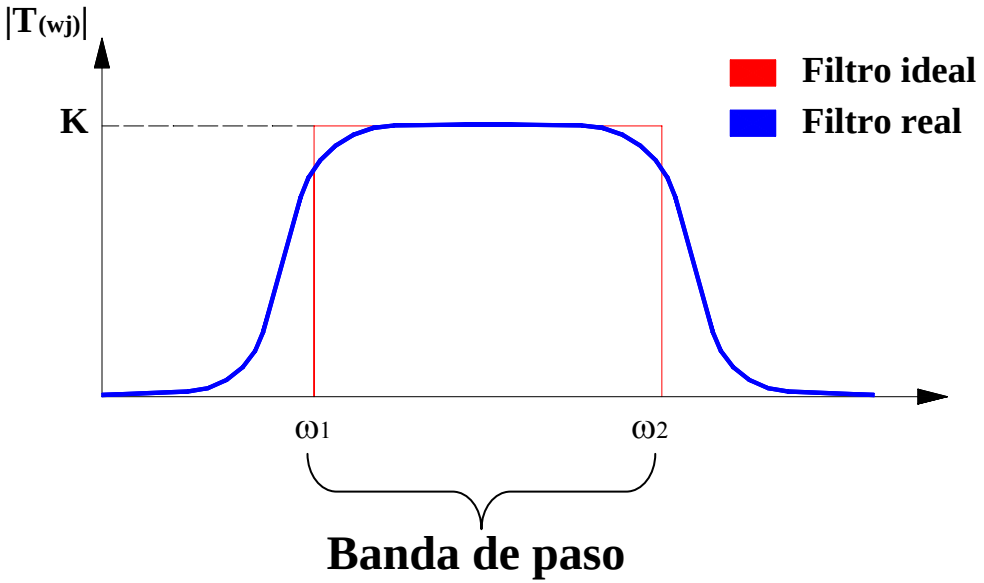
Filtros

Filtros de onda eléctricos: Son redes (cuadripolos) que actúan sobre la señal presentando características de libre transmisión en determinados intervalos de frecuencia y fuerte rechazo o atenuación fuera de dichos intervalos. Los intervalos de frecuencia donde se verifica la condición de libre transmisión se denominan bandas de paso y aquellos intervalos para los que se produce el rechazo se denominan bandas de atenuación.



Filtro ideal: es un modelo donde se supone que aquellas señales cuyas frecuencias se encuentran en su **banda de paso** no se ven afectadas y rechaza totalmente las demás, es decir, si se representa el módulo de su transferencia, se tiene la línea de trazo fino de la Figura

Filtros

Donsión

SEGÚN SU UBICACIÓN RELATIVA

- **FILTROS DE ENTRADA**
- **FILTROS DE SALIDA**

SEGÚN SU FUNCIÓN

- **FILTROS DE RECHAZO**
- **FILTROS DE ABSORCIÓN**

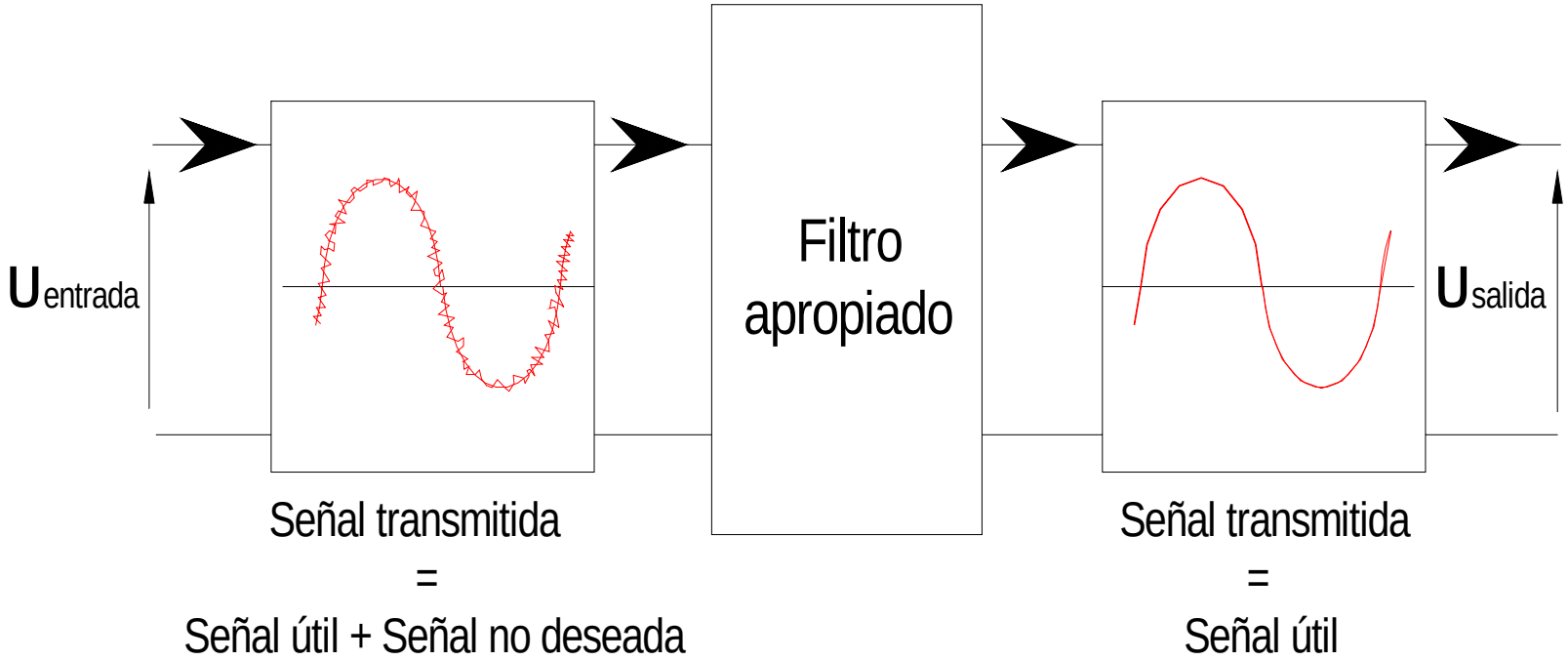
SEGÚN LA TECNOLOGÍA UTILIZADA

- **FILTROS PASIVOS**
- **FILTROS ACTIVOS**
- **FILTROS HÍBRIDOS**

Filtros

Donsión

Representación esquemática de la función de un filtro.



Filtros

Clasificación.

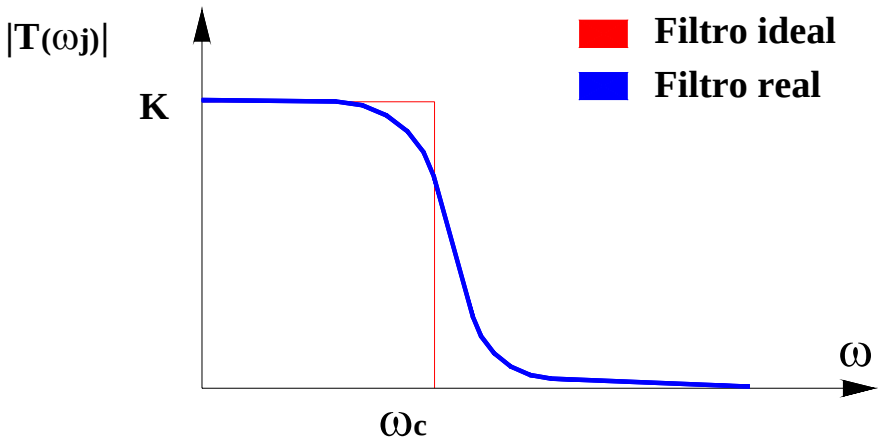
Desde el punto de vista del objetivo a cumplir, los filtros eléctricos pueden clasificarse en:

- filtros paso bajo,
- paso alto (pasa altos)
- paso banda
- rechazo de banda (elimina banda).

Filtros

Filtro paso bajo.

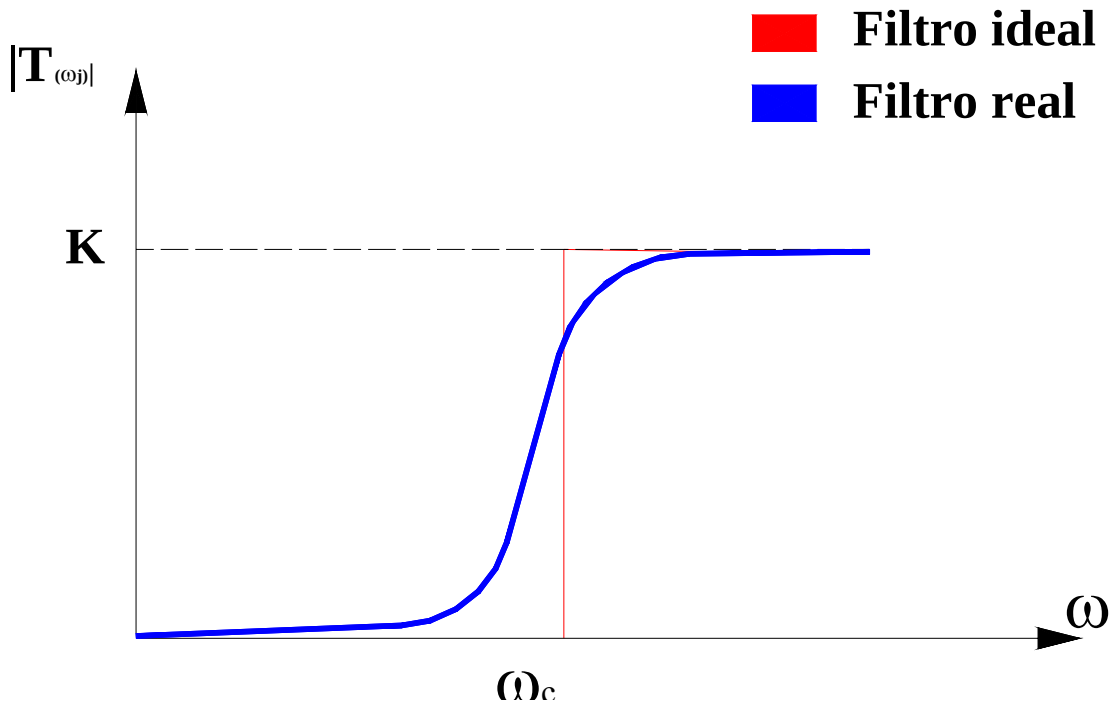
Son aquellos destinados a transmitir con atenuación despreciable señales cuyas frecuencias se encuentran comprendidas entre corriente continua y un cierto valor denominado frecuencia de corte w_c. Las componentes de la señal cuyas frecuencias superan a w_c se verán fuertemente rechazadas. Ver *Figura*.



Filtros

Filtro paso alto.

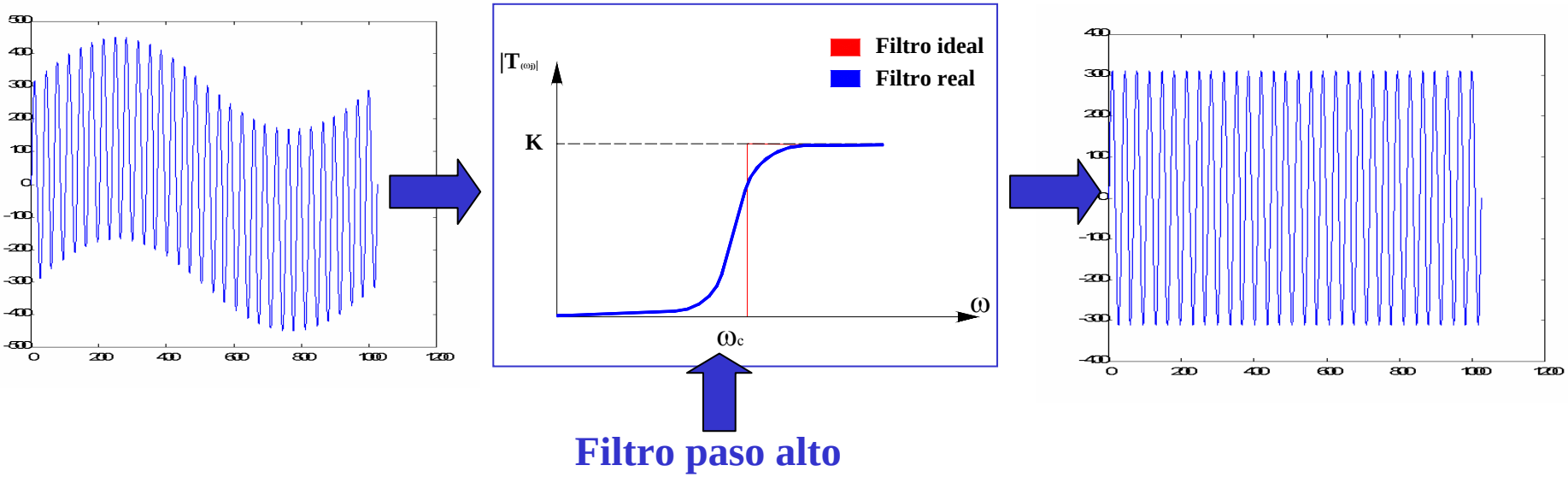
Están destinados a transmitir con atenuación despreciable señales cuyas frecuencias se encuentran entre una cierta frecuencia de corte w_c y frecuencias muy altas (teóricamente infinito). Las componentes de la señal cuyas frecuencias están por debajo de w_c se verán fuertemente rechazadas. El módulo de la transferencia se representa en la *Figura*



Filtros

Filtro paso alto.

En ciertos casos la señal útil es de mayor frecuencia que la señal indeseable, como ocurre cuando a la mencionada señal se le superpone un zumbido de baja frecuencia proveniente de la fuente de alimentación, en tal caso se puede recuperar la señal original a la salida de un filtro paso alto, como se muestra en la siguiente *Figura*.



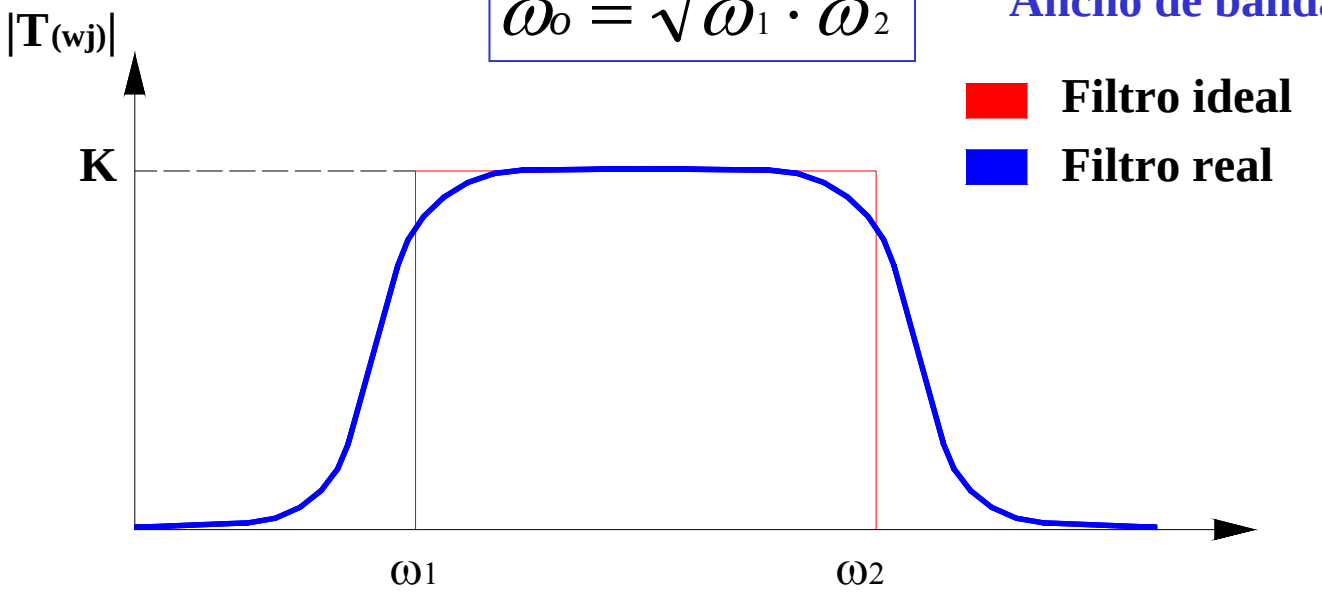
Filtros

Filtro paso banda.

Se utilizan para transmitir con atenuación despreciable señales cuyas frecuencias se encuentran entre w_1 y w_2, (frecuencias de corte inferior y superior respectivamente), fuera de dicho intervalo, las componentes de la señal se verán fuertemente rechazadas. La *Figura*, muestra la transferencia correspondiente

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_1 \cdot \omega_2}$$

Ancho de banda $\Rightarrow$ $\varpi = \varpi_2 - \varpi_1$



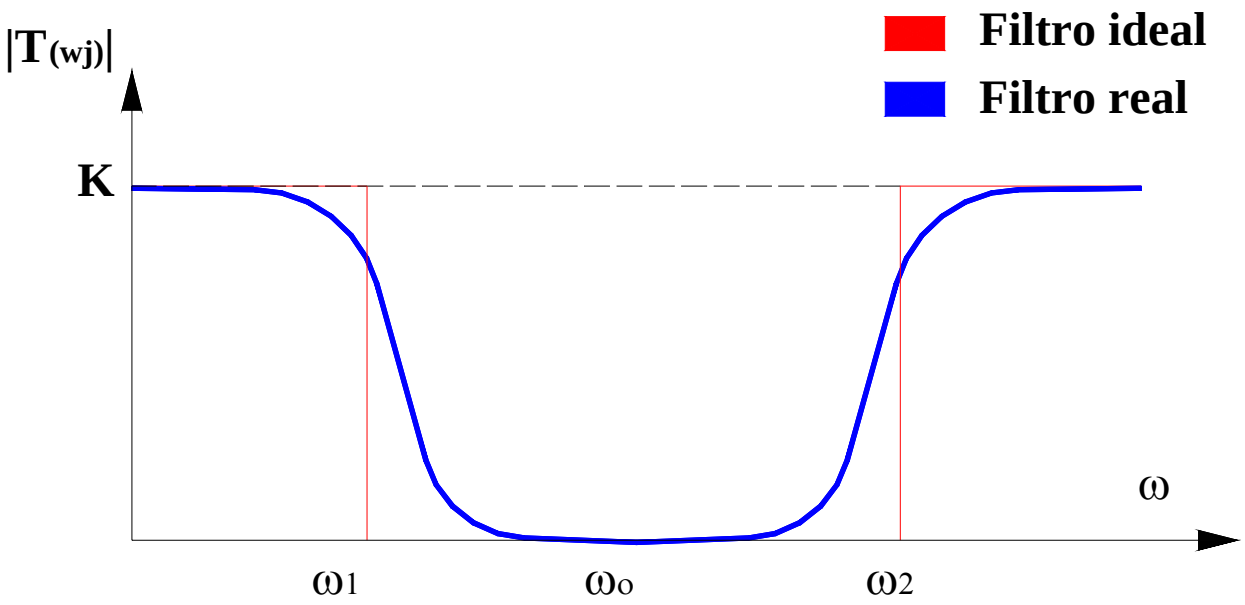
Factor de mérito

$$Q_c = \frac{\varpi_0}{\varpi}$$

Filtros

Filtro de rechazo de banda.

Son aquellos destinados a transmitir con atenuación despreciable componentes de la señal cuyas frecuencias se encuentran fuera de un intervalo de eliminación dado definido por dos valores de corte w_1 y w_2; todas aquellas componentes de la señal cuyas frecuencias caen dentro de dicho intervalo se verán fuertemente rechazadas. La *Figura* muestra la función de transferencia correspondiente a este tipo de filtros.



$$\omega_o = \sqrt{\omega_1 \cdot \omega_2}$$

Ancho de banda de eliminación

$$\varpi = \varpi_2 - \varpi_1$$

Filtros

Pérdidas.

Si, en la *figura a*, R1=R2 se transmite la máxima potencia a la carga, pero si R1<>R2, la potencia en la carga será menor y se dice que existe una **pérdida de transducción.**

Si ahora se intercala entre los terminales a-a' un filtro cuyos elementos no son reactivos puros, *Figura b*, entonces se verifica que la potencia en R2 es todavía menor y se dice que existe además una **pérdida de inserción**.

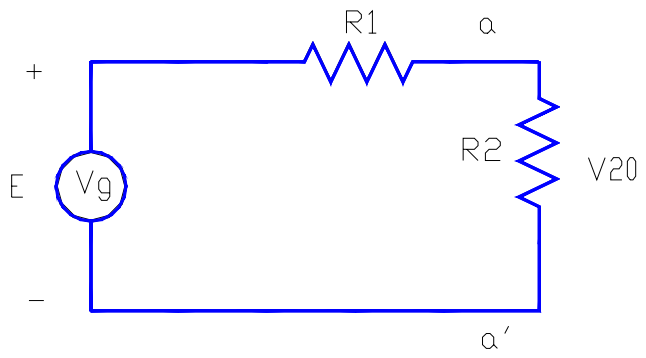


Fig. a.- Perdidas sin inserción de filtro

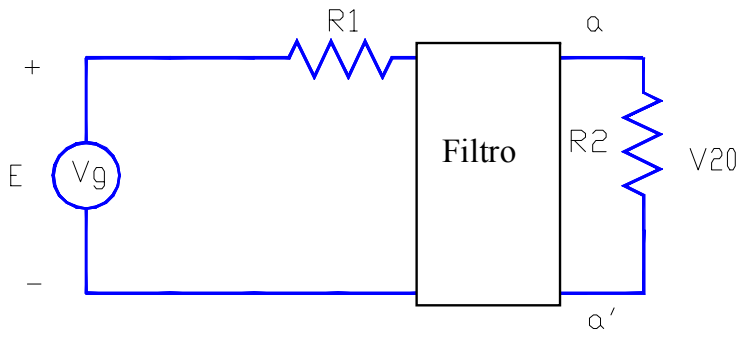


Fig. b.- Perdidas por inserción

Filtros

Pérdidas.

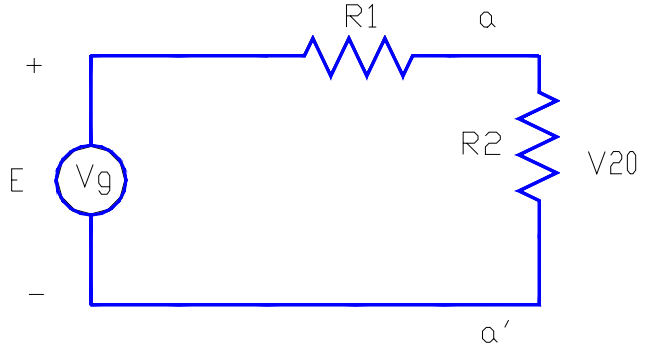


Fig. a.- Perdidas sin inserción de filtro

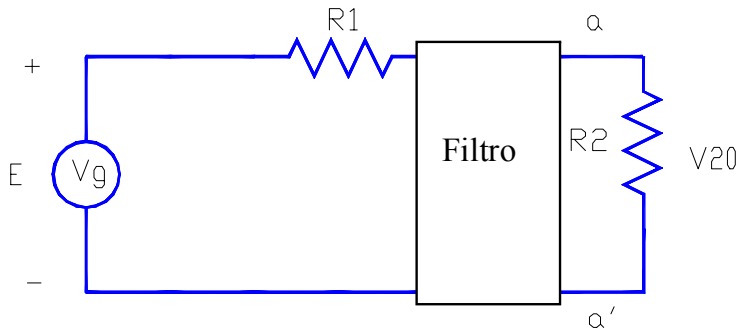


Fig. b.- Perdidas por inserción

Pérdidas de transducción

$$P_{mx} = \frac{|E|^2}{4R_1} \qquad \text{Para: } R_1 = R_2$$

$$P_{20} = \frac{|V_2|^2}{R_2}$$

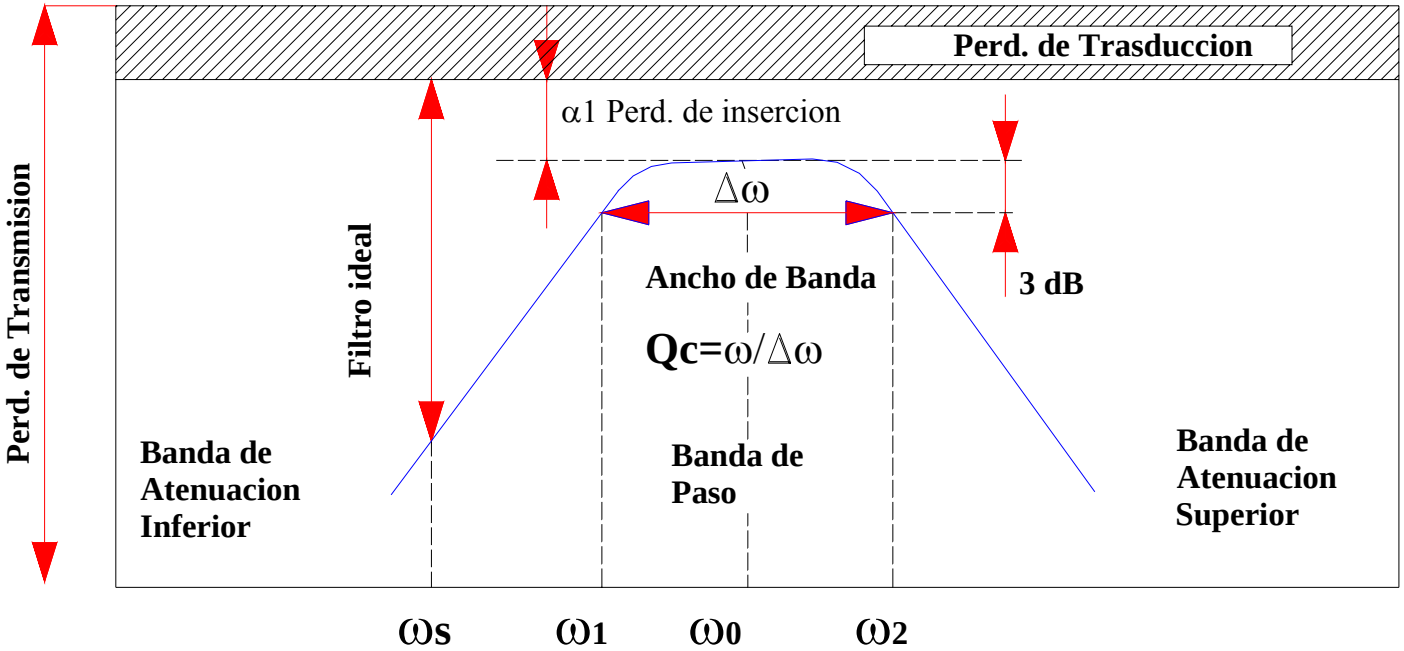
$$\alpha_l \Big|_{dB} = 20\log\sqrt{\frac{R_2}{4R_1}}\left|\frac{E}{V_2}\right| dB$$

Pérdidas de inserción

$$\alpha_i \Big|_{dB} = 10\log\frac{P_{20}}{P_2} = 20\log\left|\frac{V_{20}}{V_2}\right| dB$$

Filtros

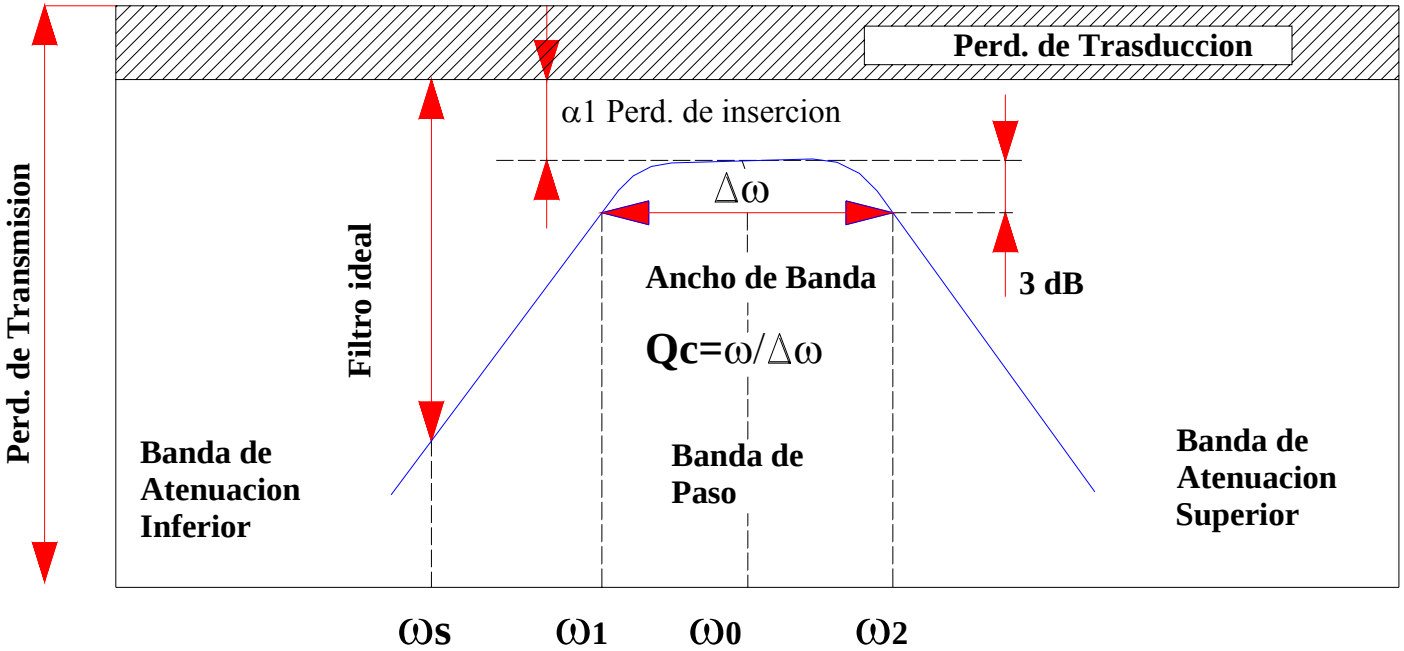
Pérdidas.



Pérdidas de inserción en la banda de atenuación: Es la relación entre la amplitud (en dB) de las componentes indeseables de la señal antes y después de intercalar el filtro. Los valores entre 20 y 100 dB son los habituales.

Filtros

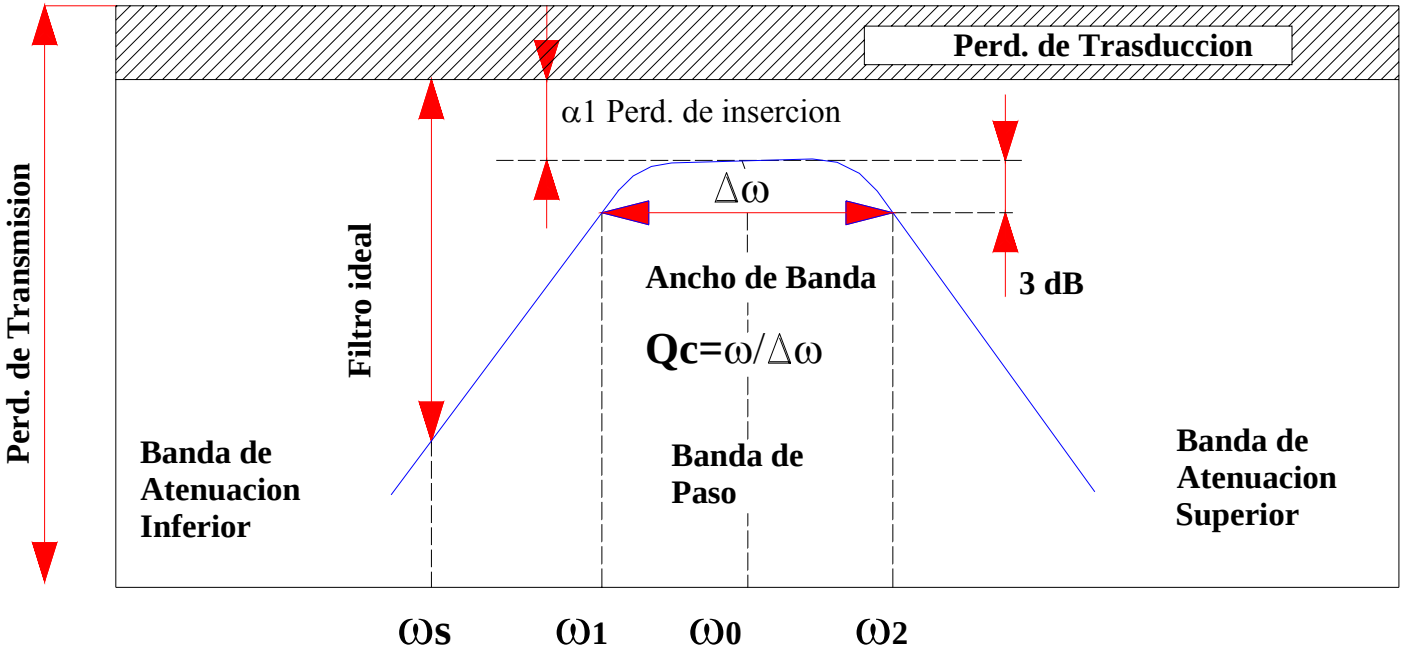
Pérdidas.



Nivel de impedancia: Se trata del valor de impedancia que presenta el circuito al adaptar varias redes entre sí o con sus impedancias terminales. Cuando los requerimientos del problema lo exigen, especialmente en circuitos de potencia, se trabaja en la entrada con un nivel de impedancia distinto al de la salida.

Filtros

Pérdidas.

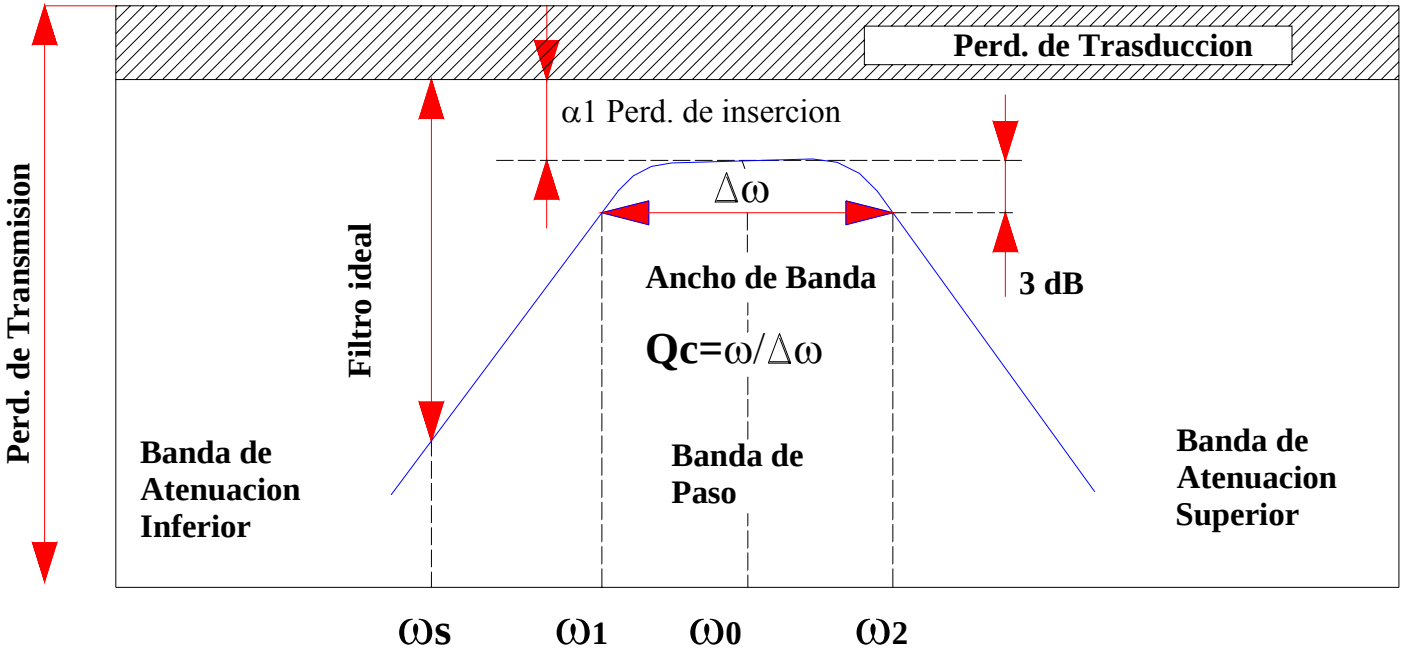


Frecuencias de corte: Son aquellas frecuencias que establecen el límite entre las bandas de paso y las de atenuación, en general se las define para una atenuación de 3 dB por debajo de las pérdidas de inserción, *según Figura*, pero es posible admitir valores menores según el criterio del proyectista.

Filtros

Donsión

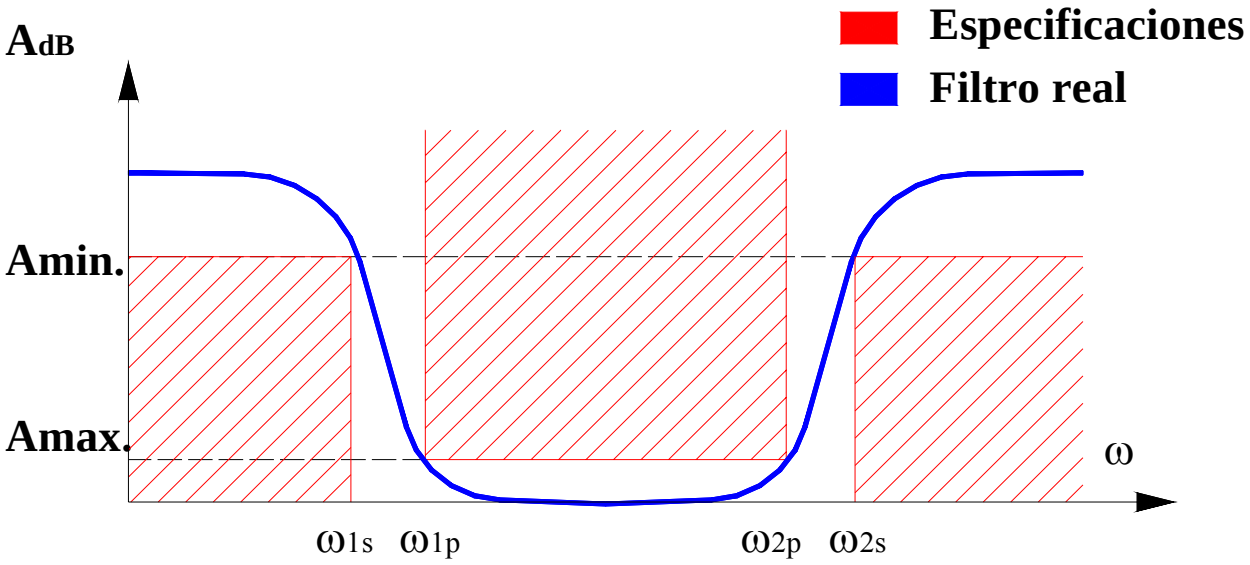
Pérdidas.



Ancho de banda: Es el intervalo comprendido entre dos frecuencias de corte en la banda de paso del filtro y en el caso paso bajo entre cero y la frecuencia de corte.

Filtros

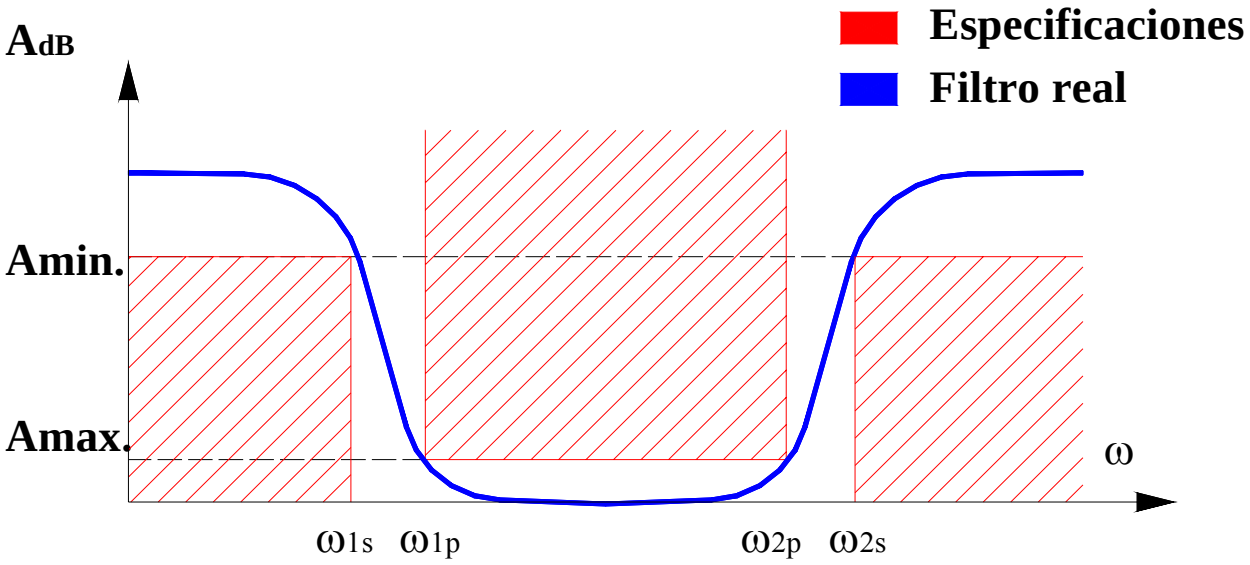
Pérdidas.



Atenuación: En la *Figura*, se muestra la característica de atenuación superpuesta con lo que se ha dado en llamar la plantilla. La plantilla de un filtro no es otra cosa que la representación de las restricciones impuestas por las especificaciones. La zona enmarcada no puede ser invadida por la característica de atenuación real.

Filtros

Pérdidas.



En la *Figura*, Amax es la máxima atenuación permitida en la banda de paso y Amin, la mínima atenuación requerida en la banda de atenuación que conjuntamente con la diferencia define la pendiente requerida.

Filtros

Relación de inserción: *Una función muy útil es la inversa de la relación de pérdidas que se denomina función de inserción (se utiliza en filtros pasivos).*
Sean V_{20} y P_{20} la tensión y potencia en la carga cuando el filtro no se encuentra insertado y V_2 Y P_2 las mismas cantidades cuando el circuito se encuentra interpuesto. Se define la relación de inserción por la expresión:

$$H(s) = \frac{V_2}{V_{20}}$$

$$V_{20} = \frac{V_g}{R_1 + R_2} \cdot R_2$$

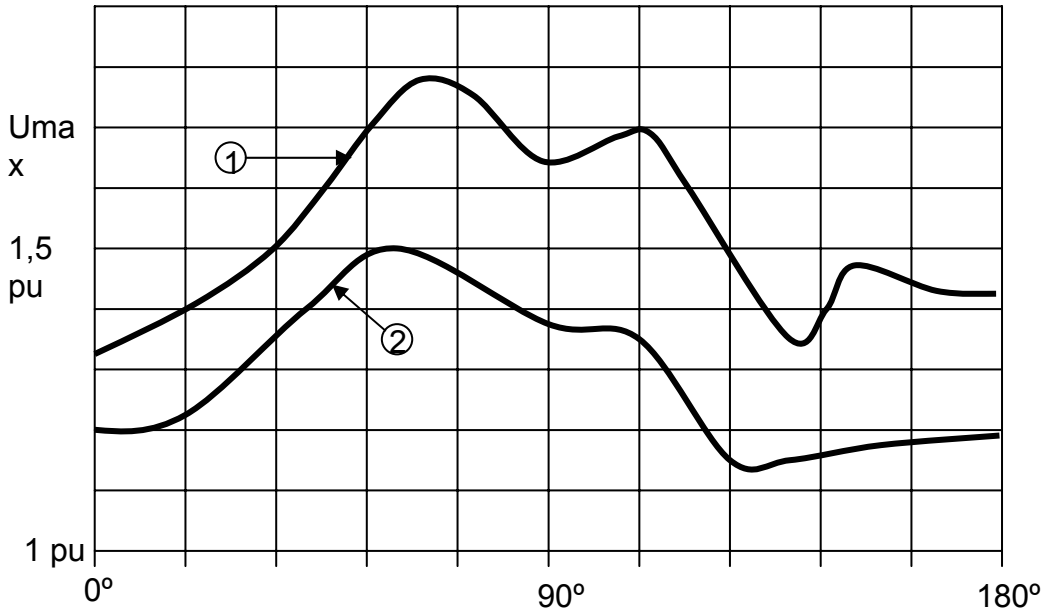
$$H(s) = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \cdot \frac{V_2}{V_g} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \cdot T(s)$$

$$H(s) = K \cdot T(s)$$

T(s) presenta una idéntica constelación de polos y ceros que H(s), es decir, ambas funciones sólo difieren en una constante.

Filtros

Influencia de los transitorios



Influencia de la atenuación de la red en las sobretensiones transitorias en función del instante de conexión de un banco de condensadores de 150MVA. 1. Red puramente inductiva. 2 Sistema real

- Los filtros deben estar diseñados para soportar las perturbaciones más severas y minimizar la duración de los períodos de recuperación.

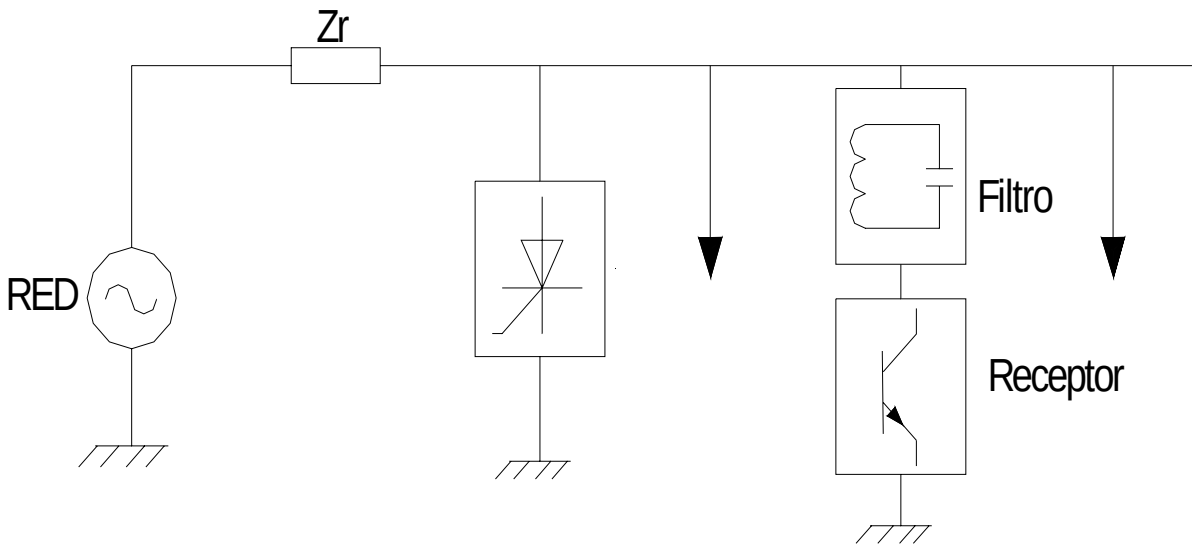
- Con este fin, los filtros deberán estar sintonizados a frecuencias muy bajas (del segundo al cuarto armónico) e incluir resistencias o componentes no lineales para la atenuación y limitación de la respuesta transitoria.

- El amortiguamiento ejercido por la red ejerce gran influencia en los transitorios que resultan de la conexión de los transformadores que alimentan a convertidores estáticos y de los equipos de compensación de la potencia reactiva.

- La *Figura* muestra los resultados, obtenidos por simulación, de la conexión de un banco de filtros pasa-banda de segundo orden, con amortiguación de la red y en ausencia de la misma; las sobretensiones están representadas en función del instante de la conexión.

Filtros

Filtro de rechazo de banda

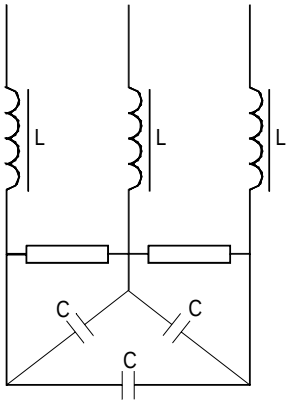


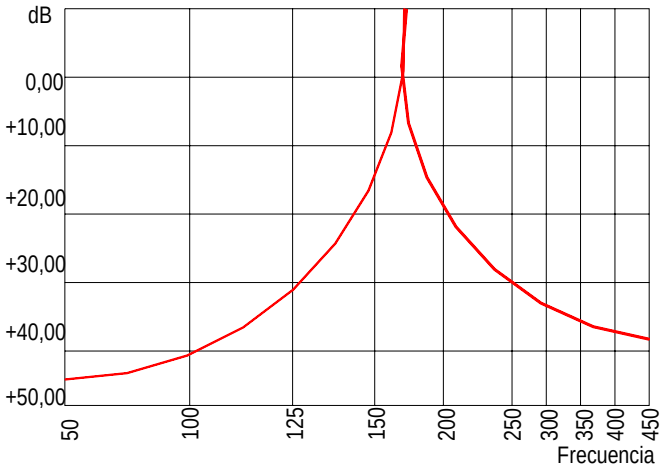
Filtro de rechazo, conectado en serie con un dispositivo sensible.

- Estos filtros están formados, generalmente, por un conjunto LC en paralelo sintonizado a la frecuencia que se quiere rechazar y el conjunto se conecta en serie con la carga en la cual se desea evitar la penetración de algún armónico en particular.

Filtros

Filtro de rechazo de banda

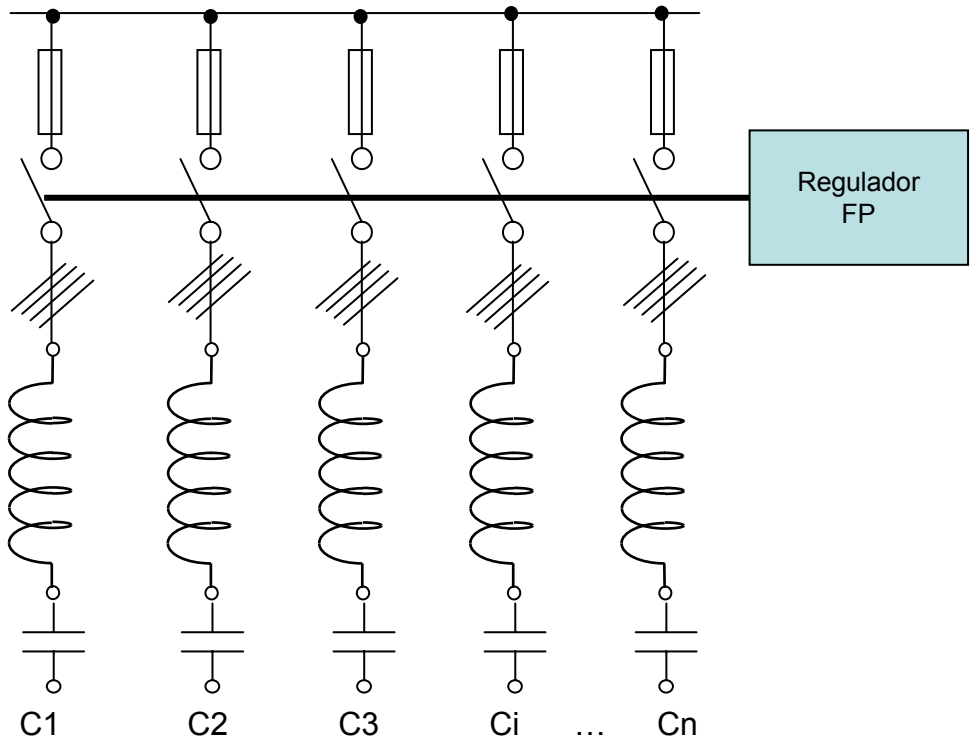




Configuración y respuesta en frecuencia de un filtro pasivo de rechazo.

- La configuración del filtro pasivo de rechazo y la curva de respuesta en frecuencia, puede ser como la representada en la *Figura*.
- El filtro completo puede formarse con tantas ramas como sean necesarias. La frecuencia de resonancia de todas las ramas, convenientemente elegida, ha de ser la misma.

Filtro de rechazo de banda



Esquema unificar de un filtro de rechazo

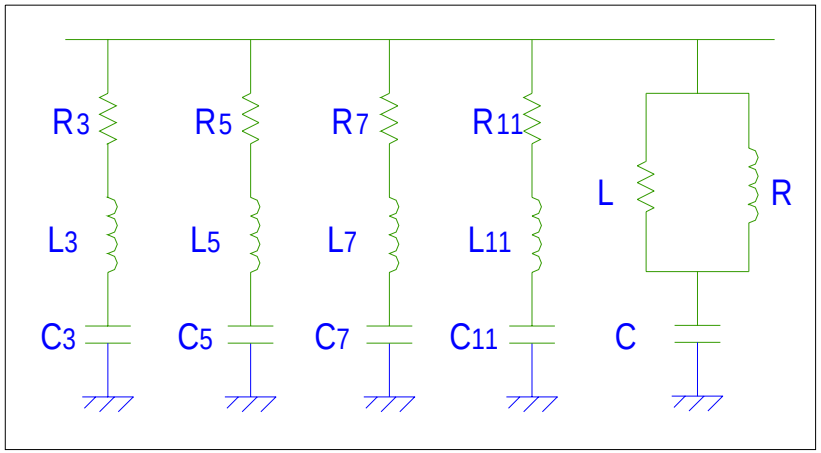
- El filtro completo puede formarse con tantas ramas como sean necesarias para compensar la energía reactiva de la instalación.
- Las citadas ramas se podrán conectar y desconectar en función de la demanda de compensación del factor de potencia, tal como se indica en esquema unifilar de la *Figura*.

Factor de sobretensión

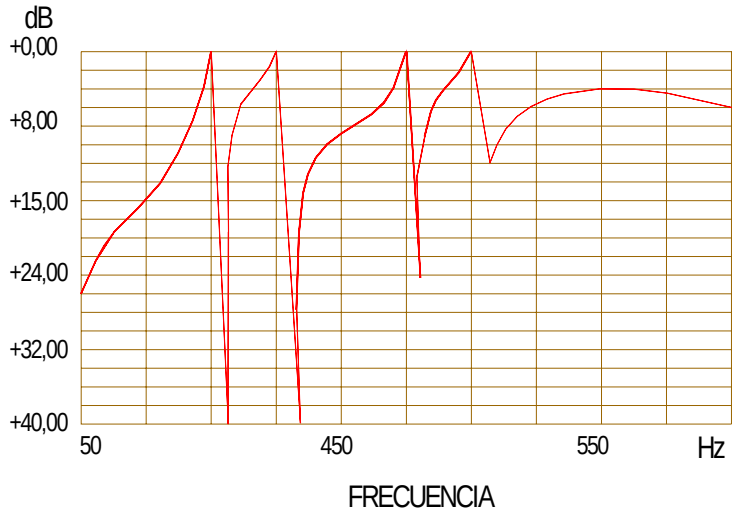
$$P\% = 100 \cdot \frac{U_L}{U_C} = 100 \cdot \left(\frac{\omega}{\varpi_r} \right)^2$$

Filtros

Filtros de absorción



Configuración de un banco de filtros.



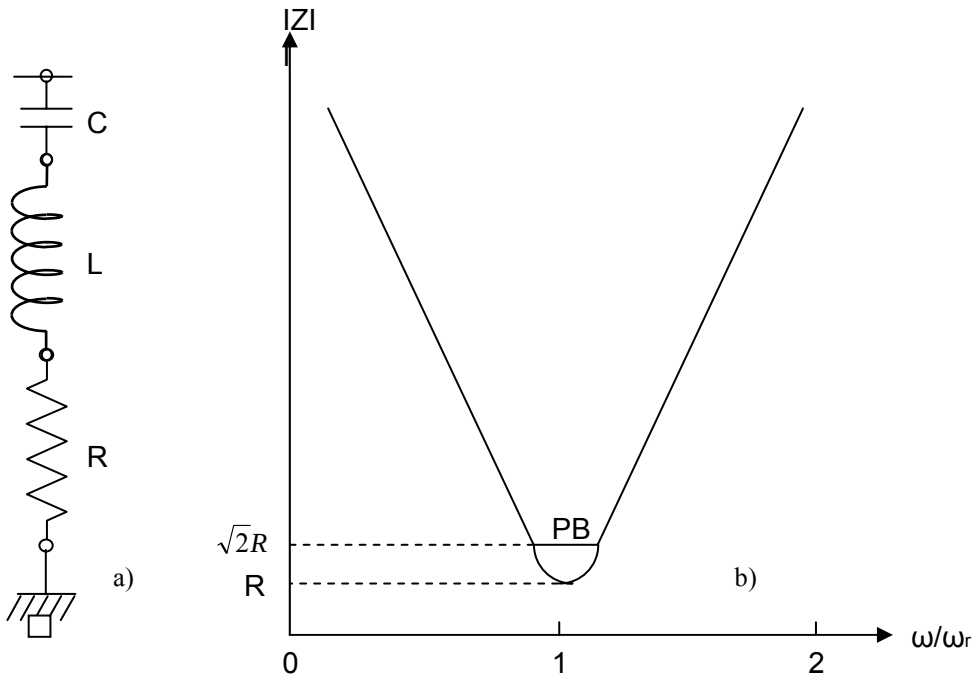
Respuesta en frecuencia del filtro.

- Los filtros de absorción, instalados en paralelo, son los que habitualmente se emplean para la eliminación de armónicos en las redes industriales.

- Están formados por tantas ramas LC como armónicos se desee filtrar, con frecuencias de resonancia coincidentes con las de dichos armónicos (sintonizados).

Filtros

Filtros sintonizados



(a) Circuito de un filtro shunt sintonizado de Q elevado. (b) Impedancia del filtro en función de la frecuencia.

- El factor de calidad del filtro (Q) determina la agudeza de la sintonización. Los filtros de Q elevado están sintonizados a un armónico bajo (tal como el quinto) y un valor típico de Q es de 30 a 60. Los filtros de Q reducido (entre 0,5 y 5) presentan impedancias bajas a un gran ancho de banda; cuando se usan para eliminar los armónicos de órdenes elevados (por encima del 17), se le denominan filtros de banda pasante alta (pasa-alta).

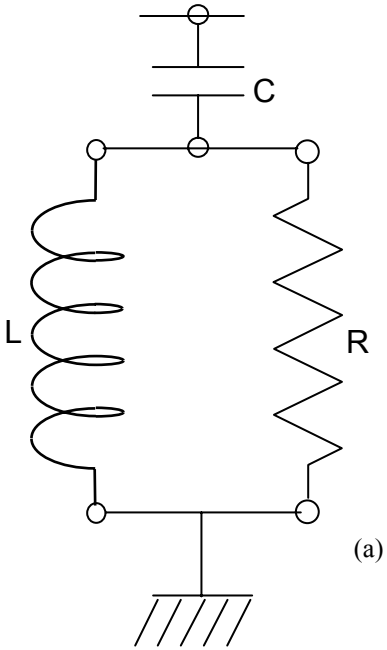
- En el caso de filtros sintonizados, el factor Q está definido como la razón de la inductancia (o capacitancia) a la resistencia en el punto de resonancia.

$$Q = \frac{X_0}{R}$$

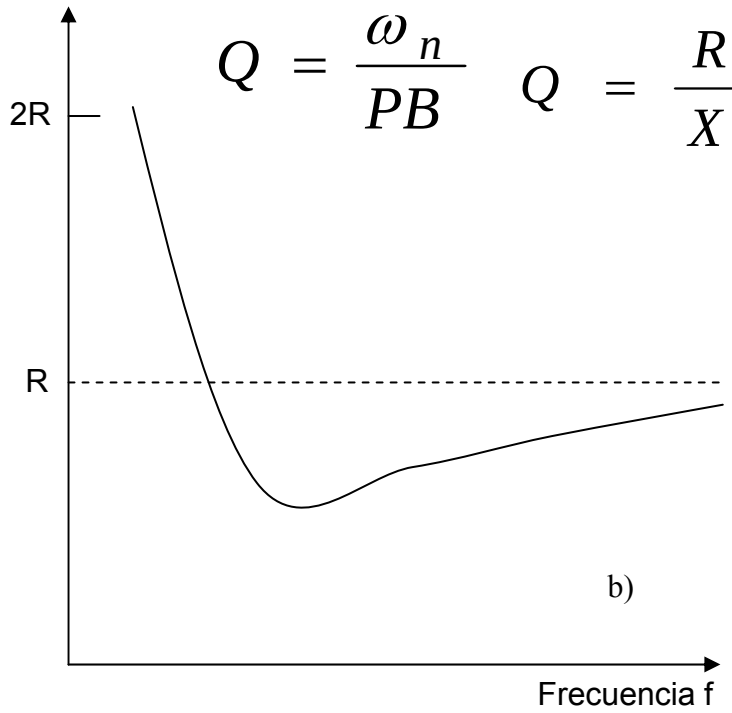
Filtros

Donsión

Filtro sintonizados



$$Q = \frac{\omega_n}{PB} \qquad Q = \frac{R}{X}$$



$$\delta = \frac{(\omega - \omega_n)}{\omega_n}$$

$$\delta = \frac{\Delta_f}{f_n} + \frac{1}{2}\left(\frac{\Delta L}{L_n} + \frac{\Delta C}{C_n}\right)$$

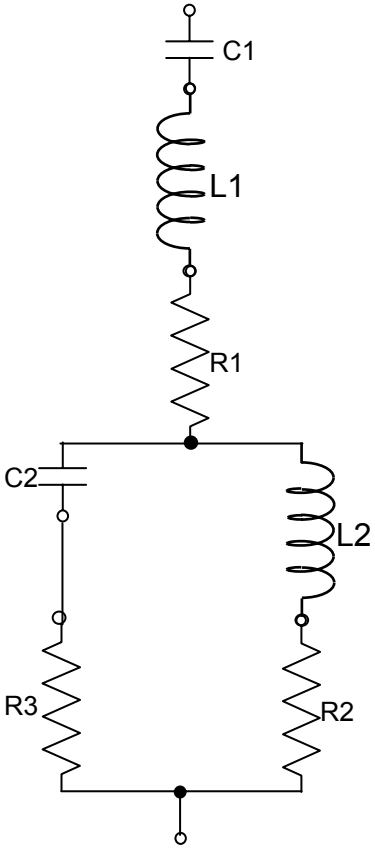
- **La amplitud de la asintonía del filtro con respecto a la frecuencia nominal de sintonización está representada por el factor δ. Este factor incluye los siguientes efectos:**
- Variaciones de la frecuencia fundamental.
- Variaciones en las reactancias inductiva y capacitiva causadas por envejecimiento y temperatura.
- Tolerancias de fabricación de los componentes.

(a) Filtro Pasa-banda, de segundo orden.

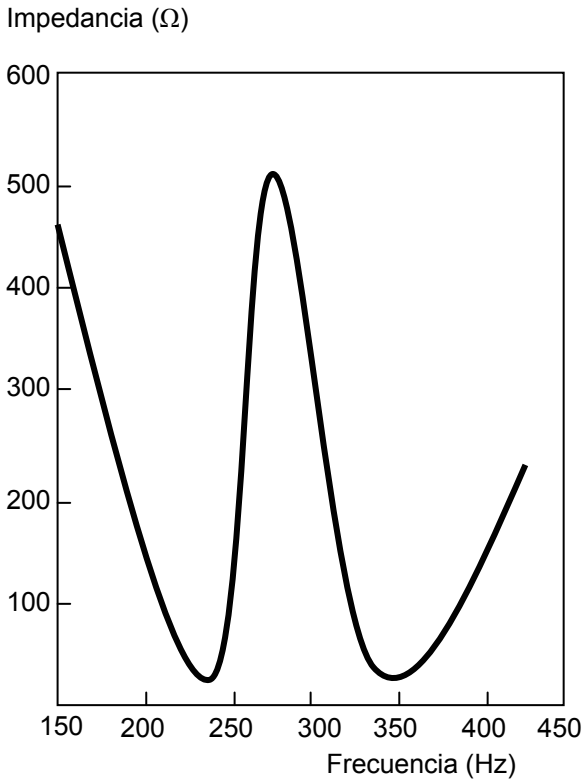
(b) Impedancia del filtro en función de la frecuencia.

Filtros

Filtros de doble sintonía



Esquema de un filtro de sintonía doble



Impedancias armónicas de filtro doble.

- El filtro de doble sintonía tiene la ventaja de reducir las pérdidas de energía a la frecuencia fundamental en relación al uso de dos filtros independientes. El doble circuito tiene ventaja en aplicaciones de alta tensión, debido al reducido número de bobinas diseñadas para soportar fuertes impulsos de tensión en las líneas.

- Aunque en teoría se pueden usar filtros de sintonización triple o cuádruple, en la práctica, no se justifican debido a las dificultades de su ajuste correcto.

Filtros

Filtros de sintonización automática.

- **La sintonización automática ofrece las siguientes ventajas sobre los filtros fijos:**

- a) Reducción de la potencia instalada de condensadores.

- b) Los condensadores utilizados combinan un alto coeficiente de temperatura y de potencia reactiva por unidad de volumen y coste.

- c) Debido a su elevado Q, las pérdidas son menores.

- Las ventajas a) y b) reducen el coste de los condensadores, que constituyen los componentes más caros del filtro, y la c) reduce el de la resistencia y, por tanto, de las pérdidas.

Filtros

Filtros paso banda.

Los filtros paso banda ofrecen las siguientes ventajas:

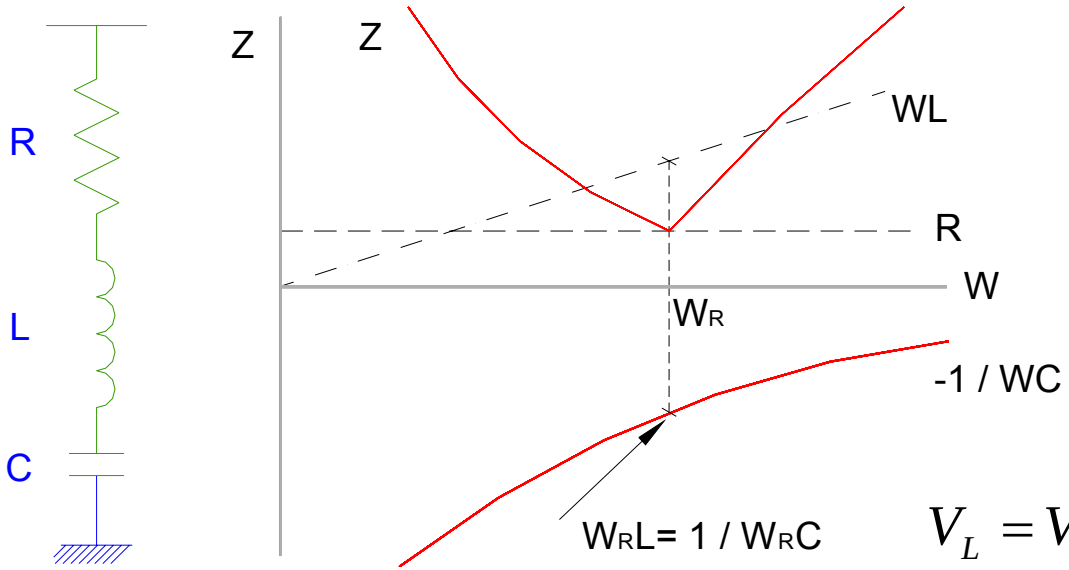
- Su funcionamiento y carga son menos sensibles a las variaciones de temperatura, desviaciones de frecuencia, tolerancias de fabricación de los componentes, pérdida de unidades del banco de condensadores, etc.
- Baja impedancia a un espectro ancho de armónicos sin necesidad de subdivisión en muchas ramas en paralelo que requieren un gran número de interruptores y aumentan los problemas de mantenimiento.
- El uso de filtros sintonizados, crea más resonancias en paralelo entre los filtros y la admitancia de la red a frecuencias por debajo de la correspondiente al orden más bajo del filtro sintonizado y también a frecuencias intermedias entre las de los filtros sintonizados. En tales casos, el uso de uno o más filtros paso banda es una alternativa más aceptable.

Por otra parte, estos filtros tienen desventajas, entre las que se encuentran:

- Para conseguir el mismo nivel de filtrado, requieren mayor potencia a la frecuencia fundamental.
- Las pérdidas en bobinas y resistencias, en general, son más altas.

Filtros

Cálculo de las ramas del filtro paso banda.



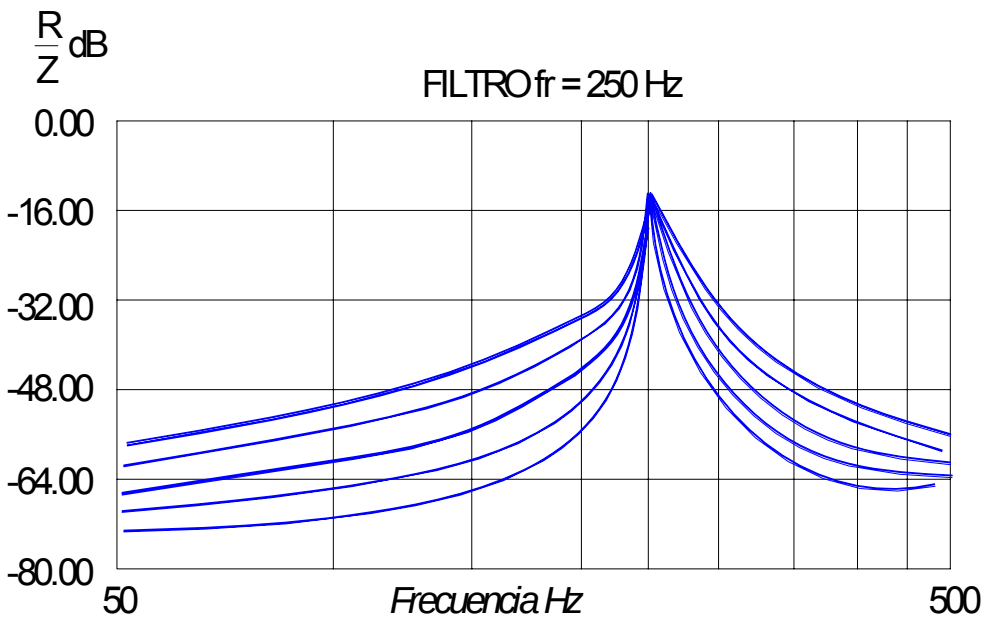
$$Q = \frac{L \cdot \omega_R}{R} = \frac{\frac{1}{\omega_R \cdot C}}{R}$$

$$V_L = V_C = \omega_R \cdot L \cdot I_n = \omega_R \cdot L \cdot \frac{V_n}{R} = Q \cdot V_n$$

Respuesta del filtro paso banda. Cada una de las ramas, con una configuración R-L como la representada en el esquema, presenta una curva de impedancia en función de la frecuencia.

Filtros

Cálculo de las ramas del filtro paso banda.



Respuesta en frecuencia de un filtro paso banda

- La desintonización puede producirse tanto por cambios en los valores de L y C como por cambio de la propia frecuencia de la red.
- La impedancia que presenta el filtro en caso de producirse la desintonización será, para Zn, la indicada por la expresión:

$$Z_{nF} = R \cdot \sqrt{\left(1 + 4 \cdot \delta^2 \cdot Q^2\right)}$$

Cálculo de las ramas del filtro paso banda.

- **Un proceso sencillo para la determinación de Q, L y C, es el siguiente:**

- Medición de la corriente armónica máxima que debe absorber el filtro para un armónico determinado. Suponer el valor In medido antes.
- Elección del condensador de acuerdo con dos criterios básicos:
- Bajo consumo a la frecuencia fundamental:

$$\frac{V_1}{3} \cdot X_1 \cdot C < 0{,}005 \cdot I_n$$

Siendo V1 la tensión compuesta.

- Limitación de la tensión en el condensador y bobina en resonancia:

$$\frac{1}{X_n \cdot C} \cdot I_n < V_{\max}$$

Siendo Vmax la máxima tensión admisible en C.

- Elección de L para obtener la resonancia a la frecuencia del armónico que se desee filtrar:

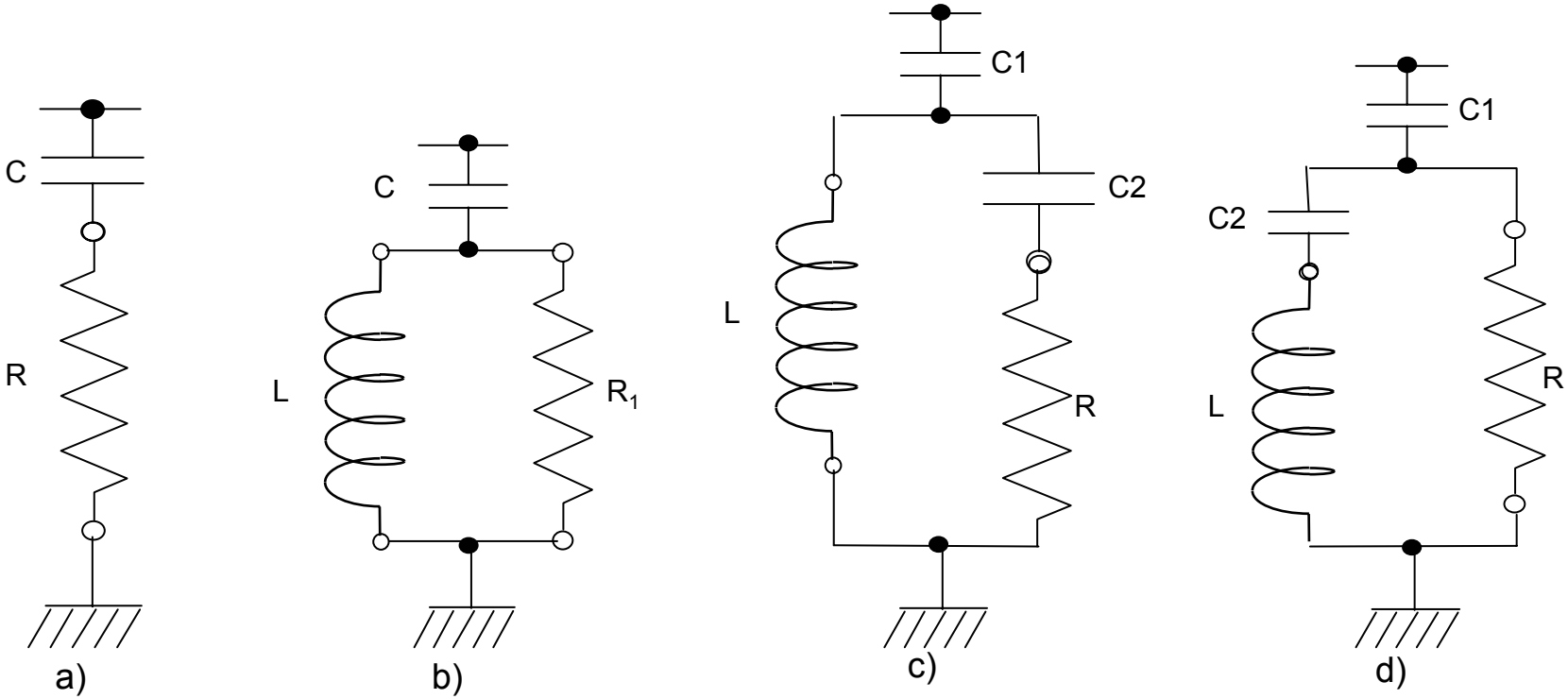
$$L = \frac{1}{C \cdot X_n^2}$$

- Elección de valor de R y Q, según: $Z_{nF} = R \cdot \sqrt{\left(1 + 4 \cdot \delta^2 \cdot Q^2\right)}$ y que cumpla: **ZnF<< Zn RED**.

El valor de R se tomará según la calidad de bobina y condensador entre 0,02 y 0,05 y el valor de Q del orden de 40 en primera aproximación. Esto permitirá calcular un valor de R para la bobina.

Filtros

Filtros paso alto. Con la sección paso alto del filtro se pretende crear un camino de baja impedancia para las componentes armónicas de corriente, cuya frecuencia es elevada (corrientes armónicas de orden mayor a 15 o 20).



Configuraciones de filtros paso alto. a) primer orden, b) segundo orden, c) tercer orden d) tipo C.

Filtros

Filtros paso alto. Características

- El filtro de **primer orden** no se utiliza normalmente, porque requiere un condensador grande y tiene pérdidas excesivas a la frecuencia fundamental.

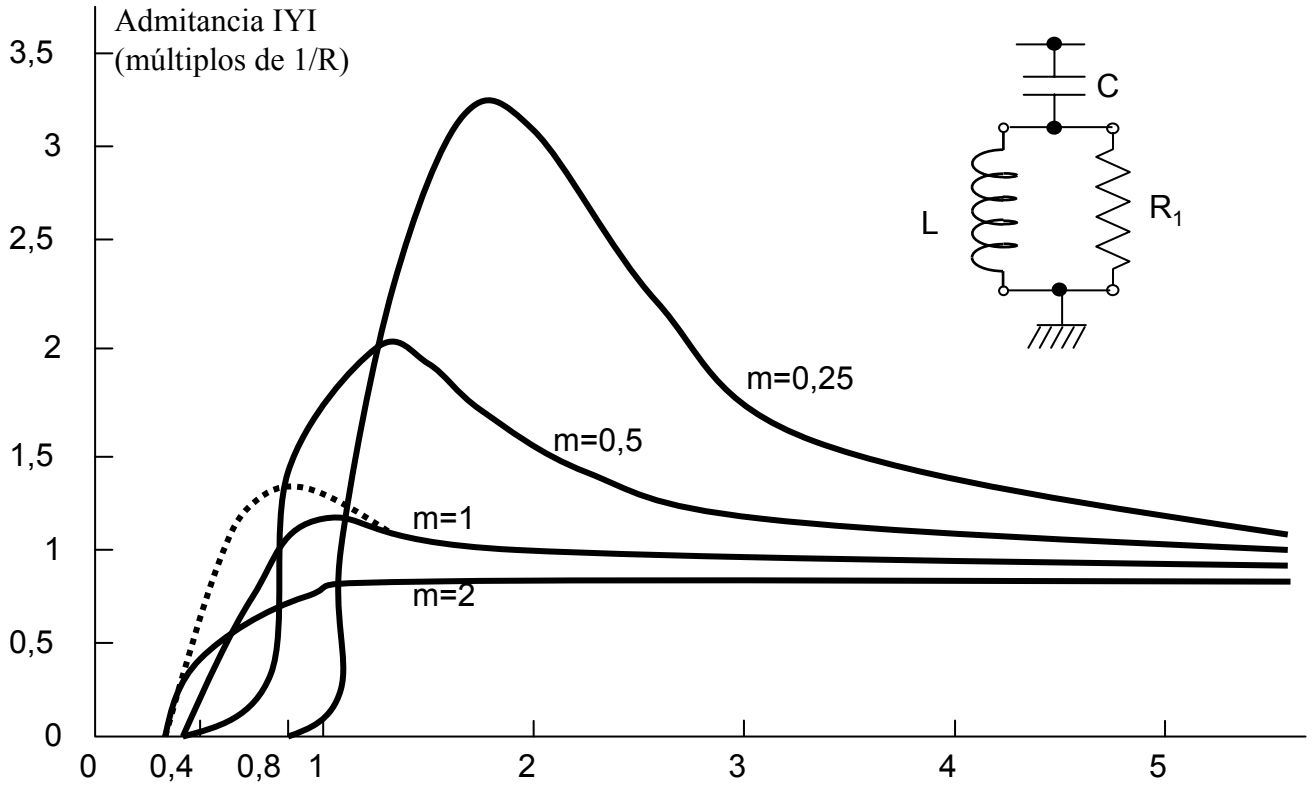
- El filtro de **segundo orden** ofrece el mejor filtrado, pero sus pérdidas a la frecuencia fundamental son superiores a la del filtro de tercer orden.

- El filtro de **tercer orden** reduce las pérdidas, debido al aumento de su impedancia a la frecuencia fundamental por la presencia del condensador C_2; el valor nominal de este condensador es muy reducido en comparación con el de C_1.

- Las características del **filtro tipo-C** se encuentran entre las de los filtros de segundo y tercer orden. Su principal ventaja es una considerable reducción de las pérdidas debido a que C_2 y L están sintonizados en serie a la frecuencia fundamental y R cortocircuitada; como consecuencia, este filtro es más susceptible a desviaciones de la frecuencia y de los valores de los componentes.

Filtros

Filtros paso alto. Filtro de 2º orden.



$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C \cdot L}$$

$$m = \frac{L}{R^2 \cdot C}$$

Admitancia del filtro de 2º orden en múltiplos de 1/R.

Filtros

Filtros paso alto. Filtro de 2º orden.

- **Para altas frecuencias, un criterio de cálculo sencillo de este tipo de filtros es el siguiente:**

- El valor de impedancia a altas frecuencias puede suponerse igual a R y debe cumplir, para el mínimo n que se desee filtrar, la expresión:

$$R < 0{,}1 \cdot Z_n RED$$

- Una vez determinado el valor de R, el valor de C se determina por la frecuencia deseada:

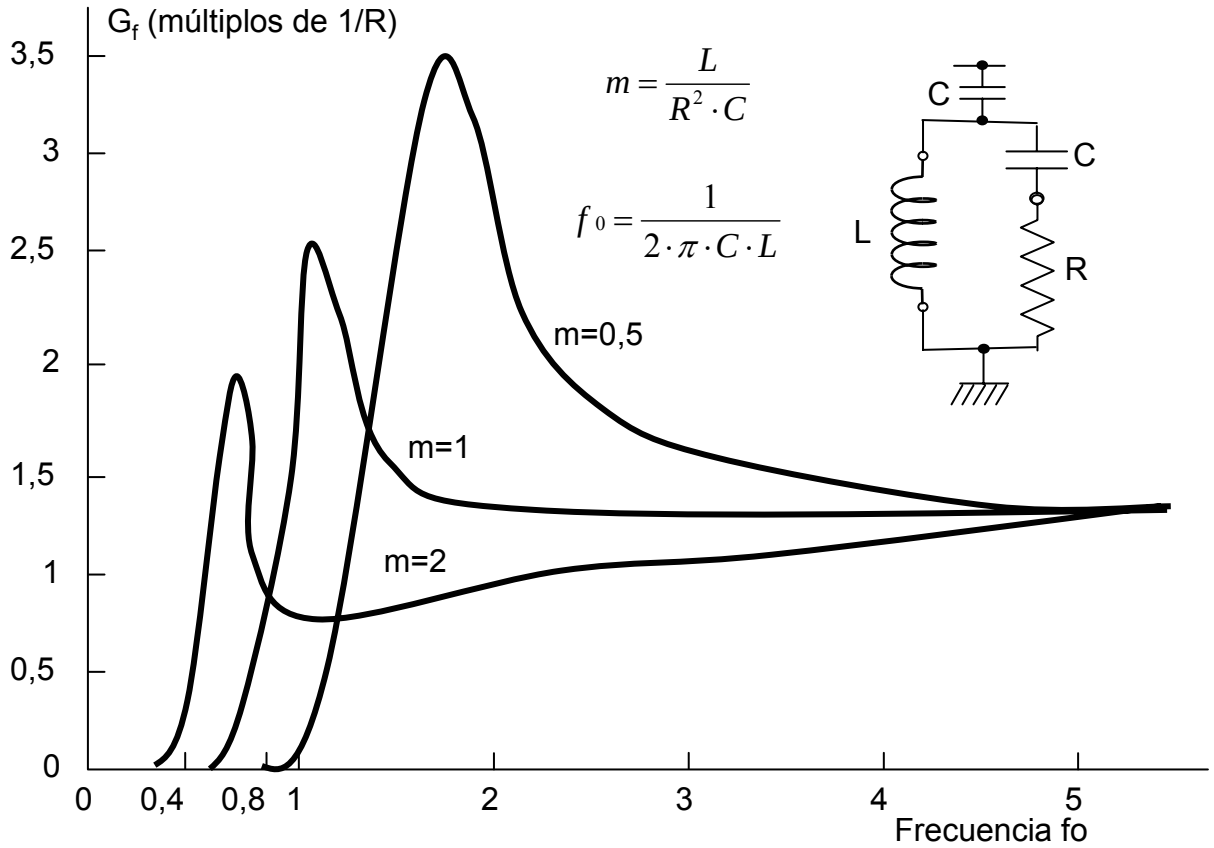
$$X_n = (1.5 \div 2) \cdot \frac{1}{C \cdot R}$$

- El valor de inductancia suele elegirse de forma que se cumpla expresión:

$$\frac{L}{R^2 \cdot C} = (0{,}5 \div 1)$$

Filtros

Filtros paso alto. Filtro de 3º orden.

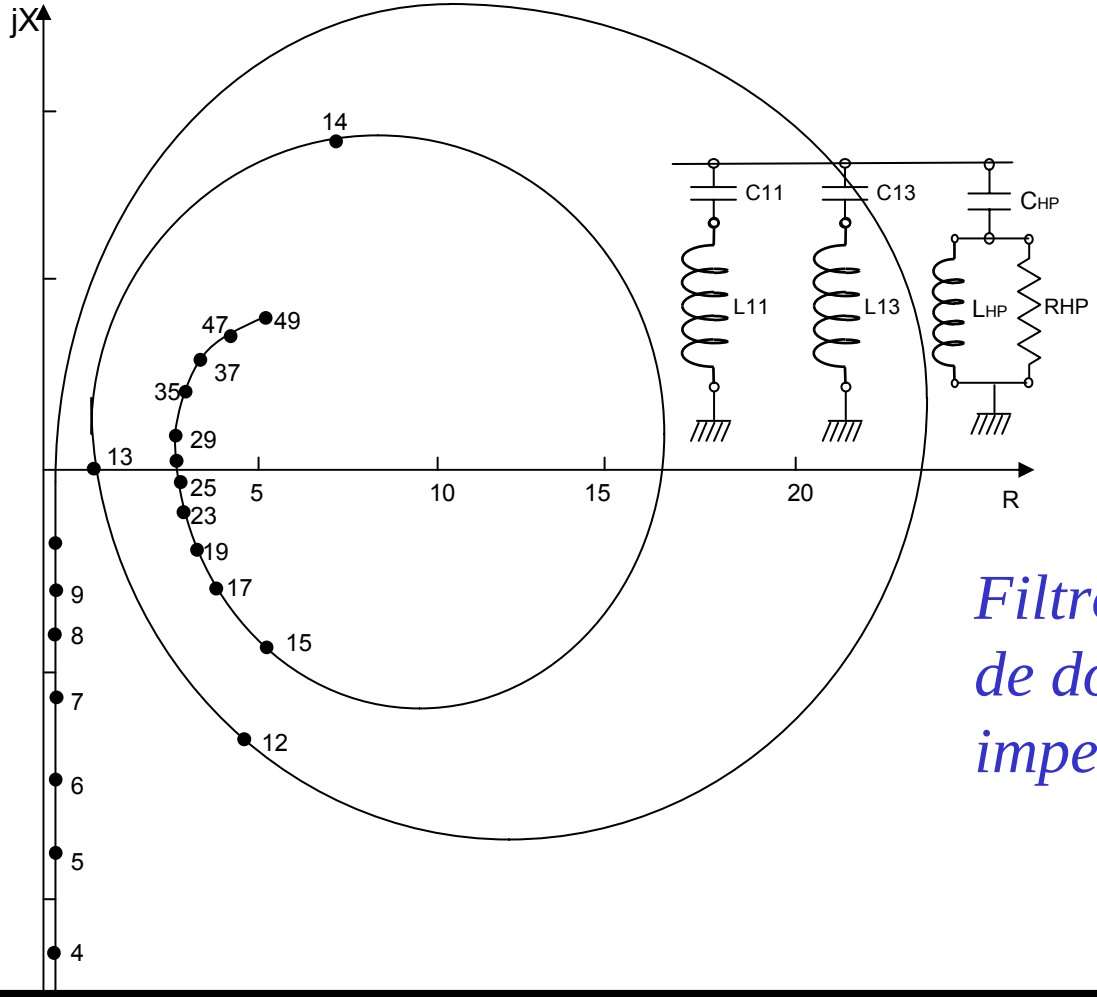


Conductancia Gf de un filtro de 3º orden.

Filtros

Donsión

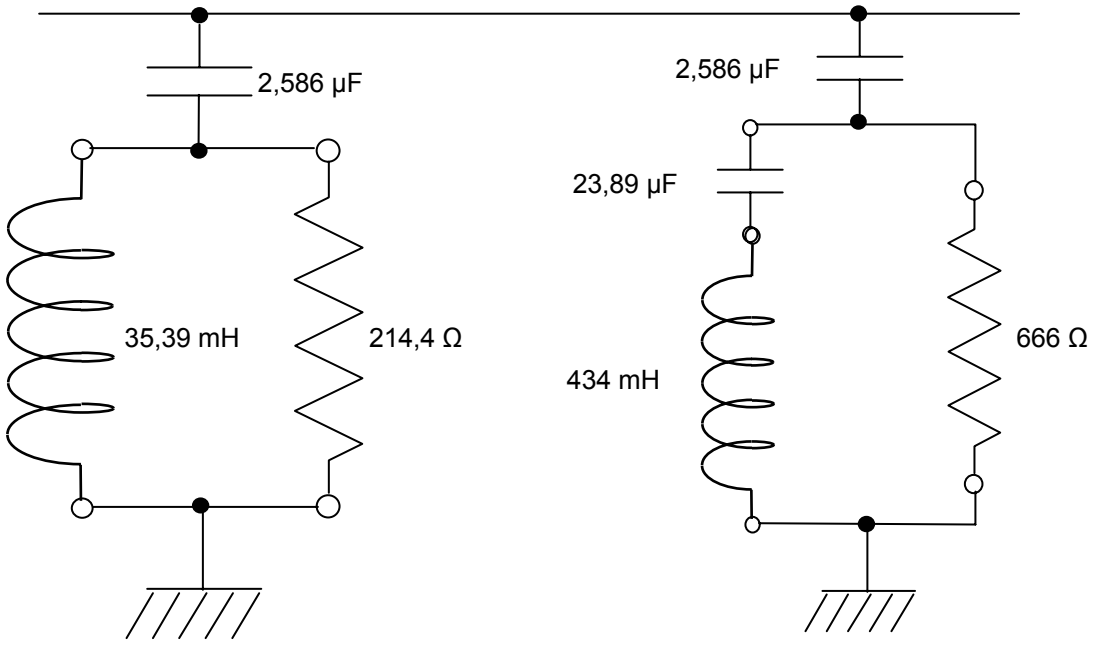
Configuraciones típicas de los filtros de corriente alterna



Filtro de un convertidor de doce pulsos y lugar de impedancias típicas

Filtros

Filtros para convertidores de 12 pulsos



Filtro combinado de segundo orden y Tipo-C.

Filtros

Inconvenientes de los filtros pasivos.

La ventaja de utilizar filtros pasivos estriba, básicamente, en su bajo coste; sin embargo, tienen muchos inconvenientes, entre ellos:

- La impedancia de la fuente resulta muy afectada por las características del filtro.

- La resonancia serie entre el filtro y la impedancia de la fuente puede causar amplificaciones de las tensiones armónicas a ciertas frecuencias.

- El filtro pasivo puede provocar una resonancia paralelo con la red de suministro, con amplificación de las corrientes armónicas.

- Los filtros pasivos, debido a la componente resistiva, tienen un consumo de componente fundamental, lo que provoca armónicos de tensión.

- El número de secciones del filtro será tanto más elevado cuanto mayor sea el número de armónicos a eliminar, lo que supone aumentar los problemas anteriormente mencionados.

- En el caso de compensaciones centralizadas, el filtro de absorción (que es, generalmente, el utilizado a nivel industrial), está adaptado a una configuración concreta de red y estado de cargas. Por lo tanto, no podrán eliminarse ni añadirse cargas a un grupo compensado de esta forma.