FACTOR Q:

En este artículo queremos poner algo de luz sobre el llamado "factor Q", teniendo en cuenta tanto el factor de calidad de los componentes electrónicos - condensadores e inductores- como el de los circuitos de resonancia.

Quienes trabajan en el campo de la **electrónica**, ya sea como profesión o afición, y especialmente los que trabajan en **RF** (Radio Frecuencia), a veces tienen que "enfrentarse" con el llamado **factor Q** (Factor de Calidad), un término al que se dan diferentes significados que suelen llevar a confusión. En este breve artículo trataremos de aclarar un poco el asunto, buscando la ayuda de algunos ejemplos sencillos. Comencemos por distinguir el **factor Q** de los componentes electrónicos como **condensadores e inductancias** y el **factor Q** de un **circuito resonante**.

En el primer caso, el **factor Q** está estrechamente relacionado con los **factores de fabricación** del componente, como por ejemplo la sección del cable, la relación longitud/diámetro, el tipo de núcleo en el caso de una bobina o bien el tipo dieléctrico en el caso de un condensador. Por lo general, **Q** se menciona en la **lista de características técnicas** del componente. Hay que tener en cuenta que, ya que su valor varía en función de la frecuencia, por lo general en esa lista se indica su **peor valor**.

La **Q** de un **condensador** se expresa como una relación entre su reactancia capacitativa y su **ESR** (Equivalent Series Resistance), como se muestra en la Figura 1.

Por ejemplo, si un condensador de 100 microfaradios tiene una **ESR** de **0,2 ohmios** y se pone a trabajar a una frecuencia de **100 Hz**, el factor Q será igual a:

Q = XC : ESR
XC ohm = 1 : (6,28 x F x C)
Q = 15,9 : 0,2 = 79,5

donde:
XC = reactancia capacitiva en ohmios
ESR = Equivalent Series Resistance en ohmios
= 6,28 número fijo igual a2 x pi griego
F = frecuencia en hercios
C = capacidad en faradios

Nota: *en la fórmula se utilizan las unidades de medida estándar de hercios y faradios, pero en realidad se suele trabajar con megahercios y con picofaradios o microfaradios.*

La fórmula en cuestión se transforma de la siguiente manera:
XC ohm = 159.000 : (MHz x pF)

O bien:
XC ohm = 159.000 : (Hz x µF)

Hay que tener en cuenta que el **factor Q** se expresa sólo con un número y por lo tanto, es una cantidad adimensional.

Es por esto que los condensadores pueden recalentarse durante su funcionamiento: la **ESR** produce una disipación del calor en función de la corriente que fluye a través de ellos. Este fenómeno se puede observar fácilmente en **fuentes de alimentación conmutadas**, donde los condensadores de nivelación están sujetos a altas corrientes impulsadas por frecuencias relativamente elevadas.

La resistencia parásita **ESR** se da cuando los componentes son demasiado largos como para poder considerarse “ideales”, o lo que es lo mismo “faltos de pérdidas” y, en consecuencia, se intentan usar los que tienen el mejor factor **Q** posible.

aclaremos algunas cosas

Q = XC: ESR

Ejemplo:

C = 100 µF
F = 100 Hz
ESR = 0,2 ohm

Calcular XC del condensador mediante la fórmula:

XC ohm = 159.000 : (Hz x µF)

Por tanto:

XC ohm = 159.000 : (100 x 100) = 15,9

Ahora podemos calcular el Q:

Q = XC: ESR = 15,9: 0,2 = 79,5

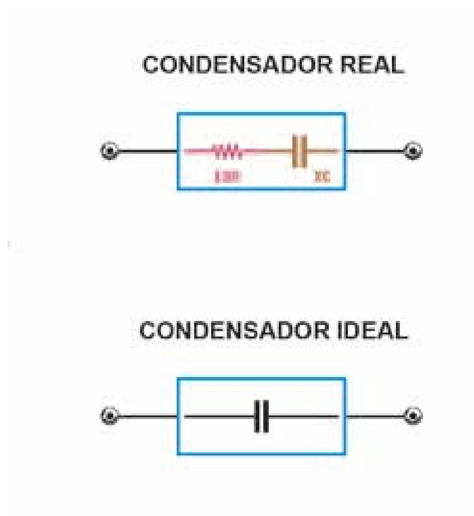


Fig. 1 En todos los condensadores hay una resistencia parásita ESR que provoca su recalentamiento cuando se someten a corrientes elevadas.

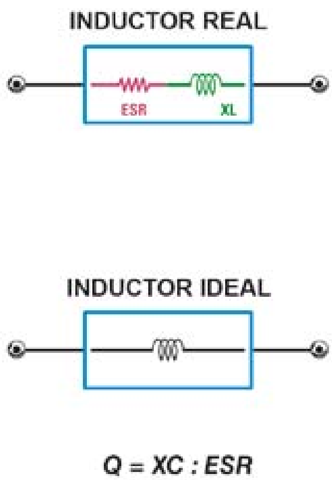


Fig. 2 También en las inductancias existe la ESR debida a la resistencia del cable con el que se fabrican.

La **Q** de una **bobina** inductora es igual a la relación entre su **reactancia inductiva** y su **ESR** (Ver fig. 2).

Q = XL: ESR
L = 6,28 x F x L

donde:
XL = reactancia inductiva en ohmios
= 6,28 número fijo igual a 2 x pi griego
F = frecuencia en Hz
L = inductancia en henrios

Nota: también en este caso, en la fórmula se han usado las unidades de medida estándar de hercios y de henrios, pero ya que en realidad se suele trabajar con megahercios y microhenrios, la fórmula en cuestión se transforma de la siguiente manera:

XL ohm = 6,28 x (MHz x µF)

Incluso en este caso la **ESR** es una resistencia de pérdida debida a la resistencia óhmnica del cable con el que está hecha la bobina.

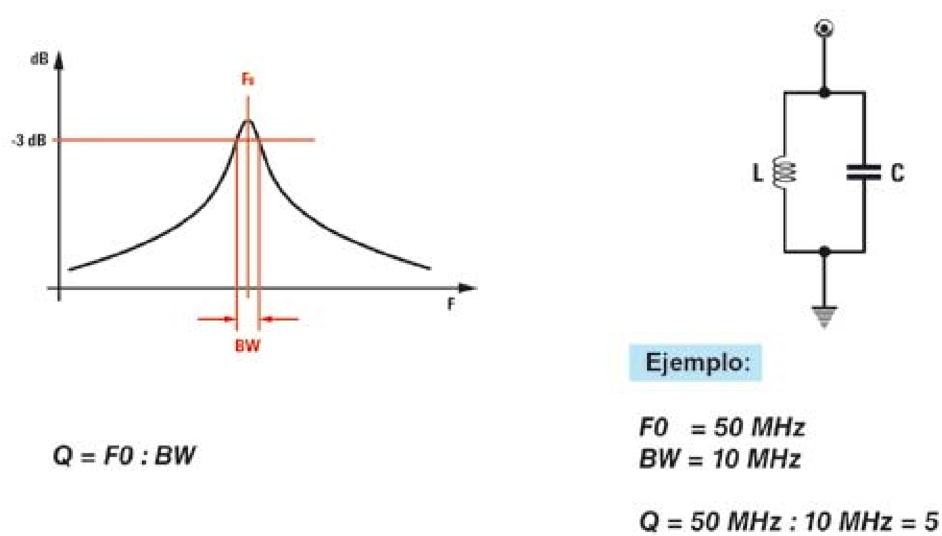
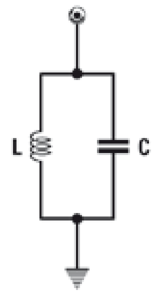


Fig.3 En un circuito resonante el factor Q expresa su ancho de banda. En este caso Q es la relación entre la frecuencia central y el ancho de banda a -3 dB.

El cuadro que se reproduce en la página siguiente muestra los valores de algunos parámetros de las inductancias Neosid, incluyendo el valor Q.

L± 10% (µH)	Q ≥	Freq. Ris. > (MHz)	R ≤ ohm	I max. (mA)
0,1	70	600	0,15	800
0,12	80	560	0,15	800
0,15	80	470	0,2	800
0,18	80	420	0,2	800
0,22	80	380	0,2	800
0,27	80	320	0,25	800
0,33	80	290	0,25	800
0,39	75	260	0,25	800
0,47	75	230	0,3	800
0,56	45	210	0,35	800
0,68	45	185	0,35	800
0,82	45	165	0,4	800
1	55	155	0,25	800
1,2	60	135	0,3	800
1,5	65	115	0,3	800
1,8	65	100	0,3	800
2,2	65	85	0,33	800
2,7	70	75	0,33	800
3,3	55	72	0,35	800
3,9	60	64	0,4	800
4,7	60	58	0,44	750
5,6	65	51	0,46	750
6,8	65	47	0,5	750
8,2	70	41	0,55	750

L± 5% (µH)	Q ≥	Freq. Ris. > (MHz)	R ≤ ohm	I max. (mA)
10	55	38	0,55	700
12	55	32	0,6	680
15	60	27	0,7	620
18	60	23	0,75	580
22	60	20	0,85	560
27	60	18	0,9	540
33	60	16	0,95	520
39	60	14	1,1	500
47	60	12	1,2	480
56	60	9	1,3	460
68	60	8	1,4	440
82	60	7	1,6	400
100	60	6,5	1,8	380
120	60	5,5	2	360
150	60	4,5	2,2	340
180	60	2,8	2,5	320
220	60	2,5	2,8	300
270	60	2,2	3,1	280
330	60	2	3,4	270
390	65	3,5	8	180
470	70	3	9	180
560	70	2,5	10	170
680	70	1,5	11	150
820	70	1,5	12	140



Ejemplo:

L = 1 µH

C = 33 pF

$F0 = 1 : (6{,}28 \times \sqrt{L \times C}) = 27{,}71\ MHz$

Fig.4 La condición de resonancia se produce cuando XC y XL toman los mismos valores.

Nota: *para simplificar los cálculos, la fórmula de la frecuencia de resonancia se puede modificar como sigue:*

$$F0\ MHz = 159{,}24 : \sqrt{pF \times \mu H}$$

donde los valores de capacidad se expresan en picofaradios y los de inducción microhenrios.
Si calculamos la XL y la XC en esta frecuencia, obtendremos que asumen los mismos valores.
De hecho:

$$XC\ ohm = 159.000 : (MHz \times pF) = 159.000 : (27{,}71 \times 33) = 173{,}8$$

$$XL\ ohm = 6{,}28 \times (MHz \times \mu H) = 6{,}28 \times (27{,}\ 71 \times 1) = 174$$

Nota: *la pequeña diferencia entre los valores se debe al redondeo.*

Hay que tener en cuenta que en alta frecuencia no es la resistencia la que se mide con un tester, sino que se mide la frecuencia de trabajo, que puede tener un valor más alto: a causa de "**efecto piel** ": la **corriente** no fluye de manera uniforme por el conductor, sino sólo por su superficie, reduciendo así "virtualmente" la efectividad del conductor en sí mismo.

A veces se prefiere recurrir a **núcleos magnéticos** para la fabricación de bobinas magnéticas, ya que se obtiene el mismo valor de inductancia con menos vueltas de alambre, con la consiguiente reducción de la **ESR** que se traduce en un mayor **Q**.

Hablemos ahora del **factor Q** aplicado a los **circuitos de resonancia de tipo paralelo**. El **Q** de un **circuito resonante** es igual a la relación entre su **frecuencia central** y su ancho de banda a -3 dB y proporciona una medida de su "Selectividad" (ver Figura 3).

La frecuencia de resonancia (F0) se produce cuando la reactancia de la capacidad del condensador es igual a la reactancia inductiva de la bobina y ésta tiene una frecuencia igual a:

$$F0 = 1 : (6{,}28 \times \sqrt{L \times C})$$

El hecho de que incluso en este caso los componentes no sean los "ideales", por lo tanto con un **Q no infinito,** significa que la frecuencia de resonancia del circuito no se comporta exactamente igual que un circuito "abierto", como tendría que ser al menos teóricamente, sino que presenta una resistencia parásita **RP** puesta prácticamente en paralelo a los componentes (ver fig. 5).

El valor de esta resistencia depende del **Q de la bobina** y tiene un efecto negativo en el circuito debido a que **disminuye la selectividad**, mientras que el **Q del condensador** en muchos casos sigue siendo elevado.

Ya que es útil saber de antemano el **ancho de banda** que podemos esperar de un circuito resonante paralelo en función del **Q** de la bobina utilizada, damos algunos ejemplos que aclaran cómo localizarlo.
El valor de esta resistencia parásita es igual a:

$$RP = Q \times L$$

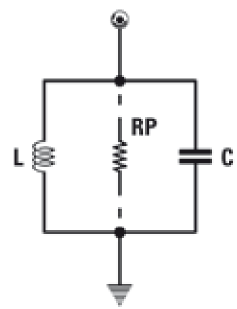


Fig. 5 El valor de resistencia del parásito RP depende de Q.

Ejemplo:

RP = Q x XL = 55 x 628 = 34.540 ohm

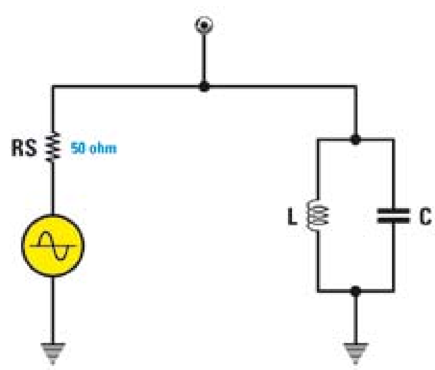
L = 10 µH Neosid
Q = 55 *(ver tabla en página anterior)*
C = 25,3 pF

*En este ejemplo tenemos un circuito de resonancia en la frecuencia de **10 MHz** determinada mediante la aplicación de la siguiente fórmula:*

F0 MHz = 159,24 : √pF x µH

luego:

159,24 : √25,3 x 10 = 10 MHz



Ejemplo:

L = 0,1 µH

C = 47 pF

F0 = 73,4 MHz

XL = XC = 46 ohm

*Para encontrar el **Q** de este circuito y por lo tanto la selectividad se debe proceder de la siguiente manera:*

Q = RS : XC = 50 : 46 = 1,08 BW = F0 : Q = 73,4 MHz : 1,08 = 67,9 MHz

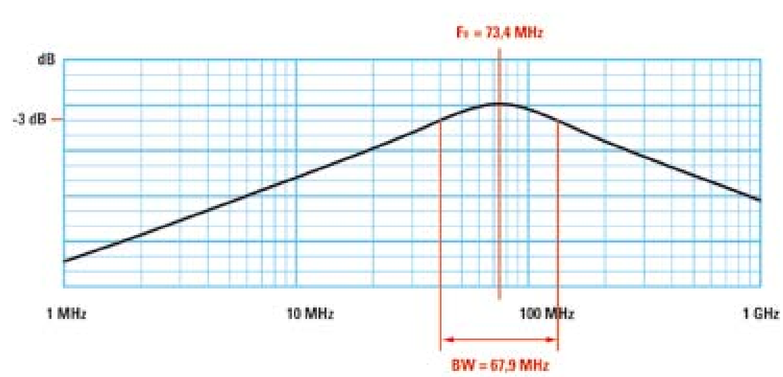


Fig. 6 Como se puede deducir de la gráfica, la resistencia de salida del generador RS afecta al Q del circuito resonante.

Por ejemplo, si tenemos en cuenta una ***inductancia Neosid de 10 microhenrios*** *(ver figura 5), consultando los* data sheet *vemos que tiene un* ***Q de 55*** *y, por tanto, si se hace funcionar a* ***10 MHz*** *tendrá un* ***RP*** *igual a:*

RP = 55 x 628 = 34.540 ohm

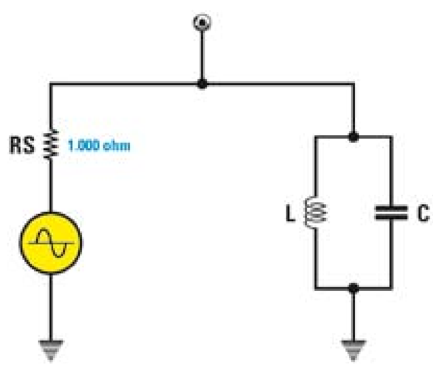
*Esta resistencia "****virtual****" afectará al* ***Q*** *del circuito de resonancia y ampliará su ancho de banda.*

Obviamente, un circuito resonante paralelo nunca funcionará solo, sino que siempre estará conectado a "algo" que lo supeditará a otras "cargas", como la resistencia de entrada de un amplificador de potencia o la resistencia de salida de un generador.

Estas resistencias ***reducirán*** *aún más el* ***Q*** *del circuito de resonancia.*

En este sentido, hay un ejemplo en la figura 6.

Por lo tanto, es un circuito poco selectivo, pero si aumentamos la ***RS*** *del generador a* ***1000 ohmios*** *veremos cómo cambia el* ***Q*** *a la misma frecuencia central observando el ejemplo de la Figura 7.*



Ejemplo:

L = 0,1 µH
C = 47 pF
Q = RS : XC = 1.000 : 46 = 21,7
BW = 73, 4 MHz : 21,7 = 3,38 MHz

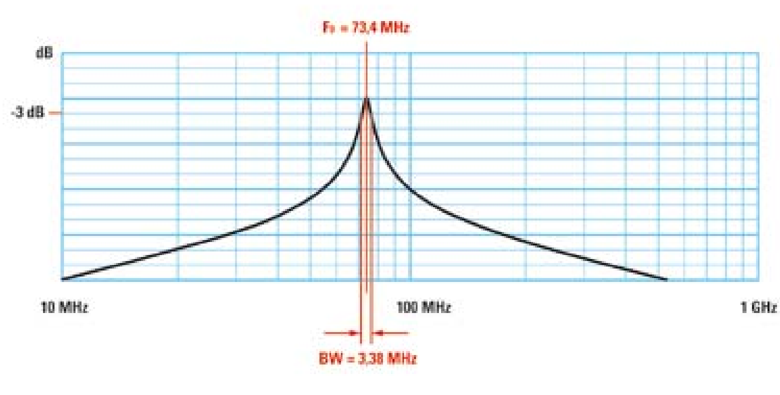
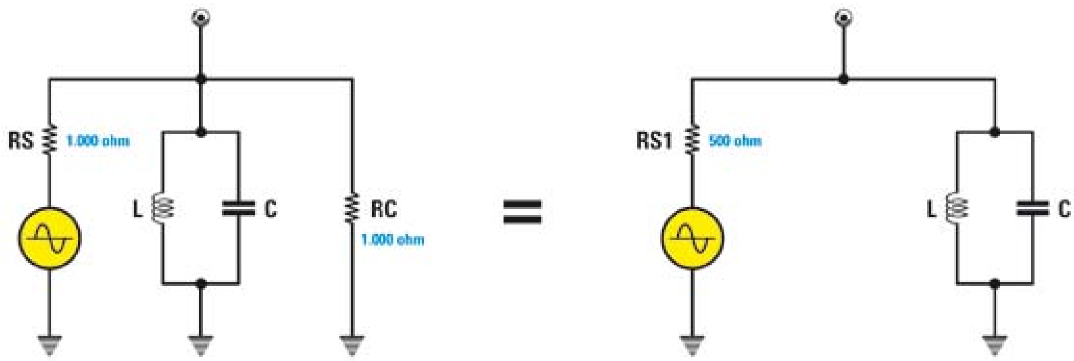


Fig.7 En comparación con Fig.6 donde la RS era de 50 ohmios, al aumentar el valor a 1000 ohm se observa una mayor selectividad.

Como se puede ver, aumentando la RS el Q también aumenta considerablemente, lo que hace el circuito más selectivo utilizando los mismos componentes L/C.

Si se aplica al circuito una resistencia "de carga", algo que en la práctica ocurre siempre, **Q** se reduce ya que la resistencia total a la que se enfrenta la da el "paralelo" de los dos valores, como lo demuestra el ejemplo de la fig.8.



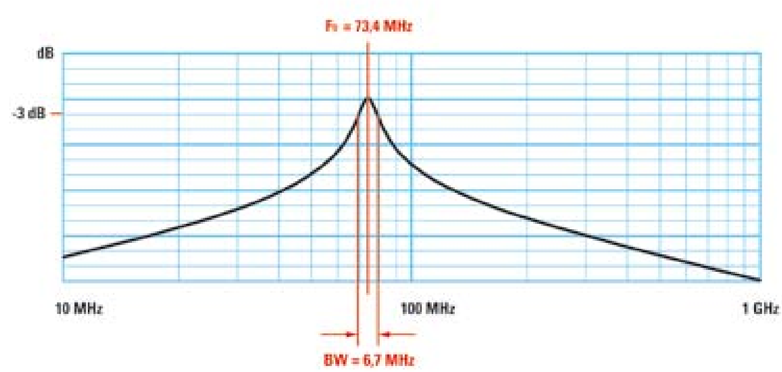
Ejemplo:

RS1 = (RS x RC) : (RS + RC) = (1.000 x 1.000) : 2.000 = 500 ohm

Fig.8 La combinación de la dos resistencias RS y RC se puede considerar un único valor dado por el paralelo entre ambas.

En estas condiciones **Q** se reducirá como lo demuestra el ejemplo de la fig. 9.

Podemos entonces decir que la selectividad y por lo tanto el **Q** del circuito resonante (en este caso se denomina "**loaded Q**", es decir, Q cargado, ya que considera también la resistencia de la carga a la que está sujeto el circuito), dependerá del valor de la resistencia de carga a la que esté conectado el circuito.



Ejemplo:

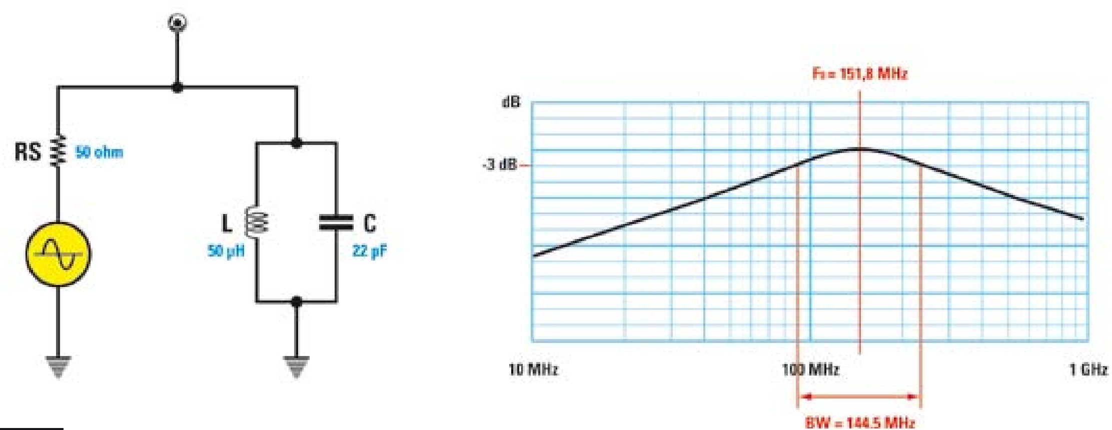
Q = RS : XC = 500 : 46 = 10,8

BW = F0 : Q = 73,4 MHz : 10,8 = 6,7 MHz

Fig. 9 En este ejemplo podemos ver que la presencia de la resistencia de carga RC afecta a la selectividad.

A una frecuencia constante y de resistencia de la carga aplicada, también la relación **L/C** de un circuito resonante determina la selectividad como se demuestra en la fig.10.

Si, de lo contrario, se obtiene un ancho de banda determinado con una resistencia equivalente de carga conocida; podemos proceder como en el ejemplo que proponemos a continuación.

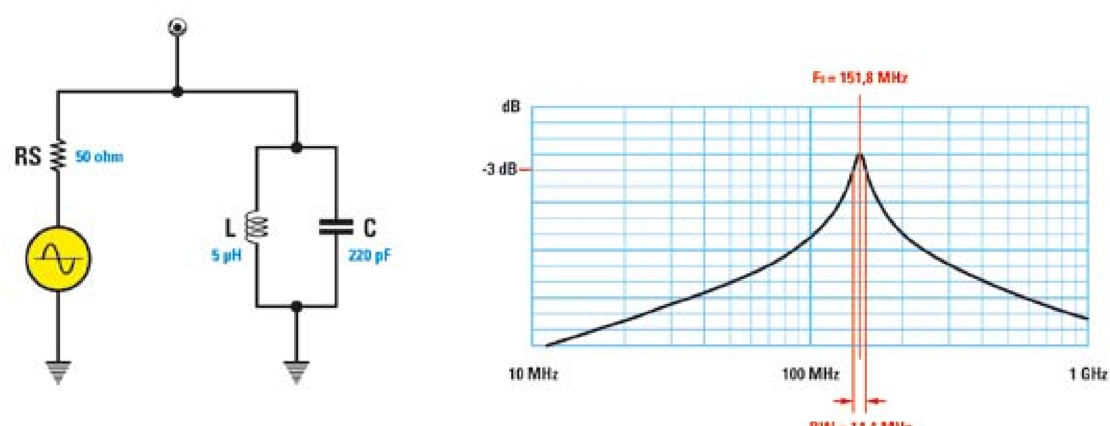


Ejemplo:

F0 = 151,8 MHz

Gran inductancia - pequeña capacidad = bajo Q

Q = RS : XC = 50 : 47,6 = 1,05 ***BW = F0 : Q = 151,8 MHz : 1,05 = 144,5 MHz***



Ejemplo:

F0 = 151,8 MHz

Pequeña inductancia - gran capacidad = alto Q

Q = RS : XC = 50 : 4,76 = 10,51 ***BW = F0 : Q = 151,8 MHz : 10,51 = 14,4 MHz***

Fig. 10 Como se puede deducir de estos dos ejemplos, la relación de L/C determina una selectividad diferente de los circuitos.

Ejemplo: queremos calcular un circuito resonante con una frecuencia de **100 MHz** con un ancho de banda de **15 MHz** conectado a un circuito que tiene una resistencia de salida **RS de 500 ohm** y una resistencia de carga **RC de 1.000 ohmios** (ver fig.11).

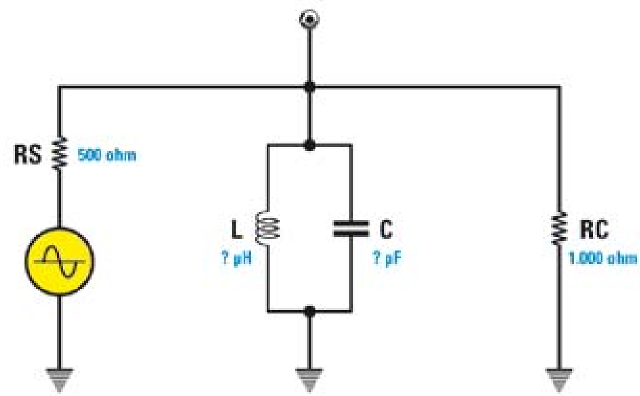


Fig.11 En este ejemplo se muestra cómo calcular los componentes L/C para obtener un circuito resonante con un cierto ancho de banda en función de los valores de RS y RC.

Ejemplo:

F0 = 100 MHz
BW = 15 MHz

*El **Q** del circuito debe ser igual a:*

Q = F0: BW

100 MHz: 15 MHz = 6,66

*La resistencia total equivalente **RP** es igual al paralelo de la **RS** con la **RC**:*

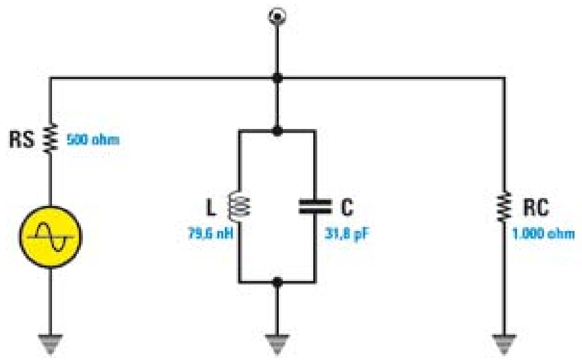
RP = (SR x RC): (RS + CR)

500 x 1000: (500 + 1.000) = 333 ohmios

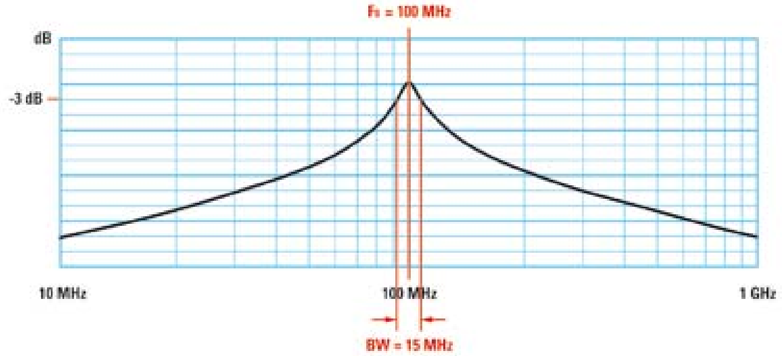
La reactancia a F0 de los dos componentes L/C es igual a:

XL (o XC) = RP: Q

333 ohms: 6.66 = 50 ohms



Seguimos el ejemplo de la figura 11 que muestra cómo, una vez conocidos los valores de XL y XC, es fácil calcular los valores de L y C en función de la frecuencia de trabajo utilizando la siguiente fórmula.



Los valores de los componentes serán:

L = XL : (6,28 x F) = 50 : (6,28 x 100 MHz) = 79,6 nH

C = 1 : (6,28 x F x XC) = 1 : (6,28 x 100 MHz x 50) = 31,8 pF

*En este caso el **Q** de la inductancia determina fundamentalmente la pérdida de inserción del filtro.*