ferrite a muy altas frecuencias reducen el valor del Q. Son especialmente adecuados para construir filtros y circuitos resonantes cuando se requiere una baja interferencia debida a señales externas.

Los inductores multi-layer con cuerpo de cerámica se construyen para la banda de frecuencias de algunos cientos de MHz hasta la región de los GHz.

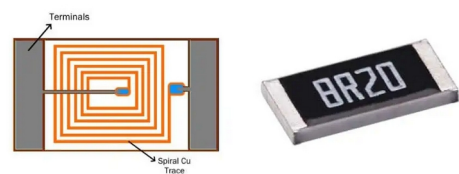
Debido a su compacta construcción SMD, los inductores multi-layer son muy adecuados para las aplicaciones con alta densidad de componentes y se los emplea en equipos de comunicaciones móviles.



3.3.5 Inductores Thin Film

Este tipo de inductor consiste en un substrato delgado de ferrite u otro material magnético, sobre el cual se coloca una traza conductora de cobre en forma de espiral. Esta construcción tiene buena estabilidad y resistencia a las vibraciones.

Gracias a su gran precisión, desempeño y tamaño compacto, se los usa en dispositivos para comunicaciones móviles, redes inalámbricas, amplificadores, fuentes de alimentación, VCOs, etc.



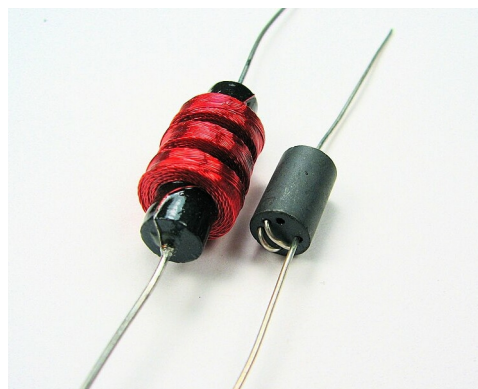
3.3.6 Inductores con núcleo de polvo de hierro

El polvo de hierro es un material magnético que tiene inherentemente un gap distribuido de aire. Comparado con otros materiales, como por ej. el ferrite, este gap distribuido permite que el núcleo conduzca un flujo magnético de mayor intensidad. Esto permite que una corriente de DC más alta circule a través del inductor antes de que el núcleo se sature. Estos núcleos se componen casi en un

100 % de hierro. Las partículas de hierro, aisladas una de otra, se mezclan con un aglutinante fenólico o epóxico y son comprimidas para darle al núcleo su forma final. Los núcleos de polvo de hierro suelen ser la alternativa de menor costo y su permeabilidad tiene típicamente un coeficiente de temperatura más estable que el ferrite.

3.4 Chokes

Un choke es un inductor construido específicamente para bloquear la corriente alterna de alta frecuencia presente en un circuito eléctrico, permitiendo al mismo tiempo el paso de la corriente continua y de las señales de baja frecuencia. Consisten usualmente en una bobina de alambre aislado, devanada sobre un núcleo magnético, aunque algunos son una “perla” de ferrite alrededor de un alambre. Al igual que los demás inductores, los chokes resisten los cambios en la corriente que pasa a través de ellos, oposición que aumenta con la frecuencia y se reduce por encima de su frecuencia de autoresonancia. Los chokes no requieren de las técnicas constructivas que se usan para reducir la resistencia de los inductores que se emplean en los circuitos sintonizados y que permiten obtener un alto Q.



3.5 Campos de uso aproximados de los diferentes inductores

una capa	multicapa	núcleo ferromagnético	núcleo de ferritas blandas
$f = 1,5$ a 200 MHz	$f = 100$ KHz a 2 MHz	audiofrecuencias	DC a microondas
$Q = 100$ a 500	$Q = 40$ a 150	$Q = 0,5$ a 10	
$L = 1$ a 500 μ H	$L = 500$ μ H a 100 mH	$L = 1$ a más de 100 H	

Bibliografía

- Terman, F. E., (1946). *Manual del Radio Ingeniero*
- Langford-Smith, F., (1953). *Radiotron Designer's Handbook*. RCA
- Vishay, *Basics of Linear Fixed Resistors*, Application Note
- Meeldijk V., *Selecting the Best Resistor/Capacitor*, Radio-Electronics Annual 1986
- WIMA, (2019). *Filmkondensatoren für die Elektronik*
- Analog Devices Inc, *Avoiding passive components pitfalls*. Application Note AN-348
- Coilcraft, *Getting Started: An Introduction to Inductor Specifications*
- Coilcraft, *Modeling Coilcraft RF Inductors*
- Vishay, *Inductors 101*, Instructional Guide VMN-SG2139-1203
- TDK, (2008). *Inductors – General technical information*
- Green I., (2001). *RF-inductor modelling for the 21st century*. EDN magazine september 2001
- Wheeler, H., *Simple Inductance Formulas for Radio Coils*. Proceedings of the IRE, October 1928
- Medhurst, R., *HF Resistance and Self-capacitance of Single-layer Solenoids*, Wireless Engineer
Februay/March 1947
- The Q-factor of Single-layer Coils*, Wireless Engineer June 1949
- UTN – Facultad Regional de Mendoza, Diversos repartidos de la Cátedra de Tecnología Electrónica
- European Passive Components Institute, *ABC of CLR*, <https://epci.eu/category/abc-of-clr/>
- NASA, *Workmanship Standards*,
<https://workmanship.nasa.gov/lib/insp/2%20books/frameset.html>
- Programa para cálculo de inductores - <https://coil32.net/>