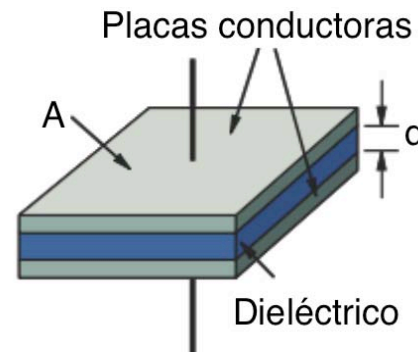


# CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LOS COMPONENTES PASIVOS IV: CONDENSADORES

## Condensador ideal.

Un condensador ideal es un elemento puramente reactivo, que almacena energía en el campo eléctrico generado por la carga almacenada en sus electrodos. El condensador ideal no disipa energía.

Por construcción el condensador esta formado por dos placas paralelas, conectadas cada una a uno de los dos conectores del condensador y separadas por un material dieléctrico (no conductor).



Esquema de un condensador básico.

Las placas conductoras, o armaduras pueden ser de dos tipos, las armaduras completas, que son piezas metálicas totalmente independientes del dieléctrico y las armaduras metalizadas, que son delgadas capas de metalización aplicadas directamente sobre el material dieléctrico, que en este caso generalmente tiene la forma de una tira larga de material plástico.

El material dieléctrico está caracterizado por la rigidez o resistencia dieléctrica, que es el voltaje máximo que puede ser aplicado a una capa del material, sin que se produzca perforación, viene dada en voltios o kilovoltios por unidad de espesor, y por la constante dieléctrica  $K$ , que relaciona la capacidad de un condensador que emplea el aire como dieléctrico y el mismo usando el material considerado.

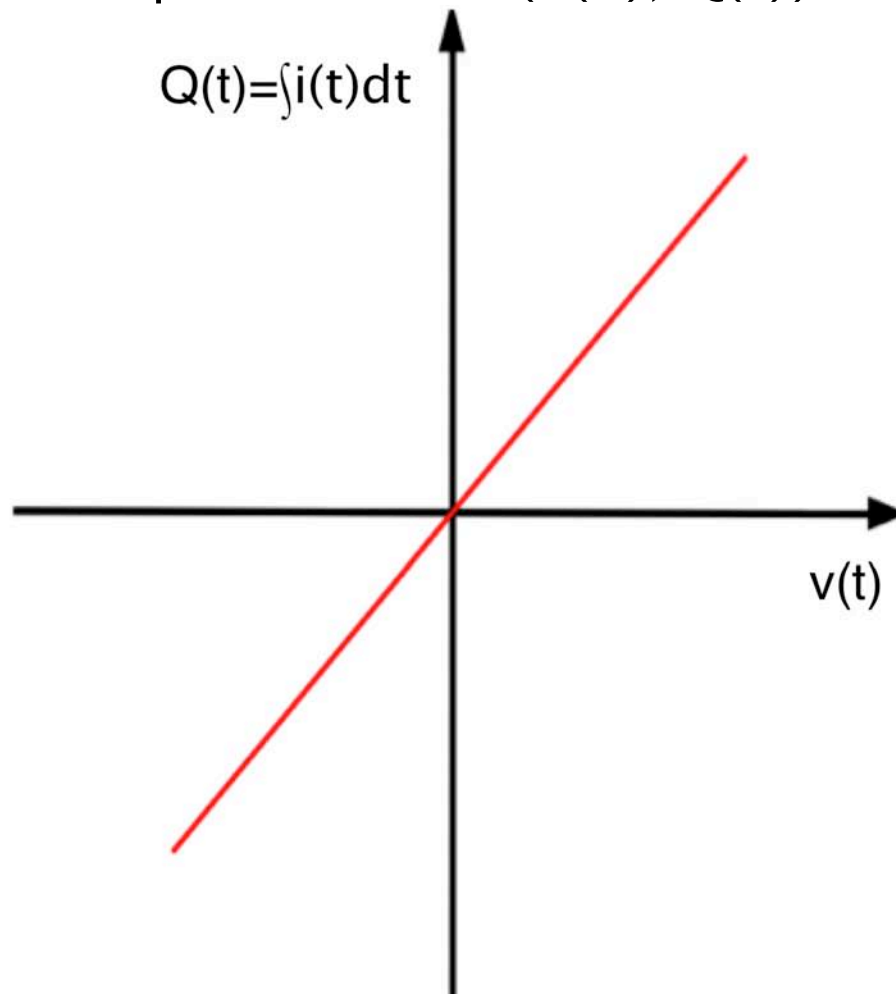
La cantidad de carga  $Q$  (en coulombios, C) almacenada en el condensador es:

$$Q(t) = Cv(t) = \int_0^t i(\tau) d\tau$$

$$v(t) = \frac{1}{C}Q(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau$$

Donde  $C$  es la capacitancia del condensador en faradios (F),  $V$  es la tensión entre las placas, en voltios (V) e  $i$  es la corriente que ha circulado por el condensador, en amperios. (A).

La ecuación característica del condensador ideal se puede graficar en el plano de fase  $(v(t), Q(t))$  como:



La impedancia de un condensador ideal  $Z_C$  es:

$$Z_C(s) = \frac{1}{sC}$$

La impedancia instantánea de un condensador ideal,  $Z_C(\infty)$  es:

$$Z_C(\infty) = \lim_{s \rightarrow \infty} Z_C(s) = \lim_{s \rightarrow \infty} \frac{1}{sC} = 0$$

Lo que implica que, transitoriamente, el condensador se comporta como una fuente de tensión ideal cuyo valor es el de la tensión producida por la carga que esté almacenada en ese instante en el condensador.

Dada la relación integral entre el voltaje de un condensador y la integral de la corriente acumulada, cambios bruscos del voltaje en el condensador requieren valores de corriente muy elevados; en el límite, para lograr un cambio en escalón del voltaje en un condensador se debería cumplir:

$$\frac{dv_C}{dt} \rightarrow \infty \Rightarrow i_C \rightarrow \infty$$

Por lo tanto un condensador no puede ser conectado directamente a una fuente ideal de voltaje capaz de producir cambios en escalón.

Por la misma razón no se debe cortocircuitar los terminales de un condensador cargado.

La energía eléctrica  $E_c$ , almacenada en el campo eléctrico de un condensador de capacitancia  $C$ , es función de la carga  $Q$  acumulada en las placas.

$$E_c = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} CV^2$$

Esta energía conservativa tiende a mantener constante el valor de la tensión entre los terminales del condensador.

En régimen permanente y con excitaciones periódicas el valor promedio de la corriente en un condensador ideal es:

$$\bar{I}_C = \frac{1}{T} \int_0^T i_C(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T C \frac{v_C(t)}{dt} dt = C [\Delta v_C]_0^T = 0$$



La capacitancia C del condensador viene dada por:

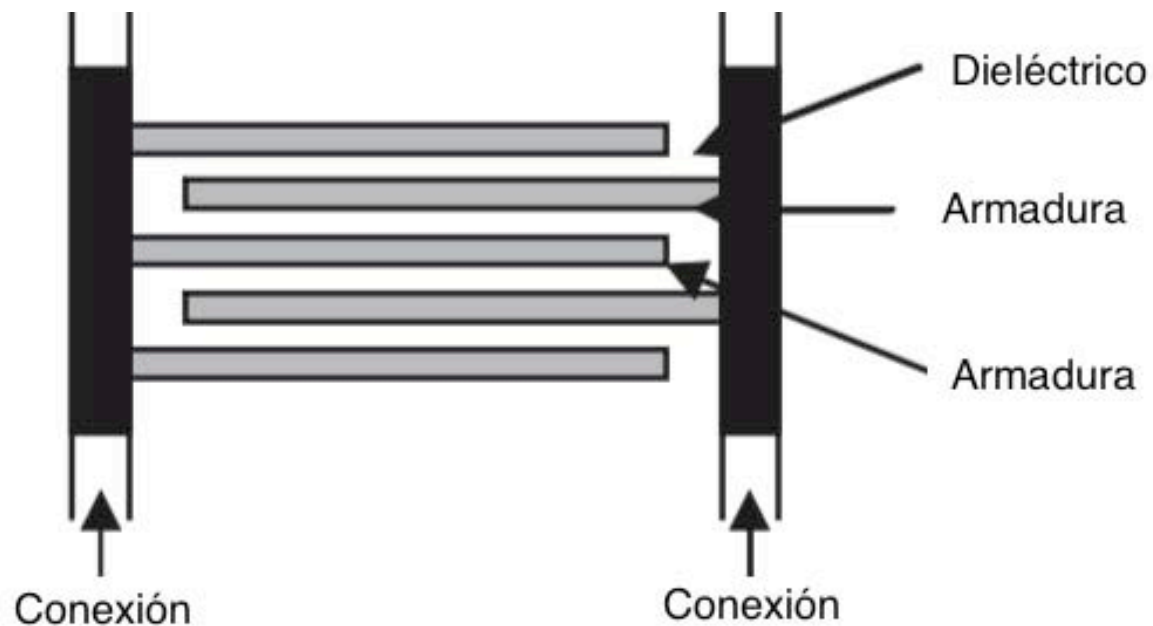
$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d}$$

Donde C es la capacitancia en faradios,  $\epsilon_0$  es la constante dieléctrica del vacío en faradios/m (F/m),  $\epsilon_r$  es la constante dieléctrica relativa del material dieléctrico que separa las placas, A es la superficie de las placas en metros<sup>2</sup> (m<sup>2</sup>) y d es el espesor del material dieléctrico en metros (m).

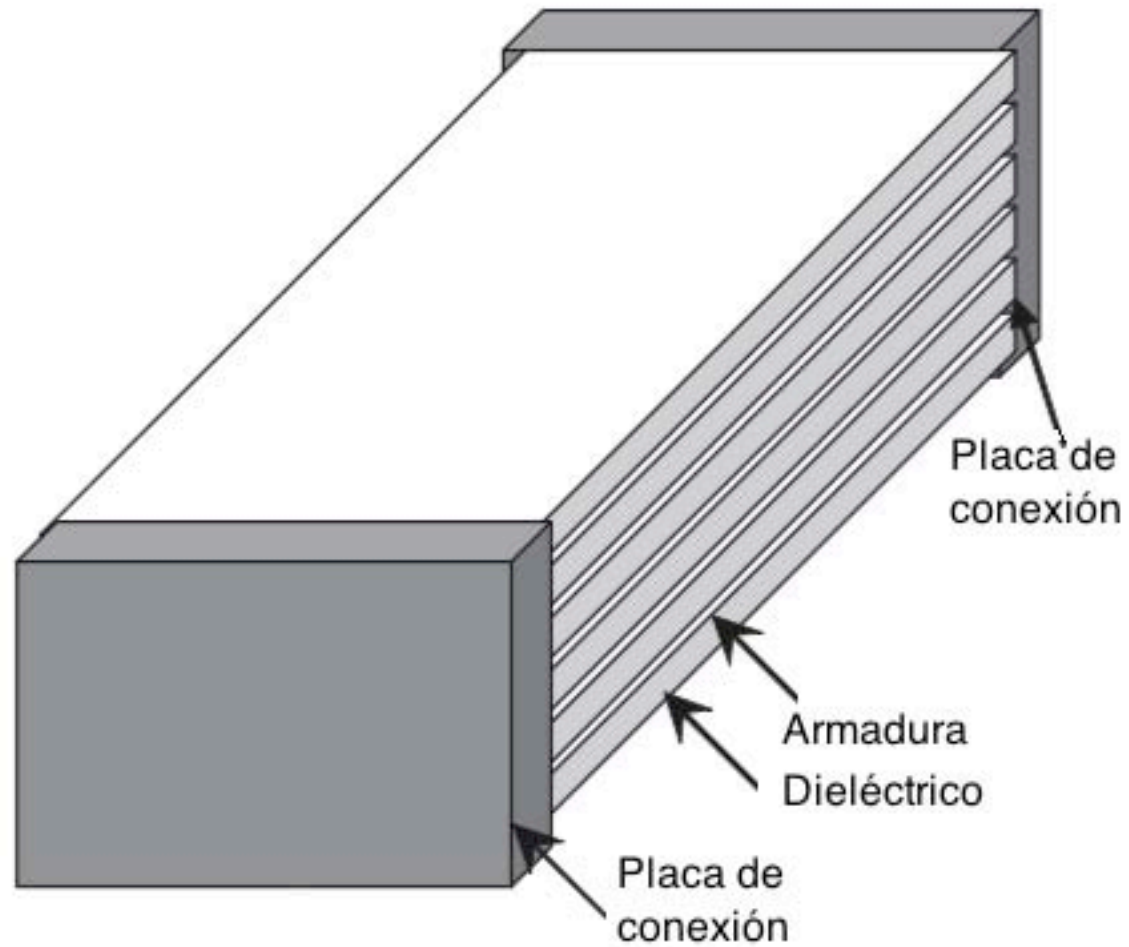
Un alto valor de capacidad requiere aumentar el área de las placas, seleccionar un material dieléctrico con una constante dieléctrica elevada y, en igualdad de estas condiciones, reducir el espesor del dieléctrico.

El aumento en la superficie de las placas se puede lograr de dos maneras:

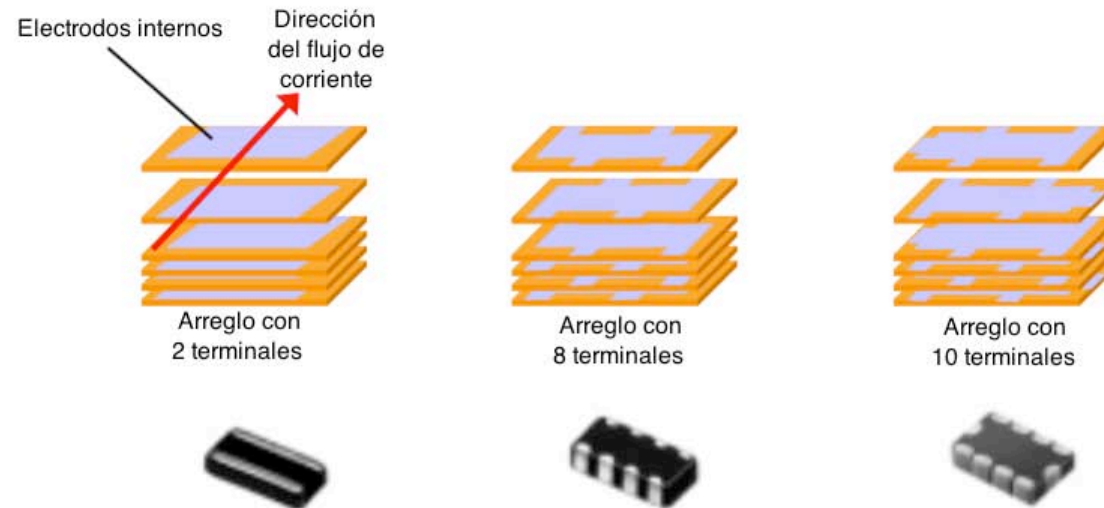
1.- Conectando múltiples placas en paralelo dentro del cuerpo del condensador.



Esquema de conexión interna de un condensador multicapas.

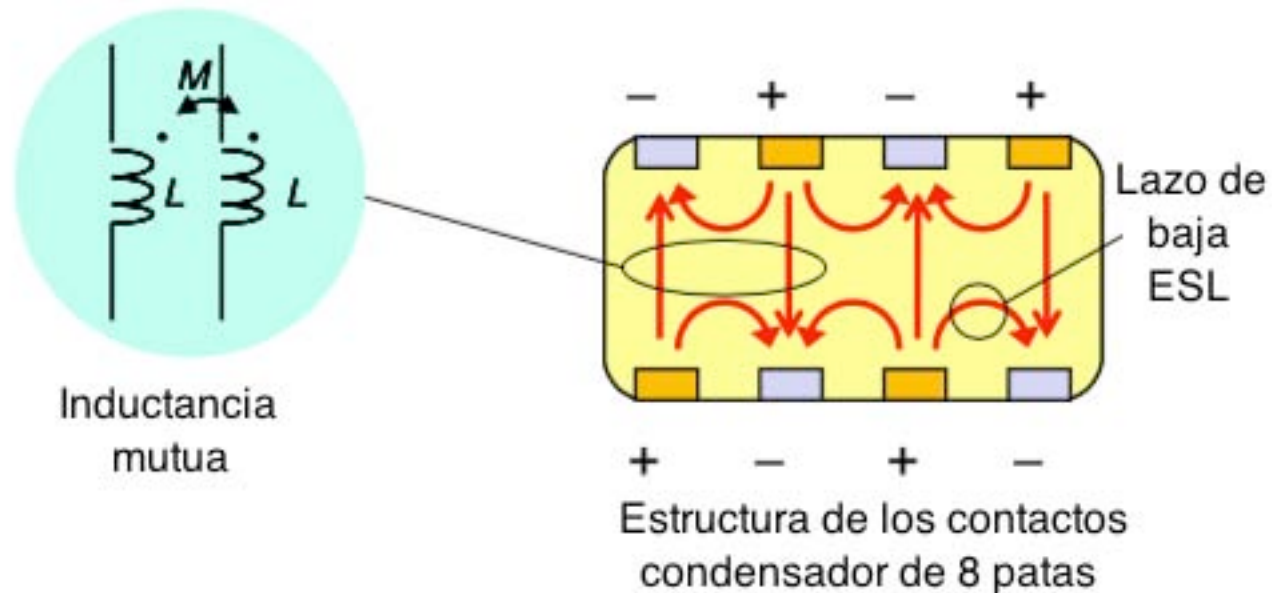


Condensador multiplaca, implementación práctica (configuración "Chervil").



## Condensadores tipo "chip" de montaje superficial de baja ESL

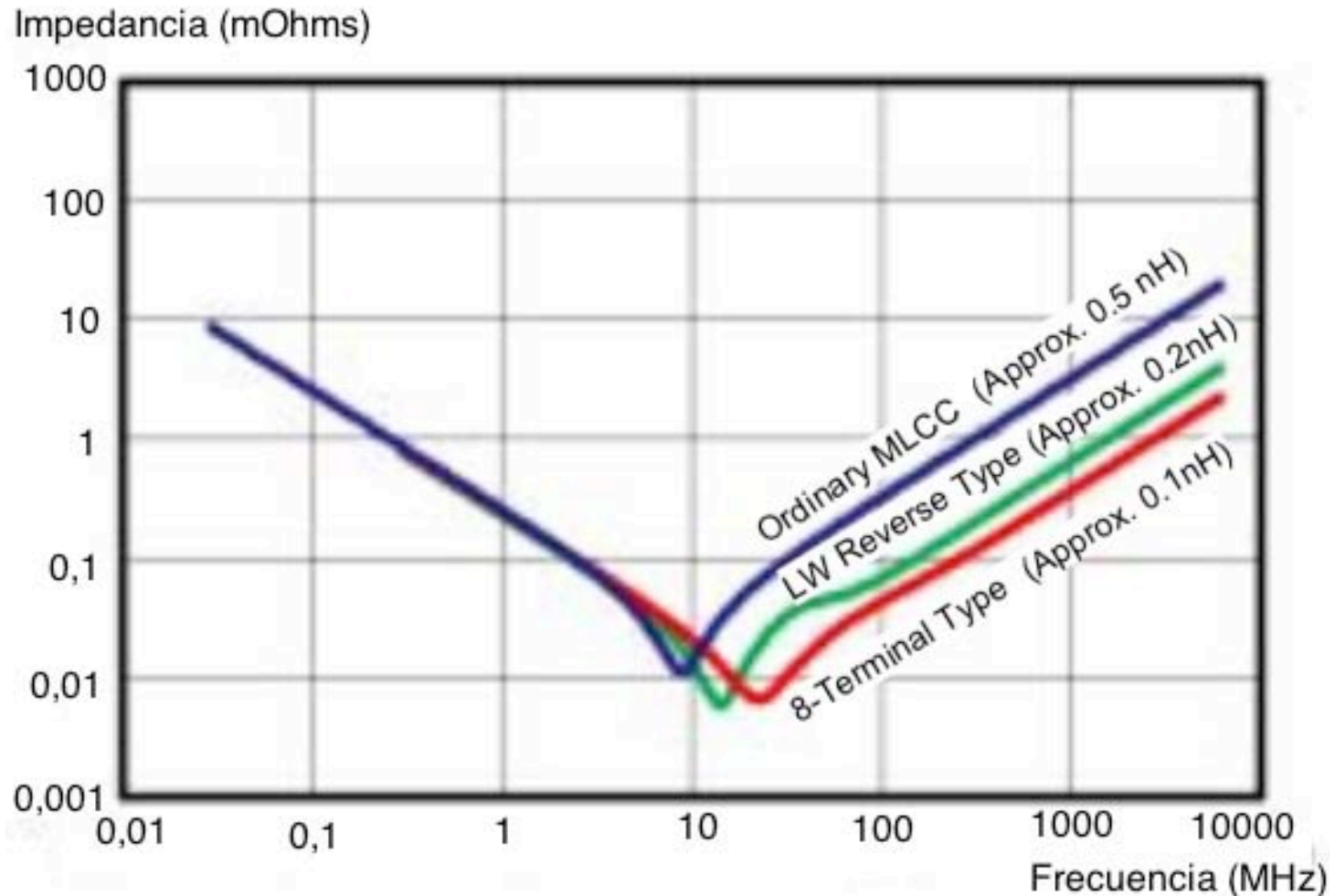
La estructura de los condensadores multicapa puede ser modificada incluyendo múltiples conexiones para reducir significativamente la inductancia parásita, ESL, del condensador resultante, especialmente para los condensadores tipo "chip" de montaje superficial.



Estructura de contactos de un condensador tipo chip multi-pata.

Asumiendo que la inductancia  $L$  en cada uno de los posibles caminos sea igual la inductancia resultante,  $L_{part}$  será:

$$L_{part} = 2L - 2M$$

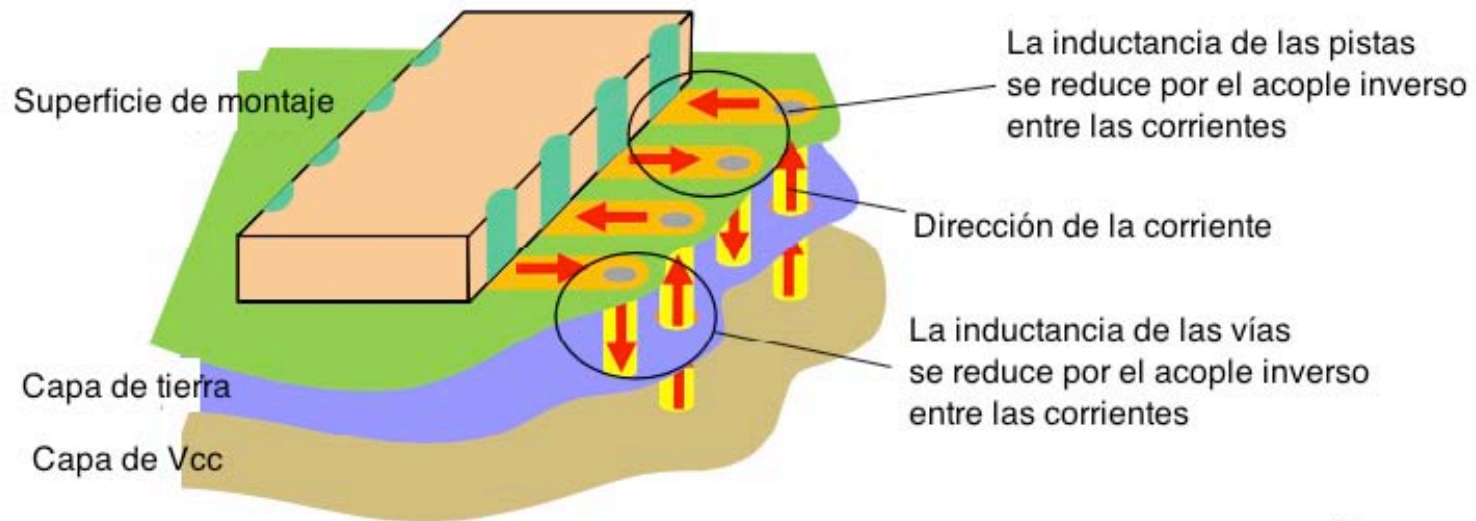


Gráfica de impedancia contra frecuencia, condensadores tipo chip.

Trazo azul: condensador ordinario (ESL del orden de 0,5nH).

Trazo verde: condensador de baja ESL de dos terminales (ESL del orden de 0,2nH).

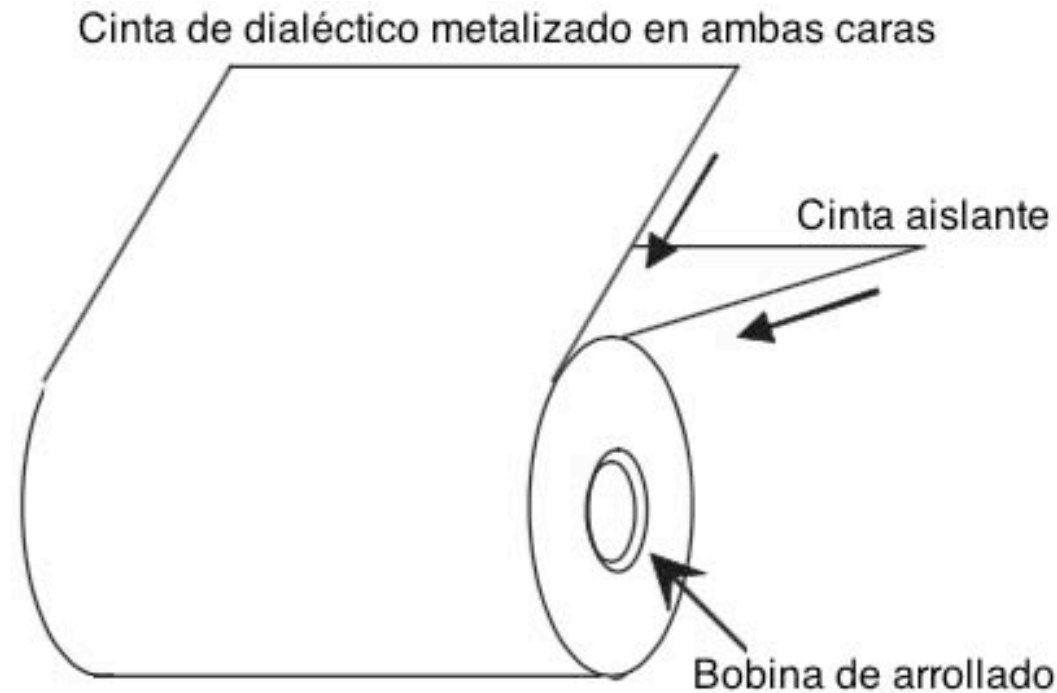
Trazo rojo: condensador de baja ESL de ocho terminales (ESL del orden de 0,1nH).



Conexión d un condensador de montaje superficial de 8 terminales en elcircuito impreso.

Las corrientes entrelazadas reducen por efecto de las inductancias mútuas el calor efectivo del campo generado y por consiguiente la inductancia parásita no solo del condensador sino también la del circuito de conexión.

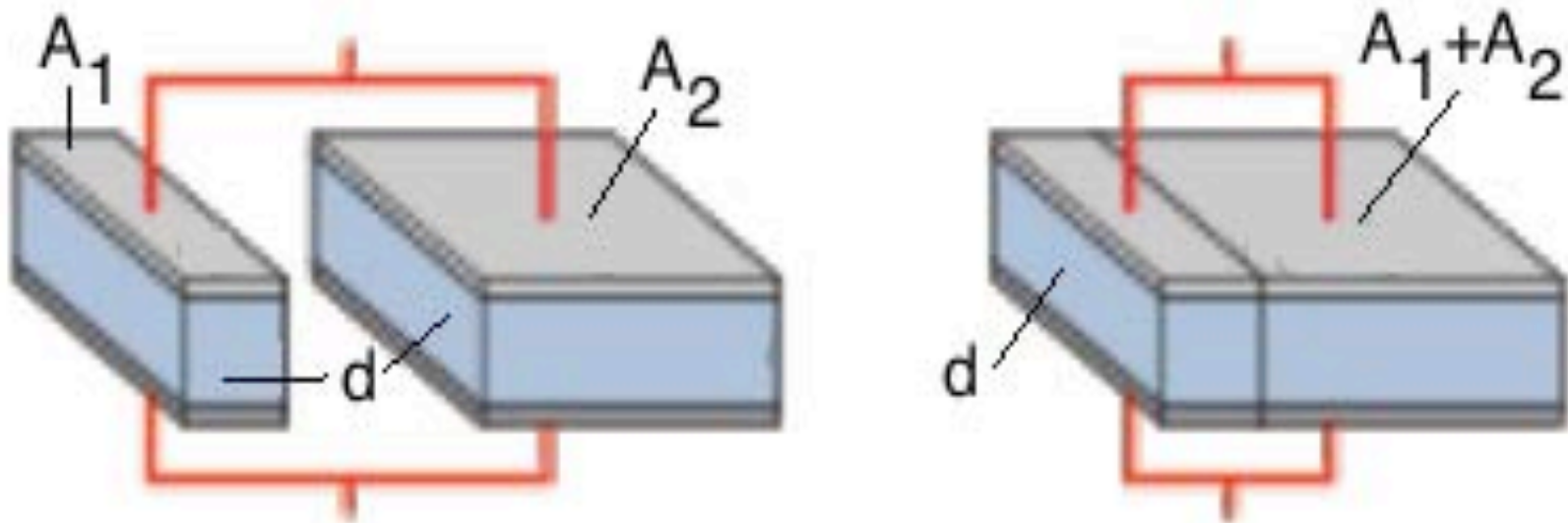
2.- Enrollando sobre si misma una cinta lo suficientemente larga de dieléctrico metalizado.



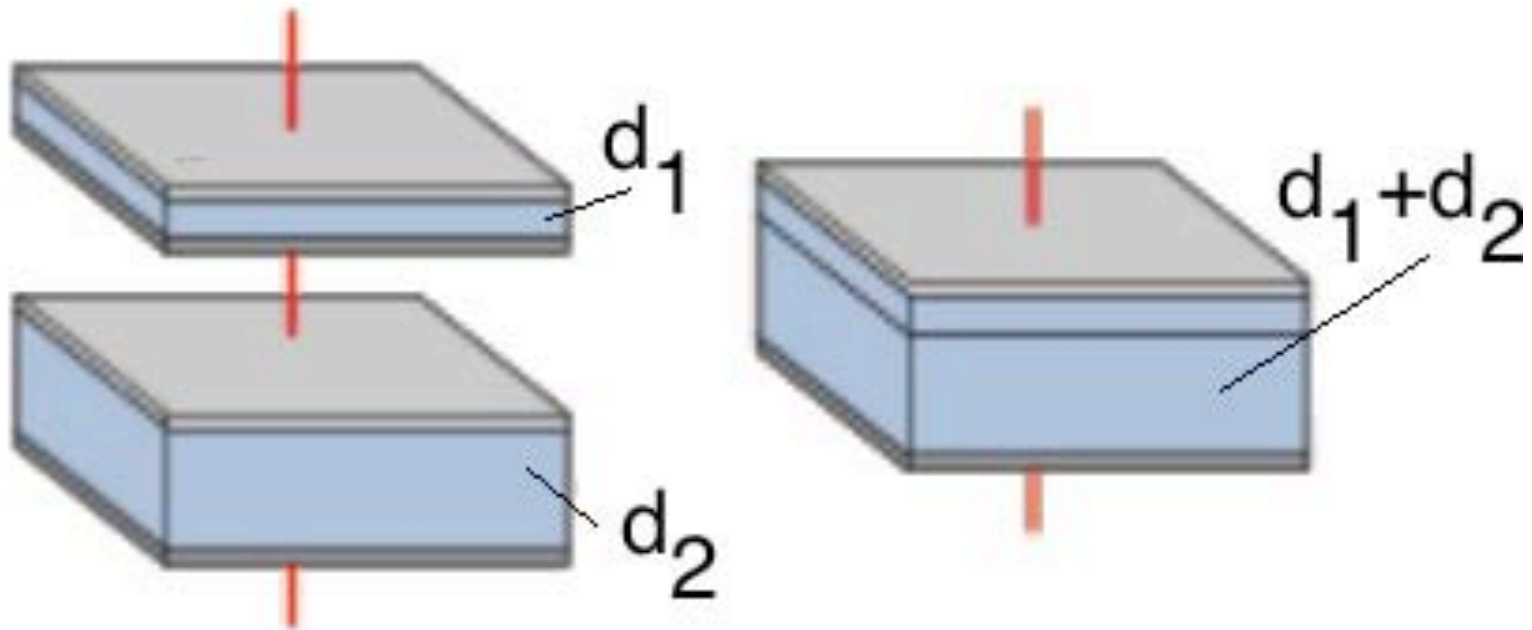
Esquema de construcción de un condensador de cinta dieléctrica metalizada.



Esta estructura es mas sencilla y barata de fabricar, pero produce un condensador con un valor relativamente elevado de inductancia parásita (ESL).



Dado que la capacidad es proporcional al área de las placas, el resultado de conectar condensadores en paralelo, lo que aumenta el área total de placa, es que la capacidad del arreglo es la suma de las capacidades.



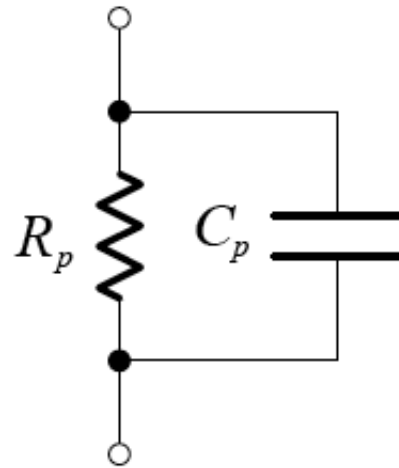
Dado que la capacidad es inversamente proporcional al espesor del dieléctrico, el resultado de conectar condensadores en serie, lo que aumenta el espesor total del dieléctrico, es que la capacidad del arreglo es el inverso de la suma del inverso de las capacidades.

Constantes dieléctricas de los materiales mas usados como dieléctricos.

Material	$\epsilon_r$
Vacío ( $\epsilon_0=4\pi \cdot 10^{-7}$ F/m)	1
Aire a 1 atmósfera	1,00059
Poliestireno	2,5
Polipropileno	2,5
Policarbonato	2,8
Polietileno-tereftalato	3
Papel impregnado	2-6
Mica	6,5-8,7
$Al_2O_3$ (óxido de aluminio)	7
Vidrio	4-9,5
$Ta_2O_3$ (óxido de titanio)	10-25
Cerámica	20-12.000

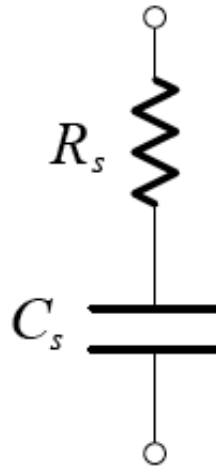
En teoría un condensador ideal cargado y dejado en circuito abierto, esto es, con una impedancia infinita entre sus terminales debería mantener indefinidamente su carga, y el mismo componente no debería ofrecer ninguna resistencia a la circulación de corriente.

En la práctica los materiales dieléctricos presentan fugas, esto es la carga acumulada se va perdiendo con el tiempo y el condensador se va descargando. Las fugas pueden ser modeladas como una resistencia de alto valor, EPR (por "Equivalent Parallel Resistance"), en paralelo con el condensador ideal, que ofrece un camino de descarga y disipa lentamente la energía almacenada.



Modelo simple del condensador con la resistencia de fuga en paralelo.

Adicionalmente, todo conductor tiene resistencia, así que todo condensador real presenta una resistencia,  $R_s$ , también llamada ESR (por "Equivalent Series Resistance"), en serie con el condensador ideal que produce pérdidas óhmicas cuando circula la corriente de carga o descarga.

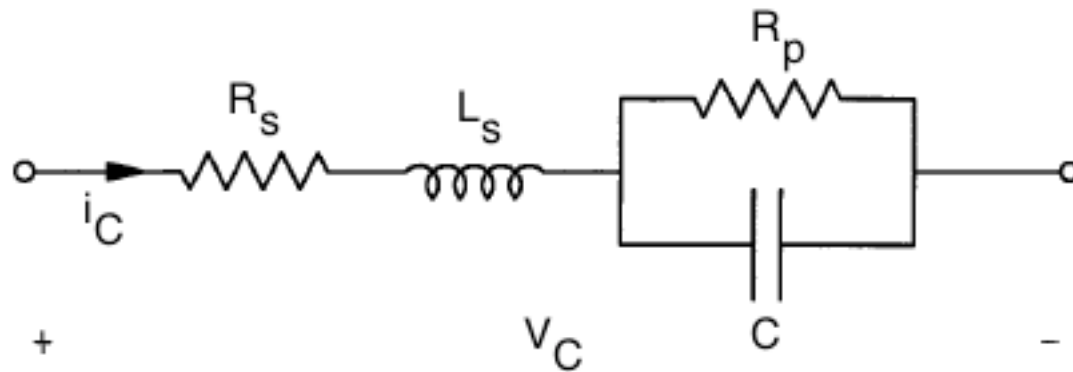


Modelo equivalente simplificado del condensador con la resistencia equivalente en serie.

Alcanzar el valor de capacidad requerido obliga al fabricante a usar placas de una superficie considerable, lo que se logra enrollando las dos placas separadas por el dieléctrico; esta estructura además de aumentar la resistencia serie, introduce un elemento inductivo adicional,  $L_s$ , también en serie con la capacidad, al cual se suele llamar ESL (Equivalent Series Inductance).



Detalle de construcción de un condensador.



Modelo en parámetros concentrados completo del condensador.

En un condensador razonablemente bien diseñado se debe cumplir que la inductancia serie esta en el rango de los nH, y la resistencia de pérdidas debe ser muy alta, de forma que la constante de tiempo de descarga del condensador  $t_d=R_pC$  es muy larga.

Normalmente en un circuito de Electrónica de Potencia la frecuencia fundamental de conmutación es fija y por lo tanto es conveniente evaluar el comportamiento del condensador a esa frecuencia  $\omega_c$ .

El proceso se inicia simplificando la configuración a una totalmente serie.



El arreglo paralelo entre el condensador y la resistencia de pérdidas se convierte en un arreglo serie entre una resistencia de

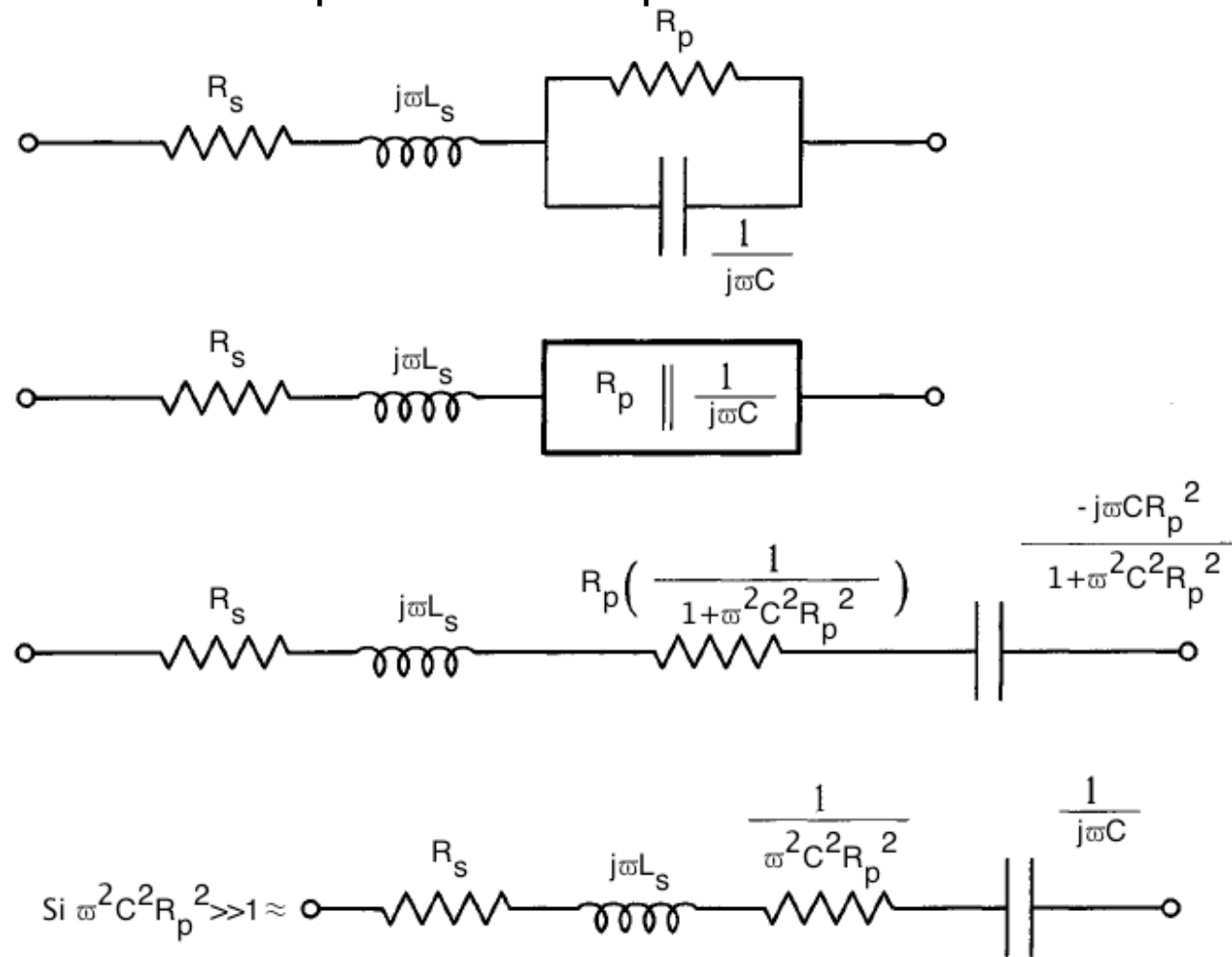
valor  $R_p \left( \frac{1}{1 + \omega^2 R_p^2 C^2} \right)$  y una reactancia capacitiva de valor

$$\frac{-j\omega R_p^2 C}{1 + \omega^2 R_p^2 C^2}.$$

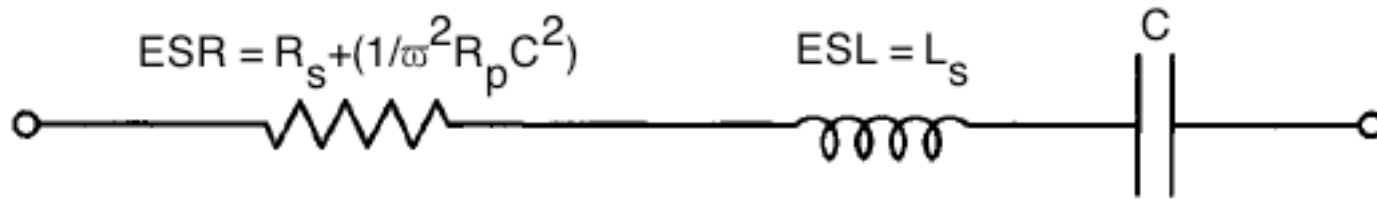
Dado que el producto  $R_p C$  es muy alto por diseño, a frecuencias superiores a 1 Hz, esto es para todas las frecuencias de interés, se cumple que  $\omega^2 R_p^2 C^2 \gg 1$ , por lo que la reactancia capacitiva se

reduce al valor inicial de la reactancia del condensador,  $\frac{-j}{\omega C}$ .

La figura presenta las etapas del proceso de simplificación del modelo equivalent completo del condensador:



Agrupando los términos de tipo resistivo, el circuito equivalente final del condensador resulta:



Este modelo, que muchas veces se llama "modelo estándar del capacitor", es el usado por los fabricantes para dar las especificaciones de sus componentes.

La presencia en serie de una inductancia y una capacidad implica que el componente tiene una respuesta de tipo resonante serie,

cuya frecuencia natural está dada por  $\frac{1}{\sqrt{(ESL)C}}$ .

La resistencia ESR resulta ser dependiente de la frecuencia en forma no lineal. Usualmente los fabricantes especifican el valor medido a una frecuencia fija, 120Hz, pero este valor queda muy por debajo del rango usual de operación de los conversores DC/DC y DC/AC.

El factor de disipación,  $df$  ("dissipation factor"), definido como el cociente entre la resistencia y la reactancia del condensador

$\left( df = \frac{ESR}{|X|} \right)$  se usa con frecuencia para indicar la calidad del condensador.

Para frecuencias muy por debajo de  $\frac{1}{\sqrt{(ESL)C}}$  la reactancia del modelo estándar se aproxima a  $\frac{1}{\omega C}$ , por lo que:

$$df = \frac{R}{|X|} = \frac{ESR}{\frac{1}{\omega C}} = (ESR)\omega C$$

El  $df$  también se conoce como la tangente de pérdidas,  $\tan\delta$ , por analogía con el ángulo de la impedancia del condensador,  $\phi$ , cuya

definición es  $\phi = \tan^{-1}\left(\frac{|X|}{ESR}\right)$

Si la resistencia del alambre,  $R_s$ , es pequeña, la ESR tiende al valor  $1/\omega^2 R_p C^2$ , y el factor de disipación tiende a  $1/\omega R_p C$ .

La resistencia de descarga,  $R_p$ , depende de la resistividad del aislante,  $\rho$ ; la relación entre la capacidad y  $R_p$  viene dada por:

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad R_p = \frac{\rho d}{A}$$

Donde  $\epsilon$  es la constante dieléctrica del aislante,  $A$  el área de las placas,  $d$  el espesor del aislante, y  $\rho$  la resistividad del aislante.

En estas condiciones el factor  $\omega R_p C$  se simplifica a  $\omega \rho \epsilon$ , lo que significa que  $\tan \delta = (\omega \rho \epsilon)^{-1}$ , esto es, las pérdidas no tienen relación con la geometría del condensador y solo son una función de la frecuencia de operación y de las propiedades del aislante.

La corriente principal del condensador circula por la resistencia parásita serie produciendo pérdidas que reducen la eficiencia energética del circuito y causan el calentamiento del dieléctrico del condensador.

La ESR se puede reducir aumentando la frecuencia de operación o usando condensadores de valor muy alto. En aplicaciones de bajo voltaje (5V y por debajo) muchas veces el factor crucial de la selección del condensador es reducir la ESR.

Como ejemplo, se puede considerar el caso de la conexión de un condensador de  $100\mu\text{F}$ , la ESL del condensador es  $15\text{nH}$ , la tangente de pérdidas  $0,2$  (20%); el cable de conexión tiene  $5\text{cm}$  de largo. Interesa conocer la ESR si se opera a  $40\text{kHz}$ .

Aplicando la regla aproximada de 5nH por cm para la inductancia del cable de conexión, la inductancia total en el circuito es de unos 40nH.

La frecuencia de resonancia con esta ESL y 100μF de capacidad está en los 80kHz. Como 40kHz > 80kHz se puede considerar que la ESR cumple con la fórmula aproximada:

$$ESR = \frac{\tan \delta}{\omega C} = \frac{0,2}{2\pi 40.000Hz * 100 * 10^{-6} F} \approx 8m\Omega$$

Despreciando la resistencia del cable de conexión.



Para resaltar el efecto de la frecuencia de operación se puede considerar el caso de un condensador de  $2\mu\text{F}$ , con ESL de  $25\text{nH}$  y una tangente de pérdidas de  $1\%$ . Se desea conocer cual será la ESR cuando se usa el condensador como filtro de salida de un puente rectificador no controlado y cuando se usa en un conversor DC/DC que conmuta a  $150\text{kHz}$ .

La frecuencia de resonancia con  $25\text{nH}$  y  $2\mu\text{F}$  es  $712\text{kHz}$ .

Cuando el condensador se usa como filtro del rectificador no controlado conectado a la línea de  $60\text{Hz}$  la frecuencia aplicada al condensador es  $120\text{Hz}$ :

$$ESR_{120\text{Hz}} = \frac{\tan \delta}{\omega C} = \frac{0,01}{2\pi * 120\text{Hz} * 2 * 10^{-6}\text{F}} \approx 6,63\Omega$$

$$ESR_{150\text{kHz}} = \frac{\tan \delta}{\omega C} = \frac{0,01}{2\pi * 150 * 10^3\text{Hz} * 2 * 10^{-6}\text{F}} \approx 5,53\text{m}\Omega$$

Suponiendo una corriente de 1 A, en la aplicación de baja frecuencia las pérdidas en el condensador resultan ser 6,63W, mientras que a alta frecuencia son 5,53mW, un valor totalmente despreciable en situaciones normales, mientras que una disipación de más de 6,6W puede no ser aceptable en el filtro del rectificador.

$$\eta = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} = \frac{5V * 2A}{6,6W + 5V * 2A} = \frac{10}{16,6} = 0,6.$$

Este fenómeno es particularmente grave en los condensadores electrolíticos (el electrolito puede llegar a hervir y el vapor a presión causar una pequeña explosión), por lo que el fabricante debe especificar cual es el máximo valor de corriente RMS tolerable.

## Efecto de la ESR sobre las formas de onda.

En aplicaciones de Electrónica de potencia es usual que el circuito aplique a los condensadores trenes de pulsos rectangulares de corriente, que en un condensador ideal deberían de producir una forma triangular de rizado de voltaje; al existir la ESR sobre la onda triangular producida por la integración del tren de pulsos en el condensador ideal se suma una cuadrada producida por la caída de tensión en la ESR (el llamado "salto de la ESR") que debe ser considerada al calcular el valor del rizado de voltaje.

## Comportamiento de la impedancia.

Cuando el condensador se usa como elemento para fijar la impedancia de salida de una fuente de tensión (usualmente del tipo DC/DC), su característica mas importante es su impedancia.

En un condensador ideal  $|Z_c| = \frac{1}{\omega C}$ , y en su diagrama de Bode la impedancia es una recta con una pendiente de -1.

Dado el modelo genérico del condensador real, que es un circuito serie R-L-C, la impedancia del dispositivo presenta una resonancia serie, por lo cual la impedancia capacitiva se va a reducir hasta el mínimo, que se alcanza a la frecuencia de resonancia, por encima de la cual la impedancia aumenta, pero ahora con características inductivas.

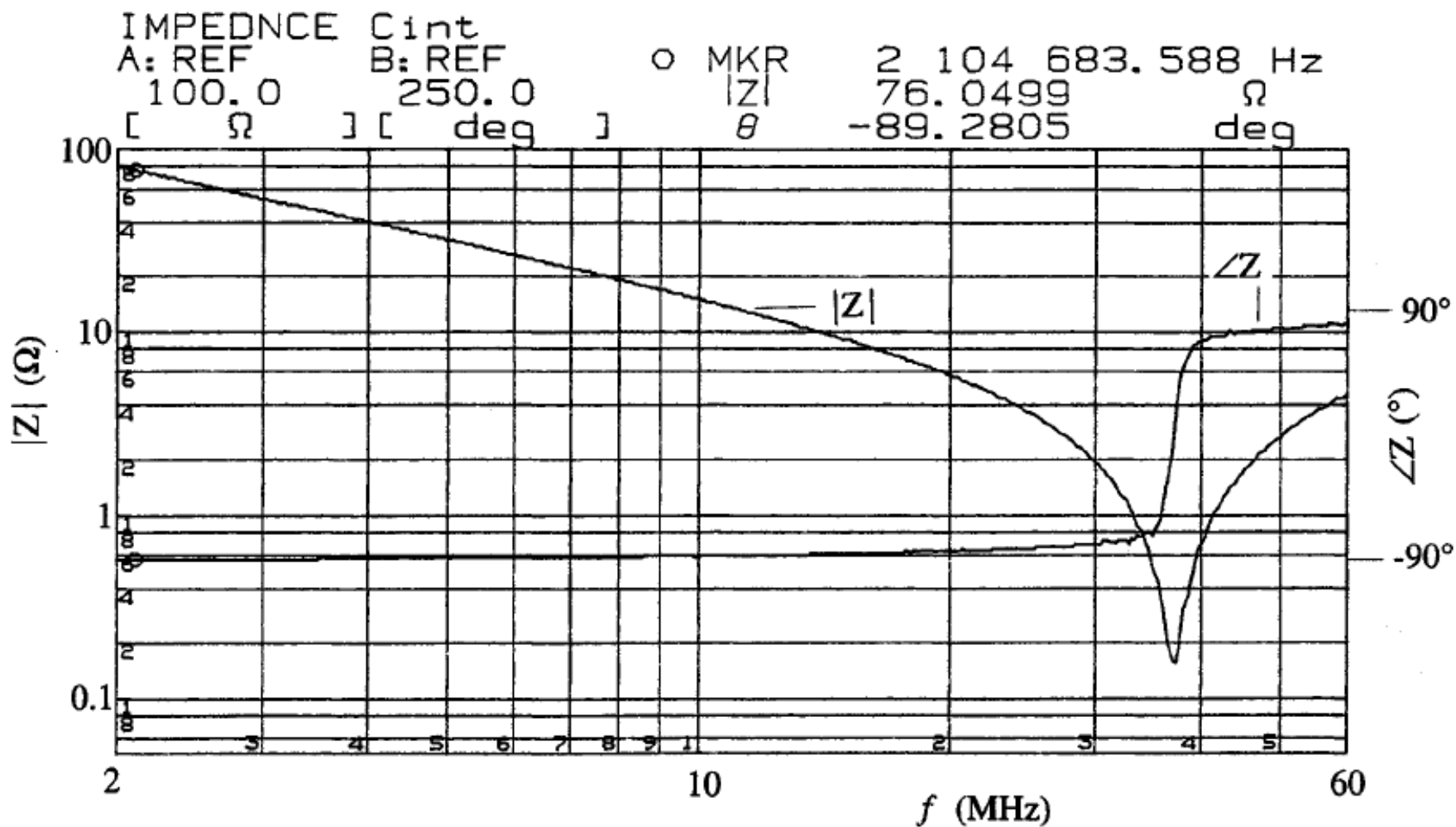


Diagrama de Bode experimental de un condensador de 1000pF de poliestireno.

Del diagrama resulta que el condensador de 1000pF de poliestireno, que hasta unos pocos MHz es casi ideal, tiene una frecuencia de resonancia del orden de 36MHz, de donde se puede inferir que su ESL es del orden de 20nH, con una ESR de cerca de  $0,15\Omega$  a la frecuencia de resonancia, cuando la impedancia es puramente resistiva.

El efecto de la frecuencia de resonancia puede hacer que la selección de un condensador sin considerar este efecto sea inadecuada.

Por ejemplo, como resultado del diseño de un inversor se determinó que era necesario emplear un condensador de  $2700\mu\text{F}$  capaz de soportar 400V en la salida para eliminar los componentes indeseados de la modulación PWM para operación ultrasónica (más de 20kHz). Dado el tamaño de los componentes del equipo, la conexión tiene unos 20cm de largo.

Dado el largo de la conexión, el valor de la ESL debe ser por lo menos 100nH, aún sin contar la inductancia serie del condensador, por lo que la frecuencia de resonancia como máximo podrá ser:

$$\frac{1}{\sqrt{2700\mu F * 100nH}} = 6,1 * 10^4 \text{ rad/s} = 9,7\text{kHz}$$

Evidentemente este condensador solo puede ser utilizado en la aplicación deseada si la frecuencia de conmutación del conversor es significativamente menor que 10kHz; dado que se pretende usarlo a 20kHz o mas, el diseño está fundamentalmente errado, ya que cualquier condensador de 2700 $\mu$ F resulta tener características inductivas a esa frecuencia.

Regresando al condensador de  $100\mu\text{F}$  de un ejemplo anterior, resultó que a  $40\text{kHz}$  su ESR era del orden de  $8\text{m}\Omega$ ; a esa frecuencia su reactancia capacitiva es del orden de  $40\text{m}\Omega$ , así que su ESR es del orden del 20% de la reactancia, valor que ya no es despreciable.

Por ejemplo si se desea usarlo para reducir el rizado de una fuente computadora de  $5\text{V}$  @  $500\text{W}$ , resulta que la corriente de salida es de  $100\text{A}$  y la resistencia equivalente de la carga (circuitos digitales) es de  $50\text{m}\Omega$ , lo que implica que la impedancia del condensador de salida es comparable con la impedancia de carga, por lo que el efecto de filtrado será poco efectivo.



Otro caso de interés relacionado con el efecto de la resonancia es la decisión de emplear condensadores individuales de gran capacidad o arreglos equivalentes de condensadores de menor capacidad.

Por ejemplo se dispone de dos modelos de condensadores del mismo fabricante, un de  $1000\mu\text{F}$  y el otro de  $100\mu\text{F}$ ; ambos modelos tienen una ESI de  $20\text{nH}$  y una tangente de pérdidas de  $0,2$  ambos modelos.

Se debe decidir si, para un conversor por conmutación con una frecuencia de conmutación de  $10\text{kHz}$ , es mas adecuado emplear un condensador de  $1000\mu\text{F}$  o un arreglo de  $10$  condensadores de  $100\mu\text{F}$  conectados en paralelo.

La frecuencia de resonancia del condensador de  $1000\mu\text{F}$  es  $36\text{kHz}$ , y la del condensador de  $100\mu\text{F}$  es  $113\text{kHz}$ ; A  $10\text{kHz}$  la ESR del condensador de  $1000\mu\text{F}$  es  $3,2\text{m}\Omega$  y la del condensador de  $100\mu\text{F}$  es de  $32\text{m}\Omega$ .

El arreglo de los 10 condensadores de  $100\mu\text{F}$  tendrá una capacidad de  $1000\mu\text{F}$ , una ESR de  $3,2\text{m}\Omega$  y una ESL de  $2\text{nH}$ .

Por lo tanto el arreglo de los 10 condensadores en paralelo tiene la misma capacidad y la misma ESR que el condensador individual de  $1000\mu\text{F}$ , pero su frecuencia de resonancia es  $113\text{kHz}$ , por lo que el margen con la frecuencia de conmutación del convertidor es mucho más grande, lo que es interesante; pero el arreglo ocupa mucho más espacio, y tiene un componente de cableado mayor. En definitiva, los argumentos no son decisivos y es necesario realizar un estudio más detallado para tomar la decisión.

## Tensión de ruptura.

Todo material aislante, incluyendo los empleados como dieléctricos en los condensadores, tiene una capacidad limitada de soportar una diferencia de tensión entre sus dos caras; cuando la tensión aplicada el valor crítico de la tensión de ruptura, se produce un arco eléctrico, usualmente destructivo, que perfora el material y restablece el equilibrio de cargas entre las dos caras.

El voltaje de ruptura,  $V_{bd}$ , de un condensador resulta:

$$V_{ds} = E_{ds}d$$

Donde  $V_{ds}$  es el voltaje al cual se produce la ruptura del dieléctrico en V,  $E_{ds}$  es la tensión de ruptura característica del material en V/m y  $d$  es el espesor de la capa de dieléctrico en m.

Evidentemente la ruptura del dieléctrico por sobrevoltaje es indeseable, por lo que a todo condensador se le señala una tensión máxima de trabajo, inferior a la tensión de ruptura con un margen de seguridad razonable; esta tensión no debe ser superada bajo ninguna circunstancia.

Los plásticos mas utilizados en los condensadores de película metalizada son el polipropileno, con una rigidez dieléctrica del orden de 16kV/mil y el policarbonato, con una rigidez dieléctrica del orden de 7,5kV/mil

## Características de falla: Condensadores clase X y clase Y.

### Condensadores clase X:

Se diseñan para estar conectados entre los terminales de entrada de la línea AC (de línea a neutro o de línea a línea). Dado que se asume que existe algún tipo de limitador de corriente aguas arriba (fusible o conmutador-limitador) el diseño es tal que el modo de falla del condensador es en corto-circuito; mientras el condensador no se incendie este modo de falla es "seguro", ya que el limitador de corriente en la línea AC interrumpirá la corriente en caso de falla.

## Condensadores clase Y:

Se diseñan para estar conectados entre línea y tierra (fuentes de poder de clase I), entre línea y un punto de cero potencial (fuentes de poder de clase II) o entre el primario y el secundario de un transformador.

En estas aplicaciones un cortocircuito produciría tensiones peligrosas en el punto de cero potencial o en el lado del secundario, por lo que deben fallar en circuito abierto.

En aplicaciones de alta seguridad para el usuario (equipos médicos y del hogar) se debe asegurar protección contra dos fallas, así se deben conectar dos condensadores clase Y en serie entre la barrera de aislamiento o entre la línea y tierra o cero potencial.

La clase se logra por construcción. En los clase X, cuando se produce un arco que perfora el dieléctrico los contactos tienden a fundirse entre si, creando el cortocircuito. En los clase Y los conductores son mucho mas delgados, y tienden a evaporarse localmente cuando se produce un arco, fallando en abierto; son auto-limitantes.

Se puede usar un condensador clase Y en aplicaciones tipo clase X, pero no a la inversa.

La norma ICE 60384-14 clasifica los condensadores clases X y Y en función de su voltaje de trabajo nominal y su capacidad de soportar sobre tensiones.

### Norma IEC 60384-14 clasificación de los condensadores clases X y Y

Class	Peak Voltage	Over-voltage withstand ability
X1	$\leq 4\text{kVDC}$	4kV per $C \leq 1\mu\text{F}$ or $4/\sqrt{C}$ kV per $C > 1\mu\text{F}$
X2	$\leq 2.5\text{kVDC}$	2.5kV per $C \leq 1\mu\text{F}$ or $2.5/\sqrt{C}$ kV per $C > 1\mu\text{F}$
X3	$\leq 1.2\text{kVDC}$	None
Class	Rated Voltage	Over-voltage withstand ability
Y1	$\leq 500\text{VAC}$	8kV
Y2	$\leq 300\text{VAC}$	5kV
Y3	$\leq 250\text{VAC}$	None
Y4	$\leq 150\text{VAC}$	2,5kV



Tipos de condensadores clasificados por el tipo de dieléctrico:

1.- No polarizados.

El dieléctrico es isotrópico, ofrece las mismas características cuando se polariza con tensión directa o inversa, lo que los hace ideales en aplicaciones donde están sometidos a tensiones alternas.

En el estado actual de la tecnología es difícil producir condensadores no polarizados de mas de  $10\mu\text{F}$ .

1.1.- Dieléctrico de cerámica: Los dieléctricos de cerámica con muy alta tensión de ruptura (hasta decenas de kV), alta resistencia de descarga y bajas resistencia y la inductancia parásitas, lo que produce una impedancia serie baja y una buena respuesta en frecuencia. Son de dos clases:

1.1.a.- Clase I: La cerámica tiene una constante dieléctrica  $\epsilon$  de entre 10 y 500  $\epsilon_0$ , y es muy estable, típicamente +/-3% sobre amplios márgenes de tensión aplicada, temperatura y tiempo de operación; el factor de disipación es del orden de 0,1% a 1MHz; los condensadores designados NPO o COG son de clase I.

1.1.b.- Clase II: La cerámica tiene una constante dieléctrica  $\epsilon$  mayor que los clase I, y a su vez forman dos sub-grupos.

El primero tienen constantes dieléctricas  $\epsilon$  de rango medio, entre 500 y 3000 $\epsilon_0$ , valores relativamente constantes ante variaciones de voltaje y corriente y con el tiempo de operación.

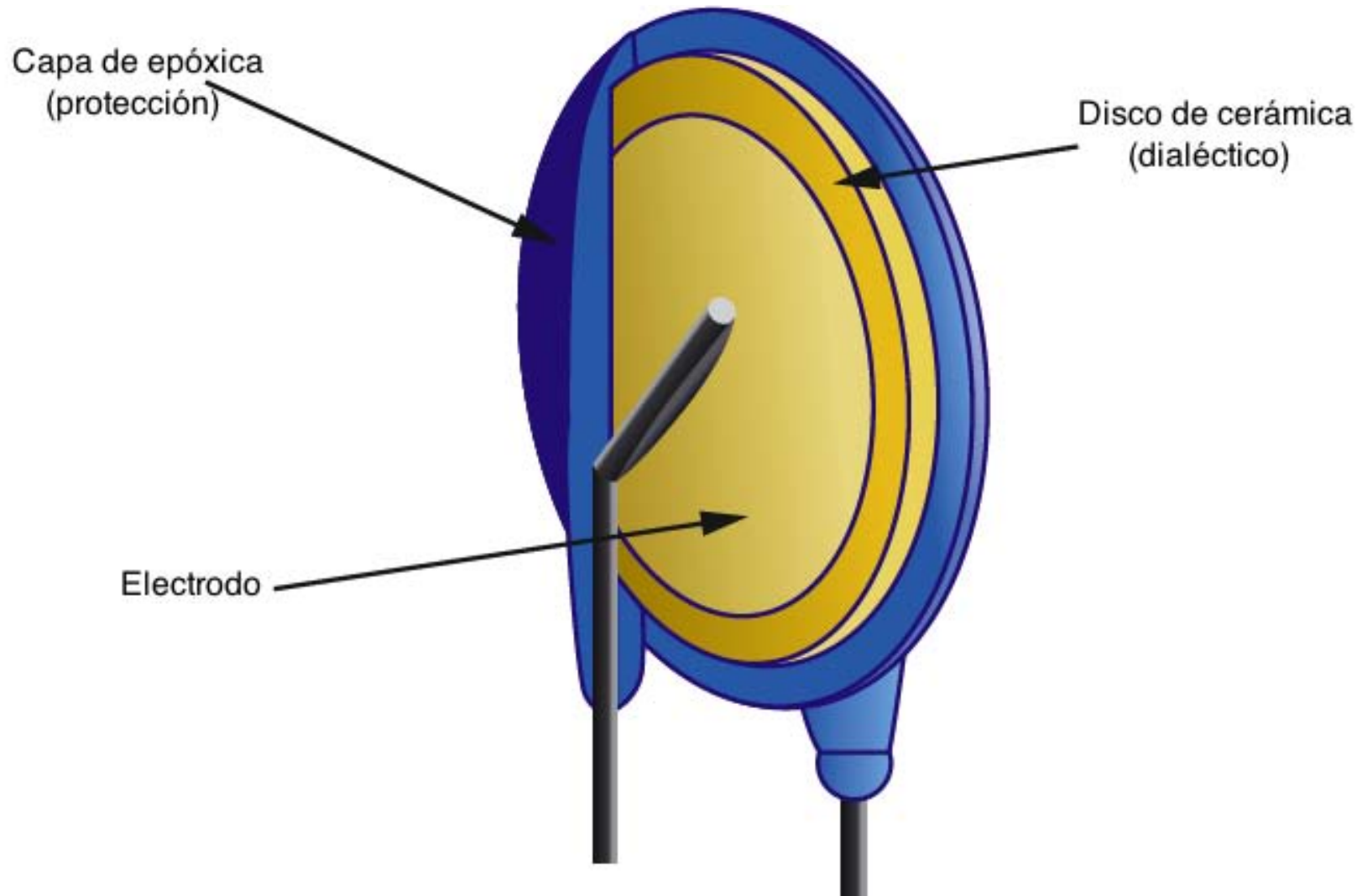
El segundo está formado por cerámicas de constantes dieléctricas  $\epsilon$  de valores muy elevados, en el rango de 3000 a 20000 $\epsilon_0$ , pero mucho menos estables, especialmente con respecto a la temperatura.

Códigos de clasificación de los condensadores clase II del segundo subgrupo.

Temperatura mínima °C	Temperatura máxima °C	% de cambio respecto a 25°C
X = -55	4 = +65	A = +/- 1,0
Y = -30	5 = +85	B = +/- 1,5
Z = +10	6 = +105	C = +/- 2,2
	7 = +125	D = +/- 3,3
	8 = +150	E = +/- 4,7
		F = +/- 7,5
		P = +/- 10
		R = +/- 15
		S = +/- 22
		T = + 22, -33
		U = + 22, - 56
		V = + 22, -82

Las características de degradación térmica de los condensadores de este subgrupo de clase II se especifican con un código de dos letras y un número, la primera letra especifica la temperatura mínima, el número central la temperatura máxima y la segunda letra, el porcentaje de variación.

Así, por ejemplo un condensador de código X7R se caracteriza por tener una variación de  $-15\%$  a  $+15\%$  en los extremos de su rango de operación que va de  $-55^{\circ}\text{C}$  a  $+125^{\circ}\text{C}$ ; y uno de código Z5U se caracteriza por tener una variación de  $-56\%$  a  $+22\%$  en los extremos de su rango de operación que va de  $+10^{\circ}\text{C}$  a  $+85^{\circ}\text{C}$



Corte condensador de cerámica (Cortesía Kemet).

Los de una sola capa son los mas baratos, pero el valor de capacitancia está limitado entre pico faradios y decenas de nano faradios. Con estructura multi-capas se llega a los  $20\mu\text{F}$ , pero estos son especiales y de alto costo. La tangente de pérdidas tiene valores de entre 1 y 5%.

Son los preferidos para aplicaciones de muy alta tensión (kV en tubos de rayos catódicos, rayos X, etc.) y como condensadores de desacople de fuente ("by-pass") para circuitos integrados digitales que introducen picos de corriente de muy alta frecuencia en la línea de alimentación.

1.2.-De mica: la mica es una cerámica natural y un excelente aislante, sus pérdidas son muy bajas con una tangente de pérdidas mucho menor al 1%, pero están limitados a valores del orden de los  $10.000\text{pF}$ .

1.3.- De película de plástico (film capacitors): El dieléctrico es una tira de plástico (polipropileno, poliestireno, polietileno, politetrafluoroetileno (Teflón), policarbonato, etc., con tensión de ruptura alta (hasta 1500V), es fácil producir capas muy delgadas sin defectos, constante dieléctrica relativamente baja  $\epsilon$  del orden de  $3\epsilon_0$ . La tira esta metalizada en uno o los dos lados para formar los contactos.

La cinta metalizada de contacto puede ser producida por deposición de metal al vacío sobre la cinta de plástico, lo que produce espesores del orden de entre 0,01 y 0,05  $\mu\text{m}$  de "película metalizada", o puede insertarse como una cinta independiente de metal, con un espesor de entre 5 a 15  $\mu\text{m}$ . Los condensadores contruidos con las cintas metálicas independientes pueden conducir corrientes mucho mas grandes que los de película metalizada.

El material mas usado en los condensadores de película para electrónica de potencia es el polipropileno, que tiene una rigidez dieléctrica del orden de 16kV/mil, una K del orden de 2,3 y es muy estable con temperatura, cambiando pocos puntos porcentuales en el rango de operación normal de 25°C a 105°C.

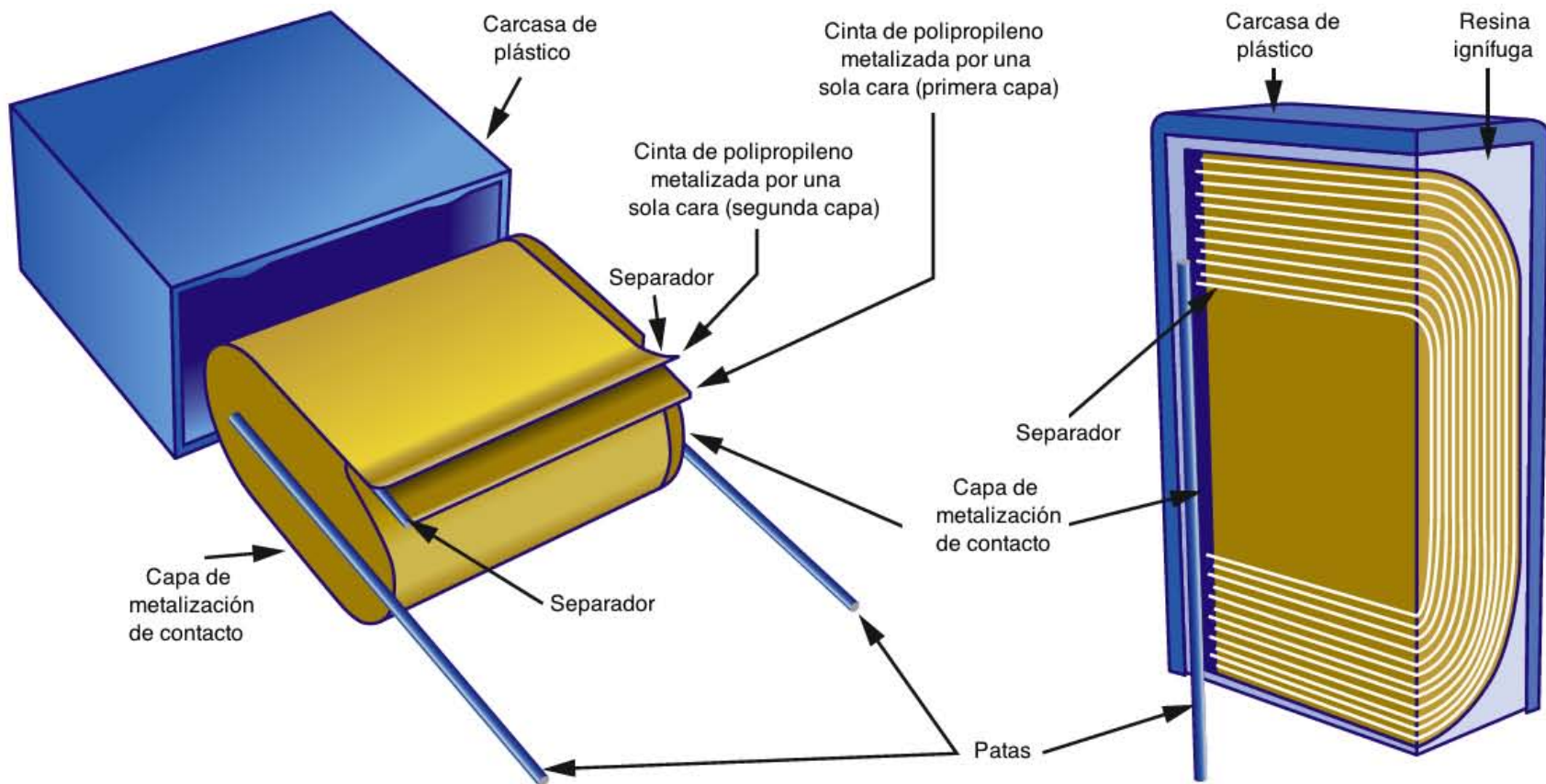
El segundo mas usado, el policarbonato, tiene una rigidez dieléctrica del orden de 7,5kV/mil, una K del orden de 3 y puede operar hasta unos 125°C,

Las pérdidas en estos dieléctricos son bajas, con un factor D del orden de 0,02% para el polipropileno y de 0,1% para el policarbonato en el rango de frecuencias de 1 a 100kHz, de forma que los aportes principales a las pérdidas en estos condensadores provienen de la resistencia de las metalizaciones y los terminales de contacto.



las frecuencias de resonancia típicas ( $\omega L = 1/\omega C$ ) están en el orden de 100kHz para condensadores de alto valor ( $50\mu\text{F}$ ) y los 10MHz para los de bajo valor ( $0,01\mu\text{F}$ ).

Los valores de capacitancia son bajos, se puede llegar a superar los  $10\mu\text{F}$ , aunque lo usual son valores menores o iguales a  $0,1\mu\text{F}$ , presentan baja impedancia parásita serie; la tangente de pérdidas suele ser menor al 0,1%, y raramente supera el 1%, son ideales para aplicaciones convertoras DC-DC, DC/AC, con frecuencias de conmutación de decenas de kHz o superiores si el bajo valor de C no es un problema.



Condensador de película plástica.

## Características de los plásticos usados en los condensadores de película.

Film characteristics	Film material, abbreviated codes				
	PET	PEN	PPS	PP	
Relative permittivity at 1 kHz	3.3	3.0	3.0	2.2	
Minimum film thickness ( $\mu\text{m}$ )	0.7–0.9	0.9–1.4	1.2	2.4–3.0	
Moisture absorption (%)	low	0.4	0.05	<0.1	
Dielectric strength ( $\text{V}/\mu\text{m}$ )	580	500	470	650	
Commercial realized voltage proof ( $\text{V}/\mu\text{m}$ )	280	300	220	400	
DC voltage range (V)	50–1,000	16–250	16–100	40–2,000	
Capacitance range	100 pF–22 $\mu\text{F}$	100 pF–1 $\mu\text{F}$	100 pF–0.47 $\mu\text{F}$	100 pF–10 $\mu\text{F}$	
Application temperature range ( $^{\circ}\text{C}$ )	–55 to +125 /+150	–55 to +150	–55 to +150	–55 to +105	
$C/C_0$ versus temperature range (%)	$\pm 5$	$\pm 5$	$\pm 1.5$	$\pm 2.5$	
Dissipation factor ( $\cdot 10^{-4}$ )	at 1 kHz	50–200	42–80	2–15	0.5–5
	at 10 kHz	110–150	54–150	2.5–25	2–8
	at 100 kHz	170–300	120–300	12–60	2–25
	at 1 MHz	200–350	–	18–70	4–40
Time constant $R_{\text{Insul}} \cdot C$ (s)	at 25 $^{\circ}\text{C}$	$\geq 10,000$	$\geq 10,000$	$\geq 10,000$	$\geq 100,000$
	at 85 $^{\circ}\text{C}$	1,000	1,000	1,000	10,000
Dielectric absorption (%)	0.2–0.5	1–1.2	0.05–0.1	0.01–0.1	
Specific capacitance ( $\text{nF} \cdot \text{V}/\text{mm}^3$ )	400	250	140	50	

1.4.- De papel impregnado: Son mucho mas baratos que los otros de tipo de película con valores de tangente de pérdidas similares; capaces de soportar altas corrientes, son relativamente voluminosos, ideales para aplicaciones a frecuencia de línea y no se suelen usar para frecuencias altas.

1.5.- Especiales: Con dieléctrico de aire, gas o vidrio, son para aplicaciones tipo “nicho” o histórico/demostrativo. Esta categoría incluye a los primeros condensadores utilizados en la Historia, del tipo "botella de Leyden", inventados en 1746 por Pieter van Musschenbroek.



## 2.- Polarizados.

El material dieléctrico es anisotrópico, su comportamiento depende de la polaridad del voltaje aplicado y solo pueden funcionar en polarización directa, ya que tensiones inversas del orden de 1,5V o superiores pueden causar daños destructivos en el dieléctrico.

Esto en general limita su aplicación a circuitos DC, donde deben ser cuidadosamente conectados para que la tensión tenga la polarización directa indicada, para lo cual sus terminales están marcado + (polo directo) y - (polo inverso).

## 2.1.- Condensadores electrolíticos de aluminio.

Una de las placas del condensador está formada por una cinta de aluminio que se ataca químicamente produciendo una corrosión superficial que crea una estructura erosionada cuya superficie efectiva es del orden de 100 veces mayor que la superficie de la tira de metal original.

A continuación se aplica oxígeno para producir una oxidación controlada (tiempo, concentración de  $O_2$ , temperatura) para formar una capa dieléctrica muy delgada de óxido de aluminio ( $Al_2O_3$ ) con una constante dieléctrica  $K$  del orden de 8,4, que constituye el dieléctrico del condensador.

La otra "placa" del condensador es un electrolito líquido que cubre la superficie de óxido de aluminio y está en contacto con otra cinta de aluminio que forma el otro terminal del condensador.

Dado que la resistividad del electrolito es mayor que la del metal, la resistencia serie de este tipo de condensadores es relativamente alta.

El electrolito introduce otro problema ya que se va perdiendo con el tiempo, lo que limita la vida útil de un condensador de electrolito líquido, ya que la pérdida va cambiando los valores de la capacitancia. La velocidad de pérdida es función de la temperatura, y ocurre aunque el condensador no esté conectado.



### 2.3.-Condensadores electrolíticos de tántalo.

Hay dos forma de fabricación. En la primera se parte de una cinta de tantalio cuya superficie se ataca químicamente para aumentarla y en la segunda de un bloque poroso de tantalio sinterizado. En ambos casos se procede a producir una oxidación controlada (tiempo, concentración de  $O_2$ , temperatura) del metal preparado, lo que crea una capa dieléctrica de óxido de Tántalo ( $Ta_2O_5$ ); la capa de óxido es uniforme sobre toda la superficie, y su espesor es controlable con gran precisión controlando el proceso de oxidación. La constante dieléctrica del  $Ta_2O_5$  es unas tres veces mayor que la del  $Al_2O_3$ , lo que permite obtener capacidades significativamente mas grandes en el mismo volumen.

El electrodo negativo puede ser un electrolito líquido, o puede ser una capa sólida de dióxido de manganeso depositado químicamente.

Los condensadores de tantalio de electrolito sólido ofrecen mejores prestaciones que los de electrolito gelatinoso, pero están limitados a valores de capacitancia menores.

Tienen el problema de que tienden a fallar en corto-circuito, lo que puede producir daños graves por sobre-corriente a otros componentes del circuito, y ellos mismos pueden incendiarse.

En general ambos tipos de condensadores electrolíticos (Al y Ta) ofrecen capacitancias órdenes de magnitud mas grandes que las posibles con tecnologías no polarizadas, ya que permiten producir electrodos con superficies de trabajo sumamente grandes, pero limitados a bajos voltajes.

Adicionalmente, como el crecimiento del dieléctrico (la capa de óxido) se puede controlar con precisión, es posible producir condensadores optimizados para trabajar a tensiones bajas, del orden de los 6V; mientras que con las tecnologías no polarizadas es difícil producir condensadores optimizados para tensiones inferiores a los 50V.

Dado que la capa de óxido aislante es muy delgada, las pérdidas en estos condensadores son elevadas, la tangente de pérdidas es por lo menos 5%, y puede aproximarse al 30%, o incluso mas, para aplicaciones de baja tensión y alta frecuencia.

Las altas pérdidas obligan a limitar el valor de la corriente rms, el fabricante especifica el valor máximo tolerable, que no debe superarse.

Por otra parte el proceso de oxidación que crea el dieléctrico de óxido es reversible si se aplica una polarización inversa; esto produce perforaciones que cortocircuitan al componente, las corrientes de fuga se concentran en estos defectos, produciendo un efecto de avalancha que termina causando una falla catastrófica en el componente.

El circuito R-L-C equivalente tiene una Q baja, por lo que no se presenta el pico resonante pronunciado de otras tecnologías.

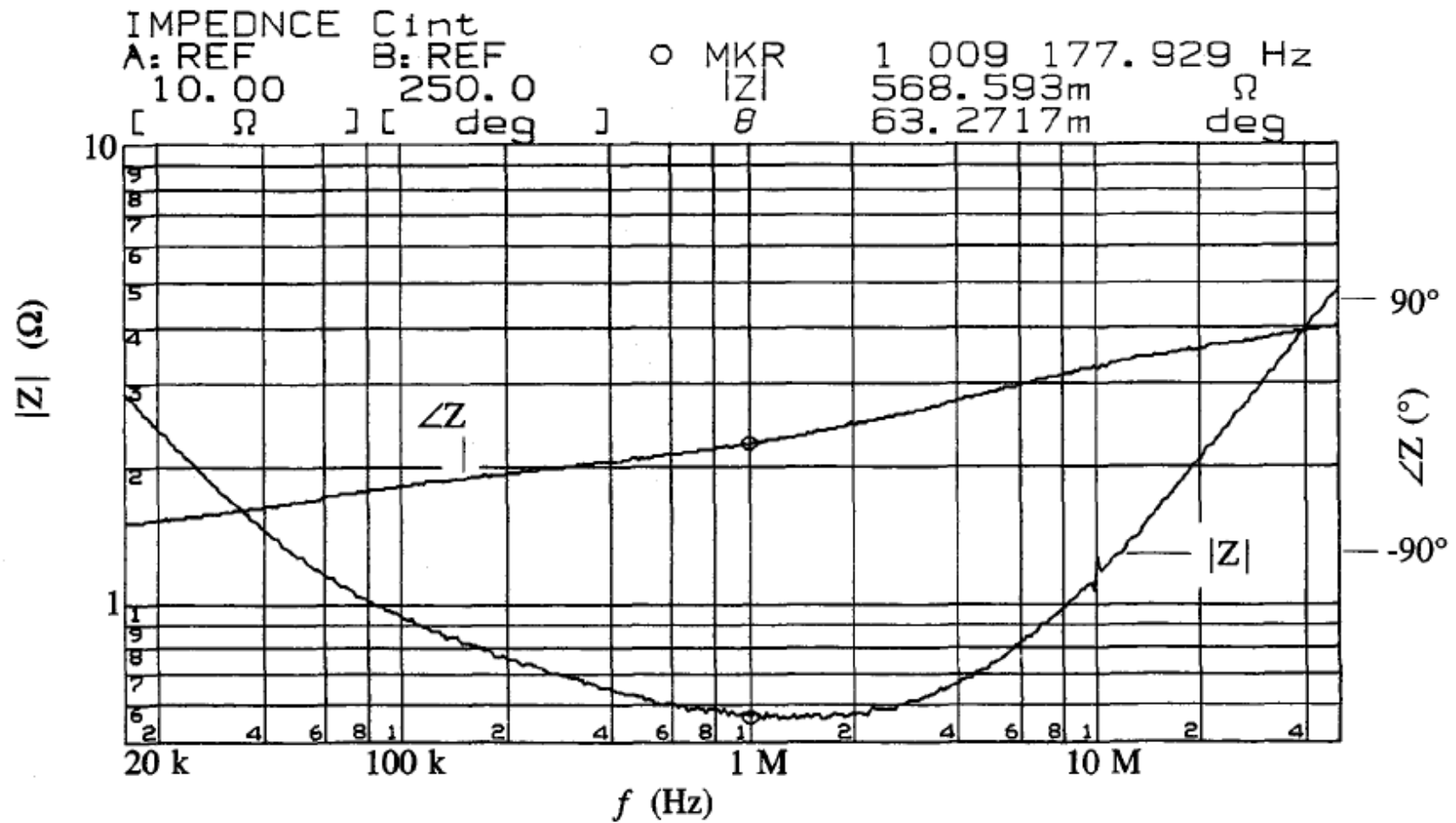
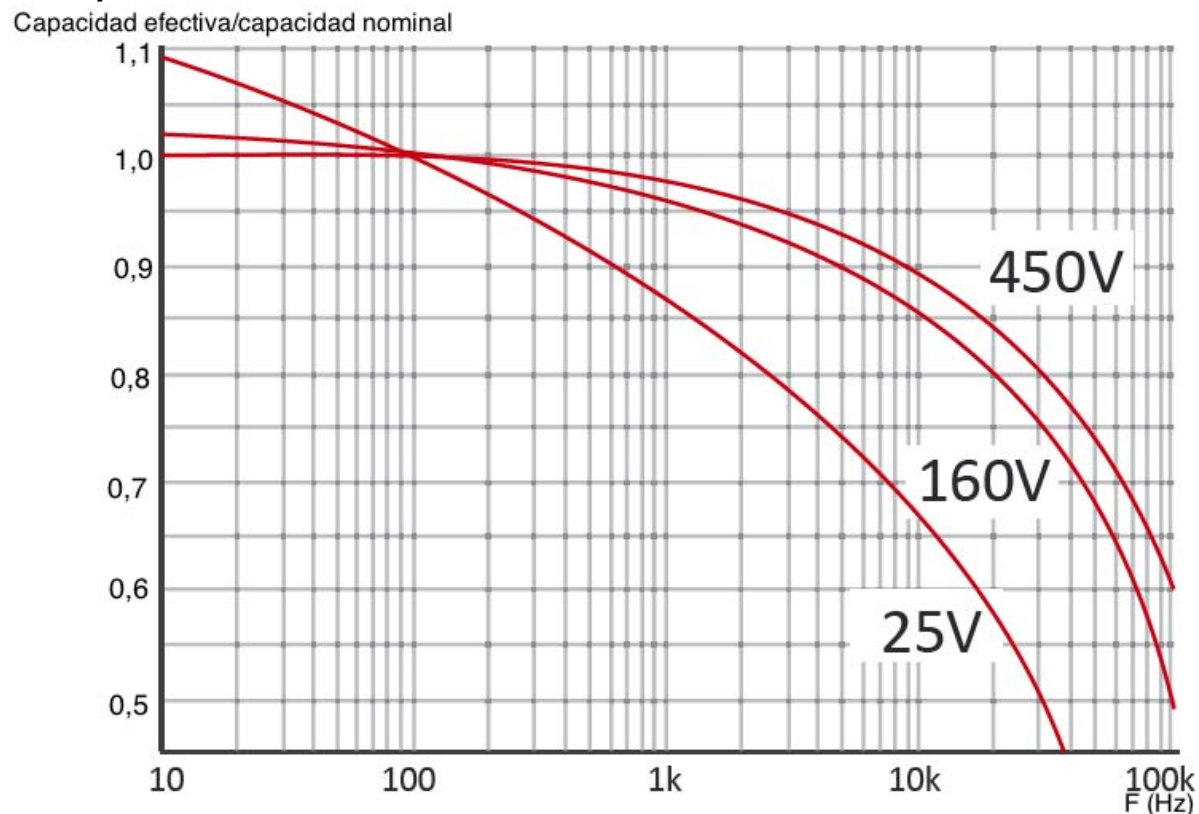


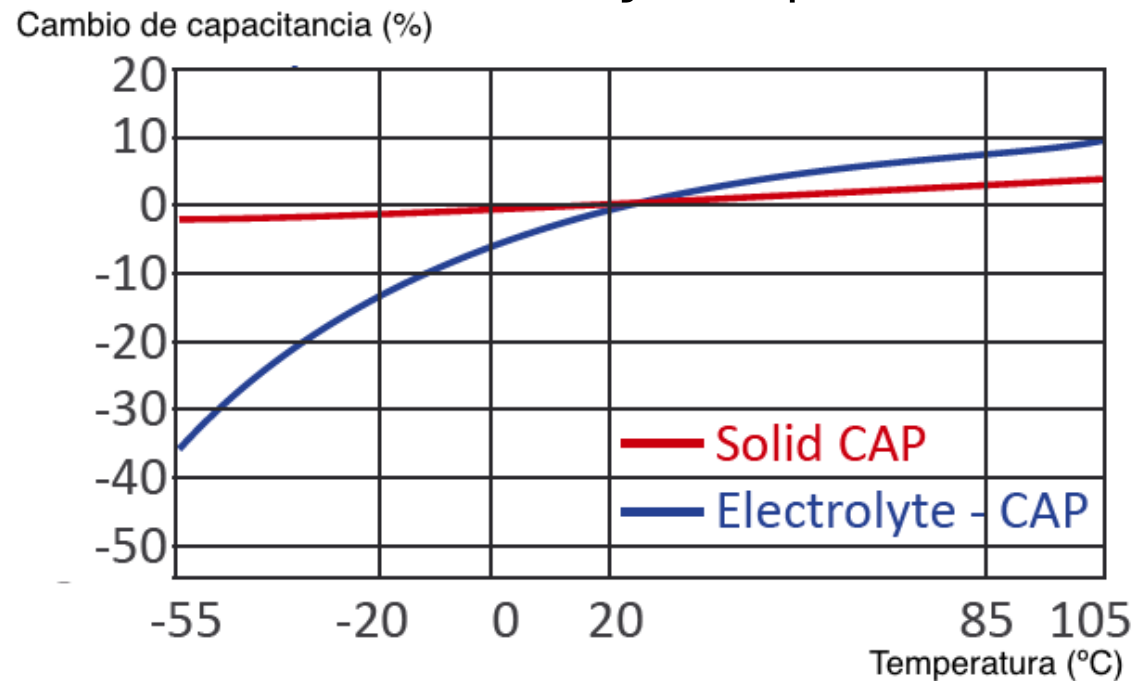
Diagrama de Bode de la impedancia de un condensador electrolítico.

La frecuencia de rizado de la corriente afecta la capacidad de los condensadores electrolíticos, el valor de capacidad de un condensador electrolítico diseñado para operar a baja frecuencia cae si se emplea en circuitos de alta frecuencia de conmutación.



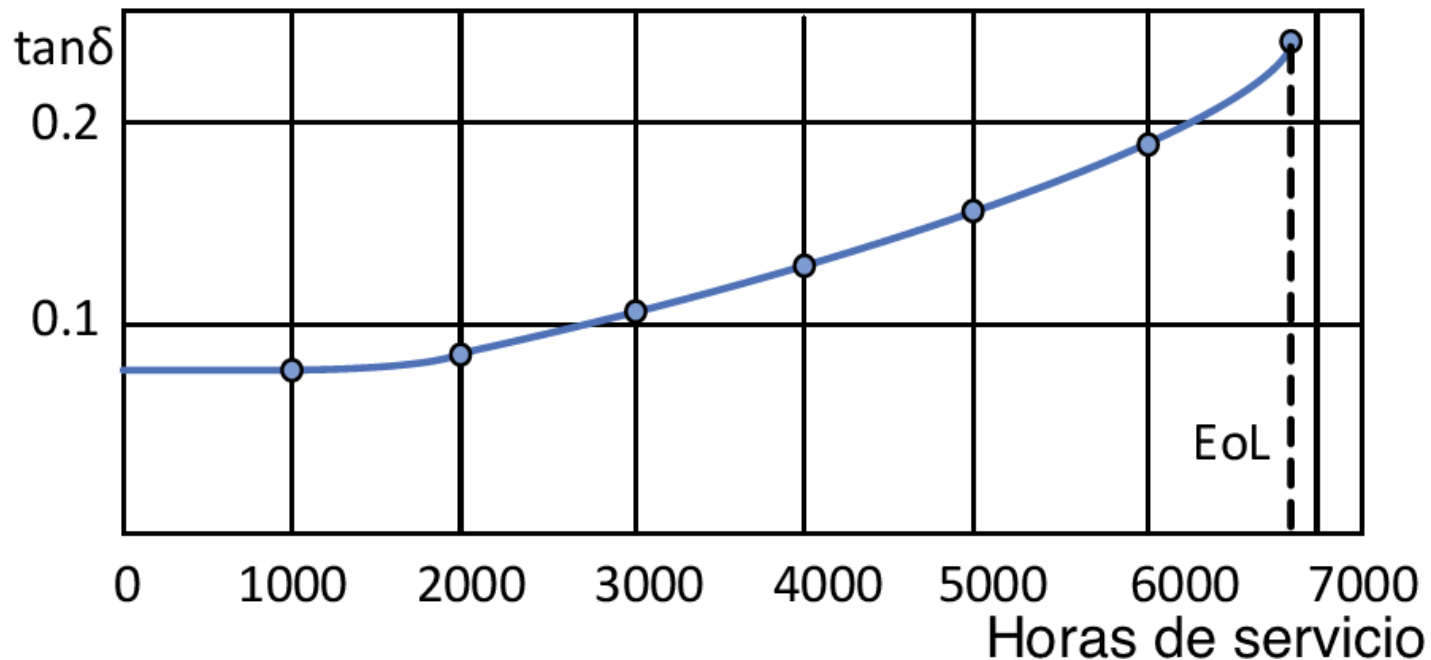
Efecto de la frecuencia del rizado en la capacitancia del condensador electrolítico.

La capacidad de los condensadores electrolíticos depende de la temperatura; a bajas temperaturas el electrolito aumenta su viscosidad y la capacitancia disminuye respecto al valor nominal a 25°C; a altas temperaturas la estructura se expande, la separación entre los electrodos aumenta y la capacitancia aumenta.



Efecto de la temperatura sobre la capacitancia.  
Rojo: Electrolito sólido. Azul: Electrolito fluido.

El electrolito se degrada con el tiempo y la temperatura y, bajo circunstancias normales de uso, su tiempo de vida es limitado y eventualmente fallan en circuito abierto.



Aumento del factor  $\tan\delta$  con las horas de servicio.

EoL: Fin de la vida útil; las pérdidas hacen que la temperatura de operación sea inaceptable.



En circuitos no energizados por períodos largos (del orden de un año) el electrolito también se puede auto-degradar; si esto ocurre, cuando se re-energiza el circuito el condensador puede fallar en circuito abierto.

El fabricante debe indicar el tiempo de vida máximo del condensador electrolítico operando bajo las peores condiciones tolerables (máxima tensión DC y máxima temperatura de operación).

Si los factores de riesgo se reducen, la esperanza de vida del condensador electrolítico,  $L$ , aumenta de acuerdo con:

$$L=L_0KTKRKv$$

Donde  $L$  es la duración de la vida de servicio en horas y  $L_0$  es la duración de la vida de servicio en horas indicada en la hoja de datos en las peores condiciones permitidas.

$K_T$  es el factor de temperatura,  $K_T = \frac{T_0 - T_A}{T_0 - T_A}$ , donde  $T_0$  es la temperatura límite y  $T_A$  es la temperatura esperada en la aplicación considerada.

$K_R$  es el factor de rizado,  $K_R = \left( \frac{I_A}{I_R} \right)^2 \frac{\Delta T_0}{\Delta T_0}$ , donde  $I_A$  es el rizado de corriente en la aplicación considerada,  $I_R$  es el valor máximo especificado para la corriente de rizado en la hoja de datos,  $\Delta T_0$  es el aumento de la temperatura interna y  $K_i$  es un factor de seguridad entre 2 y 4.

$K_v$  es el factor de voltaje,  $K_v = V_A / V_R - n$  donde  $V_A$  es la tensión de operación,  $V_R$  es la tensión máxima de operación y  $n$  es un exponente que puede valer 2,5 si la relación  $V_A / V_R$  es mayor que 50% o 5 si dicha relación es mayor que 80%.

Los factores de reducción de riesgo pueden tener un efecto notable sobre la esperanza de vida del condensador electrolítico.

Por ejemplo, si la temperatura crítica  $T_0$  es  $105^\circ\text{C}$  y el condensador opera a una temperatura  $T_A$  de  $70^\circ\text{C}$  el factor multiplicador  $K_T$  es 11,3.

Si el rizado se mantienen al 50% del valor máximo, y el aumento de temperatura interna se mantiene por debajo de los  $5^\circ\text{C}$  y el factor de seguridad seleccionado es 2, el factor multiplicador  $K_R$  es 1,3.

Si se opera a 0,9 del voltaje máximo, n será igual a 5 y el factor multiplicador  $K_v$  será 1,7

Si la vida útil declarada en la hoja de especificaciones,  $L_o$ , para el condensador era 7000 horas, la esperanza de vida extendida resulta:

$$L=L_oK_TK_RK_v = 7000 \text{ horas} * 11,3 * 1,3 * 1,7 = 174.000 \text{ horas,} \\ \text{aproximadamente 20 años.}$$

Si el voltaje de operación se reduce al 80% del máximo, la vida se alargaría hasta unos 36 años, pero si la temperatura sube de 70° a 85° el tiempo de vida esperado pasaría de unos 20 años a unos 7 años.

Aumentar el rizado del 50% al 60% reduce la esperanza de vida solo en un 6% (de 174khoras a 167,5khoras), pero si se opera al 100% la esperanza de vida se reduce en unos 4 años.

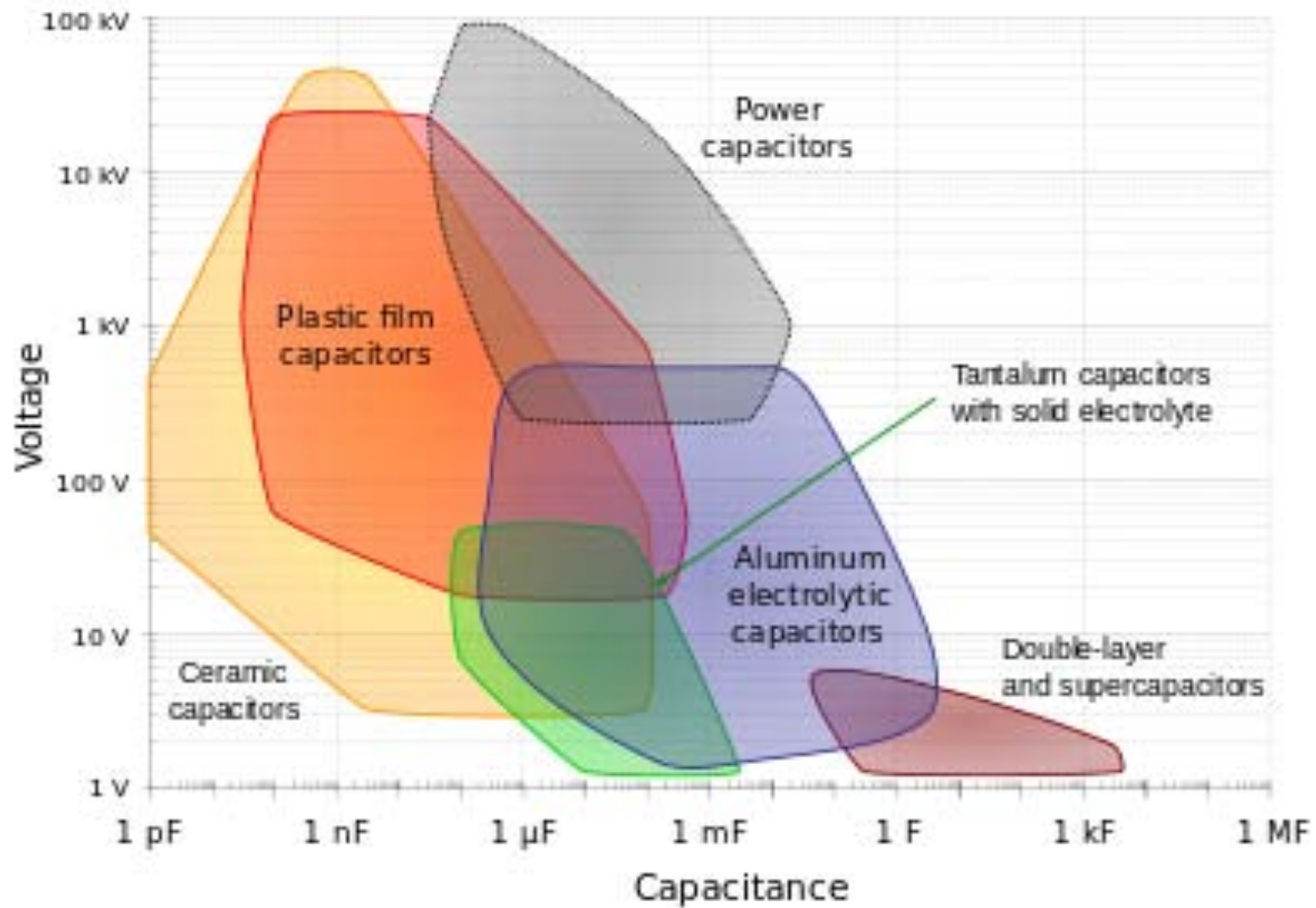
La selección de componentes es básicamente un compromiso entre rendimiento y costo, buscando que con un diseño cuidadoso se alcance la relación precio/rendimiento mas favorable.

Debido a esto y a pesar de todas las limitaciones arriba mencionadas, como los condensadores electrolíticos ofrecen los valores de capacidad mas altos, resulta necesario emplearlos como los condensadores del filtro de salida de los pre-reguladores de las fuentes de poder, lo que hace que la "falla de fuente", debida a una "falla del condensador" sea una de las mas comunes y predecibles en los equipos electrónicos.

## Comparación entre los distintos tipos de condensadores electrolíticos.

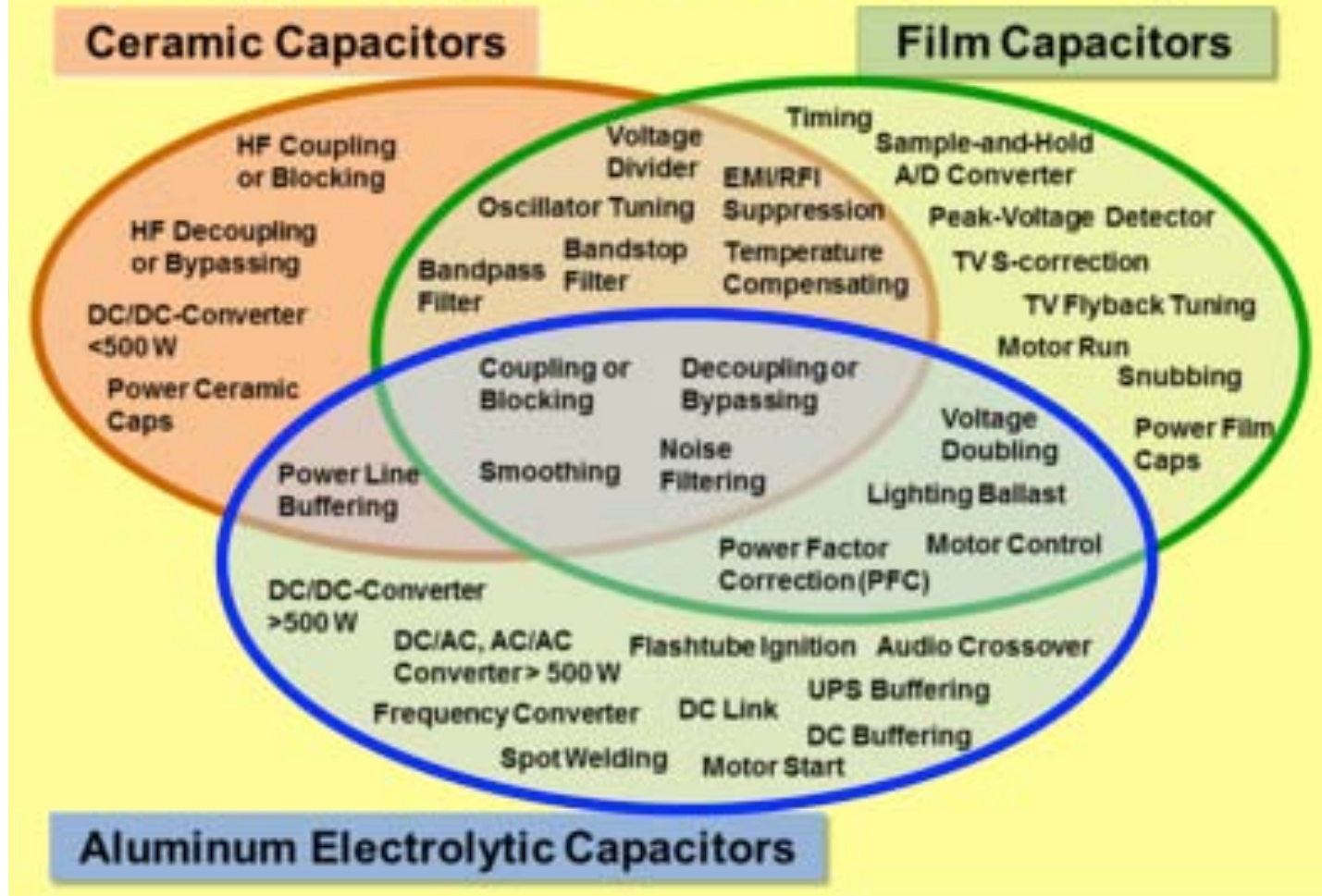
Anode material	Electrolyte	Capacitance range ( $\mu\text{F}$ )	Max. rated voltage at 85 °C (V)	Upper categorie temperature (°C)	Specific ripple current (mA/mm <sup>3</sup> ) <sup>1)</sup>
Aluminum (roughened foil)	non solid, e.g. Ethylene glycol, DMF, DMA, GBL	0.1–2,700,000	600	150	0.05–2.0
	solid, Manganese dioxide (MnO <sub>2</sub> )	0.1–1,500	40	175	0.5–2.5
	solid conductive polymere (e.g. PEDOT:PSS)	10–1,500	250	125	10–30
Tantalum (roughened foil)	non solid Sulfuric acid	0.1–1,000	630	125	–
Tantalum (sintered)	non solid sulfuric acid	0.1–15,000	150	200	–
	solid Manganese dioxide (MnO <sub>2</sub> )	0.1–3,300	125	150	1.5–15
	solid conductive polymere (e.g. PEDOT:PSS)	10–1,500	35	125	10–30
Niobium or niobium oxide (sintered)	solid Manganese dioxide (MnO <sub>2</sub> )	1–1,500	10	125	5–20

<sup>1)</sup> Ripple current at 100 kHz and 85 °C / volumen (nominal dimensions)



Plano voltaje/capacitancia con las áreas de aplicación de los condensadores.

# Overlapping Applications of Capacitor Types



Áreas de la electrónica donde se aplican los distintos tipos de condensadores.