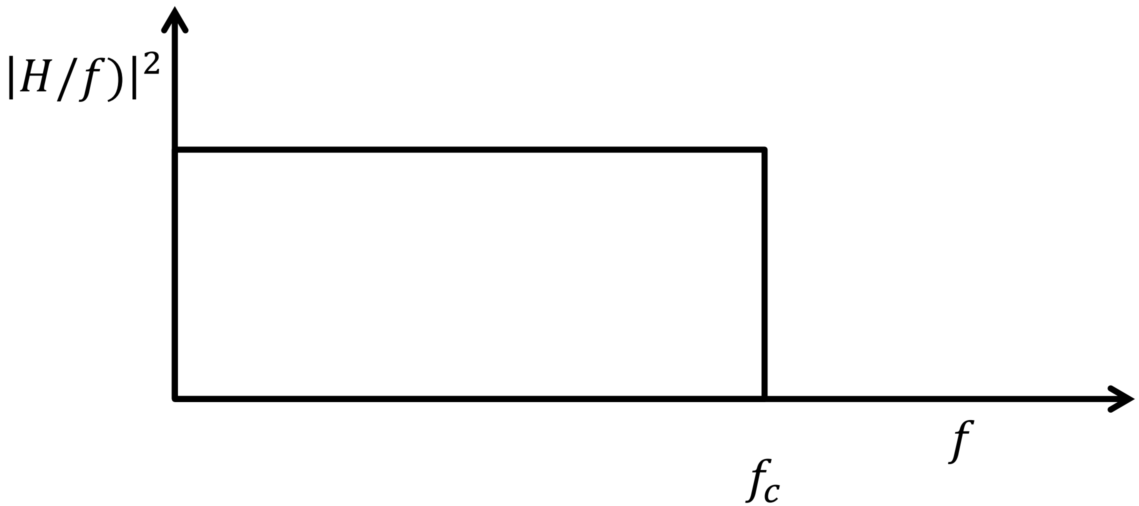
Diseño de Filtros en Microondas

En el diseño de filtros en microondas, se plantea el procedimiento conocido cono exacto, o polinomial.

En este planteo se busca diseñar una transferencia realizable en la forma del uso de componentes eléctricos tales como capacitores, inductancias y resistencias, en su versión de parámetros concentrados, y de estos elementos unidos a líneas de transmisión, como elementos de conducta distribuida, cuando la frecuencia es elevada, como en el caso de las microondas.

La transferencia idealizada de un filtro tiene la forma de una función rectangular, si se lo caracteriza en el dominio de la frecuencia f.

Diseño de Filtros en Microondas



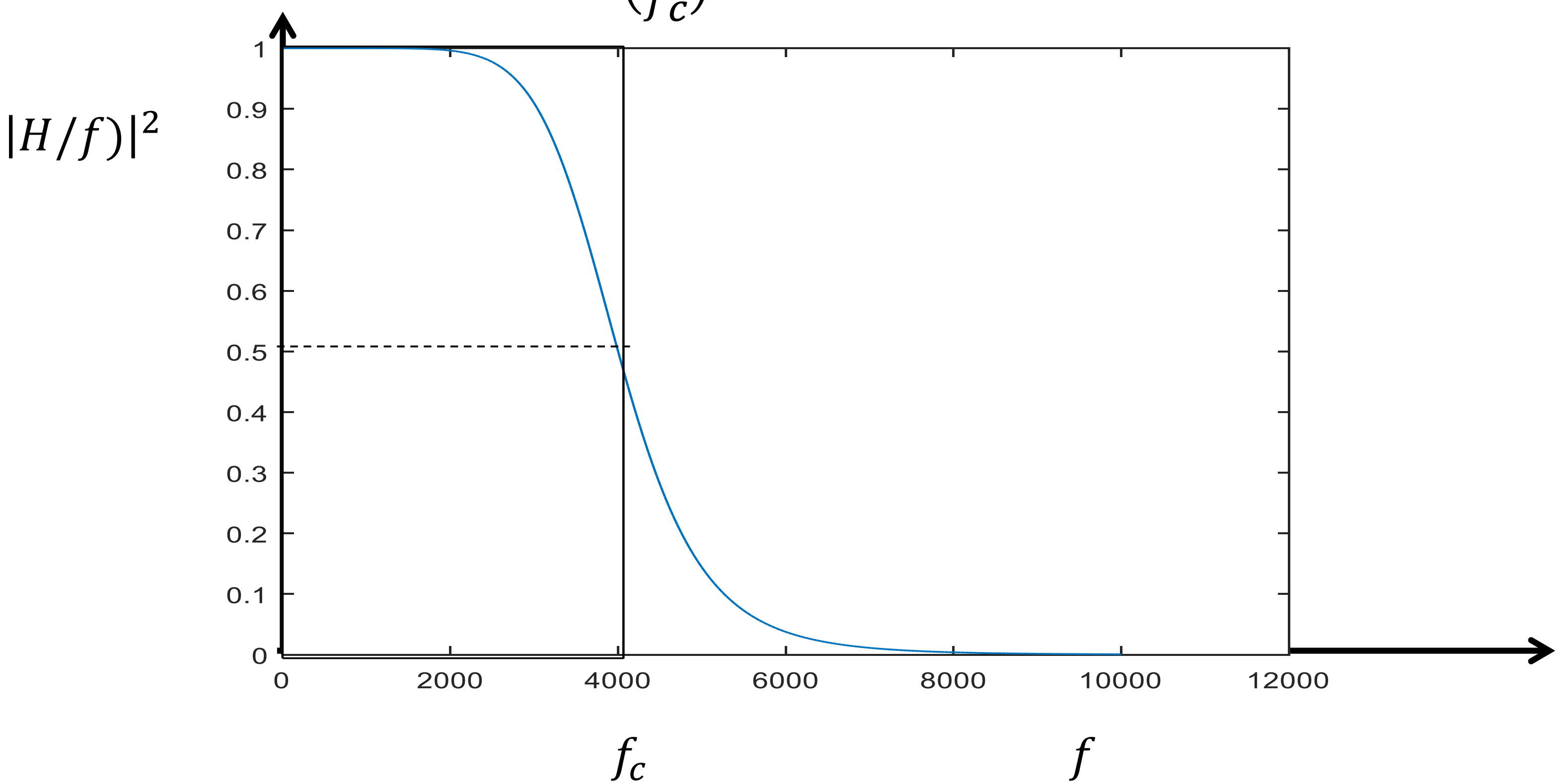
Esta transferencia no es realizable en su forma ideal, por lo que se recurre a aproximaciones, de las cuales las mas conocidas son los diseños de

- Butterworth
- Chebyshev

Diseño de Filtros en Microondas

En el diseño de Butterworth, uno de los dos enfoques solo polos, la transferencia adopta la forma:

$$|H(f)|^2 = \frac{1}{1+\left(\frac{f}{f_c}\right)^{2n}} \;, \quad n = 1,2,3, \ldots$$



Diseño de Filtros en Microondas

En el diseño de Chebyshev, el otro enfoque solo polos, la transferencia adopta la forma:

$$|H(f)|^2 = \frac{1}{1+\varepsilon^2 T_n\left(\frac{f}{f_c}\right)}\ , \quad n = 1,2,3,\ldots;\ 0 \leq \varepsilon \leq 1$$

Donde $T_n(x)$ es un polinomio de Chebyshev que para filtros de esta clase de tipo 1, adopta la forma recursiva:

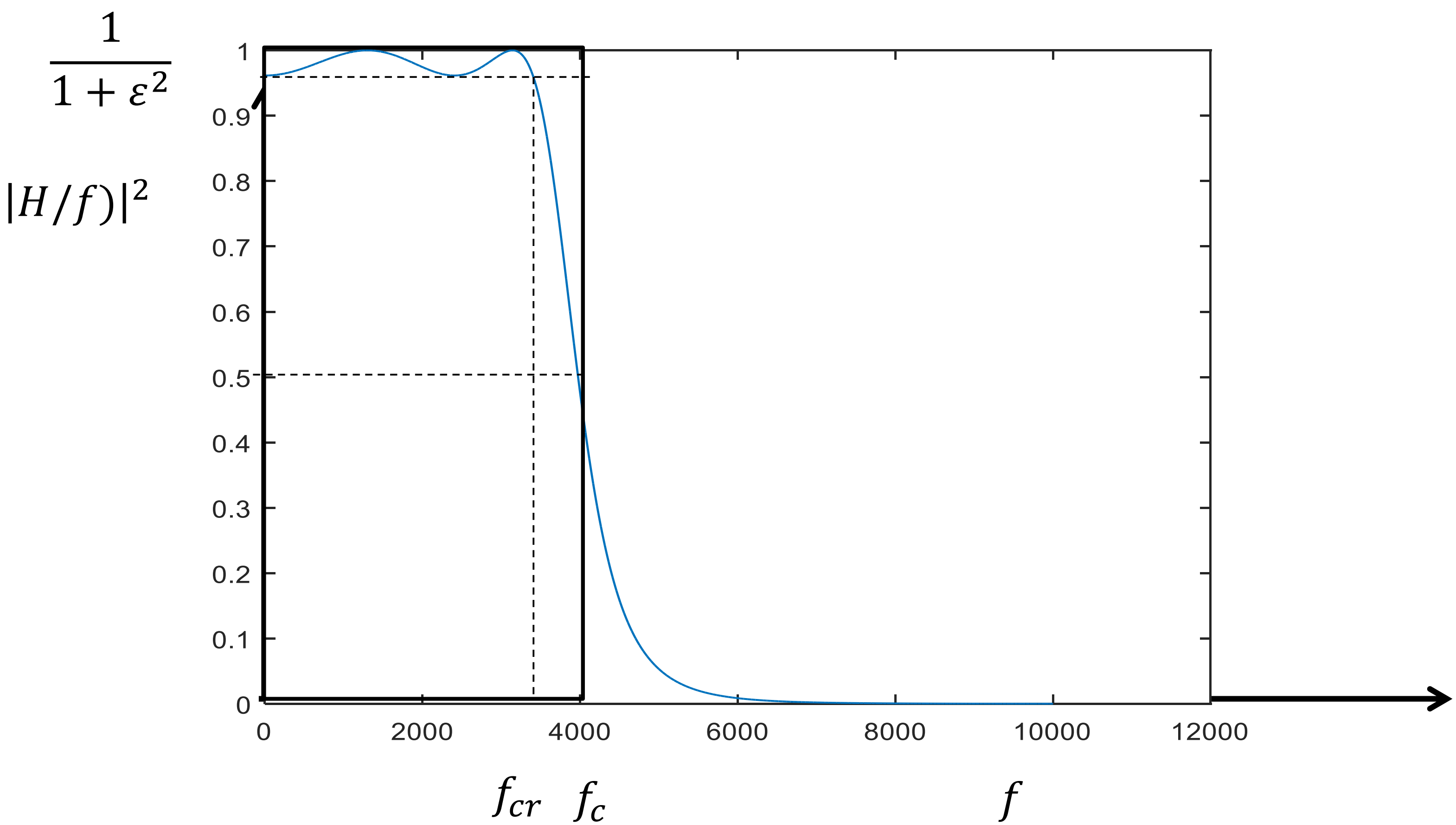
$$T_{n+1}(x) = 2xT_n(x) - T_{n-1}(x)$$

Iniciando con $T_0(x) = 1$, y $T_1(x) = x$

En estos filtros la frecuencia de corte no depende de n y el módulo de su respuesta en frecuencia oscila entre 1 y $\frac{1}{1+\varepsilon^2}$.

Diseño de Filtros en Microondas

La transferencia del filtro Chebyshev adopta la forma:



Diseño de Filtros en Microondas

En el diseño de Chebyshev f_c es la frecuencia de corte del filtro y f_{cr} la del corte del ripple ε.

En general puede decirse que

$$P_I = -10\log_{10}|H(f)|^2 = -20\log_{10}|H(f)|$$

La potencia de inserción P_I es:

$$P_I = \frac{P_{disp}}{P_L}$$

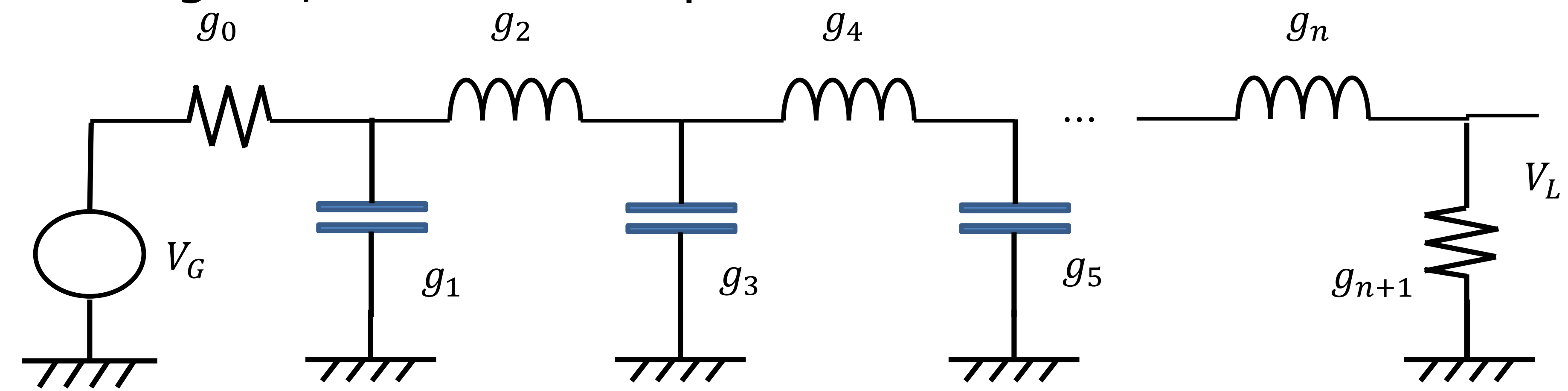
Siendo

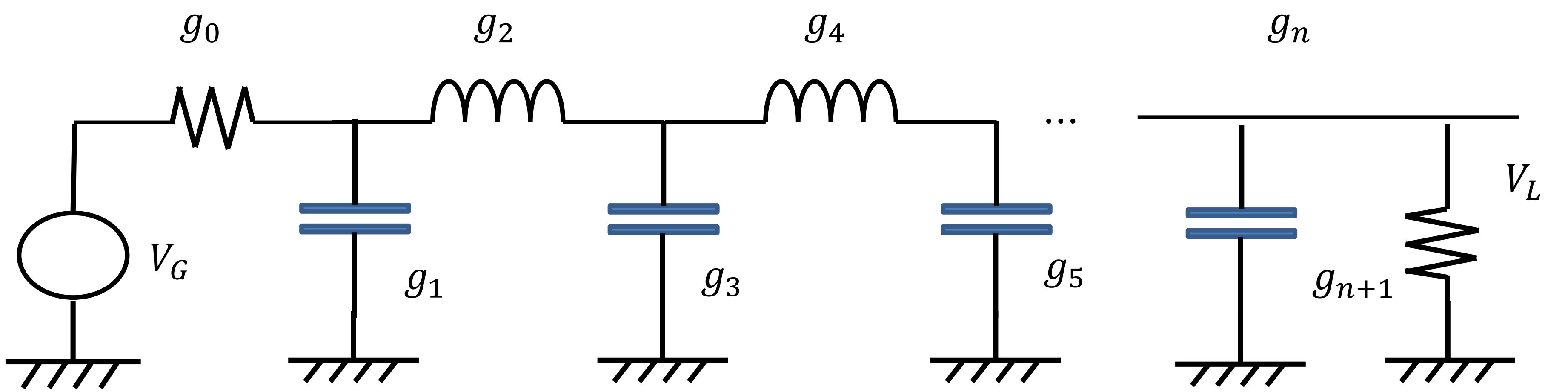
P_{disp} la potencia disponible del generador y

P_L la potencia desarrollada sobre la carga

Diseño de Filtros en Microondas

Las aproximaciones de Butterwhorth y Chebyshev se pueden implementar con circuitos LC como el mostrado en la figura, con sus dos posibles terminanciones:





Diseño de Filtros en Microondas

$$P_I = \frac{P_{disp}}{P_L}$$

$$P_L = \frac{{V_L}^2}{g_{n+1}}$$

$$P_{disp} = \frac{{V_G}^2}{4g_0}$$

La potencia de inserción P_I es, en dB y a frecuencia cero:

$$P_{I,dB} = 10\log_{10}\frac{(g_0 + g_{n+1})^2}{4g_0 g_{n+1}}$$

La pérdida de inserción es $0\,dB$ si $g_0 = g_{n+1}$, cosa que sucede en los filtros Butterworth, y Chebyshev de orden impar, en cuyos casos se habla de filtros simétricos.

Diseño de Filtros en Microondas

En el caso de los filtros Chebyshev de orden par, donde no necesariamente se cumple que $g_0 = g_{n+1}$, la respuesta de transferencia es similar a la mostrada anteriormente para estos filtros, en este caso se habla de filtros antimétricos.

El diseño se realiza utilizando tablas de coeficientes para los mismos, que se encuentran tabuladas para la estructura normalizada, donde:

$$f_c(-3dB) = \frac{1}{2\pi}$$

Las tablas dependen del número de etapas u orden n.

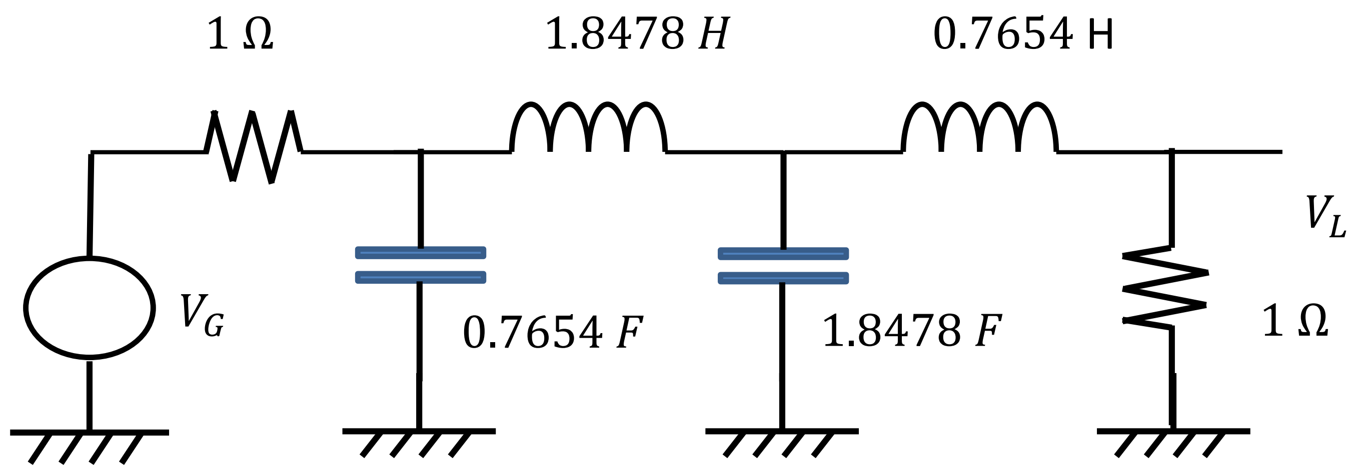
Por ejemplo:

Diseño de Filtros en Microondas

Con $n = 4$, $g_0 = g_{n+1} = 1\,\Omega$, para un filtro Butterworth, se tiene:

g_0	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5
1	0.7654	1.8578	1.8478	0.7654	1

Implementado con un circuito como el siguiente:



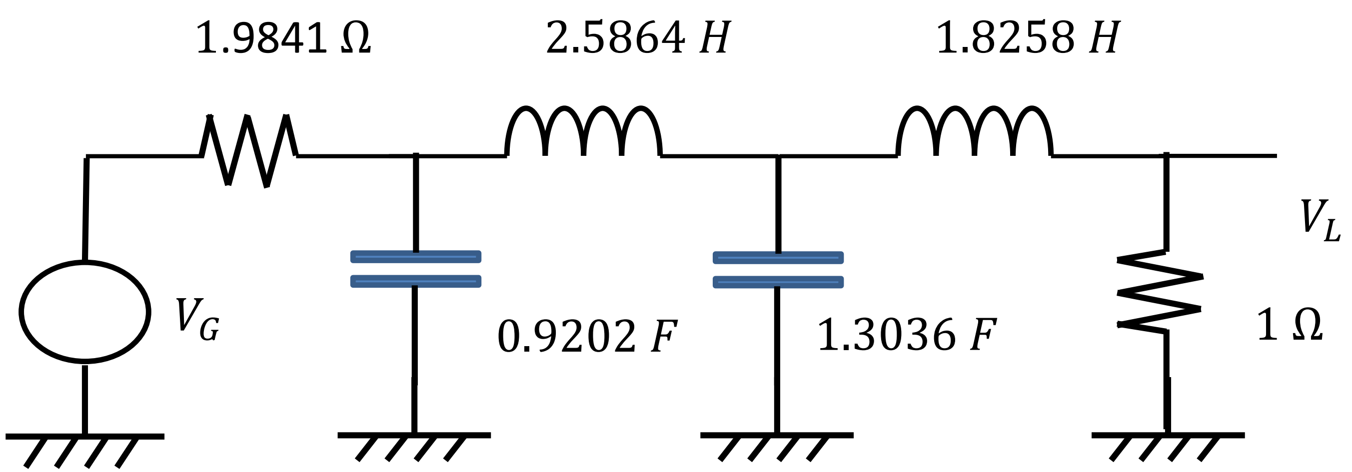
Las inductancias se dan en Henries H, los capacitores en Faradios F.

Diseño de Filtros en Microondas

Con $n = 4$, $g_0 = g_{n+1} = 1\,\Omega$, para un filtro Chebyshev con ripple $R = 10\log_{10}(1+\varepsilon^2) = 0.5\,dB$, se tiene:

g_0	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5
1.9841	0.9202	2.5864	1.3036	1.8258	1

Implementado con un circuito como el siguiente:

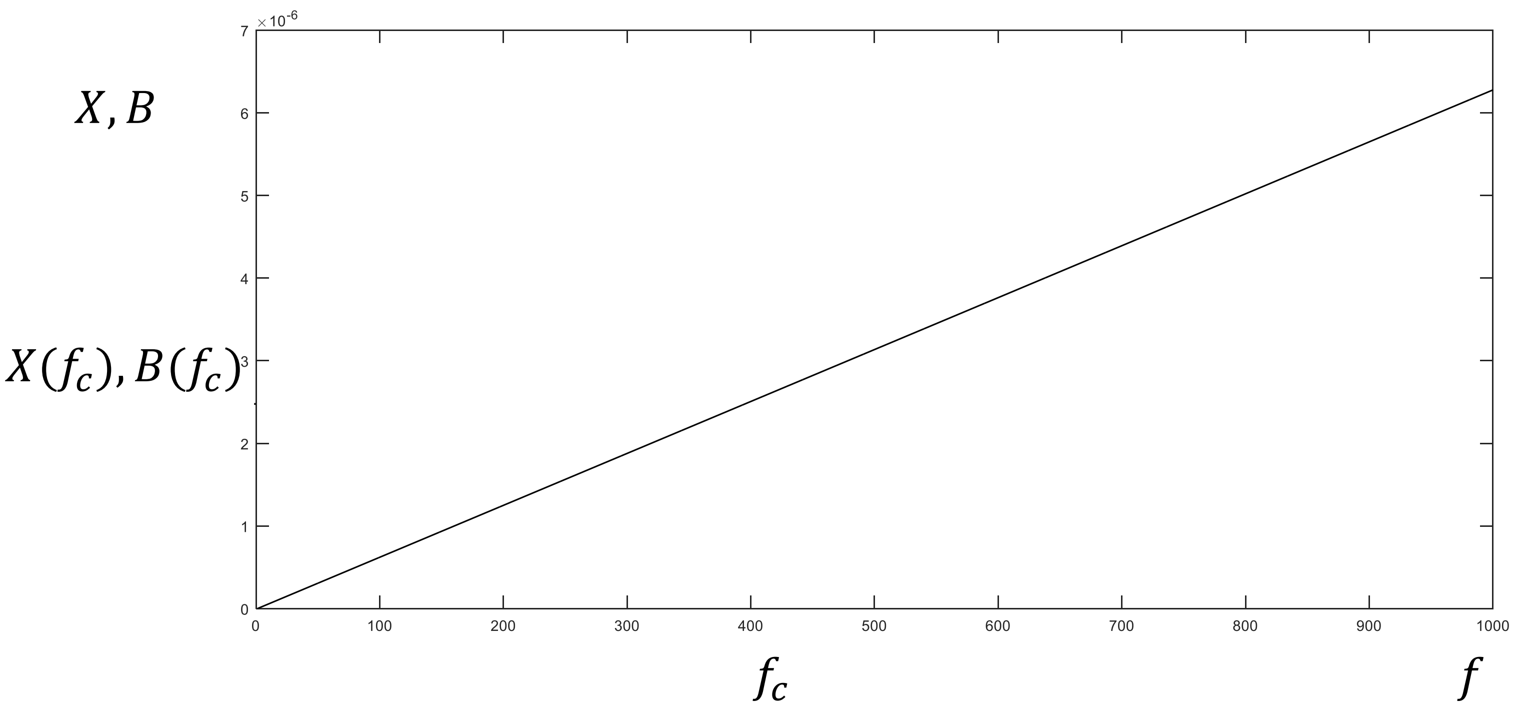


Las inductancias se dan en Henries H, los capacitores en Faradios F.

Diseño de Filtros en Microondas

Se observa entonces que los filtros presentados tienen una implementación circuital que se basa en un escalonado de reactancias inductivas conectadas en serie de la forma $X = 2\pi f L$, junto con susceptancias capacitivas conectadas en paralelo de la forma $\mathrm{B} = 2\pi f C$.

Ambas funciones son lineales con la frecuencia.



Diseño de Filtros en Microondas

La recta que caracteriza tanto a X como a B adopta un valor particular para la frecuencia de corte f_c.

Si se desea una frecuencia de corte distinta de la normalizada en la tabla de 1 rad/sec, se puede cambiar de escala de frecuencias:

$$f = Kf'$$

$$f_c = K{f_c}'$$

$$X = 2\pi f L = 2\pi(Kf')L = 2\pi f' (KL)$$

$$\mathrm{B} = 2\pi f C = 2\pi(Kf')C = 2\pi f' (KC)$$

Por lo que para realizar el cambio de frecuencia se ve que es suficiente con afectar los valores normalizados de inductancia y capacidad por el factor $K = \frac{f_c}{{f_c}'}$ donde f_c

es el valor tabulado, y ${f_c}'$ el valor deseado.

Diseño de Filtros en Microondas

Los valores de reactancias y susceptancias definen la forma del filtro. Si se desea referir a un cierto nivel de resistencia diferente del tabulado, tanto para el generador como para la carga, se multiplican las resistencias e inductancias, y dividen los capacitores, por el factor de relación entre la resistencia deseada sobre la resistencia del valor tabulado.

Este es un procedimiento de desnormalización.

Sobre la base de los datos de tabla, que corresponden a una resistencia de y una frecuencia de corte de -3 dB, se puede3n conocer los valores del circuito desnormalizados según las expresiones:

Diseño de Filtros en Microondas

$$R_G = g_0 R_L$$

$$C_i = \frac{g_i}{2\pi f_c R_L} \qquad i = 1,3,\ldots$$

$$L_j = \frac{g_j R_L}{2\pi f_c} \qquad \text{j} = 2,4,\ldots$$

Donde R_L y f_c son la resistencia de carga y la frecuencia de corte de $-3\ dB$, respectivamente.

Diseño de Filtros en Microondas. Ejemplo 1

Diseñe un filtro pasabajos de tipo Butterworth con $n = 4$, una frecuencia de corte de $-3\,dB$ en $f_c = 100\,MHz$, con una resistencia de carga $R_L = 50\,\Omega$.

Con $R_L = 50\,\Omega$, y los coeficientes correspondientes:

g_0	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5
1	0.7654	1.8578	1.8478	0.7654	1

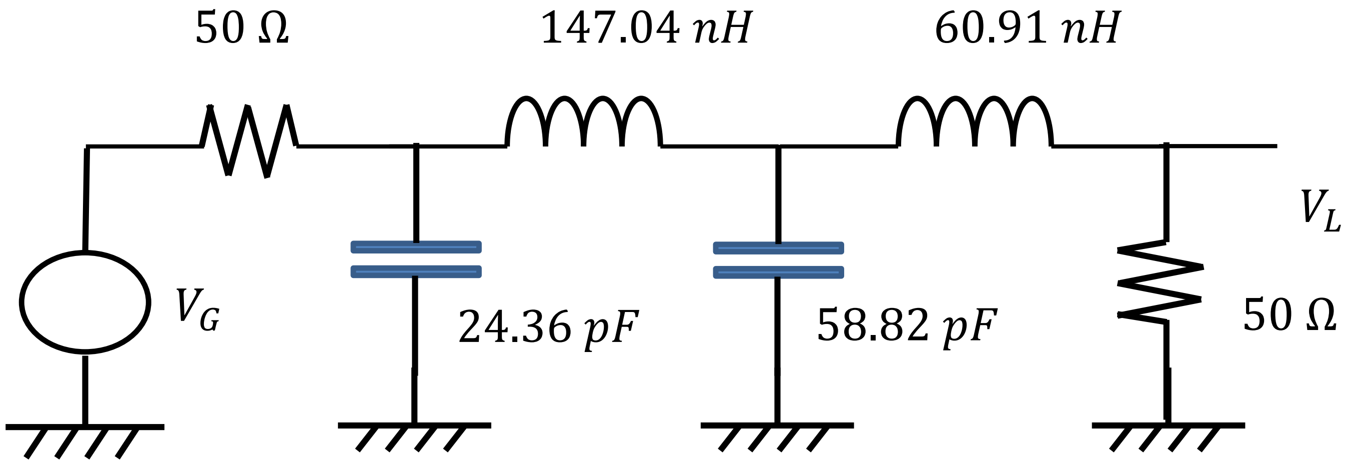
$$R_G = g_0 R_L = 50\,\Omega$$

$$C_1 = \frac{g_1}{2\pi f_c R_L} = 24.36\,pF \quad C_3 = \frac{g_3}{2\pi f_c R_L} = 58.82\,pF$$

$$L_2 = \frac{g_2 R_L}{2\pi f_c} = 147.04\,nH \quad L_4 = \frac{g_4 R_L}{2\pi f_c} = 60.91\,nH$$

Diseño de Filtros en Microondas

Implementado con un circuito como el siguiente:

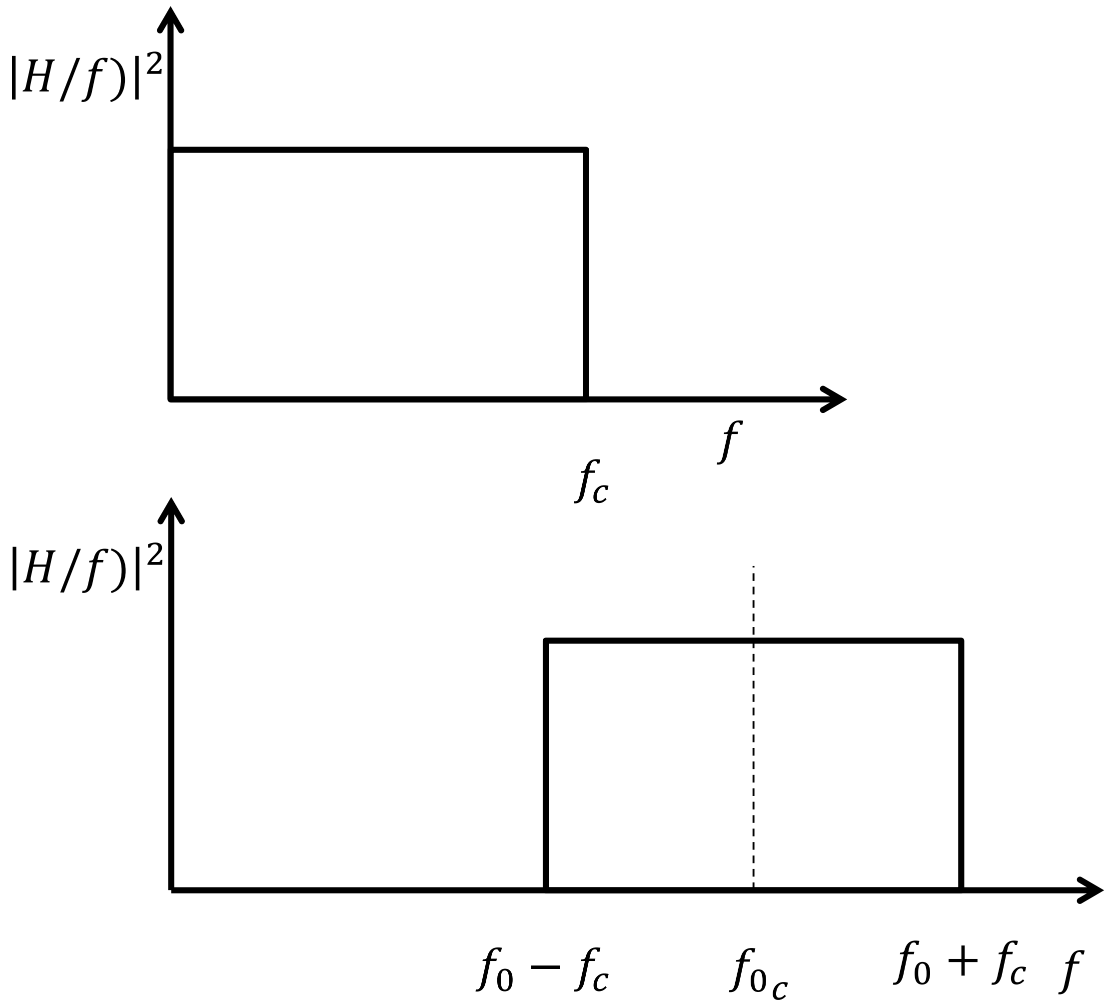


Filtros Pasabanda

Por lo analizado, se puede ver que se busca reemplazar con funciones de reactancia lineales, o aproximadamente lineales, que se anulen a frecuencia cero y que tengan la pendiente adecuada, pueden reemplazar las ramas serie de un filtro pasabajos.

Si ahora recurrimos a funciones de reactancia o susceptancia con las mismas pendientes que un filtro dado, que se anulen a la frecuencia f_0, obtenemos un filtro pasabanda alrededor de esa frecuencia.

Filtros Pasabanda



Filtros Pasabanda

Reemplazando entonces los elementos serie y paralelo de la estructura del filtro por ramas serie paralelo que sean lineales, al menos en un entorno, anulándose a la frecuencia central, se da forma a un filtro pasabanda.

Una reactancia de la forma de una rama serie resonante;

$$X = 2\pi f L - \frac{1}{2\pi f C}$$

Con una frecuencia de resonancia

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Puede ser linealizada en el entorno de dicha frecuencia:

Su pendiente en función de la frecuencia f es:

Filtros Pasabanda

$$\frac{1}{2\pi}\frac{\partial X}{\partial f}\bigg|_{f_0} = 2L$$

Por otro lado una susceptancia que se ajusta a lo requerido es:

$$\mathrm{B} = 2\pi f C - \frac{1}{2\pi f L}$$

Con una frecuencia de resonancia

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Entonces:

$$\frac{1}{2\pi}\frac{\partial B}{\partial f}\bigg|_{f_0} = 2C$$

Filtros Pasabanda

Para el diseño de un filtro pasabanda de frecuencia central f_0 y ancho de banda B_w se procede primero a diseñar un filtro pasabajos de frecuencia de corte $f_c = B_w$.

Luego, en la topología del filtro, se reemplaza a las inductancias por circuitos resonantes serie de frecuencia de resonancia f_0, y a los capacitores por circuitos resonantes paralelo a la frecuencia f_0.

Diseño de Filtros Pasabanda. Ejemplo 2

Diseñe un filtro pasabanda de tipo Butterworth con $n = 4$, una frecuencia central $f_0 = 1\,GHz$, y una frecuencia de corte de $-3\,dB$ en $f_c = 100\,MHz$, con una resistencia de carga $R_L = 50\,\Omega$.

Para el pasabajos correspondiente:

g_0	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5
1	0.7654	1.8578	1.8478	0.7654	1

$$R_G = g_0 R_L = 50\,\Omega$$

$$C_1 = \frac{g_1}{2\pi f_c R_L} = 24.36\,pF \quad C_3 = \frac{g_3}{2\pi f_c R_L} = 58.82\,pF$$

$$L_2 = \frac{g_2 R_L}{2\pi f_c} = 147.04\,nH \quad L_4 = \frac{g_4 R_L}{2\pi f_c} = 60.91\,nH$$

Diseño de Filtros Pasabanda. Ejemplo 2

Los componentes resonantes serie y paralelo respectivos se calculan como los que resuenan con cada componente del pasabajos a la frecuencia central f_0:

$$L_1 = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 C_1} = 1.0398\, nH \quad L_3 = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 C_3} = 0.4306\, nH$$

$$C_2 = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 L_2} = 1.7227\, pF \quad C_4 = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 L_4} = 0.\,4159\, pF$$

Diseño de Filtros en Microondas

Implementado con un circuito como el siguiente: