

Bibliografía: <http://www.profisica.cl/comofuncionan/como.php?id=3>

## ARTÍCULO ACTUALIZADO 2010

**José Luis Giordano**

Abril 22, 2007 (Última revisión: Noviembre 22, 2010)

## INTRODUCCIÓN

Casi todos los circuitos electrónicos están basados en la existencia de varios tipos de "condensadores eléctricos" o "capacitores". Sin su invención no se hubiesen podido desarrollar una infinidad de circuitos sintonizados tal como los conocemos, como por ejemplo los sistemas de radio, televisión, teléfonos, equipos de audio, y detectores de metales.

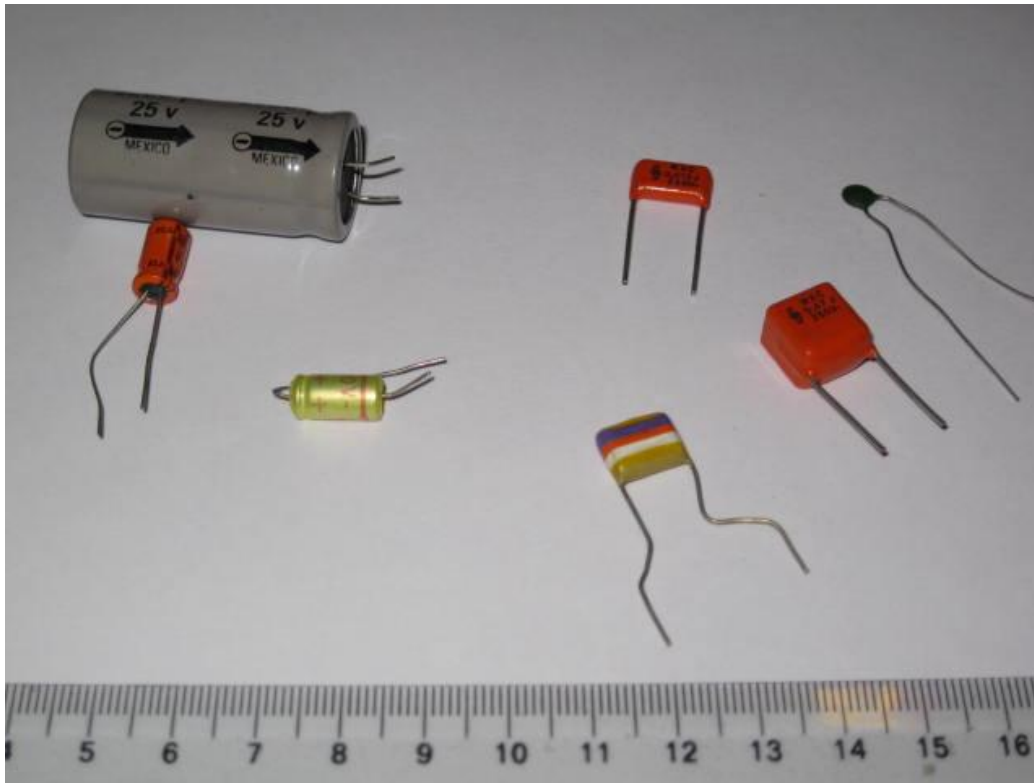
En este artículo se describen los capacitores desde el punto de vista de las aplicaciones. Pero también por otro lado, se enfatizan aspectos conceptuales, en relación a la inducción electrostática, el efecto del dieléctrico, conservación de la carga eléctrica y la energía potencial en los procesos de carga y descarga. Específicamente, se trata el problema de la energía perdida entre dos condensadores. Finalmente se comenta algo sobre la invención del capacitor y sobre el trabajo de *Franklin*.

## 1-QUÉ ES

Un **capacitor** o **condensador eléctrico** es un componente:

- 1) **eléctrico** (trabaja con corrientes y voltajes),
- 2) **pasivo** (no proporciona ganancia ni excitación),
- 3) que **acumula carga eléctrica**, y
- 4) que puede ser **simétrico** (compuesto por un dieléctrico entre 2 electrodos iguales), o **polarizado** (con un electrolito entre dos electrodos diferentes: "+" y "-").

**Nota sobre el nombre "capacitor":** Por analogía de la electricidad con los fluidos, al acumular carga se hablaba de "condensar carga eléctrica". Entonces, al elemento acumulador se lo llamó "condensador" (desde que *Volta* lo llamó así en 1782). Pero en este artículo se prefiere usar "capacitor" o "condensador eléctrico", tal como sucedió en la lengua inglesa, donde "*capacitor*" reemplazó a "*condenser*" (reservando solo "condensador" para los dispositivos que condensan vapor o gas). Análogamente, en este contexto se usa "capacitancia" o "capacidad eléctrica" (en vez de decir solamente "capacidad", que se reserva para volumen).



**Fig. 1:** Muestra de capacitores fijos, de los que se usan en circuitos impresos.

Algunas de las características que distinguen a un capacitor son:

- 1) Tener capacitancia fija o variable
- 2) Ser electrolítico o no. Tener o no tener polaridad (ser simétrico)
- 3) El material del dieléctrico
- 4) Capacidad eléctrica nominal  $C$  (generalmente en pF, nF,  $\mu$ F o en mF)
- 5) Tolerancia de la capacitancia (en %)
- 6) Voltaje máximo de operación  $\Delta V_{\max}$  (en V ó kV)
- 7) Temperatura máxima o Rango de temperatura de operación (en  $^{\circ}$ C)
- 8) Tipo de encapsulado y terminales para montaje (axial o no, superficial o no)

Su **capacitancia (capacidad de acumular carga eléctrica)**  $C$ , que en el S. I. de Unidades se mide en "F", "farad" o "faradio", es la relación entre la carga acumulada  $Q$  (que se mide en "C", "coulomb" o "coulombio") y la diferencia de potencial o voltaje  $\Delta V$  entre sus 2 terminales (en "V", "volt" o "voltio") que existe cuando está cargado:

$$C = Q/\Delta V \text{ ("farad } \equiv \text{ coulomb/volt")}$$

Como el farad y el coulomb representan cantidades muy grandes de capacitancia y de carga eléctrica respectivamente, es más común encontrar F y C con los prefijos p ("pico",  $10^{-12}$ ), n ("nano",  $10^{-9}$ ),  $\mu$  ("micro",  $10^{-6}$ ) y m ("mili",  $10^{-3}$ ).

El valor  $C$  de la capacitancia **es una constante del capacitor** (un número real positivo) que depende de parámetros geométricos (forma y tamaño del capacitor) y físicos (del material del

dieléctrico).

Cuando un capacitor de capacidad eléctrica  $C$  tiene una diferencia de potencial  $\Delta V$ , el capacitor está cargado con una carga  $Q = C \Delta V$ . La carga máxima que puede acumular está determinada por otro parámetro importante del capacitor: el voltaje máximo  $\Delta V_{\max}$  que es inferior y cercano al "**voltaje de ruptura**" ( $V_{BR}$ , *Breakdown Voltage*) que pueda tener sin destruirse. Este voltaje también depende de parámetros geométricos del capacitor y físicos del material dieléctrico.

Un criterio de diseño arbitrario pero típico es usar hasta aproximadamente un voltaje que sea el máximo nominal dividido por raíz de 2. Por ej. un capacitor cuyo voltaje máximo nominal sea 25 V, con este criterio debería estar sometido a voltajes que no superen el 71% de 25 V (es decir, hasta unos 18 V). Este criterio se basa en la relación entre el valor eficaz (rms) y el valor de la amplitud en una onda senoidal.

El parámetro del material directamente relacionado con el  $V_{BR}$ , es el **campo eléctrico de ruptura dieléctrica**, denominado "resistencia dieléctrica" o "ruptura dieléctrica" ( $E_{BR}$ , *Dielectric Strength*) que se mide en kV/mm (ó  $10^6$  V/m).

Para el aire seco en condiciones normales (de temperatura y presión), la ruptura se produce a 3 kV/mm aproximadamente (Esto debe ser bien conocido por las personas que se dispongan a trabajar con alta tensión).

## 2-PARA QUÉ SIRVE

Un capacitor es un elemento muy simple, pero según cómo y dónde se utilice, sirve para diferentes e importantes funciones, como por ejemplo:

### 2.1 Acumuladores de energía:

Un capacitor cargado, puede proporcionar carga eléctrica para realizar un cierto trabajo. Por lo tanto, todo capacitor cargado tiene una **energía potencial eléctrica**  $U_{\text{acumulada}}$  (que se mide en "J", "joule" o "julio"). Puede demostrarse que, para un sistema de dos conductores como el de un capacitor, es

$$U = (1/2) Q \Delta V \text{ ("joule"} \equiv \text{coulomb volt")}$$

Usando  $C = Q/\Delta V$ , también se tiene

$$U = (1/2) Q^2 / C = (1/2) C (\Delta V)^2$$

Como ejemplo de aplicación de los capacitores usados como acumuladores de energía se tienen los magnetizadores y [desmagnetizadores](#) de [imanes](#) de [parlantes](#), sistemas de campo magnético pulsado, fuentes de plasma pulsado, circuitos de disparo del flash de cámaras fotográficas y algunos chisperos (encendedores de gas) electrónicos. En general, para esta aplicación los capacitores deben ser aptos para alto voltaje (entre 0.2 y 1 kV típicamente) y capaces de producir la descargas rápidamente (entre unos 0.001 y 1 ms).

### 2.2 Filtros de rizado:

Esta función se encuentra en las fuentes de alimentación (de corriente y/o de voltaje), donde

los capacitores se utilizan para eliminar ("filtrar") el rizado o riple remanente de la conversión de corriente alterna (AC) en continua (DC) realizada por el circuito rectificador.

Hasta aproximadamente los años 1980's, los diseñadores electrónicos calculaban el transformador óptimo para una dada aplicación, mediante el uso de las "Curvas de Schade" ( Schade O H 1943 Analysis of Rectifier Operation *Proc. IRE* **31**(7) 341-361 ). En el cálculo del transformador, también estimaban la capacitancia y el voltaje máximo del capacitor. En la actualidad, se utilizan transformadores y capacitores de valores típicos, mientras que el filtrado final se realiza con un circuito integrado regulador de voltaje de 3 terminales, que puede ser fijo como el "7805", ó ajustable como el "LM317".

### 2.3 Filtros de audiofrecuencia (AF):

Cuando se trabaja con señales de corriente alterna (AC), es muy útil utilizar el **método de fasores** donde un condensador se puede considerar como una **impedancia compleja pura** que, para una capacitancia  $C$  y frecuencia angular  $\omega$ , se puede escribir en el Campo Complejo de las formas siguientes:

$$\mathbf{Z}_C = (0, X_C) = 0 + j X_C = Z_C e^{j\varphi_C} = (\omega C)^{-1} e^{-j\pi/2}$$

siendo  $j$  la unidad imaginaria ( $j^2 = -1$ ) y donde el ángulo de fase  $\varphi_C = -\pi/2$  es el argumento de la **impedancia compleja** de una capacitancia pura, que representa un adelanto de  $90^\circ$  de la corriente respecto del voltaje sobre el capacitor.

Es muy importante dejar claro (algo que está mal explicado en muchos libros de Física) que: la **reactancia capacitiva**  $X_C$  es un número real, pero no es positivo, sino **negativo**:

$$X_C = -(\omega C)^{-1}$$

Lo que sí es positivo, es el módulo de la impedancia compleja de la capacitancia pura:

$$Z_C = (\omega C)^{-1}$$

Cuando señales compuestas por diferentes frecuencias se aplican a un capacitor, la magnitud de su impedancia es mayor para las ondas de relativa baja frecuencia (es decir, pone más dificultad al paso de los sonidos graves, y deja pasar más fácilmente a los sonidos más agudos).

Este hecho tiene una importante aplicación en los circuitos preamplificadores y amplificadores de audio. En particular, los **divisores de frecuencia** pasivos (compuestos por capacitores, bobinas y resistores) que se encuentran dentro de algunas cajas acústicas ("baffles"), tienen configuraciones simples denominadas "**filtros pasa altos**" que dejan pasar las frecuencias medias y altas (a través de capacitores en serie) hacia los parlantes de sonidos medios y agudos ("tweeters"). También forman "**filtros pasa bajos**" que cortocircuitan a tierra los agudos (a través de un capacitor en paralelo) para que no lleguen a los parlantes de sonidos más graves ("woofers").

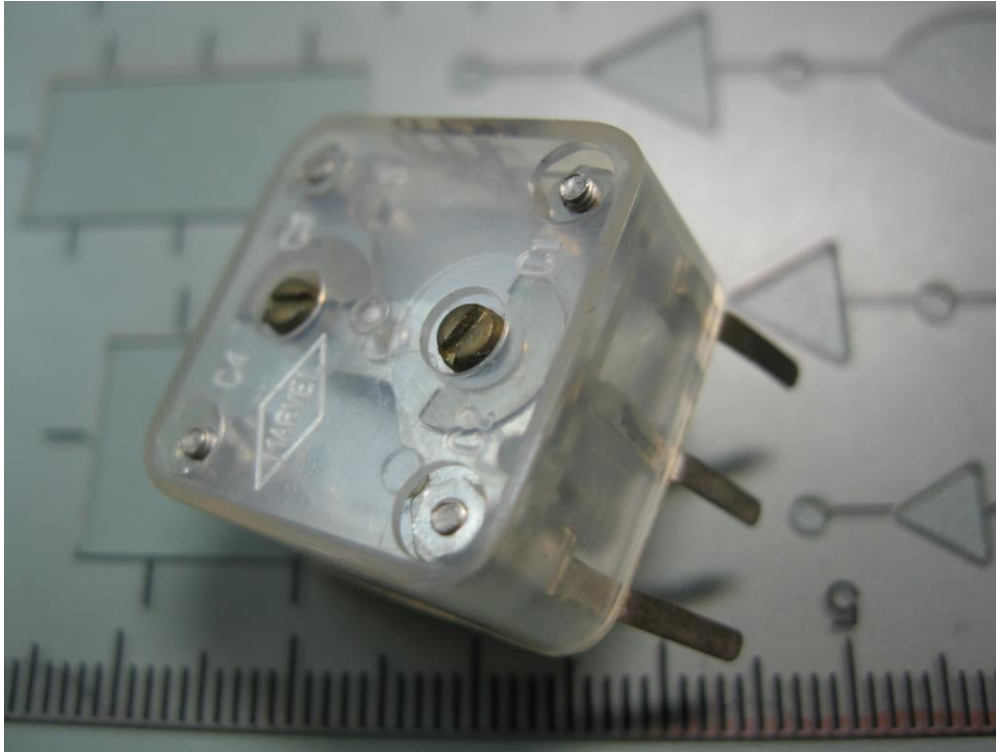
Estos divisores de frecuencia también se utilizan con "**luces psicodélicas**" en teatros, discotecas y *pubs*, para enviar los bajos hacia lámparas de cierto color, y los sonidos medios y los altos a otras lámparas de diferente color.

## 2.4 Sintonizadores y Filtros de radiofrecuencia (RF):

Elementos "reactivos" como capacitores y bobinas producen desfases entre corriente y voltaje cuando son *variables* (a diferencia de las resistencias, que no desfasan). Los capacitores hacen que la corriente se adelante al voltaje (ángulo de fase negativo) y las bobinas atrasan la corriente (ángulo de fase positivo). Esta propiedad se usa en los "**filtros pasabanda**" y en los "**filtros de rechazo de banda**" (o filtros "*notch*"), en los que los componentes determinan una o varias frecuencias particulares denominadas **frecuencias de resonancia**, para las cuales el efecto del capacitor sobre la corriente se compensa total o parcialmente con el efecto de la bobina, haciendo que la señal que posea esa frecuencia (y las cercanas) pueda pasar con menor impedancia en el filtro pasabanda, o por el contrario, que esa señal se pierda con mayor facilidad en el filtro *notch*.

Entonces, en los aparatos de radio, de televisión (TV), teléfonos, detectores de metales y otros sistemas de alta frecuencia, se utilizan capacitores y bobinas en la implementación de filtros pasabanda para dejar pasar solo un estrecho rango de frecuencias (filtros sintonizados de RF), para elegir o seleccionar emisoras (sintonizadores de RF), o bien para eliminarlas (filtros *notch*). Capacitores fijos y variables puestos en paralelo (en "tandem") forman parte de los circuitos "tanque" de sintonización de emisoras, conectados generalmente en paralelo con bobinas o con transformadores de RF.

Para ajuste fino de frecuencias en la calibración de equipos de comunicaciones se requieren capacitores de capacitancia variable y relativamente pequeña (menor que 1 nF) en los que las variaciones de capacitancia puedan ser mucho menores aún (1-100 pF). Para esto existen capacitores variables denominados **trimmers** de hasta 50 pF que son 2 láminas metálicas, separadas por una lámina aislante (de mica, mylar o teflon) muy delgada, con un tornillo de ajuste para regular la distancia de separación de las láminas (y por lo tanto, poder ajustar la capacitancia con cierta resolución). Para capacitancias relativamente mayores, existen **padders** que son similares a los *trimmers*, pero de mayor tamaño y con capacitancias en el rango 50-250 pF.



**Fig. 2:** Elemento de sintonía de un receptor superheterodino AM de bolsillo.

En la Figura se muestra un elemento capacitivo de sintonía de una radio superheterodina de amplitud modulada (AM) "de bolsillo" (casi del tamaño de un paquete de cigarrillos). El encapsulado plástico de este elemento sintonizador (de unos  $2 \times 2 \times 1 \text{ cm}^3$  aprox.) contiene 2 capacitores variables en tandem, formados por láminas metálicas que giran introduciéndose alternadamente unas en otras (el eje central está en la cara que no se ve en la Figura, donde se atornilla el "dial", que es una rueda numerada con las frecuencias de las emisoras). Se observan las ranuras de los tornillos de ajuste de 2 *trimmers*.

### **2.5 Filtros de frecuencia de línea:**

Los filtros *notch* también se utilizan para eliminar múltiplos de la frecuencia de la red eléctrica (50 ó 60 Hz) que puedan interferir en algún circuito cercano. Por ejemplo, si la red es de 50 Hz, según el equipo puede haber filtros *notch* implementados con capacitores, resistencias y bobinas para eliminar "ruido" de 50, 100, 150 y 200 Hz.

### **2.6 Protectores de componentes electrónicos, bobinas y contactos de relays:**

En "circuitos inductivos" (donde predomine el efecto de las bobinas de atrasar la corriente respecto del voltaje) los capacitores funcionan como supresores ("snubbers") de transitorios. Conectados en paralelo sirven para absorber la energía de la sobretensión inducida, ya que hacen que el transitorio de corriente evolucione más lentamente (y por lo tanto que el voltaje inducido sea menor), evitando que un contacto eléctrico se funda, se carbonice o perfore, o protegiendo componentes pasivos (como bobinas, transformadores y motores), o evitando quemar componentes activos (como transistores, [tiristores y triacs](#)).

Esto se puede ver matemáticamente con un poco de cálculo diferencial. En una bobina, el

flujo magnético  $\Phi$  creado por la corriente  $I(t)$  que circula en sus espiras en cada instante  $t$ , se puede considerar función de  $t$  o de  $I$ . Utilizando la Ley de Inducción Electromagnética de *Faraday-Lenz*, donde el voltaje inducido  $\varepsilon(t)$  en una bobina en el instante  $t$  es -menos- la rapidez de la variación del flujo magnético  $\Phi(t)$  en el circuito que esté entre esos terminales (con el lapso  $\Delta t$  tendiendo a cero:  $\Delta t \rightarrow 0$  s):

$$\varepsilon(t) = - \Delta\Phi(t)/\Delta t$$

y utilizando la definición de la autoinductancia  $L$  (en "H", "henry" o "henrios") donde el cambio  $\Delta I$  en la corriente tiende a cero:

$$L \equiv \Delta\Phi(I)/\Delta I$$

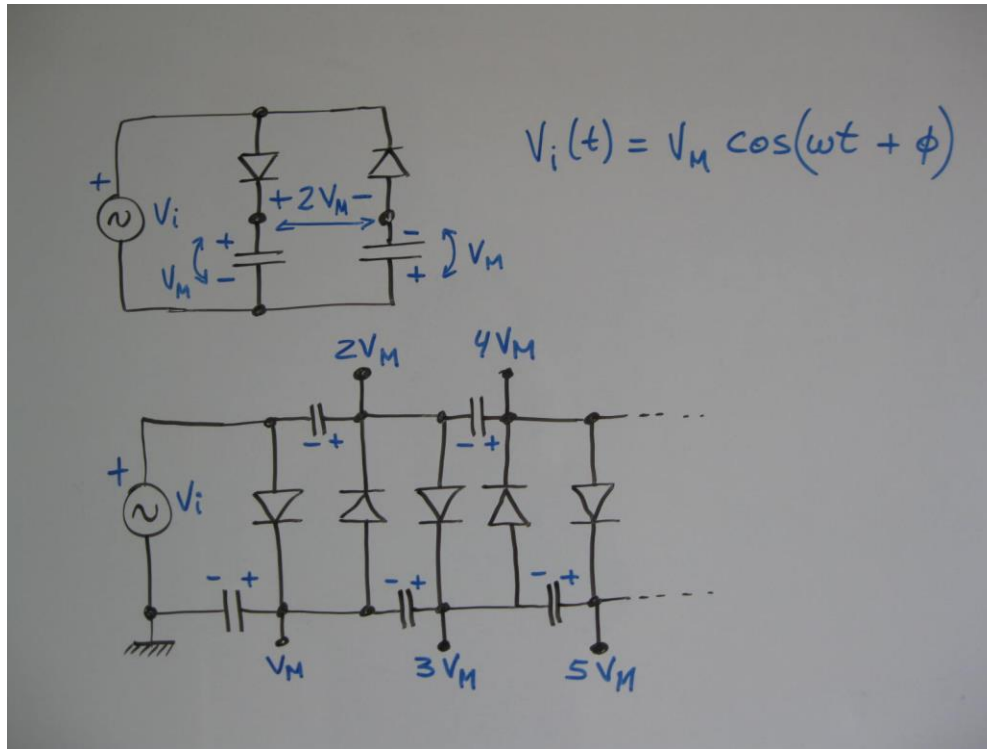
se tiene que (usando la regla de derivación de una composición de funciones o "regla de la cadena", para  $\Delta t \rightarrow 0$  s)

$$\varepsilon(t) = - \Delta\Phi/\Delta t = - (\Delta\Phi/\Delta I) (\Delta I/\Delta t) = - L (\Delta I/\Delta t)$$

Para una dada bobina,  $L$  es una constante (que depende de la geometría de la bobina y del material magnético en su interior). Esto significa que la interrupción o conexión muy rápida o repentina de la corriente (es decir  $\Delta I/\Delta t$  muy grande) de un circuito inductivo (generalmente con bobinas o motores donde  $L$  es muy grande), produce un transitorio de voltaje  $\varepsilon(t)$  inducido de gran amplitud, que generalmente supera los 3kV/mm (ruptura dieléctrica del aire), y por lo tanto produce chispas. Esto sucede en los contactos de interruptores y en algunos componentes de estado sólido trabajando en conmutación, que pueden dañarse por esta sobretensión que dura una fracción de milisegundo.

## 2.7 Multiplicadores de Voltaje:

Conectando [diodos rectificadores](#) y capacitores, se pueden implementar configuraciones que a partir de un voltaje alterno (AC) carguen los capacitores en los semiciclos AC, llegando a alcanzar alto voltaje entre dos puntos dados del circuito. Estos circuitos se utilizan en fuentes de alto voltaje (como por ej. las fuentes de televisores y de ozonizadores de aire en hospitales y de agua en piscinas).



**Fig. 3:** Diagramas esquemáticos de un duplicador de voltaje y de un multiplicador de voltaje extendible, a partir de una fuente de voltaje AC  $V_i(t)$  de amplitud  $V_M$ , capacitores y diodos rectificadores. En el segundo circuito, cada capacitor queda cargado con  $V_M$  y, donde se unen el diodo y el capacitor  $n$ -ésimos, se tiene el voltaje de salida  $V_o(n) = nV_M$ .

## 2.8 Acumuladores (digitales y analógicos) de información:

junto con la gran familia de "FET's" (*Field Effect Transistors*, transistores de efecto de campo), los capacitores se utilizan en referencias de voltaje, dentro de "chips" de memorias y en circuitos lógicos.

## 2.9 Constantes de tiempo y acoplamientos:

Los capacitores sirven para producir constantes de tiempo (del tipo  $\tau = RC$  o equivalentes) en temporizadores, alarmas, sirenas, atenuadores de luz ("dimmers") y [convertidores portátiles de voltaje](#).

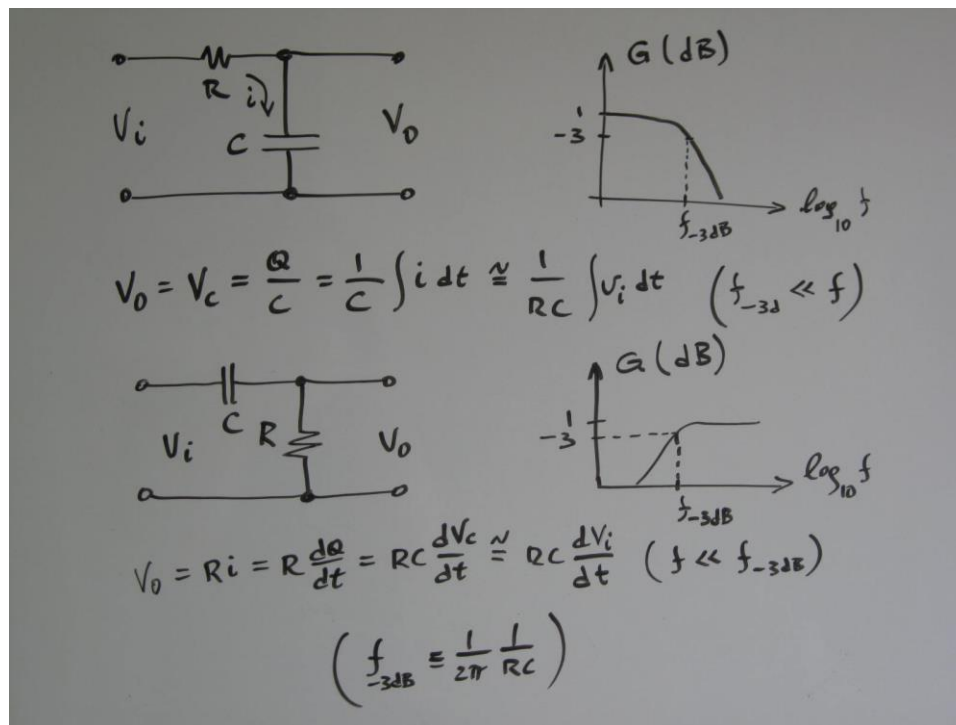
Los capacitores también sirven para acoplar circuitos lógicos, etapas de amplificadores y sondas con instrumentos (como osciloscopios).



## 2.10 Integradores y derivadores RC:

Las constantes de tiempo  $RC$  también se utilizan para hacer que un capacitor en paralelo (como en una configuración *pasa bajos*) se comporte como un integrador de los voltajes con frecuencias superiores a la frecuencia de corte  $f_{-3dB}$  del filtro.

Por el contrario, un capacitor en serie (como en una configuración *pasa altos*) se comporta como un derivador de los voltajes con frecuencias inferiores a la frecuencia de corte  $f_{-3dB}$  del filtro.



**Fig. 4:** Filtro pasa-bajos funcionando como integrador y filtro pasa-altos funcionando como derivador. Diagrama esquemático de cada circuito, Diagrama de Bode de la ganancia  $G$  en decibel (dB) de cada filtro, y deducción de su funcionamiento como integrador y como derivador respectivamente.

Por ejemplo, cuando se obtiene el ciclo de histéresis magnética en la pantalla de un osciloscopio, se mide la intensidad  $B(t)$  del campo magnético alterno (de frecuencia  $f$ ) producido por un bobinado AC en el material. Esto se puede implementar con un integrador (formado simplemente por una resistencia y un capacitor tales que la frecuencia  $f$  sea mucho mayor que frecuencia de corte  $f_{-3dB}$  del filtro RC pasabajos). Como el voltaje  $\varepsilon(t)$  inducido en los extremos del bobinado es proporcional a la derivada del flujo magnético  $\Phi$ , este voltaje se aplica al integrador, y de este modo la señal de salida resulta proporcional a  $\Phi(t)$  y por lo tanto, también proporcional a  $B(t)$ .

## 2.11 Selectores o conmutadores táctiles:

En selectores de pisos en ascensores, teclado en cajeros, y en dispositivos como las [ruedas](#)

[táctiles de los iPod's](#), los capacitores sirven como *interruptores electrostáticos*, en lugar de los clásicos "botones" electromecánicos que actúan por presión mediante piezas móviles.

### 2.12 Desfasadores de línea (Corrección del "factor de potencia"):

En un circuito AC (de corriente alterna de 50 ó de 60 Hz) hay que distinguir entre dos potencias:

**Potencia media** que se calcula como la media de la potencia instantánea  $P(t)$  en un período, y que representa la potencia realmente utilizada por la maquinaria, que suele especificarse en watt (W); y

**Potencia aparente** que es el producto de los valores eficaces (RMS, *root mean square*) de la corriente y el voltaje:

$$P_{ap} \equiv I_{rms} V_{rms}$$

Esta es la potencia relacionada con la energía eléctrica que se cobra, usualmente especificada en "volt-ampere" (VA). La diferencia entre esta potencia y la media siempre se puede expresar mediante:

$$P_{av} = P_{ap} \cos \varphi$$

donde el ángulo de fase  $\varphi$  es el argumento de la **impedancia compleja** total del circuito:

$$\mathbf{Z} = Z e^{j\varphi} = Z (\cos\varphi + j \sin\varphi)$$

Cuando los circuitos son puramente resistivos (ángulo de fase  $\varphi = 0$ ), ambos tipos de potencia coinciden. Pero las industrias suelen tener maquinarias con motores e iluminación con tubos fluorescentes (que usan bobinas). Esto hace que la instalación eléctrica industrial sea equivalente a un circuito fuertemente inductivo ( $\varphi$  grande), lo que ocasiona una gran diferencia entre la  $P_{ap}$  de la energía que se les cobra y la  $P_{av}$  que se utiliza. Por eso, en algún sitio de estos establecimientos industriales, se encuentran conectados y refrigerados "bancos de capacitores" que mejoran el **factor de potencia** "cos  $\varphi$ " (disminuyen el "coseno fi").

La capacidad que se puede agregar a la instalación (para disminuir la fase  $\varphi$ ) no es arbitraria. El factor de potencia está limitado legalmente, ya que el exceso de capacitores en la red podría ocasionar transitorios de corrientes muy altos durante la puesta en marcha de la industria, haciendo "saltar" la red eléctrica de una parte de la ciudad durante la sobrecarga.

### 2.13 Sensores y Transductores:

Como transductores entre ondas acústicas y eléctricas, elementos capacitivos se usan como emisores y como receptores de ecógrafos en medicina y de sonares en biología marina.

En audio se usan en los antiguos fonocaptos ("cápsulas de cristal y cerámicas"), en micrófonos cerámicos y en altavoces de agudos ("tweeters").

También se usan con piezoeléctricos en micro-manipuladores de microscopios y en cubas de limpieza por ultrasonido.

Como sensores se utilizan en varios tipos de medidores, como por ejemplo de presión, tensión y aceleración. También se usan en sistemas microelectromecánicos (MEMs, *MicroElectroMechanical Systems*) con dispositivos cuyo tamaño es del orden de 0.01 mm.