Adaptación de Impedancias.

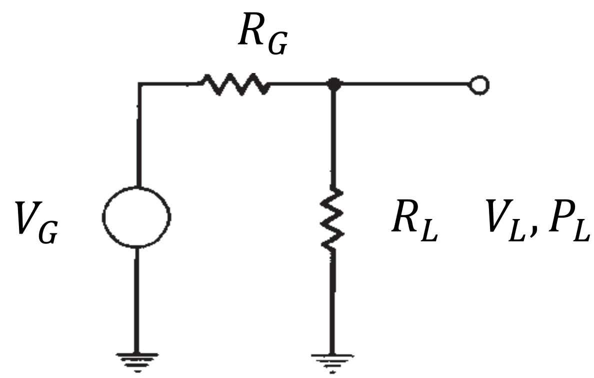
La adaptación de la impedancia a menudo es necesaria en el diseño de circuitos de RF y Microondas para proporcionar la máxima transferencia de potencia posible entre una fuente y su carga.

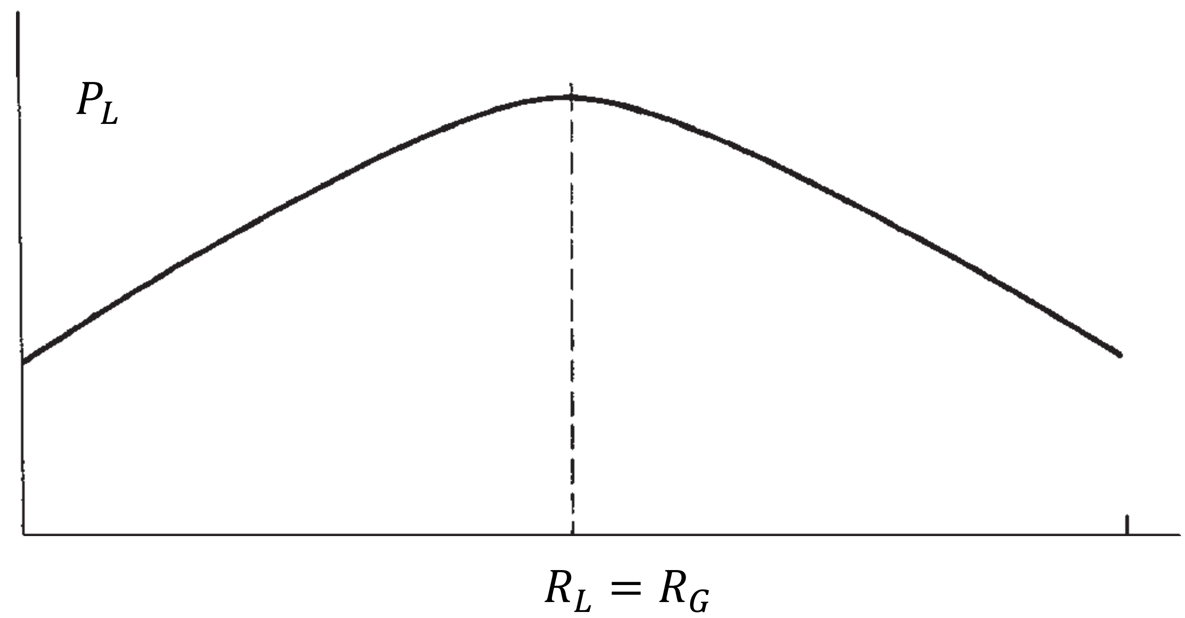
Por lo tanto, la adaptación de impedancias es necesaria en toda la cadena de componentes circuitales de un sistema.

Se estudian varios métodos para la adaptación entre una fuente dada y una carga dada. Esto puede resolverse de forma numérica, con la ayuda de la Carta de Smith, o bien utilizando herramientas de diseño de software.

Como es sabido, el *teorema de la máxima transferencia de potencia* lleva a la conclusión de que la misma se produce si las resistencias de generador y carga son iguales. Para impedancias complejas, estas deben se complejos conjugados.

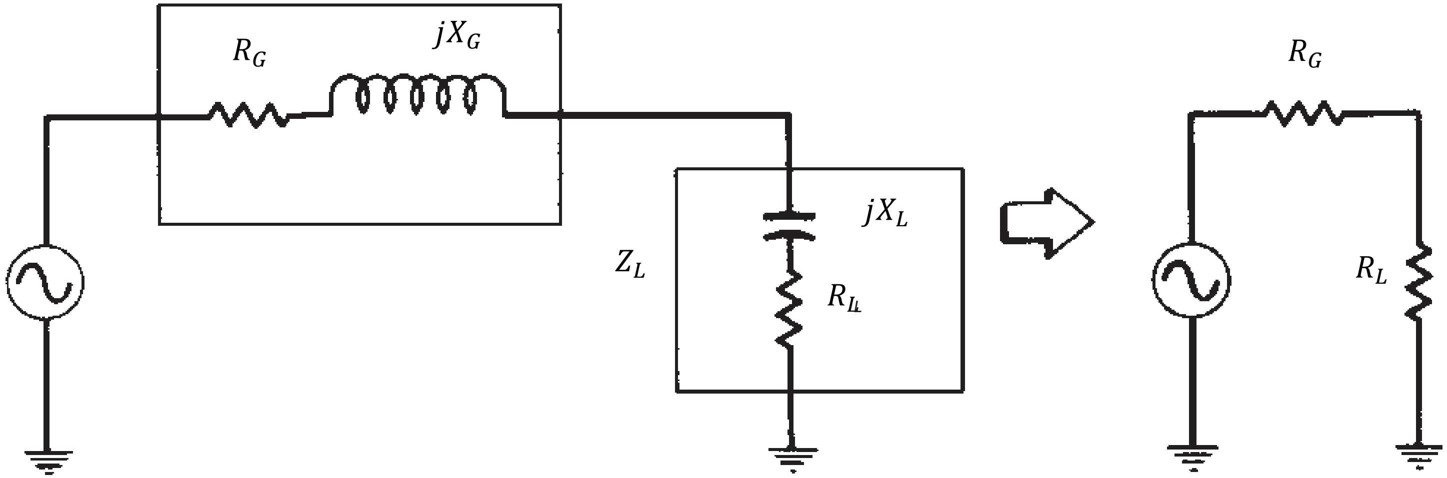
Máxima trasferencia de Potencia.





Máxima trasferencia de Potencia.

La curva muestra la potencia en la carga como función de la resistencia de carga, verificando el máximo cuando $R_L = R_G$. El siguiente circuito muestra el caso de impedancias complejas.



La máxima transferencia de potencia requiere que:

$$R_L = R_G, X_L = -X_G.$$

Las partes imaginarias se cancelan.

Adaptación de Impedancias.

El objetivo principal en cualquier esquema de adaptación de impedancia, entonces, es modificar una impedancia de carga para que “se parezca” al conjugado complejo de la impedancia de fuente, y así lograr que la potencia máxima pueda transferirse a la carga.

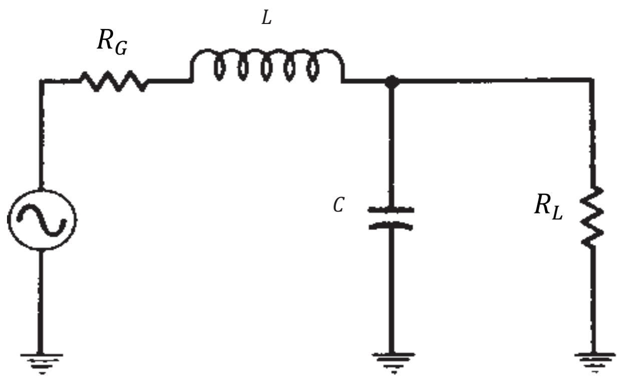
Para lograrlo se intercala una red de adaptación, que es básicamente un circuito, típicamente constituido por elementos reactivos, para no producir pérdidas, que realiza una modificación de los niveles de impedancia de carga, para que el generador vea al conjunto carga-red de adaptación como una impedancia conjugada de su impedancia interna.

Inicialmente planteamos para este problema el uso de componentes concentrados. Para altas frecuencias el diseño se hace con componentes distribuidos.

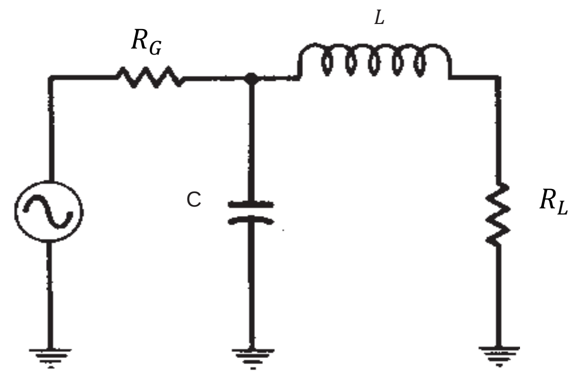
Algunas de las posibilidades para estas redes son las siguientes:

Red “L”.

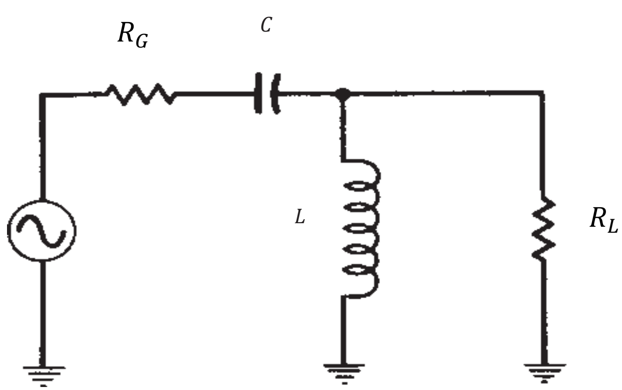
Probablemente el circuito de adaptación más simple y más utilizado es la red “L” que se muestra en la figura.



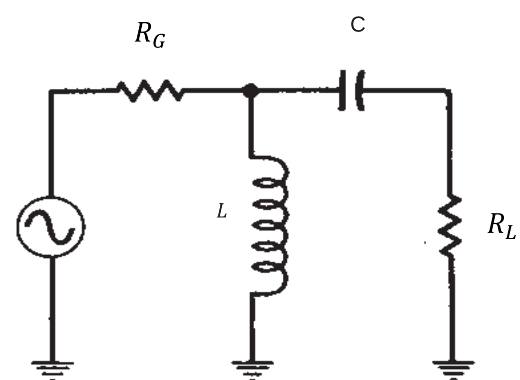
(A) Pasabajos



(B) pasabajos



(C) Pasaaltos



(D) Pasaaltos

Red “L”.

Este circuito recibe su nombre debido a la orientación de los componentes, que se parece a la forma de una L.

Como se muestra en los esquemas, hay cuatro arreglos posibles de los dos componentes L y C. Las dos impedancias a adaptar en este caso son resistivas puras.

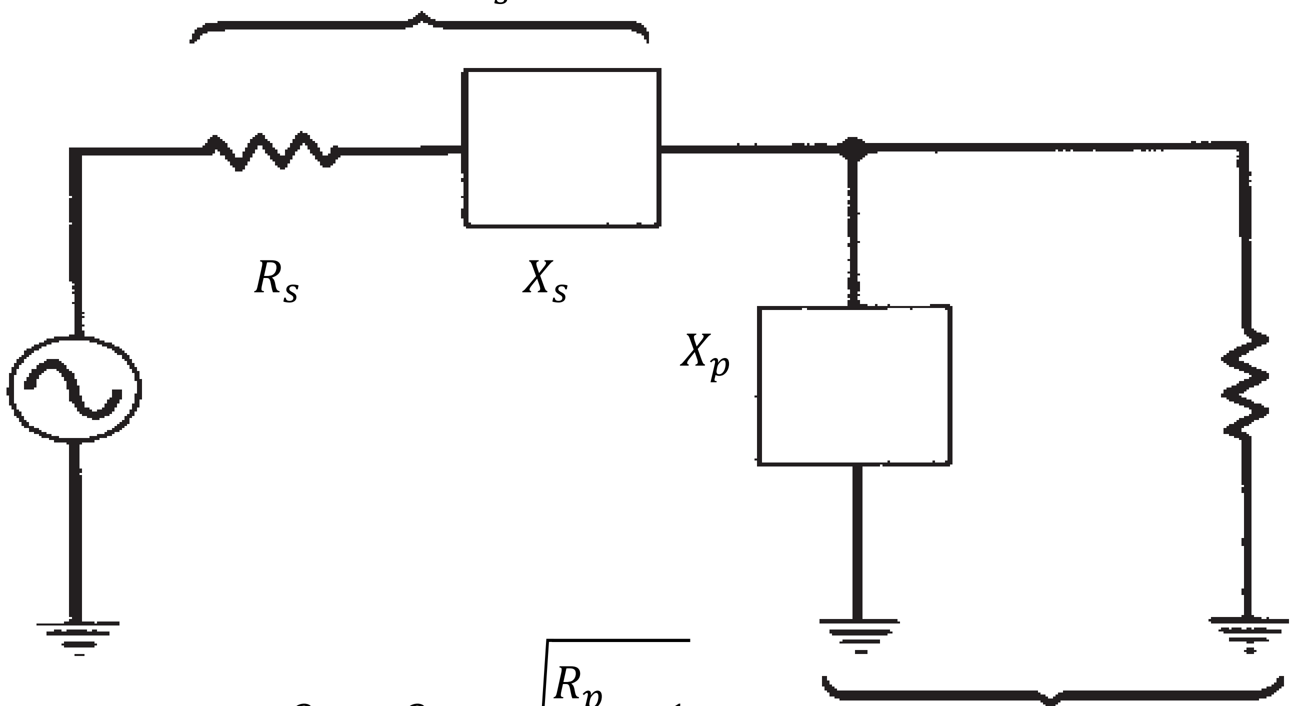
Dos de los arreglos (Figs. A y B) están en una configuración de pasabajos mientras que los otros dos (Figs. C y D) están en una configuración de pasaaltos.

Red “L”.

El diseño de estas redes de adaptación puede realizarse a través de las siguientes expresiones:

$$Q_s = \frac{X_s}{R_s}$$

Llamando



$$Q_s = Q_p = \sqrt{\frac{R_p}{R_s} - 1}$$

$$Q_p = \frac{R_p}{X_p}$$

Red "L".

Como ejemplo, si se deseara adaptar una resistencia $R_L = 1000\,\Omega$ a un generador de resistencia $R_G = R_s = 100\,\Omega$, obtendríamos:

$$Q_s = Q_p = \sqrt{\frac{R_p}{R_s} - 1} = 3$$

$$X_s = 3x100\,\Omega = 300\,\Omega \text{ Ind}$$

$$X_p = \frac{R_p}{Q_p} = \frac{1000}{3}\,\Omega = 333.33\,\Omega \text{ Cap}$$

Cuando las impedancias a adaptar son complejas, se puede proceder de la misma manera, absorbiendo los valores reactivos en los calculados.

Otro procedimiento puede ser la cancelación por resonancia con elementos adicionales.

Red "L".

Una vez determinadas las reactancias a sintetizar, la definición de los componentes se deduce de su conducta capacitiva o inductiva, y se requiere de la determinación de la frecuencia de operación.

En este sentido se destaca que la adaptación se produce a la frecuencia de operación, y que a otras frecuencias habrá desadaptación.

Redes de adaptación con 3 elementos

Las ecuaciones anteriores de diseño muestran una desventaja potencial de las redes L de 2 elementos descritas en las secciones anteriores. Una vez que se determinan R_s y R_p, o la fuente y la impedancia de carga, se define el factor Q de la red.

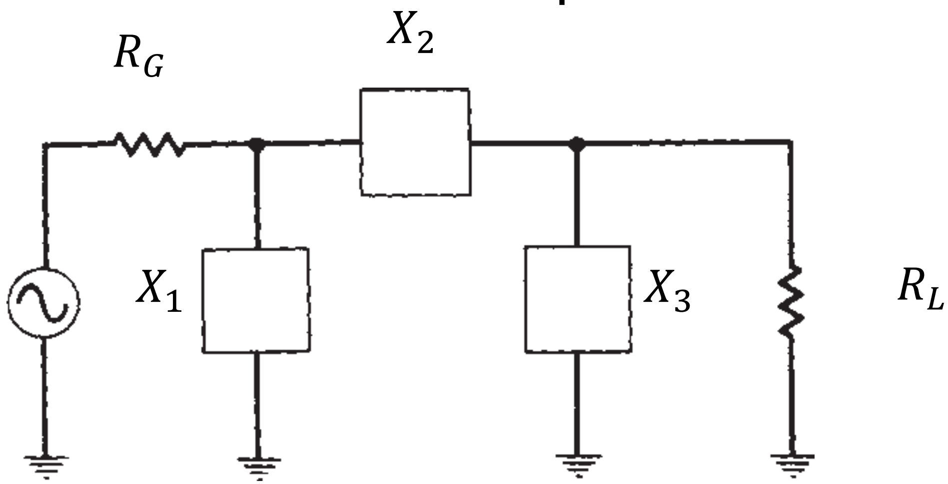
En otras palabras, con la red L, el diseñador no puede elegir el factor Q de la red.

La red de 3 elementos supera esta desventaja y se puede utilizar para aplicaciones de alto Q de banda estrecha. Además, el diseñador puede seleccionar cualquier circuito práctico con un factor Q que desee, siempre que sea mayor que el valor que es posible con la red de adaptación L sola.

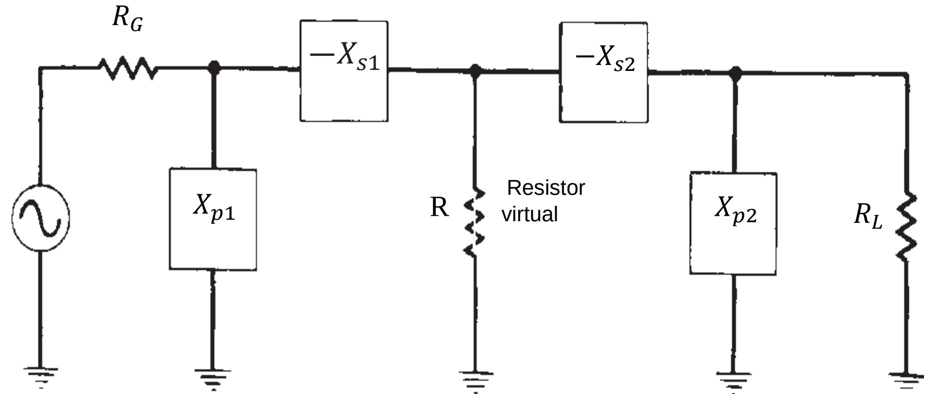
Dos variantes de la configuración de adaptación con 3 elementos son las redes “Pi” y “T”.

Redes Pi.

La red Pi posee una estructura como la que se ve en la figura:



Que se puede interpretar como dos redes L sobre un punto de resistencia virtual:



Redes Pi.

El diseño de cada sección de la red Pi procede exactamente como se hizo para las redes L en las secciones anteriores. La resistencia virtual (R) debe ser más pequeña que R_G o R_L porque está conectada al brazo en serie de cada sección L pero, de lo contrario, puede tener cualquier valor que desee. Sin embargo, la mayoría de las veces, R se define por el factor Q deseado del circuito que se especifica al comienzo del proceso de diseño.

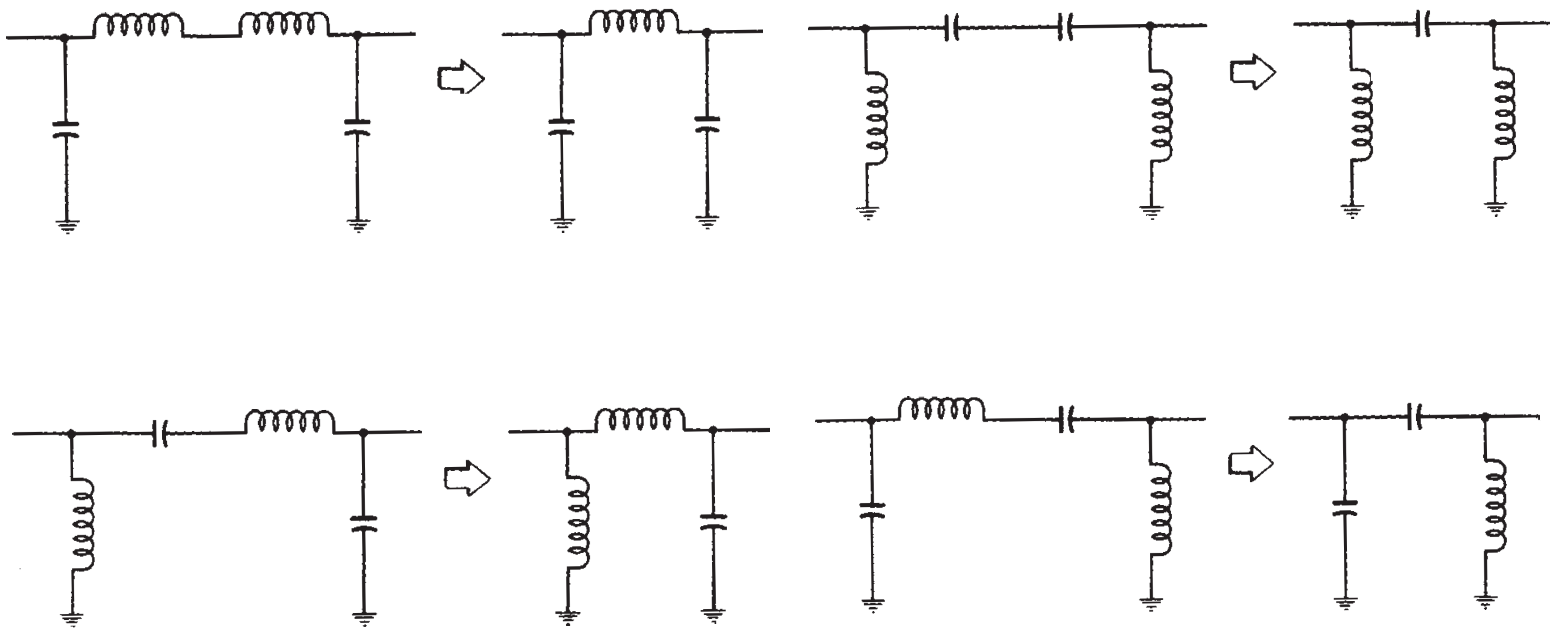
El factor de calidad Q se define como:

$$Q = \sqrt{\frac{R_H}{R} - 1}$$

Donde R_H es, entre R_G y R_L, la de valor mas alto, y R la resistencia virtual, valor a adoptar.

Redes Pi.

Esta es una fórmula de determinación de Q aproximada.



Cualquiera de las redes de la figura puede ser útil para realizar la adaptación, la elección dependerá de buscar:

- La eliminación de las reactancias parásitas.
- La necesidad de filtrado de armónicos.
- La necesidad de pasar o bloquear el voltaje de CC.

Redes Pi. Ejemplo.

Diseñe una red Pi para adaptar una fuente de 100 ohmios con una carga de 1000 ohmios. Cada red debe tener una factor Q de 15.

Para encontrar la resistencia virtual hacemos

$$R = \frac{R_H}{Q^2 + 1} = \frac{1000}{226} = 4.43\ \Omega$$

X_{p2} se obtiene entonces como:

$$X_{p2} = \frac{R_p}{Q_p} = \frac{R_L}{Q} = \frac{1000}{15} = 66.7\ \Omega$$

Para X_{s2} se hace:

$$X_{s2} = QR_s = QR = (15)4.43\ \Omega = 66.4\ \Omega$$

Redes Pi. Ejemplo.

Esto completa el diseño de la sección L del lado de carga de la red de adaptación. De los valores de impedancia pueden determinarse los valores de la capacitancia y la inductancia a la frecuencia de operación.

Se observa que el valor R_s en la ecuación anterior fue sustituido por la resistencia virtual R, que por definición está en el brazo en serie de la sección L.

Para la L del lado generador operamos de forma similar. Observe aquí que ahora se considera que la resistencia de la fuente está en el tramo paralelo de la red L. Por lo tanto, R_s se define como R_p, y podemos encontrar el factor Q como:

$$Q_1 = \sqrt{\frac{R_s}{R} - 1} = \sqrt{\frac{100}{4.43} - 1} = 4.6$$

Redes Pi. Ejemplo.

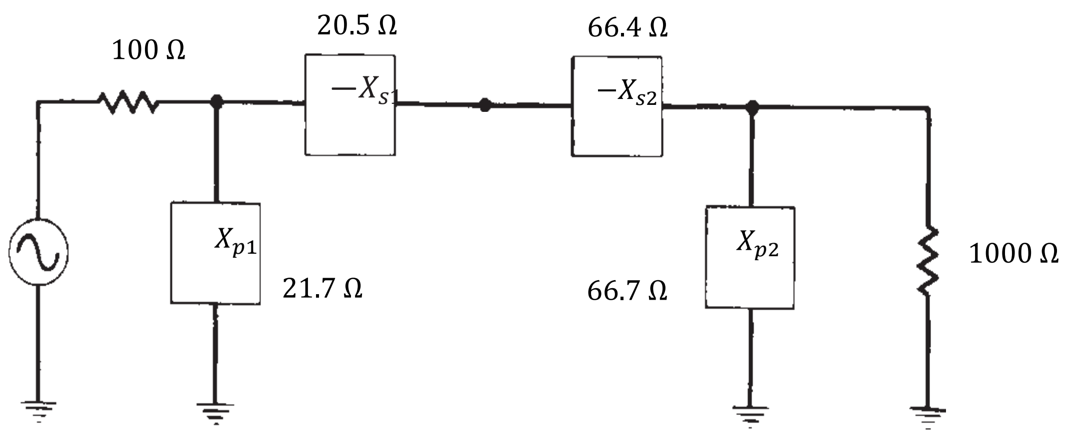
X_{p2} se obtiene entonces como:

$$X_{p1} = \frac{R_p}{Q_1} = \frac{100}{4.6} = 21.7\ \Omega$$

Para X_{s2} se hace.

$$X_{s2} = Q_1 R_s = Q_1 R = (4.6)4.46\ \Omega = 20.51\ \Omega$$

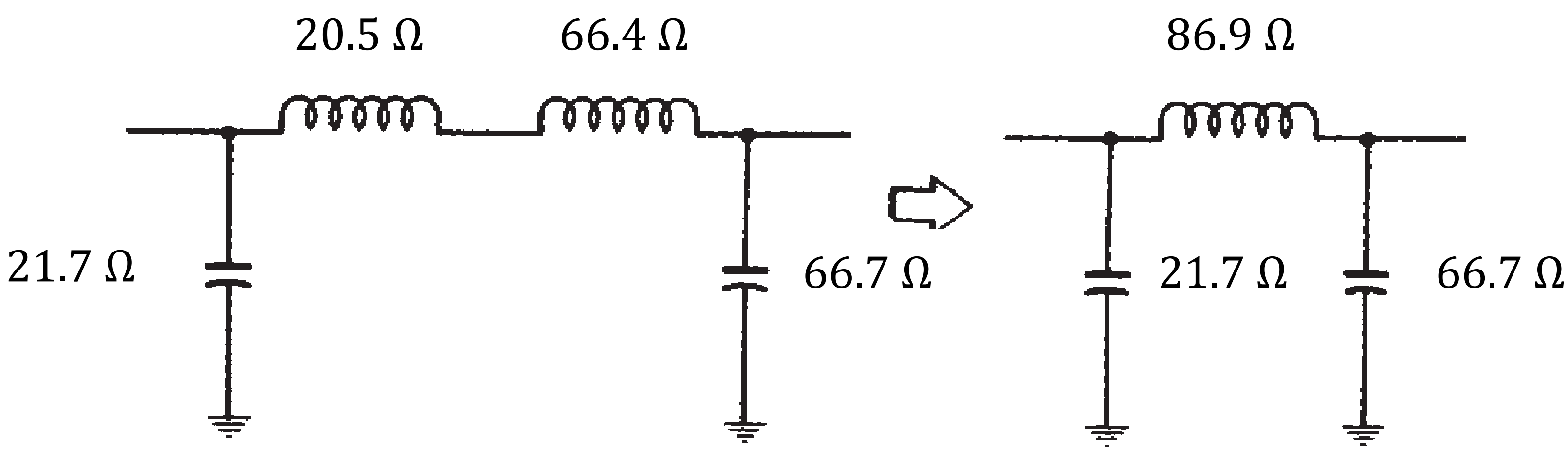
De esta manera queda completa la adaptación:



Redes Pi. Ejemplo.

Las reactancias X_{s1} y X_{s2} se encuentran conectadas en serie y simplemente se pueden sumar para formar un solo componente.

Implementada con la topología Pi de capacitores en paralelo con inductancias en serie, quedaría en modo pasabajos:



Redes Pi. Ejemplo.

Las reactancias X_{p1}, X_{s1}, X_{p2}, X_{s2}, pueden ser capacitivas o inductivas.

La única restricción es que X_{p1} y X_{s1} son de tipos opuestos, y X_{p2} y X_{s2} son de tipos opuestos.

Esto produce las cuatro redes de la figura mostrada anteriormente. Cada componente se muestra como una reactancia (en ohmios). Por lo tanto, para realizar la transformación de la dual-L a la red Pi, los dos los componentes de la serie simplemente se suman si son iguales, o restan si las reactancias son de tipo opuesto.

Finalmente, se reemplaza cada reactancia en un componente de capacitancia o de inductancia que genere la correspondiente reactancia a la frecuencia de operación.

Redes T.

El diseño de la red T de 3 elementos es exactamente el mismo que el de la red Pi excepto que con la T, se iguala la carga y la fuente, a través de dos redes de tipo L, a una resistencia virtual que es mayor que la resistencia de carga o la resistencia de la fuente, respectivamente.

Esto significa que las dos redes de tipo L tendrán sus ramas de derivación conectadas entre sí como se muestra en la figura.

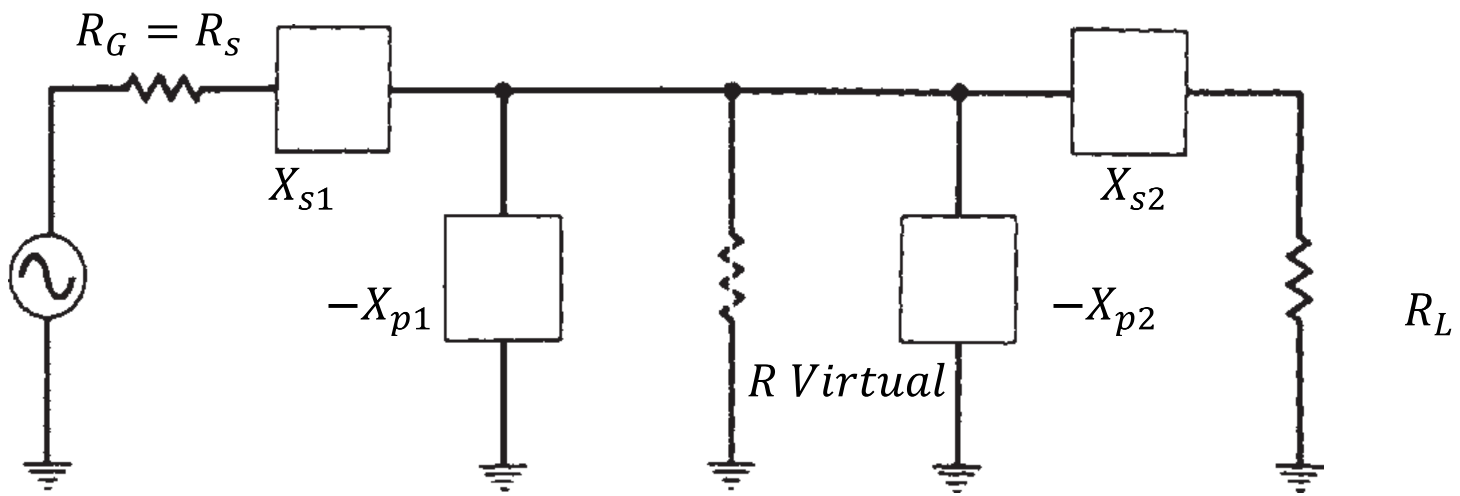
La red T se usa a menudo para hacer coincidir dos impedancias de bajo valor cuando se necesita un arreglo de alto Q. El factor Q de la red T está determinado por la sección L que tiene su valor más alto.

Por definición, la sección L con factor Q más alto ocurrirá en el extremo con la resistencia de terminación más pequeña.

Cada resistencia de terminación está en la rama en serie de cada red.

Redes T.

Las dos redes de tipo L tendrán sus ramas de derivación conectadas entre sí como se muestra en la figura.



Redes T.

La red T se usa a menudo para hacer coincidir dos impedancias de bajo valor cuando se necesita un arreglo de alto Q.

El factor Q de la red T está determinado por la sección L que tiene el factor Q más alto.

Por definición, la sección L con factor Q más alto ocurrirá en el extremo con la resistencia de terminación más pequeña.

Cada resistencia de terminación está en la rama en serie de cada red. Por tanto, la fórmula para determinar el factor Q de la red T es:

$$Q = \sqrt{\frac{R}{R_{small}} - 1}$$

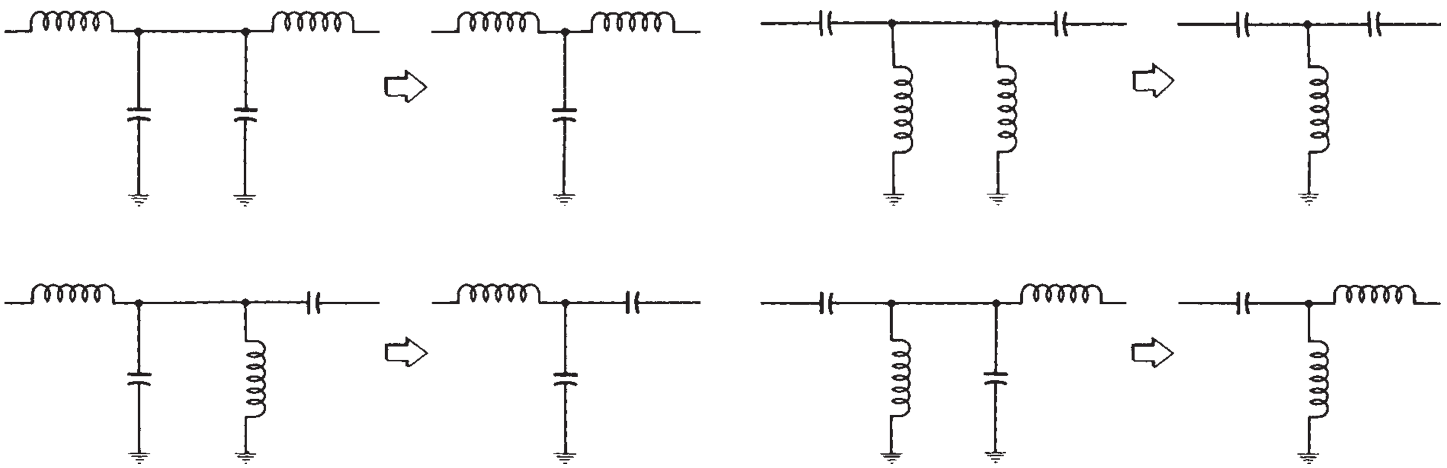
R, resistencia virtual

R_{small}, valor mas bajo entre R_G y R_L

Redes T. Ejemplo.

Diseñe una red T para adaptar una fuente de 10 ohmios a una carga de 50 ohmios. Cada red tiene un factor Q de 10.

Las cuatro posibles redes tipo T que se pueden usar para adaptar dos impedancias se muestran en la figura:



Redes T. Ejemplo.

Usando las expresiones anteriores, podemos encontrar la resistencia virtual que necesitamos para la adaptación.

De $Q = \sqrt{\frac{R}{R_{small}} - 1}$,

$$R = R_{small}(Q^2 + 1) = 10x101\ \Omega = 1010\ \Omega$$

Luego:

$$X_{s1} = QR_{small} = 10x10\ \Omega = 100\ \Omega$$

$$X_{p1} = \frac{R}{Q} = \frac{1010}{10}\ \Omega = 101\ \Omega$$

Redes T. Ejemplo.

Ahora, para la red L en el extremo de la carga, el factor Q está definido por la resistencia virtual y la resistencia de carga. De este modo,

$$Q_2 = \sqrt{\frac{R}{R_L} - 1} = \sqrt{\frac{1010}{50} - 1} = 4.4$$

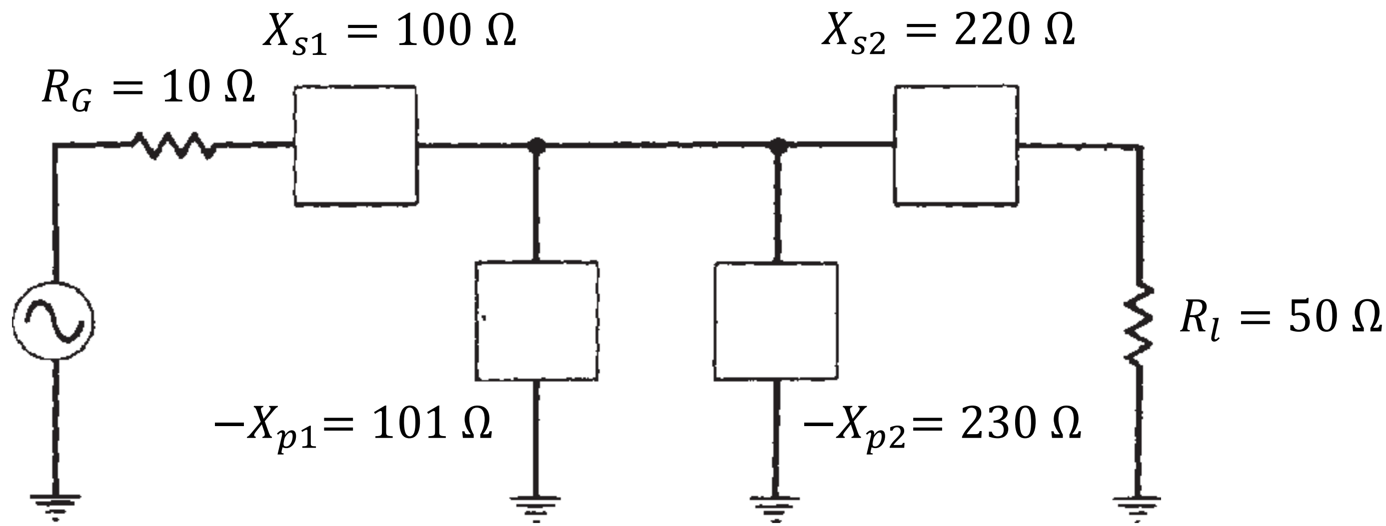
Luego:

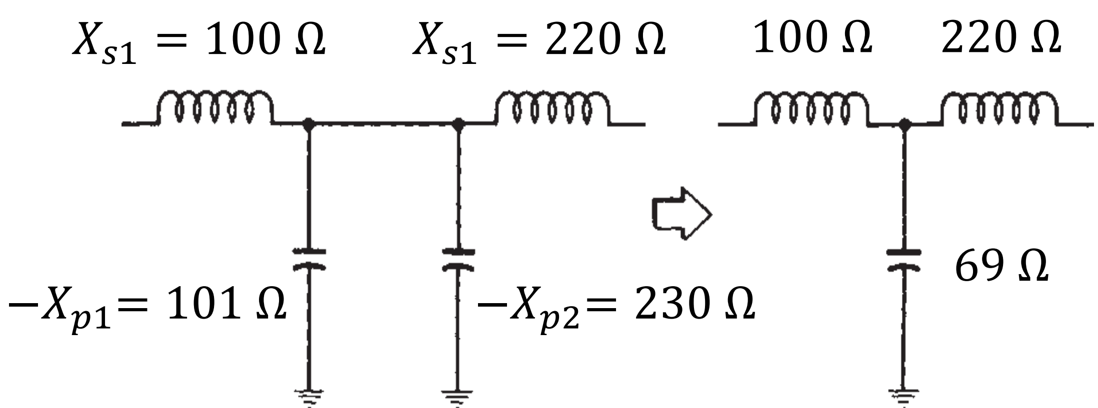
$$X_{p2} = \frac{R}{Q_2} = \frac{1010}{4.4}\ \Omega = 230\ \Omega$$

$$X_{s2} = Q_2 R_L = 4.4x50\ \Omega = 220\ \Omega$$

La red ahora está completa y se muestra en la figura, sin la resistencia virtual.

Redes T. Ejemplo.





Redes de adaptación de banda ancha.

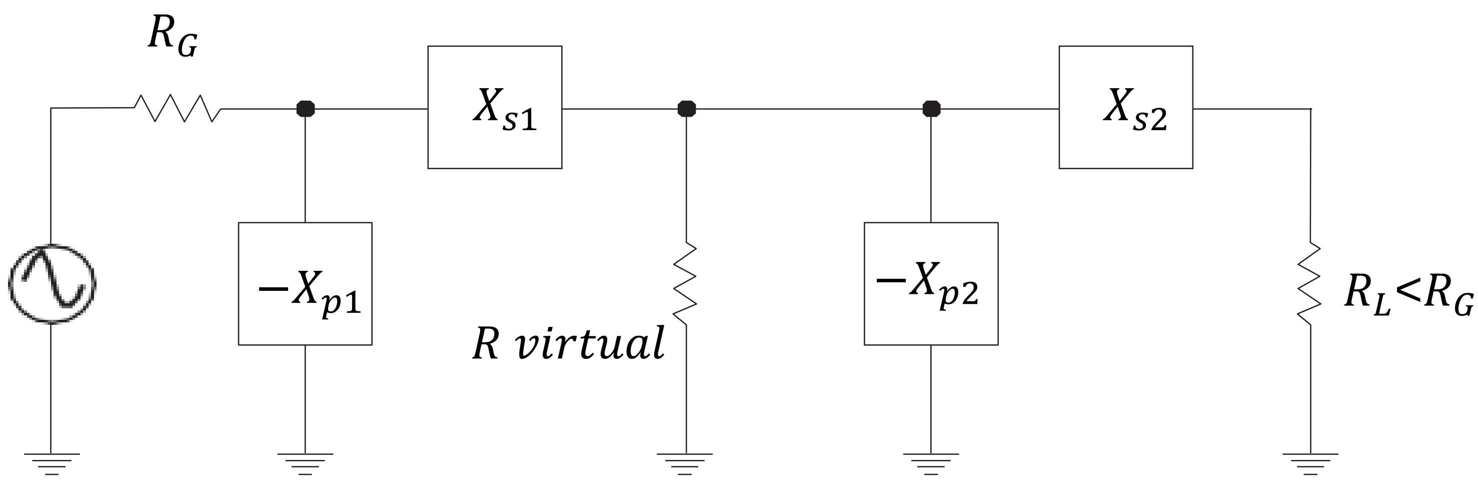
Hasta ahora en este capítulo hemos estudiado:

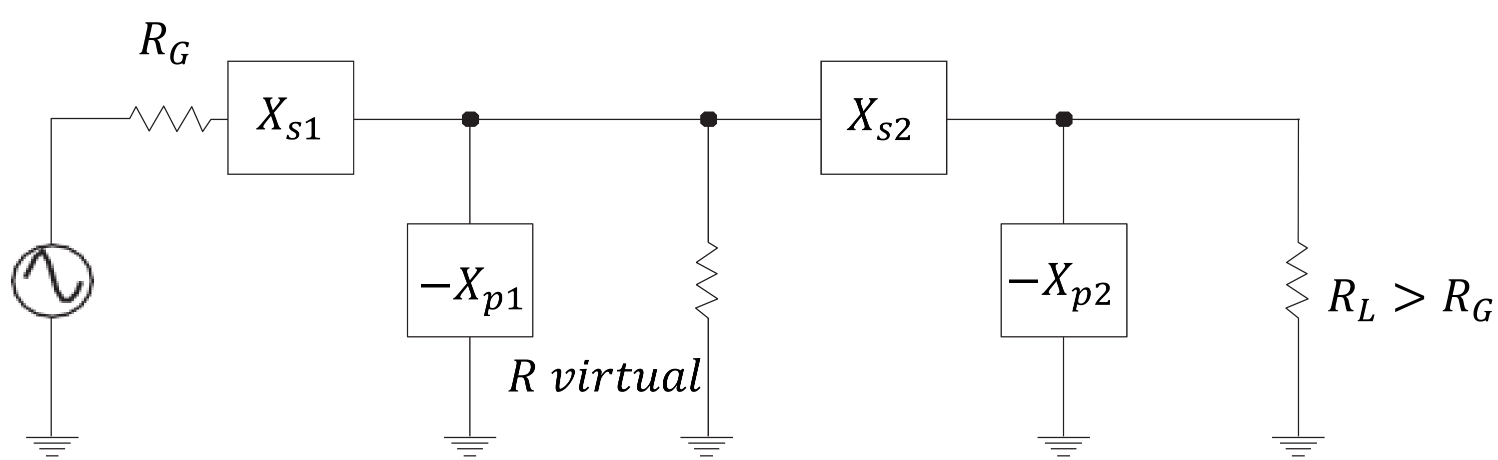
1. la red L, que tiene un factor Q que se define automáticamente cuando se establecen las impedancias de fuente y carga, y

2. las redes Pi y T, que nos permiten seleccionar un factor Q independiente de las impedancias de fuente y carga siempre que el factor Q elegido sea mayor que la que está disponible con la red L.

Las redes Pi y T son muy adecuadas para redes de adaptación de banda estrecha.
Sin embargo, es posible encontrar en la práctica la necesidad de redes de adaptación de banda ancha. Una solución a ese problema es utilizar secciones L en serie, tal como se propone en la figura:

Redes de adaptación de banda ancha.





Redes de adaptación de banda ancha.

El ancho de banda máximo (factor Q mínimo) disponible de esta red se obtiene cuando la resistencia virtual (R) se hace igual a la media geométrica de las dos impedancias que se adaptan:

$$R = \sqrt{R_G R_L}$$

El factor Q de la red queda entonces igual a:

$$Q = \sqrt{\frac{R}{R_{smaller}} - 1} = \sqrt{\frac{R_{larger}}{R} - 1}$$

R resistencia virtual
$R_{smaller}$, resistencia de terminales mas pequeña
R_{larger}, resistencia de terminales mas grande

Redes de adaptación de banda ancha.

Para incrementar el ancho de banda (reducir aun mas el factor Q) se puede recurrir a una cascada de etapas L, definiendo varios puntos de resistencia virtual R_1, R_2, …, R_n de manera que se mantenga la proporción de impedancias:

$$\frac{R_1}{R_{smaller}} = \frac{R_2}{R_1} \dots = \frac{R_{larger}}{R_n}$$