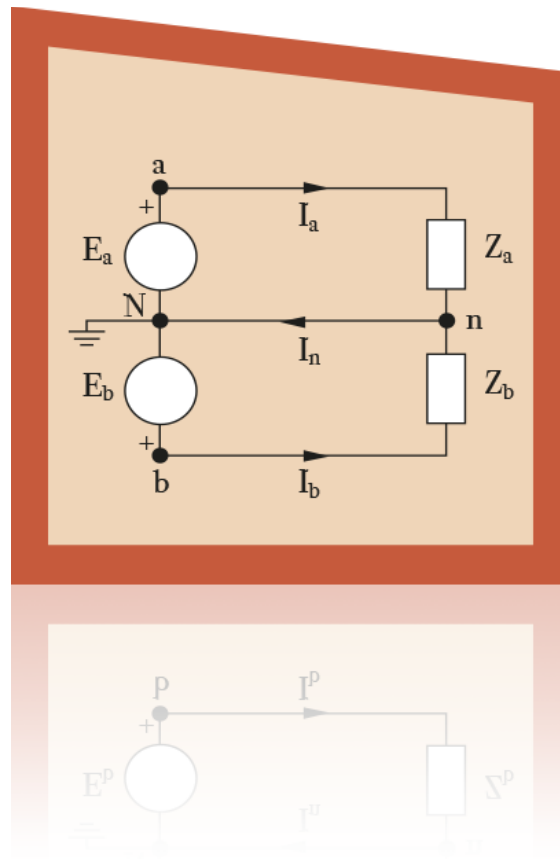


Teoría de Circuitos I

Tema 5. Síntesis de circuitos



Profesores

Alberto Arroyo Gutiérrez

Pablo Benavente Rico

Eugenio Sainz Ortiz

Sergio Bustamante Sánchez

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética

Luis Vejo Fernández

Departamento de Transportes y Tecnología de Proyectos y Procesos

GRADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA.

TEORÍA DE CIRCUITOS I. 2º Curso.

Tema 5.

INTRODUCCIÓN A LA SÍNTESIS DE CIRCUITOS.

1. Relaciones básicas.

2. Filtros:

2.1 Introducción.

2.2 Clasificación de los filtros.

2.3 Filtros activos y pasivos.

3. Filtros pasivos:

3.1 Pasa-bajas.

3.2 Pasa-altas.

3.3 Pasa-banda.

3.4 Rechaza-banda.

3.5 De doble sintonización.

3.6 Campo de utilización y aplicaciones.

4. Generalidades de filtros activos:

4.1 Ventajas e inconvenientes de los filtros activos

4.2 Campo de utilización

INTRODUCCIÓN A LA SÍNTESIS DE CIRCUITOS

1. RELACIONES BÁSICAS

1.1. Escala Logarítmica

El uso de logaritmos **permite graficar la respuesta** de un sistema para un intervalo de valores que de otra forma sería imposible o difícil de manejar con una escala lineal.

Pueden compararse los niveles de **potencia, tensión y otros** similares sin tratar con números muy grandes o muy pequeños que con frecuencia podrían empañar el verdadero impacto de la diferencia de magnitudes.

El espaciamiento de la escala logarítmica se determina al **tomar el logaritmo común (base 10) del número**.

Dado que:

$$\log_{10} 1 = 0$$

$$\log_{10} 10 = 1$$

$$\log_{10} 100 = 2$$

$$\log_{10} 1000 = 3 \dots\dots\dots$$

el espaciamiento entre 1 y 10, 10 y 100, 100 y 1000, etc, será el mismo, comprimiéndose en el extremo superior de cada intervalo. La presentación de datos en una **escala logarítmica**, figura 1.1, puede ser útil cuando los datos

cubren una amplia gama de valores, en este caso, el logaritmo los reduce a un rango más manejable.

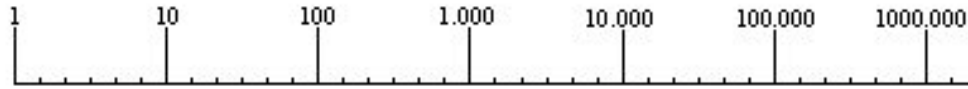


Figura 1.1: Escala logarítmica de base 10, las primeras potencias de 10 (1, 10, 100, 1000...) se disponen a intervalos iguales.

1.2: Ganancia de potencia

Dos **niveles de potencia** pueden **compararse** utilizando una unidad de medición llamada **bel** (en honor a Alexander Graham Bell) o **belio** (B), la cual está definida por la siguiente ecuación:

$$B = \log_{10} \frac{P_{\text{sal}}}{P_{\text{ent}}}$$

Estas relaciones de potencia son de **gran utilidad** en **sistemas de transmisión de la información**.

Como el belio es una unidad muy grande, se utiliza un submúltiplo diez veces menor: el **decibelio** (dB), cuya ecuación es:

$$\text{dB} = 10 \log_{10} \frac{P_{\text{sal}}}{P_{\text{ent}}}$$

El decibelio fue introducido por los ingenieros de las compañías de teléfonos como **medida de la pérdida de potencia que sufre una señal** al atravesar varios circuitos.

Por tanto, las expresiones en dB, son comparaciones logarítmicas (en base 10) entre magnitudes del mismo tipo, es decir, son adimensionales.

Si los niveles de potencia son **iguales** ($P_{\text{sal}} = P_{\text{ent}}$) no existirá cambio en el nivel de potencia y **$\text{dB} = 0$** . Si existe un **incremento** en el nivel de potencia ($P_{\text{sal}} > P_{\text{ent}}$), el nivel resultante en decibelios **será positivo**.

Si existe una **disminución** en el nivel de potencia ($P_{\text{sal}} < P_{\text{ent}}$), el nivel resultante en decibelios **será negativo**. Para el **caso especial** de $P_{\text{sal}} = 2 P_{\text{ent}}$, la ganancia en decibelios es:

$$\text{dB} = 10 \log_{10} \frac{P_{\text{sal}}}{P_{\text{ent}}} = 10 \log_{10} 2 = 3\text{dB}$$

Como ejemplo, en la industria del audio, se considera que un aumento de 1 dB es apenas perceptible, un aumento de 2 dB ya es apreciable y un aumento de 3 dB normalmente da por resultado un incremento fácil de distinguir en el nivel audible. Un incremento adicional en el nivel audible se logra, por lo general, mediante el simple aumento del nivel de salida por otros 3 dB (si se usa un sistema de 8 W, un aumento de 3 dB requeriría una salida de 16 W, mientras que un incremento adicional de 3 dB, en total 6 dB, requeriría un sistema de 32 W).

1.3. Ganancia de tensión y de intensidad

Los decibelios también se utilizan para ofrecer una **comparación entre niveles de tensión e intensidad**. En este caso, a partir de las propiedades de los logaritmos:

$$\text{dB} = 20 \log_{10} (\text{relación de módulos de variables circuitales } v, i)$$

que constituyen las ganancias en tensión e intensidad expresadas en dB.

Nótese que cuando se comparan niveles de tensión, el doble da por resultado un cambio de 6 dB en lugar de uno de 3dB, como ocurre para los niveles de potencia.

1.4. Respuesta auditiva humana

Una de las aplicaciones más frecuentes de la escala en decibelios se encuentra en las industrias de comunicación y entretenimiento. El oído humano no responde de una manera lineal a los cambios en el nivel de potencia de audio sino que responde en forma logarítmica a cambios en los niveles de potencia de audio.

Es posible formular una conclusión general de valor práctico:

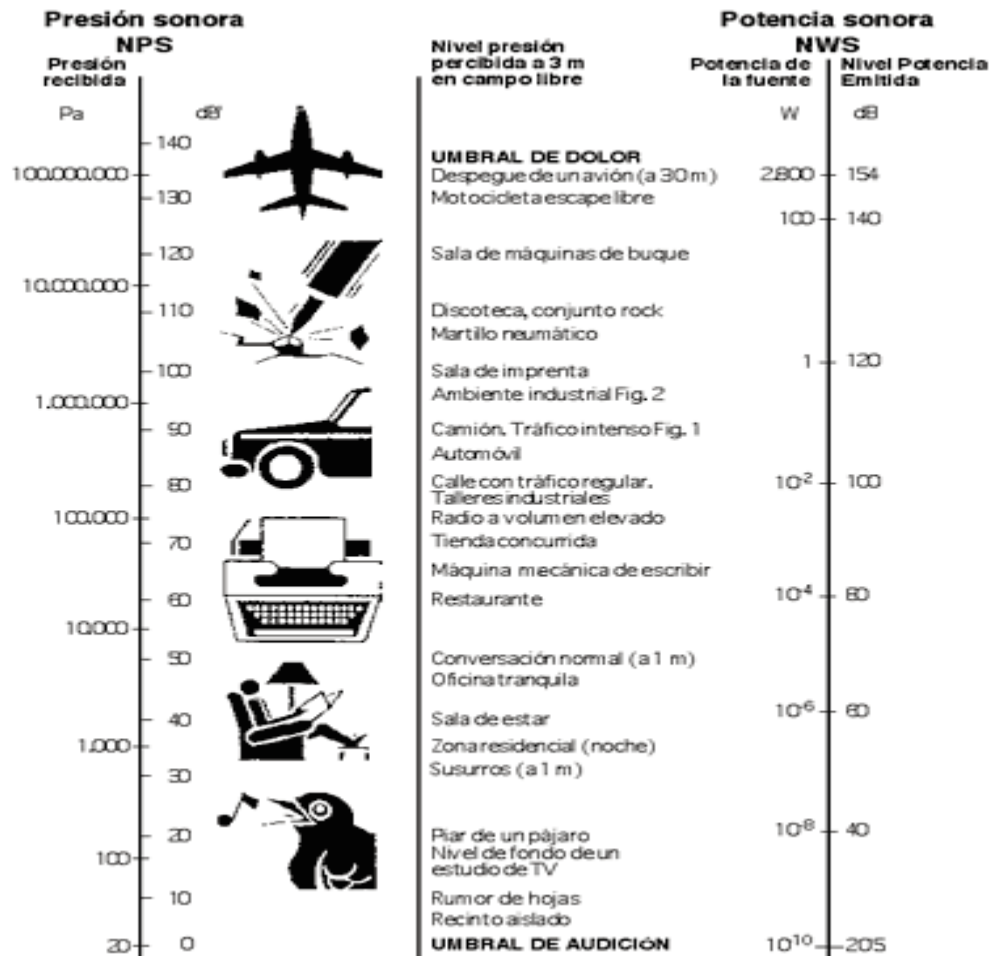
“Para duplicar el nivel de sonido recibido por el oído humano, el nivel de potencia (W) de la fuente acústica debe incrementarse por un factor de 10”.

El nivel de presión sonora determina la intensidad del sonido que genera una presión sonora instantánea (es decir, del sonido que alcanza a una persona en un momento dado), se mide en dB –en vez de en pascuales, Pa– y varía entre **0 dB** umbral de audición y **140 dB** umbral de dolor.

INTENSIDAD RELATIVA	SPL (DBA*)	FUERZA (INTENSIDAD)
100.000.000.000.000	140	Avión de propulsión a chorro y fuego de artillería
10.000.000.000.000	130	Límite de dolor
1.000.000.000.000	120	Límite de sensibilidad
100.000.000.000	110	
10.000.000.000	100	Interior de avión de hélice
1.000.000.000	90	Orquesta sinfónica completa o banda
100.000.000	80	Interior de un automóvil con velocidad alta.
10.000.000	70	Conversación cara a cara
1.000.000	60	
100.000	50	Interior de oficina general
10.000	40	Interior de oficina privada
1.000	30	Interior de recámara
100	20	Interior de teatro vacío
10	10	
1	0	Umbral de audición

Figuras 1.4.1: Niveles de sonido típicos y sus niveles en decibelios.

La figura 1.4.1 muestra la comparación del nivel de la presión del sonido SPL (en dB) y los sonidos comunes y la figura 1.4.2 compara los valores de la presión sonora en μPa entre los umbrales de audición y de dolor y sus correspondientes en dB. Con unas siluetas se han ilustrado diversos ejemplos de situaciones que producen un ruido aproximado al de la escala.



Figuras 1.4.2: Niveles de sonido típicos y sus niveles en decibelios.

1.5. Curva Universal de Resonancia

Otra forma de plantear la resonancia en circuitos RLC serie sería a través de lo que se denomina Curva universal de resonancia y que se representa en la figura 1.5:

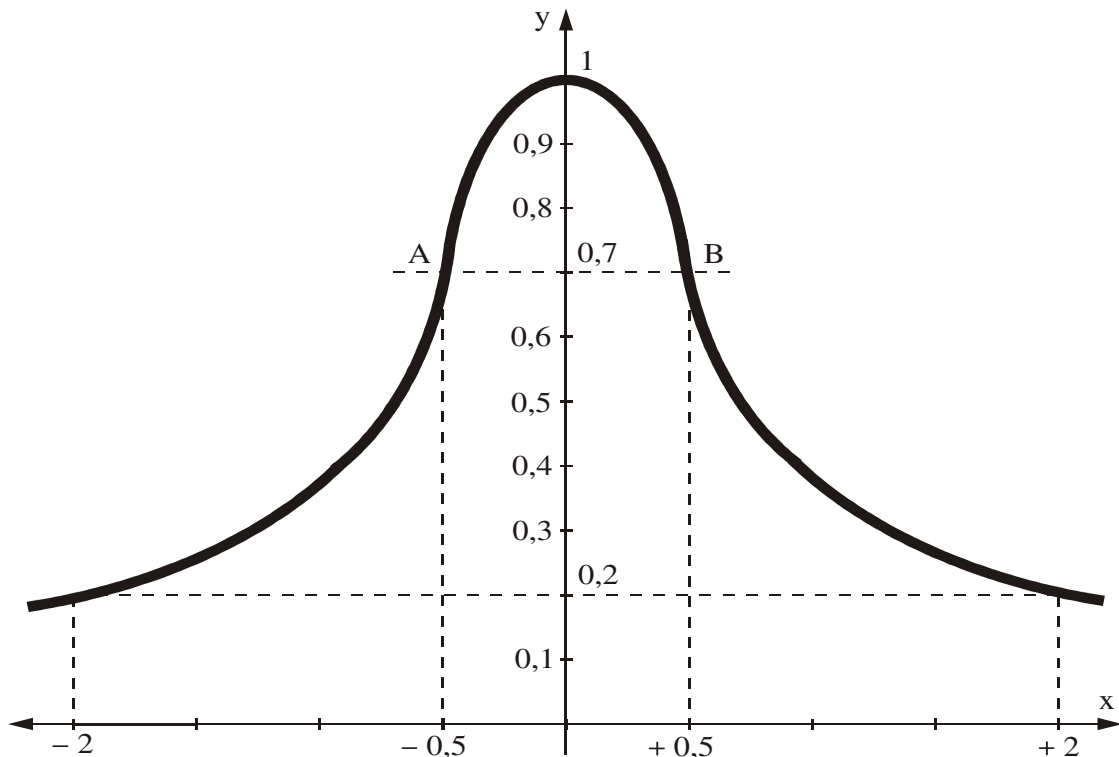


Figura 1.5: Curva universal de resonancia

Esta curva se suele representar en un entorno de x , entre $+2$ y -2 y tiene por ecuación matemática:

$$y = \frac{1}{\sqrt{1 + 4x^2}}$$

El ancho de banda corresponde al entorno $x = \pm 0,5$ (puntos A y B de la curva, llamados **puntos de potencia media**).

En Electrónica se considera que la banda de paso está definida **a uno y otro lado de la frecuencia de resonancia** por la pérdida de 3 dB en el valor de la intensidad respecto de la de resonancia; en tal caso:

$$-3\text{dB} = 20 \log_{10} \frac{I}{I_0} \Rightarrow \frac{-3}{20} = \log_{10} \frac{I}{I_0} \Rightarrow \text{anti log}_{10} \left(\frac{-3}{20} \right) = \frac{I}{I_0} = 0,707$$

entonces:

$$0,707 = \frac{1}{\sqrt{1 + 4x^2}} \quad \text{de donde } x = \pm 0,5$$

2. FILTROS

Quizás la **aplicación más importante de la síntesis** de circuitos sea la de obtener la **amplia gama de filtros** utilizados en Telecomunicaciones. Los filtros son circuitos eléctricos destinados a **favorecer** (idealmente con atenuación nula) el paso de señales de determinadas frecuencias e **impedir** totalmente (idealmente con atenuación infinita) el paso de frecuencias diferentes a las seleccionadas, **de forma que pueda seleccionarse el espectro que se desea transmitir.**

Se define la **atenuación** en decibelios (dB) de un filtro como el de la figura 2. como:



Figura 2. Filtro.

$$A(\text{dB}) = 20 \log \frac{|V_1(j\omega)|}{|V_2(j\omega)|}$$

Donde $V_1(j\omega)$ y $V_2(j\omega)$ son las señales en la entrada y en la salida del filtro, respectivamente. La mayor o menor atenuación de la señal depende de la frecuencia.

Los filtros ajustables se emplean en radio y televisión para sintonizar la emisora deseada. La sintonización se logra al ajustar la frecuencia de resonancia de un circuito RLC de tal forma que pase la frecuencia deseada y se rechacen las otras.

Un ejemplo es el “filtro telefónico”: el sistema telefónico constituye un filtro de las señales sonoras que retransmite; es precisamente un filtro pasa-banda que deja pasar las señales de frecuencias entre 300 Hz y 3 kHz. Por ello, todas las señales del sistema tienen que ser audibles para el usuario, incluyendo el tono de marcación y la señal de ocupado. De modo similar, todas las señales del usuario hacia el sistema tienen que ser audibles, incluyendo la señal correspondiente al caso en el que el usuario oprime una tecla.

A la pregunta de “**para que se utilizan los filtros**”, se podrían considerar algunas de las opciones que se enumeran a continuación:

➤ Para el Acondicionamiento de señal de entrada

- **E**liminación de ruido en las señales de los sensores
- **S**elección de las frecuencias útiles
- **E**liminación de las frecuencias indeseables

➤ Para la Digitalización de señales

- **E**liminación de frecuencias superiores (Aliasing)
- **F**ijación del ancho de banda para compresión o transmisión.

➤ Para el Acondicionamiento de señal producida

- **E**liminación de armónicos
- **S**upresión de interferencias conducidas y radiadas
- **M**ejora de la linealidad o el rendimiento

2.1. Introducción.

Un **filtro eléctrico** es un circuito capaz de atenuar determinadas frecuencias del espectro de la señal de entrada y permitir el paso de las demás. Se denomina **espectro** de una señal a su descomposición en una escala de amplitudes y fases respecto de la frecuencia. Obsérvese que mientras el osciloscopio es un instrumento que analiza la señal en relación con el tiempo, el analizador de espectro lo hace por medio de la Transformada de Fourier.

Entonces se denomina **filtro** a cualquier combinación de elementos pasivos (R, L y C) y/o activos (transistores o amplificadores operacionales) diseñados para seleccionar o rechazar una banda de frecuencias; distinguiendo entre estos, filtros analógicos y filtros digitales. Los filtros **analógicos** son los que se encargan de trabajar con señales de tipo analógicas (continuas), y los **digitales** los que se encargan de trabajar con señales de tipo discretas, cuya implementación generalmente se realiza vía software. Se analizarán aquí los filtros analógicos.

En **sistemas de comunicación**, los filtros se utilizan para dejar pasar aquellas frecuencias que contengan la información deseada y rechazar las restantes. En los **sistemas estereofónicos**, los filtros pueden utilizarse para aislar bandas particulares de frecuencias con el propósito de aumentar o disminuir el énfasis (fuerza) de la salida del sistema acústico (amplificador, bobina, etc.). Los filtros se utilizan para filtrar cualquier frecuencia no deseada, comúnmente denominada **ruido**, debido a las características no lineales de algunos dispositivos electrónicos o a señales captadas del medio ambiente.

2.2. Clasificación de los filtros.

Los filtros se pueden **clasificar** de la siguiente forma:

→ Según su **Función**

- Filtros de radiocomunicación.
- Filtros de modulación y demodulación
- Filtros de análisis de espectro.
- Filtros que mejoran la relación señal-ruido.
- Multiplicadores de frecuencia.
- Filtros correctores.

→ Según la **Gama de Frecuencias**

- Audiofrecuencias.
- Hiperfrecuencias
- Etc ...

→ Según su **Tecnología**.

- Filtros Pasivos.
- Filtros Activos.

2.3. Filtros Pasivos y Filtros Activos.

a) Filtros Pasivos:

Están construidos exclusivamente por elementos pasivos como resistencias, condensadores y bobinas en serie o paralelo. Estos filtros generalmente son inviabiles en bajas frecuencias al exigir inductancias muy grandes.

Las características de ganancia de tensión de los cuatro filtros pasivos ideales, se muestran en la Figura 2.3.1; a) corresponde a un **filtro pasa-bajas**, b) corresponde a un filtro **pasa-altas**, c) corresponde a un **filtro pasa-banda** y d) corresponde a un filtro **rechaza-banda**.

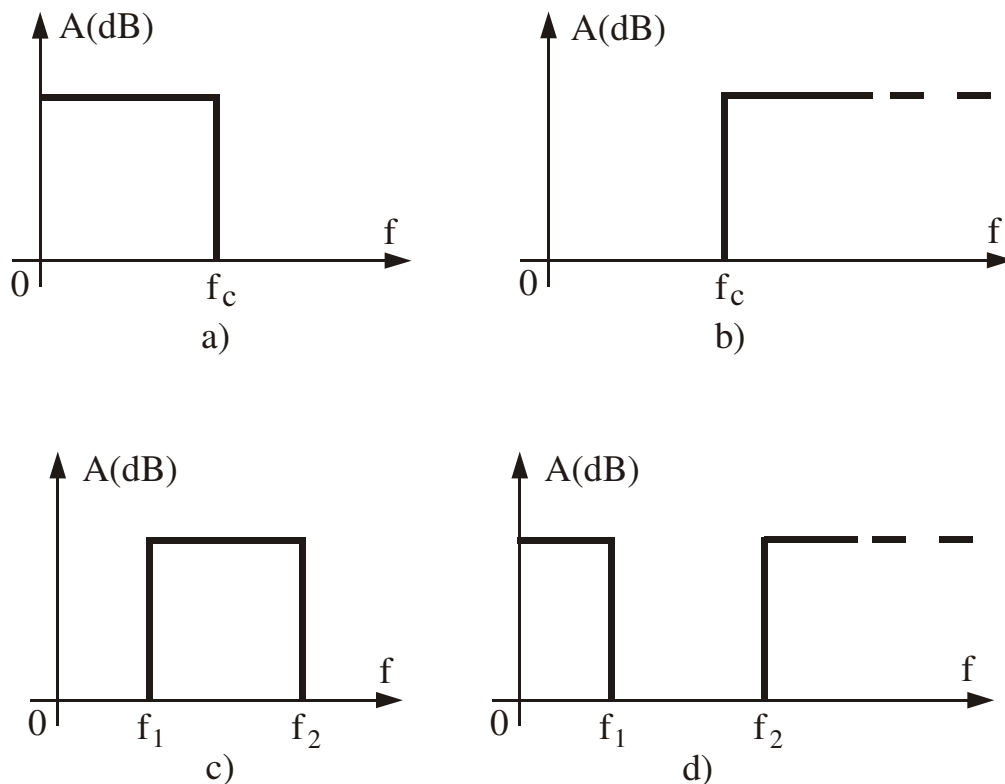


Figura 2.3.1. Características de cuatro filtros ideales.

El presente capítulo se circunscribe a los filtros pasivos. El tema de los filtros es muy amplio y continúa recibiendo gran apoyo de investigación por parte de la industria y los gobiernos a medida que se desarrollan nuevos sistemas de comunicación para cubrir las demandas de mayor volumen y velocidad, de manera que el diseño de sistemas de filtros puede volverse muy complejo y sofisticado.

Sin embargo, en general, todos los filtros pertenecen a las cuatro amplias categorías de pasa-bajas, pasa-altas, pasa-banda y rechaza-banda, como se ilustra en la figura 2.3.2.

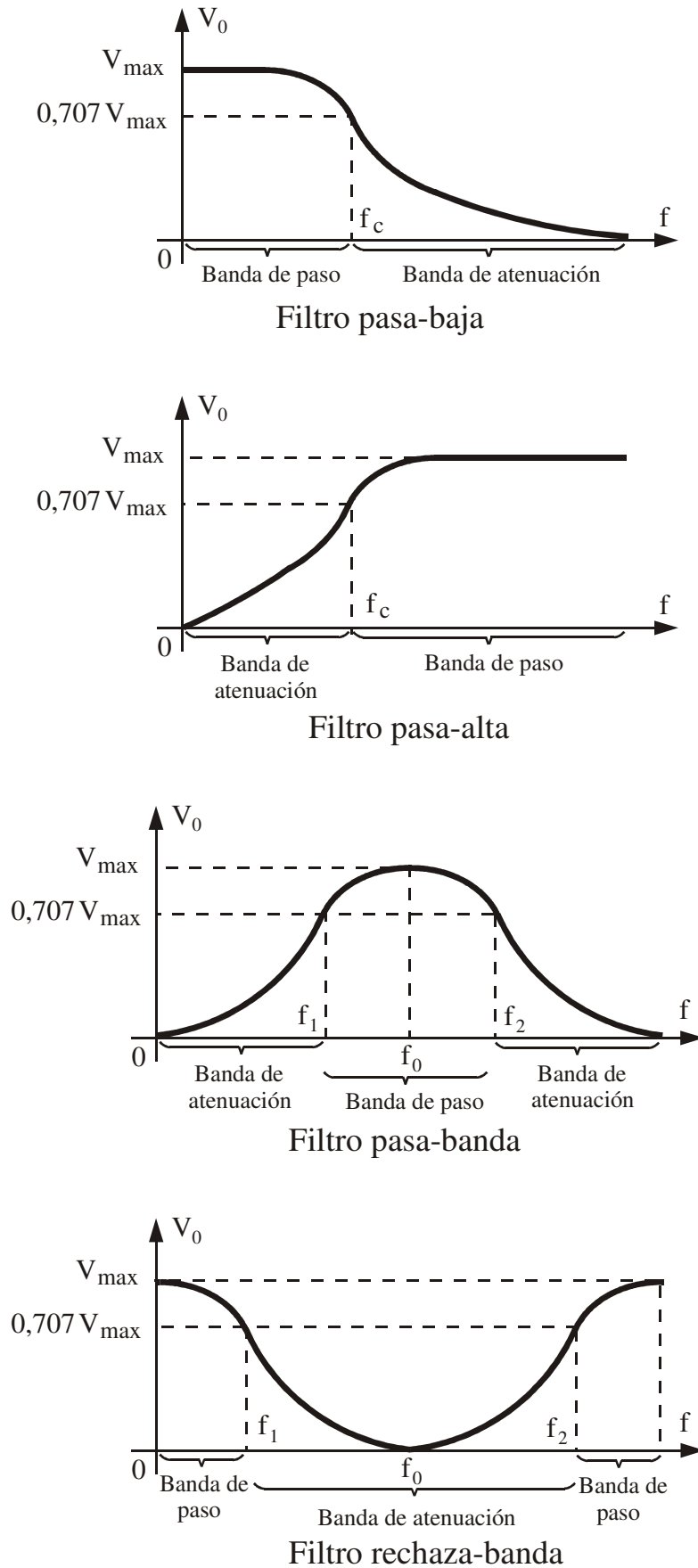


Figura 2.3.2. Definición de las cuatro categorías comunes de filtros.

Para cada tipo existen **frecuencias críticas** que definen las regiones de bandas de paso y bandas de atenuación (a menudo llamadas bandas de rechazo).

b) Filtros Activos:

Constan de elementos pasivos (R, L y C) asociados a otros activos (válvulas, transistores o amplificadores operacionales).

La **primera** generación de estos filtros utilizaba las válvulas, por lo que tenían un consumo de potencia muy alto, ruidos, baja ganancia, etc.

La **segunda** empleaba transistores como elementos activos y, aunque tenía más ventajas que la anterior, no tenía unas características enteramente satisfactorias.

La **tercera** generación, utiliza los amplificadores operacionales. La alta resistencia de entrada y la baja resistencia de salida de estos dispositivos, además de otras características, permiten la realización de filtros con cualidades óptimas.

Los filtros pasivos no requieren fuentes externas de energía, y funcionan sin alimentación. En cambio los activos se componen generalmente por circuitos RC y amplificadores, los cuales necesitan alimentación externa para su funcionamiento.

3. FILTROS PASIVOS

3.1. Filtro RC pasa-bajas.

El circuito o montaje más sencillo está formado por una resistencia en serie con un condensador, tomando la salida en el condensador, como se indica en la figura 3.1.1.

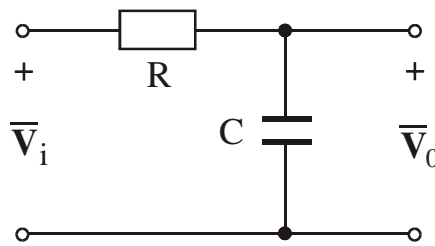


Figura 3.1.1. Filtro pasa-bajas RC.

Las frecuencias altas se derivan por el condensador, ya que su impedancia (reactancia capacitiva) es muy pequeña ($X_C = \frac{1}{2\pi f C}$), mientras que las bajas se quedan en él.

Si $f \rightarrow 0 \Rightarrow X_C \rightarrow \infty$ (C como c.a, solo queda R)

$V_0 = V_i$ (salida de alto nivel)

Si $f \rightarrow \infty \Rightarrow X_C \rightarrow 0$ (C como c.c, queda R) $\Rightarrow$

$V_0 = 0$ (salida de nivel bajo)

Una gráfica de la magnitud de V_0 en función de la frecuencia producirá la curva de la figura 3.1.2. El objetivo será obtener la frecuencia a la que ocurre la transición de la banda de paso a la banda de atenuación, llamada comúnmente f_c o frecuencia de corte (o crítica), por encima de la cual la tensión de salida cae por debajo del 70,7 % de la tensión de entrada.

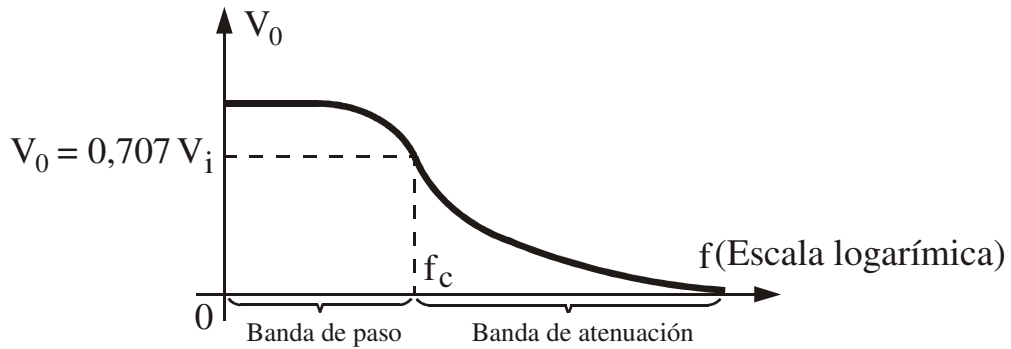


Figura 3.1.2. V_0 en función de la frecuencia para un filtro RC pasa-bajas

Para los filtros se utiliza muy a menudo una **gráfica normalizada** en lugar de la gráfica de V_0 en función de la frecuencia de la figura 3.1.2. La **normalización** es un proceso por medio del cual cantidades tales como tensión, corriente o impedancia se dividen entre una cantidad con la misma unidad de medición para establecer un nivel adimensional de un valor o intervalo específicos.

Por tanto, se puede **obtener una gráfica normalizada** para los filtros dividiendo la cantidad V_0 de la figura 2.3.2. entre la tensión aplicada V_i para el intervalo de frecuencias de interés. Dado que el valor máximo de V_0 para el filtro pasa-bajas de la figura 3.1.1 es V_i , dividiendo por este valor se obtiene la gráfica de **$A_v = \frac{V_0}{V_i}$** de la figura 3.1.3, en la que el valor máximo es 1 y la frecuencia de corte está en el nivel 0,707.

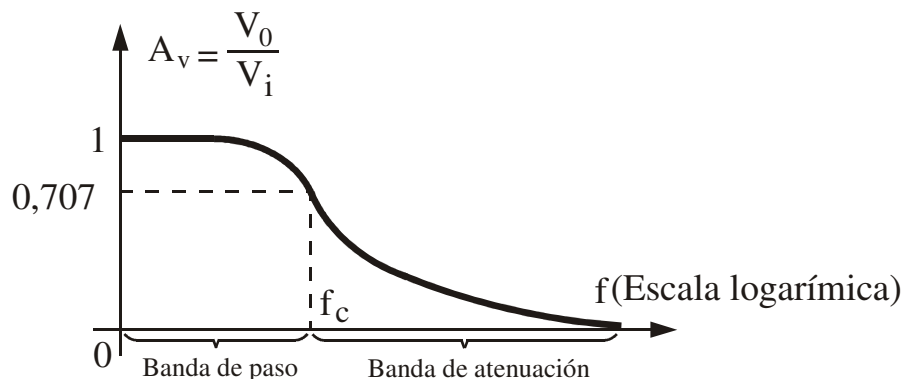


Figura 3.1.3. Gráfica normalizada de la figura 3.1.2.

En cualquier frecuencia intermedia, la tensión de salida V_0 de la figura 3.1.1 puede determinarse utilizando la regla del divisor de tensión:

$$\bar{V}_0 = \frac{X_{C/-90^\circ} \bar{V}_i}{R - jX_C}$$

o bien:

$$A_v = \frac{\bar{V}_0}{\bar{V}_i} = \frac{X_{C/-90^\circ}}{R - jX_C} = \frac{X_{C/-90^\circ}}{\sqrt{R^2 + X_C^2} \angle -\tan^{-1}(X_C/R)}$$

$$A_v = \frac{X_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}} \angle -90^\circ + \tan^{-1}(X_C/R)$$

Por tanto, la **magnitud** de la razón $\frac{V_0}{V_i}$, se determina mediante:

$$A_v = \frac{V_0}{V_i} = \frac{X_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{R}{X_C}\right)^2 + 1}}$$

y el ángulo de **fase** se determina por:

$$\theta = -90^\circ + \tan^{-1} \frac{X_C}{R} = -\tan^{-1} \frac{R}{X_C}$$

Para la frecuencia especial en que $X_C = R$, la magnitud se convierte en:

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{X_C}{R}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 1}} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$$

la cual **define la frecuencia crítica o de corte** de la figura 3.1.3.

La frecuencia en que $X_C = R$ está determinada por:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f_c C} = R \Rightarrow f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

La expresión anterior indica que para todo filtro pasa-bajas, la aplicación de cualquier frecuencia menor a f_c da por resultado una tensión de salida V_0 que es al menos el 70,7 % de la máxima y para cualquier frecuencia por arriba de f_c la salida será menor que 70,7 % de la señal aplicada.

En resumen, para el filtro RC pasa-bajas de la figura 3.1.1:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

Para: $f < f_c$ $V_0 > 0,707 V_i$.
 mientras que para: $f > f_c$ $V_0 < 0,707 V_i$

En $f = f_c$ ($X_C = R$) $\Rightarrow -\tan^{-1}(R/X_C) = -\tan^{-1}1 = -45^\circ$ V_0 atrasado 45° de V_i .

La respuesta del filtro pasa-bajas de la primera gráfica de la figura 2.3.2, puede obtenerse también utilizando la combinación LR de la figura 3.1.4, con:

$$f_c = \frac{R}{2\pi L}$$

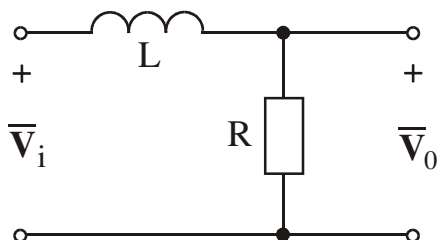


Figura 3.1.4. Filtro RL pasa-bajas.

Sin embargo la combinación RC es más popular debido al tamaño pequeño de los elementos capacitivos y a las no linealidades asociadas a los elementos inductivos.

3.2. Filtro RC pasa-altas.

El circuito o **montaje más sencillo** está formado por una resistencia en serie con un condensador, tomando la salida en la resistencia, como se indica en la figura 3.2.1.

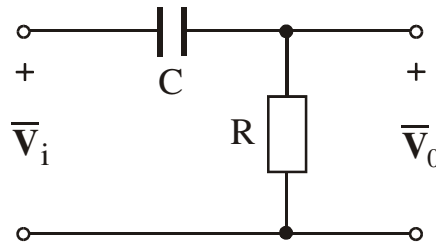


Figura 3.2.1. Filtro pasa-altas RC.

Si $f \rightarrow 0 \Rightarrow X_C \rightarrow \infty$ (C como c.a, solo queda R) $\Rightarrow V_0 = 0$ (salida de bajo nivel).

Si $f \rightarrow \infty \Rightarrow X_C \rightarrow 0$ (C como c.c, queda R) $\Rightarrow V_0 = V_i$ (salida de nivel alto).

En la figura 3.2.2 se proporciona una **gráfica de la magnitud en función de la frecuencia**, con la **gráfica normalizada** en la figura 3.2.3.

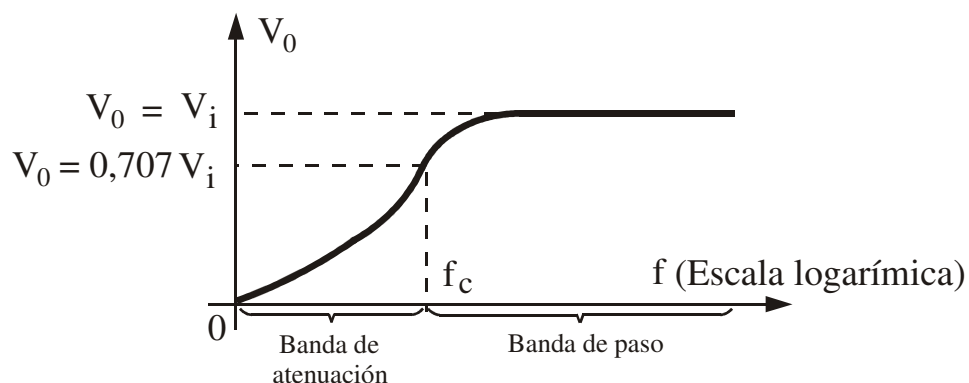


Figura 3.2.2. V_0 en función de la frecuencia para un filtro RC pasa-altas

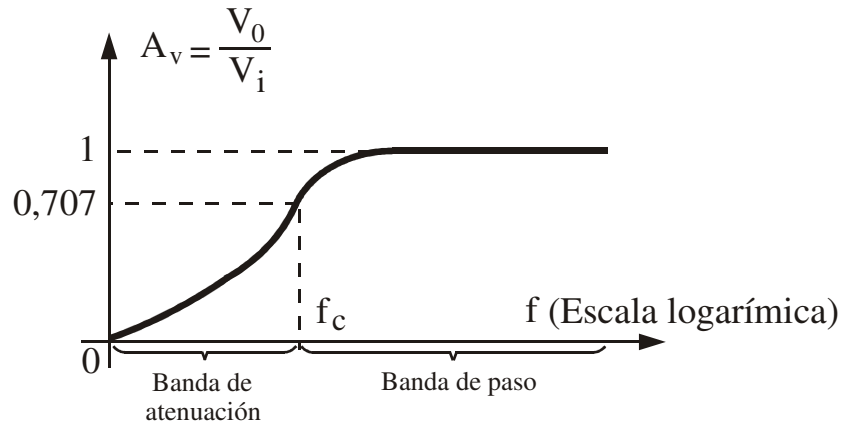


Figura 3.2.3. Gráfica normalizada de la figura 3.2.2.

En cualquier frecuencia intermedia, la tensión de salida V_0 de la figura 3.1.4 puede determinarse utilizando la regla del divisor de tensión:

$$\bar{V}_0 = \frac{R_{/0^\circ} \bar{V}_i}{R - jX_C}$$

o bien:

$$A_v = \frac{\bar{V}_0}{\bar{V}_i} = \frac{R_{/0^\circ}}{R - jX_C} = \frac{R_{/0^\circ}}{\sqrt{R^2 + X_C^2} \angle -\tan^{-1}(X_C/R)} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_C^2}} \angle \tan^{-1}(X_C/R)$$

Por tanto, la **magnitud** de la razón $\frac{V_0}{V_i}$, se determina mediante:

$$A_v = \frac{V_0}{V_i} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_C^2}} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{X_C}{R}\right)^2 + 1}}$$

y el ángulo de **fase** se determina por:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{X_C}{R}$$

Para la frecuencia especial en que $X_C = R$, la magnitud se convierte en:

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{X_C}{R}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 1}} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$$

la cual define la frecuencia crítica o de corte de la figura 3.2.3.

La frecuencia en que $X_C = R$ está determinada por:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f_c C} = R \Rightarrow f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

Para el filtro RC pasa–altas, la aplicación de toda frecuencia mayor a f_c dará por resultado una tensión de salida V_0 que es al menos el 70,7 % de la magnitud de la señal de entrada y para cualquier frecuencia por debajo de f_c la salida es menor que 70,7 % de la señal aplicada.

En **resumen**, para el **filtro RC pasa–altas** de la figura 3.1.4:

$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$		
Para:	$f < f_c$	$V_0 < 0,707 V_i$
mientras que para:	$f > f_c$	$V_0 > 0,707 V_i$

En $f = f_c$ ($X_C = R$) $\Rightarrow \tan^{-1}(X_C / R) = \tan^{-1} 1 = 45^\circ$ V_0 adelanta 45° a V_i

La respuesta **del filtro pasa–altas** de la segunda gráfica de la figura 2.3.2, puede obtenerse también utilizando la **combinación RL** de la figura 3.2.4, con:

$$f_c = \frac{R}{2\pi L}$$

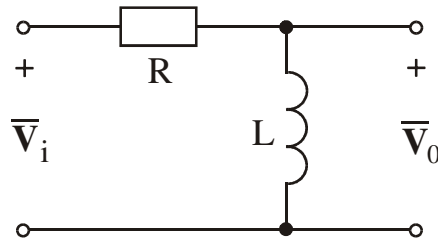


Figura 3.2.4. Filtro RL pasa–altas.

3.3. Filtros pasa-banda.

Para establecer la **característica pasa-banda** de la tercera gráfica de la figura 2.3.2, se utilizan **varios métodos**. Un método emplea los **filtros pasa–bajas y pasa–altas en cascada** como se muestra en la figura 3.3.1. Los componentes se seleccionan para establecer una frecuencia de corte para el filtro pasa–altas que es menor que la frecuencia crítica del filtro pasa–bajas, como se muestra en la figura 3.3.2.

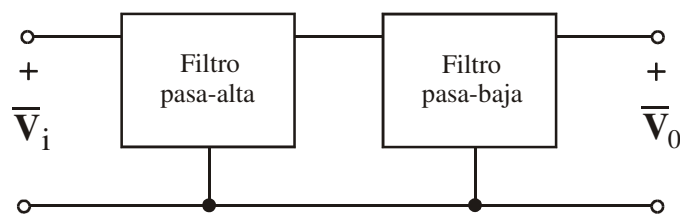


Figura 3.3.1. Filtro pasa–banda.

Una frecuencia baja f_1 podrá pasar a través del filtro pasa–bajas, pero tendrá poco efecto sobre V_0 debido a las características de rechazo del filtro pasa–altas. Una frecuencia alta f_2 podrá pasar a través del filtro pasa–altas sin problemas, pero no podrá alcanzar el filtro pasa–altas debido a las características del filtro pasa–bajas. Una frecuencia f_0 cercana al centro del filtro pasa–banda cruzará a través de ambos filtros con muy poca atenuación.

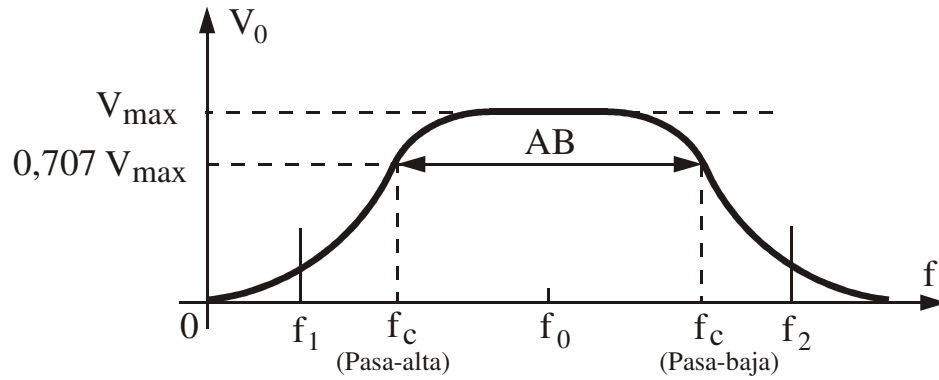


Figura 3.3.2. Filtro pasa-altas RC.

La respuesta pasa-banda puede obtenerse también utilizando circuitos resonantes en serie y en paralelo.

Para el **circuito resonante en serie** de la figura 3.3.3, $X_L = X_C$ en resonancia, y además:

$$V_{0\max} = \frac{R}{R + R_1} V_i \quad \text{para} \quad f = f_s \quad \text{y} \quad f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

con:

$$Q_s = \frac{X_L}{R + R_1} \quad \text{y} \quad AB = \frac{f_s}{Q_s}$$

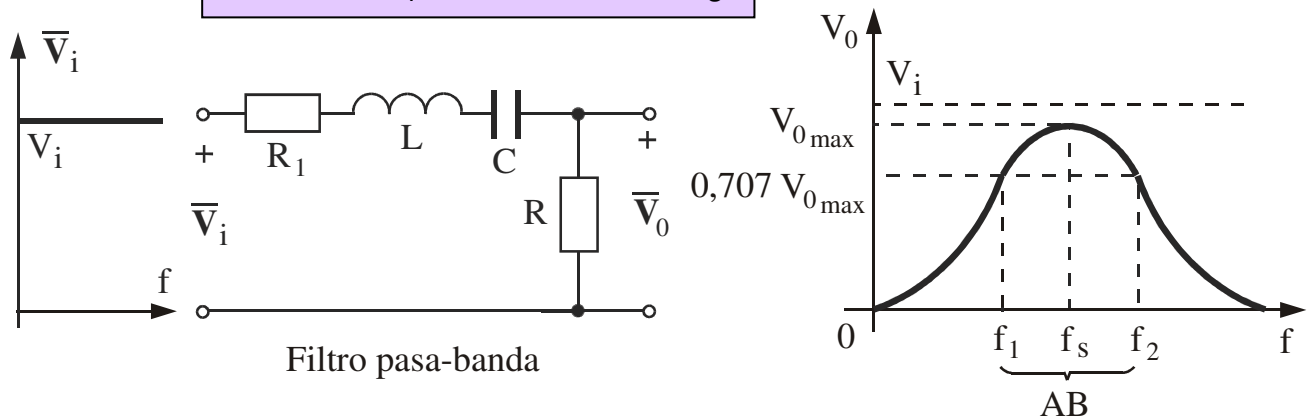


Figura 3.3.3. Filtro pasa-banda resonante en serie.

Para el **circuito resonante en paralelo** de la figura 3.3.4, Z_{Tp} es un valor máximo en la resonancia, y además:

$$V_{0\max} = \frac{Z_{Tp}}{Z_{Tp} + R} V_i \quad \text{para} \quad f = f_p.$$

con: $Z_{Tp} = Q_1^2 R_1$ para $Q_1 \geq 10$ y $f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ para $Q_1 \geq 10$

Para el circuito resonante en paralelo:

$$Q_p = \frac{X_L}{R_1} \quad \text{y} \quad AB = \frac{f_p}{Q_p}$$

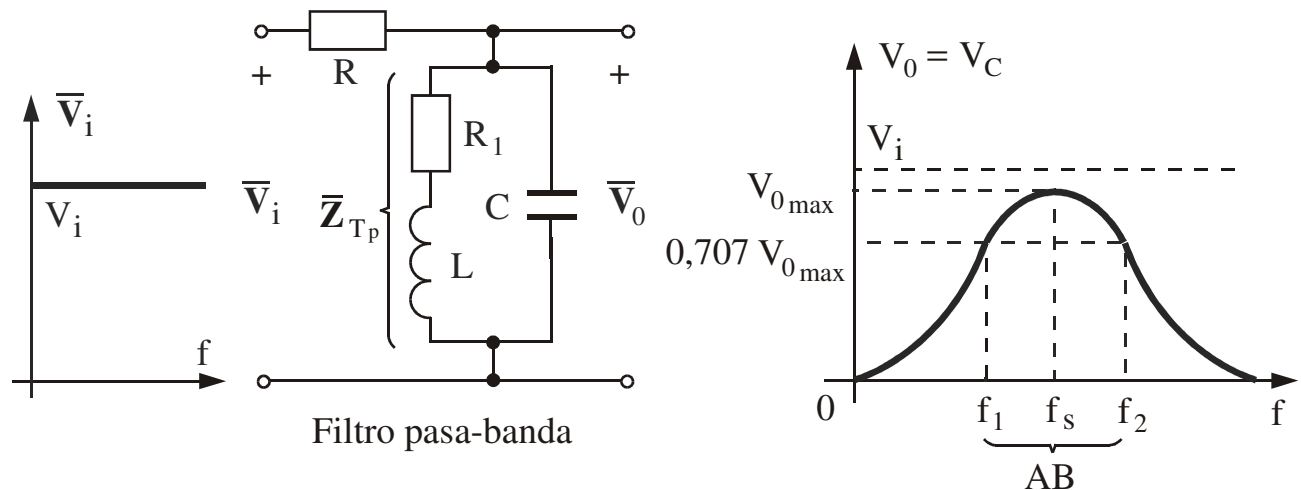


Figura 3.3.4. Filtro pasa-banda resonante en paralelo.

Como una primera **aproximación** que sea aceptable para la mayoría de las **aplicaciones prácticas**, se puede suponer que la frecuencia resonante parte al ancho de banda.

3.4. Filtros rechaza-banda.

Los **filtros rechaza-banda** también pueden construirse utilizando un filtro pasa-bajas y uno pasa-altas. Sin embargo, en lugar de la configuración en cascada que se emplea en el filtro pasa-banda, se requiere una **conexión en paralelo** como se muestra en la figura 3.4.1.

Una frecuencia baja f_1 podrá atravesar el filtro pasa-bajas, y una frecuencia alta f_2 podrá utilizar la trayectoria en paralelo, como se muestra en las figuras 3.4.1. y 3.4.2.

Sin embargo, una frecuencia tal como la f_0 en la banda de rechazo será mayor que la frecuencia crítica del pasa-bajas y menor que la frecuencia crítica del pasa-altas, y por tanto no podrá contribuir a los niveles de V_0 por encima de $0,707 V_{\max}$.

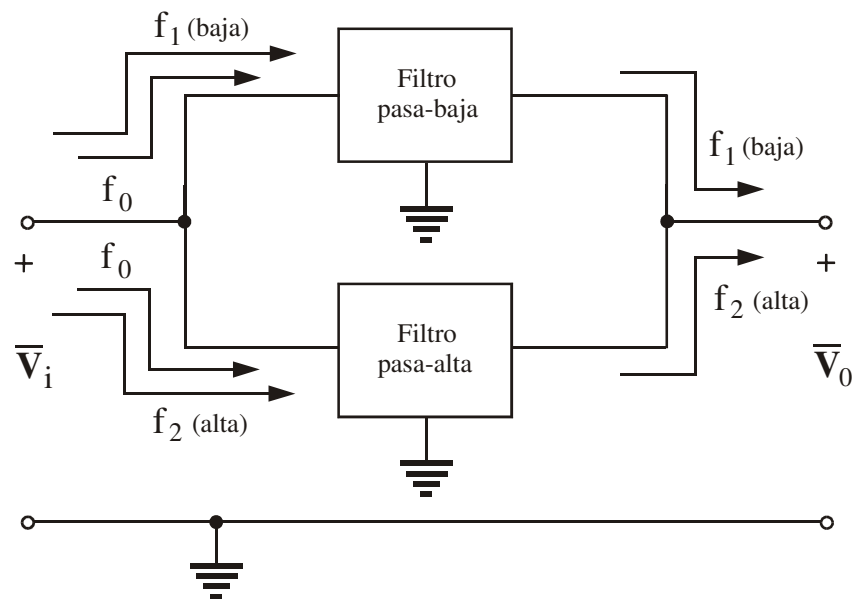


Figura 3.4.1. Filtro rechaza-banda.

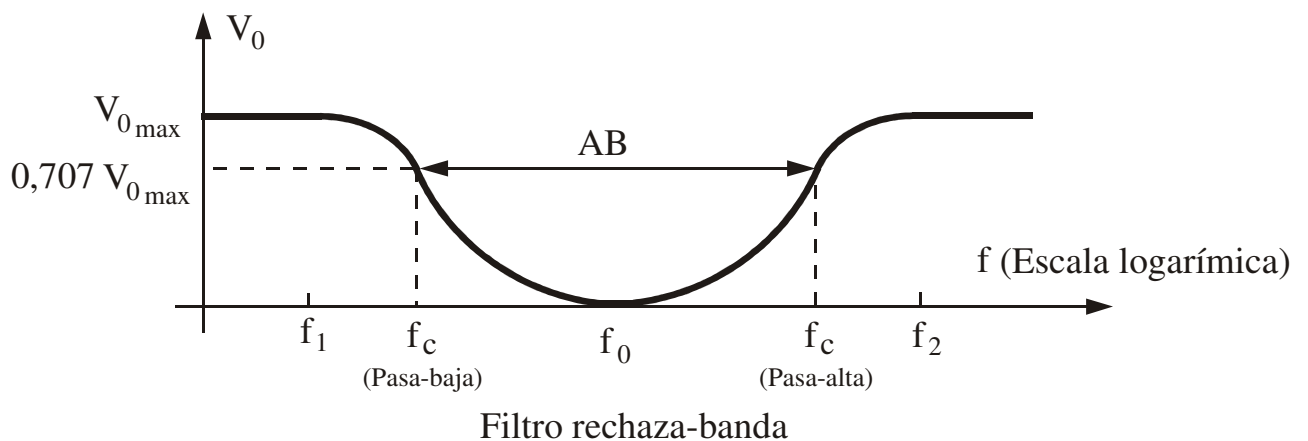


Figura 3.4.2. Características rechaza-banda.

Debido a que las características de un filtro rechaza-banda son las inversas a las del patrón obtenido para los filtros pasa-banda, se puede utilizar el hecho de que a cualquier frecuencia la suma de las magnitudes de las dos formas

de onda a la derecha del signo de igual en la figura 3.4.3 serán iguales a la tensión aplicada V_i .

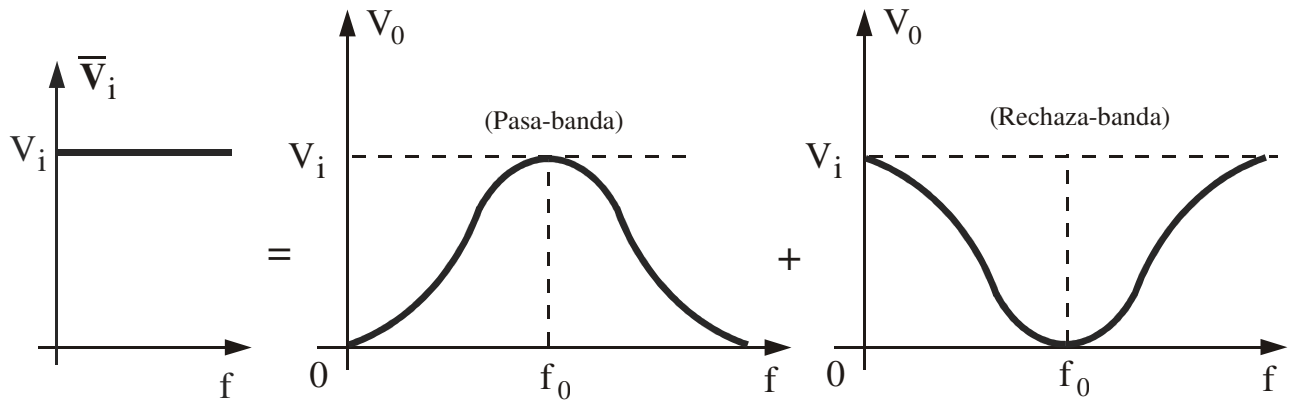


Figura 3.4.3. Demostración de cómo una señal aplicada de magnitud fija puede dividirse en una curva de respuesta pasa-banda y una de respuesta rechaza-banda.

Por tanto, para los filtros pasa-banda de las figuras 3.3.3 y 3.3.4, tomando la salida de los otros elementos en serie como se muestra en las figuras 3.4.5 y 3.4.6, **se obtendrá una característica rechaza-banda**, cumpliendo la ley de Kirchhoff de tensión.

Para el **circuito resonante en serie** de la figura 3.4.5, las ecuaciones siguientes son también válidas, pero ahora en resonancia:

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$$Q_s = \frac{X_L}{R + R_1}$$

$$AB = \frac{f_s}{Q_s}$$

Con:

$$V_{0\min} = \frac{R_1}{R + R_1} V_i$$

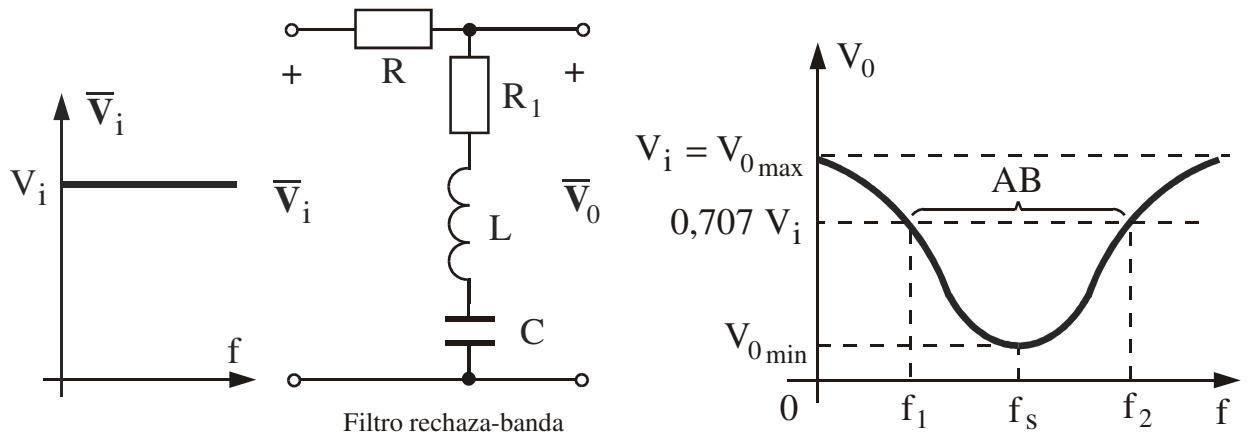


Figura 3.4.5. Filtro rechaza-banda utilizando un circuito resonante en serie.

Para el **circuito resonante en paralelo** de la figura 3.4.6, las ecuaciones siguientes son también válidas, pero ahora en resonancia:

$$Z_{Tp} = Q_1^2 R_1 \quad \text{para } Q_1 \geq 10 \quad \text{y} \quad f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \text{para } Q_1 \geq 10$$

$$Q_p = \frac{X_L}{R_1} \quad \text{y} \quad AB = \frac{f_p}{Q_p}$$

Con:

$$V_{0\min} = \frac{R V_i}{R + Z_{Tp}}$$

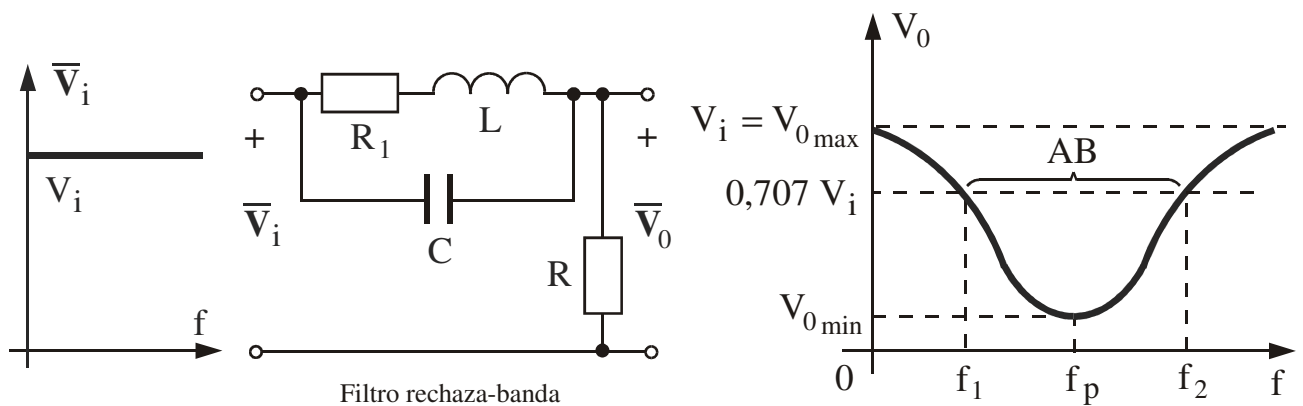


Figura 3.4.6. Filtro rechaza-banda utilizando un circuito resonante en paralelo.

3.5. Filtros de doble sintonización

Algunas configuraciones presentan características pasa-banda y rechaza-banda, como se muestra en la figura 3.5. Tales redes se denominan **filtros de doble sintonización** o **doblemente resonantes**. Hay una frecuencia a la cual ocurre una resonancia paralelo –que determina la **frecuencia rechazada**– y otra frecuencia a la cual ocurre una resonancia serie –que determina la **frecuencia aceptada**–.

Usando 2 condensadores y una bobina, como en la figura 3.5:

$$f_{\text{rechazo}} > f_{\text{paso}}.$$

Usando 2 bobinas y un condensador, reemplazando C_2 por L_2 , como se indica en la figura 3.5:

$$f_{\text{rechazo}} < f_{\text{paso}}.$$

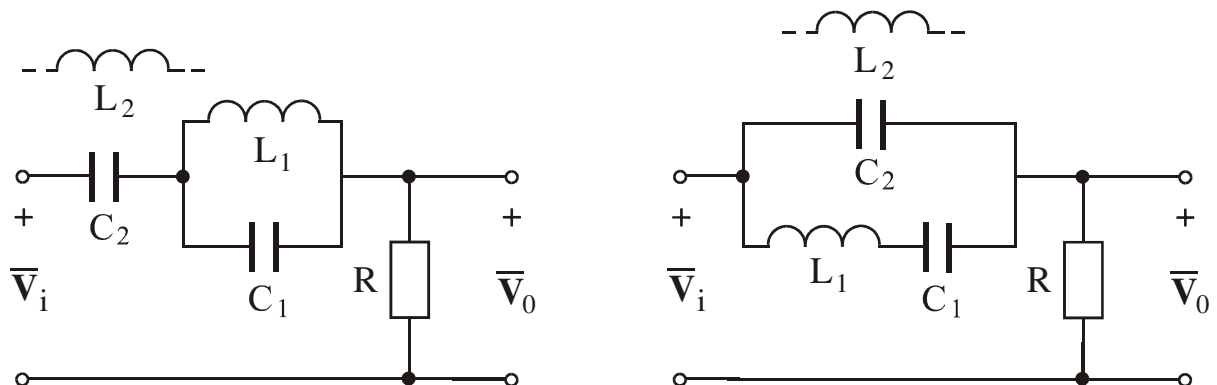


Figura 3.5. Filtros de doble sintonización.

3.6. Campo de utilización y aplicaciones.

Los filtros pasivos se utilizan en receptores de radio, radio control, receptores de televisión, en transmisores, etc. También son muy útiles para la eliminación de armónicos (no el fundamental) perjudiciales para la red.

La mayor parte de los filtros usados en electricidad son pasivos, sobre todo en el campo de la rectificación y para reducir el rizado de la señal de salida.

APLICACIONES

Atenuadores

Los **atenuadores** son cualquier dispositivo o sistema que pueda reducir la potencia o el nivel de tensión de una señal introduciendo poca o nula distorsión. Existen **atenuadores activos** (emplea transistores y circuitos integrados) y **pasivos** (solamente utiliza resistencias). Los primeros se tratarán en electrónica **se mencionarán aquí los de tipo resistivo**. Los atenuadores se utilizan comúnmente en equipos de audio, sistemas de antenas, sistemas de AM o FM y en cualquier otra aplicación donde se necesite reducir la fuerza de una señal.

Atenuación	R_1	R_2
1 dB	2,9 Ω	433,3 Ω
2 dB	5,7 Ω	215,2 Ω
3 dB	8,5 Ω	141,9 Ω
5 dB	14,0 Ω	82,2 Ω
10 dB	26,0 Ω	35,0 Ω
20 dB	41,0 Ω	10,0 Ω

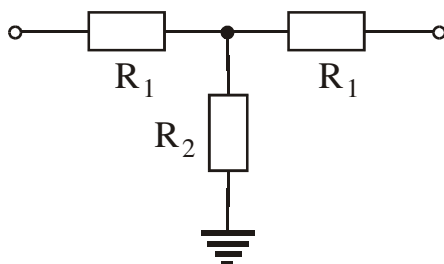


Figura 3.6.1. Configuración en T.

Atenuación	R_1	R_2
1 dB	870,0 Ω	5,8 Ω
2 dB	436,0 Ω	11,6 Ω
3 dB	292,0 Ω	17,6 Ω
5 dB	178,6 Ω	30,4 Ω
10 dB	96,2 Ω	71,2 Ω
20 dB	61,0 Ω	247,5 Ω

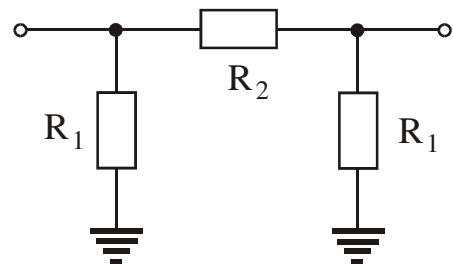


Figura 3.6.2. Configuración en Π .

El diseño es bastante sencillo, con **resistencias conectadas en T o en Π** (figuras 3.6.1 y 3.6.2), se muestran unos valores de elementos y la atenuación conseguida. **Obsérvese** que en ambos diseños dos de las resistencias son iguales y la otra tiene un valor mucho menor o mayor.

Filtros de ruido

El ruido es un problema que se presenta en todo sistema electrónico. En general se trata de la **presencia de cualquier señal no deseada** que puede afectar la operación general de un sistema. **Puede provenir de** una **fente de energía** (zumbido de 60 Hz), de **redes de retroalimentación**, de **sistemas mecánicos conectados a sistemas eléctricos**, de **capacitancias parásitas y efectos inductivos** o posiblemente de una **fente local de señal** que no se encuentra adecuadamente blindada, etc. La forma de manejar o eliminar el ruido normalmente es analizada por alguien que posee amplios conocimientos prácticos y tiene cierta idea del origen del ruido no deseado y de cómo eliminarlo de manera sencilla y directa. En la mayoría de los casos el problema no será parte del diseño original, sino un segundo esfuerzo en la fase de pruebas para eliminar problemas inesperados.

4. GENERALIDADES DE LOS FILTROS ACTIVOS

4.1. Ventajas e Inconvenientes de los filtros activos.-

En comparación con los pasivos, los filtros activos poseen una serie de **ventajas**:

- Permiten **eliminar las inductancias** que, en bajas frecuencia, son voluminosas pesadas y caras.

- Facilitan el **diseño de filtros complejos** mediante la asociación de etapas simples.
- Proporcionan una **gran amplificación de la señal de entrada** (ganancia), lo que es importante al trabajar con señales de niveles muy bajos.
- Facilidad en los **ajustes**, actuando simplemente sobre el elemento activo.

Por otro lado tiene una serie de **inconvenientes**:

- Exige una **fuentes de alimentación**
- Su **respuesta** de frecuencia esta **limitada por la capacidad de los Amplificadores Operacionales (AO)** utilizados.
- Es **imposible** su aplicación en **sistemas de media y alta potencia**.

Los **circuitos resonantes activos** pueden tener un coeficiente de sobretensión (factor de calidad Q) tan grande como se desee. Por consiguiente, teóricamente se pueden realizar filtros activos con las características que se quieran; pero esto no es posible en la práctica, ya que cuanto mayor sea el coeficiente de sobretensión mayor será también el riesgo de oscilación espontánea, es decir, su **inestabilidad**. El riesgo de inestabilidad es el principal inconveniente de los filtros activos, y también es el factor que limita sus características y su aplicación.

4.2. Campo de utilización.

Los filtros activos son los que resultan más convenientes en el campo de las frecuencias muy bajas. Como son poco voluminosos y, a menudo, de reducido coste, pueden compararse con ventaja a los filtros pasivos en el campo de las audiofrecuencias.

Estas cualidades les hacen también estimables para ciertas aplicaciones en frecuencias de hasta algunos centenares de KHz, cuando el volumen y el precio de coste son factores determinantes y cuando los coeficientes de sobretensión que se precisan no son demasiado elevados.

RESUMEN INTRODUCCIÓN A LOS FILTROS (I)

- ✓ Circuito con fuentes senoidales → Variando la frecuencia de la/s fuentes.
- ✓ Impedancia de los componentes reactivos es función de la frecuencia.
- ✓ Elección cuidadosa de los elementos del circuito, sus valores y sus conexiones con otros elementos → Permiten construir circuitos que dejen pasar a la salida solo aquellas señales de entrada que permanezcan en un intervalo de frecuencias dado.
- ✓ Se denominan **FILTROS** → Red de dos puertas “selectiva” → Al aplicarse una señal a la puerta de entrada, ésta puede aparecer en la puerta de salida prácticamente sin atenuación, muy atenuada o, incluso amplificada (filtros activos).
- ✓ La mayor o menor atenuación de la señal depende de la frecuencia, siendo en general, la fase de la señal de salida distinta de la fase de la señal de entrada.
- ✓ Ejemplos:
 - **Radio**: elegir una estación de radio rechazando las señales de otras que se transmiten a frecuencias diferentes.
 - **Sistemas estereofónicos**: ajustar las intensidades relativas de las componentes de una señal de audio → Cada banda en el ecualizador es un filtro que amplifica sonidos.
 - **Sistemas telefónicos**: diseño de un sistema para manejar señales audibles de frecuencias comprendidas entre 300 Hz y 3 kHz.

FILTRO PASA BAJO → Permite el paso de frecuencias bajas y bloquea las frecuencias altas.

FILTRO PASA ALTO → Permite el paso de frecuencias altas y bloquea las frecuencias bajas.

FILTRO PASA BANDA → Permite el paso de un intervalo de frecuencias y bloquea las frecuencias más altas y más bajas.

RESUMEN INTRODUCCIÓN A LOS FILTROS (II)

FILTRO ATRAPA BANDA → Bloquea el paso de un intervalo de frecuencias y permite el paso de las frecuencias más altas y más bajas.

Para los dos primeros existe una sola **frecuencia de corte** por encima de la cual la tensión de salida cae por debajo del 70,7% de la tensión en la entrada. Para los otros dos hay que delimitar el ancho de la banda pasante o de la banda a eliminar, siendo dos las frecuencias de corte que verifican la condición anterior.

Dependiendo de las **características deseadas**, los filtros pueden diseñarse con circuitos **RL, RC y RLC**, en diferentes **combinaciones**.

Vamos a ver **FILTROS PASIVOS** (sus características de filtrado dependen solo de elementos pasivos). El único filtro pasivo que se verá, que puede amplificar su salida, es el filtro resonante RLC serie.

Los **FILTROS ACTIVOS** (sus componentes producen ganancia de señal) se construyen con amplificadores operacionales, transistores, etc.

RESISTENCIA → Se comporta igual ante una tensión alterna y continua.

BOBINA → En continua se comporta como un hilo por el que circula fácilmente la corriente. En alterna, el cambio en el valor de la corriente que circula crea efectos magnéticos que se oponen a tal cambio; oposición que es mayor cuanto mayor es la inductancia de la bobina y/o la frecuencia.

CONDENSADOR → En continua se comporta como un circuito abierto por el que no circula corriente alguna (no existe contacto eléctrico entre las placas). En alterna, se producen efectos de carga y descarga de las placas lo que supone paso de corriente; esta corriente es mayor cuanto mayor es la capacidad del condensador y/o la frecuencia.