

Capítulo 4:

# Filtros passivos para RF

Prof. Alan Petrônio Pinheiro

Universidade Federal de Uberlândia

Faculdade de Engenharia Elétrica

alanpetronio@ufu.br



# Introdução

Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo 4:  
Filtros passivos RF

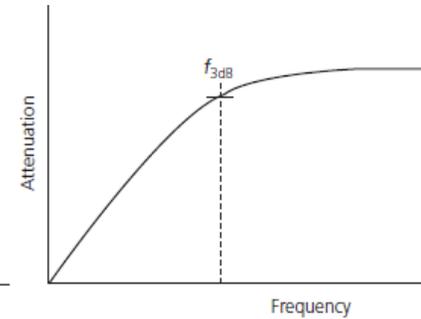
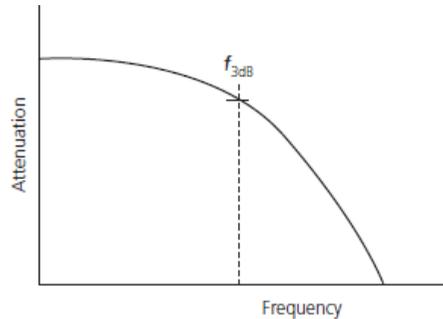
• Filtros

- Passivos
- Projeto Butterworth
- Projeto Chebyshev
- Projeto Bessel
- Transformação passa-alta
- Transformação passa-banda
- Transformação rejeita-banda

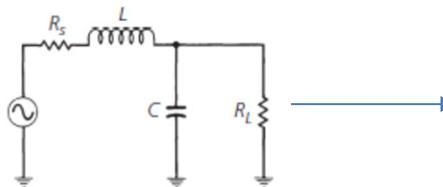
• Referências para estudo

• Ativos x passivos x Digitais

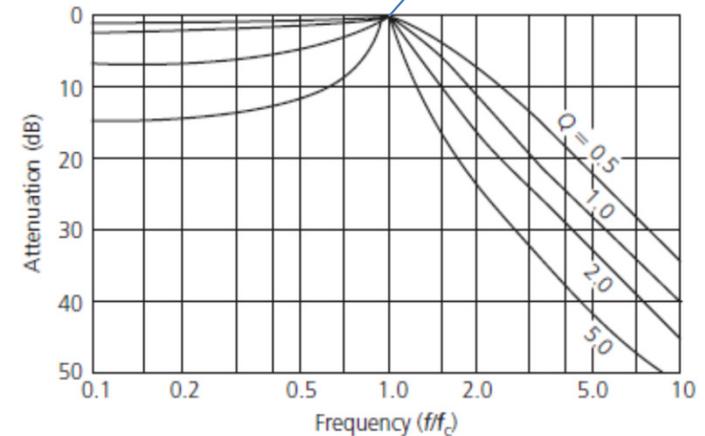
- Passa-baixas, passa-altas, passa-bandas, rejeita-banda
  - Associação de filtros em série



– Circuitos



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



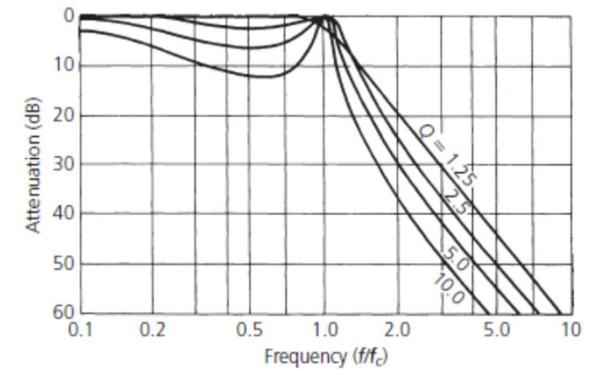
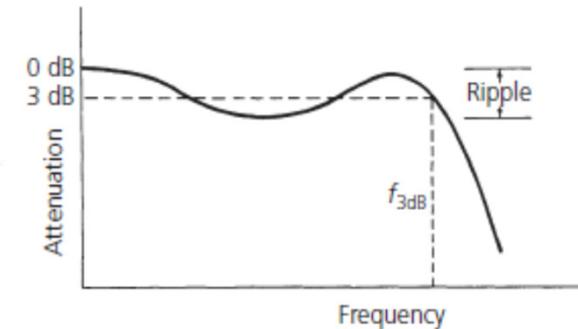
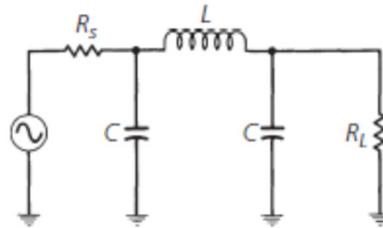


• Filtros

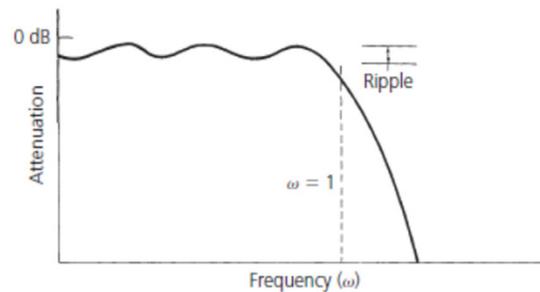
- Passivos
- Projeto Butterworth
- Projeto Chebyshev
- Projeto Bessel
- Transformação passa-alta
- Transformação passa-banda
- Transformação rejeita-banda

• Referências para estudo

- Número de picos =  $N - 1$ 
  - $N$  = número elementos reativos



- Projeto de filtros normalizados
  - Tipos: Butterworth; Chebyshev e Bessel



- Butterworth: sem ripple, Q médio
- Chebyshev: apresenta ripple e melhor atenuação
- Bessel: pior atenuação, mas linearidade em atraso de fase



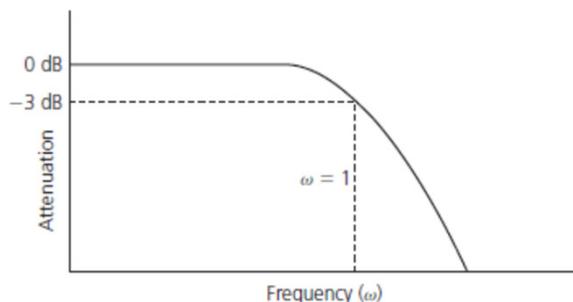
# Projeto filtro Butterworth

Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo 4:  
Filtros passivos RF

- Filtros
  - Passivos
  - Projeto Butterworth
  - Projeto Chebyshev
  - Projeto Bessel
  - Transformação passa-alta
  - Transformação passa-banda
  - Transformação rejeita-banda
- Referências para estudo

- Reposta filtro:

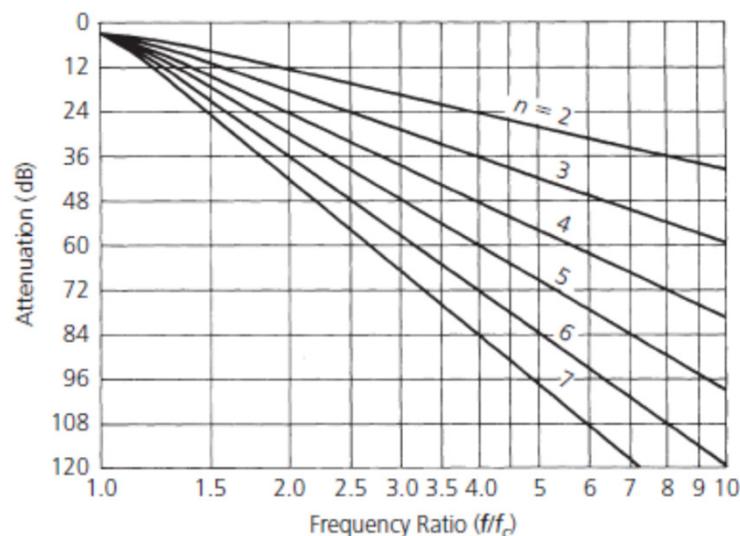


$$A_{dB} = 10 \log \left[ 1 + \left( \frac{\omega}{\omega_c} \right)^{2n} \right]$$

$\omega$  = the frequency at which the attenuation is desired,  
 $\omega_c$  = the cutoff frequency ( $\omega_{3dB}$ ) of the filter,  
 $n$  = the number of elements in the filter.

- **PASSO 1:** encontrar n filtro segundo tabela de características de atenuação

– Normalizar tudo!



relação  $\frac{f}{f_c}$

- $f_c$  = frequência de corte
- $f$  = frequência referência
- Obs.: **considera-se um  $R_L=1$  ohm**



Cir. Eletrônica Aplica.

- **PASSO 2:** usando a tabela valores Butterworth, encontrar C e L normalizados

Capítulo 4:  
Filtros passivos RF

- **Filtros**
  - Passivos
  - Projeto Butterworth
  - Projeto Chebyshev
  - Projeto Bessel
  - Transformação passa-alta
  - Transformação passa-banda
  - Transformação rejeita-banda
- **Referências para estudo**

$r$	$R_s/R_L$	$C_1$	$L_2$	$C_3$	$L_4$	$n$	$R_s/R_L$	$C_1$	$L_2$	$C_3$	$L_4$	$C_5$	$L_6$	$C_7$
2	1.111	1.035	1.835			5	0.900	0.442	1.027	1.910	1.756	1.389		
	1.250	0.849	2.121				0.800	0.470	0.866	2.061	1.544	1.738		
	1.429	0.697	2.439				0.700	0.517	0.731	2.285	1.333	2.108		
	1.667	0.566	2.828				0.600	0.586	0.609	2.600	1.126	2.552		
	2.000	0.448	3.346				0.500	0.686	0.496	3.051	0.924	3.133		
	2.500	0.342	4.095				0.400	0.838	0.388	3.736	0.727	3.965		
	3.333	0.245	5.313				0.300	1.094	0.285	4.884	0.537	5.307		
	5.000	0.156	7.707				0.200	1.608	0.186	7.185	0.352	7.935		
	10.000	0.074	14.814				0.100	3.512	0.091	14.095	0.173	15.710		
	$\infty$	1.414	0.707				$\infty$	1.545	1.694	1.382	0.894	0.309		
3	0.900	0.808	1.633	1.599		6	1.111	0.289	1.040	1.322	2.054	1.744	1.335	
	0.800	0.844	1.384	1.926			1.250	0.245	1.116	1.126	2.239	1.550	1.688	
	0.700	0.915	1.165	2.277			1.429	0.207	1.236	0.957	2.499	1.346	2.062	
	0.600	1.023	0.965	2.702			1.667	0.173	1.407	0.801	2.858	1.143	2.509	
	0.500	1.181	0.779	3.261			2.000	0.141	1.653	0.654	3.369	0.942	3.094	
	0.400	1.425	0.604	4.064			2.500	0.111	2.028	0.514	4.141	0.745	3.931	
4	0.300	1.838	0.440	5.363		7	3.333	0.082	2.656	0.379	5.433	0.552	5.280	
	0.200	2.669	0.284	7.910			5.000	0.054	3.917	0.248	8.020	0.363	7.922	
	0.100	5.167	0.138	15.455			10.000	0.026	7.705	0.122	15.786	0.179	15.738	
	$\infty$	1.500	1.333	0.500			$\infty$	1.553	1.759	1.553	1.202	0.758	0.259	
	1.111	0.466	1.592	1.744	1.469		0.900	0.299	0.711	1.404	1.489	2.125	1.727	1.296
	1.250	0.388	1.695	1.511	1.811		0.800	0.322	0.606	1.517	1.278	2.334	1.546	1.652
	1.429	0.325	1.862	1.291	2.175		0.700	0.357	0.515	1.688	1.091	2.618	1.350	2.028
	1.667	0.269	2.103	1.082	2.613		0.600	0.408	0.432	1.928	0.917	3.005	1.150	2.477
	2.000	0.218	2.452	0.883	3.187		0.500	0.480	0.354	2.273	0.751	3.553	0.951	3.064
	2.500	0.169	2.986	0.691	4.009		0.400	0.590	0.278	2.795	0.592	4.380	0.754	3.904
3.333	0.124	3.883	0.507	5.338	0.300	0.775	0.206	3.671	0.437	5.761	0.560	5.258		
5.000	0.080	5.684	0.331	7.940	0.200	1.145	0.135	5.427	0.287	8.526	0.369	7.908		
10.000	0.039	11.094	0.162	15.642	0.100	2.257	0.067	10.700	0.142	16.822	0.182	15.748		
$\infty$	1.531	1.577	1.082	0.383	$\infty$	1.558	1.799	1.659	1.397	1.055	0.656	0.223		
$n$	$R_L/R_s$	$L_1$	$C_2$	$L_3$	$C_4$	$n$	$R_L/R_s$	$L_1$	$C_2$	$L_3$	$C_4$	$L_5$	$C_6$	$L_7$

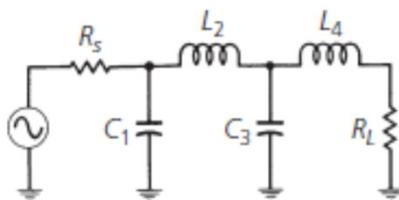


- Filtros
  - Passivos
  - Projeto Butterworth
  - Projeto Chebyshev
  - Projeto Bessel
  - Transformação passa-alta
  - Transformação passa-banda
  - Transformação rejeita-banda
- Referências para estudo

### • Passo 3: desenhar o circuito

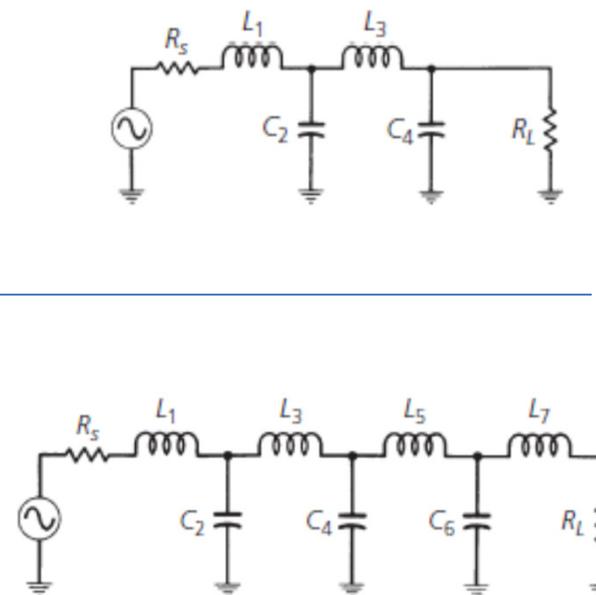
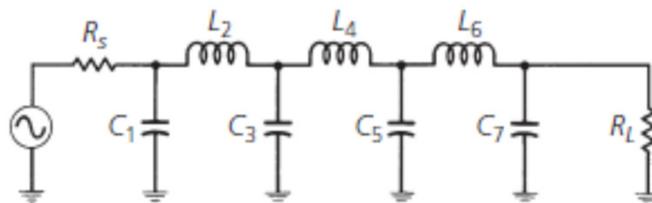
Circuito usando a relação  $R_s/R_L$

n=4



Circuito usando a relação  $R_L/R_s$

n=7





• Filtros

– Passivos

– Projeto Butterworth

– Projeto Chebyshev

– Projeto Bessel

– Transformação passa-alta

– Transformação passa-banda

– Transformação rejeita-banda

• Referências para estudo

• **Passo 4: escalonar impedância e frequência**

- As tabelas levam em conta  $w=1$  ( $f=0,159\text{Hz}$ ) e  $R_L=1\ \text{ohm}$
- Aplicar as fórmulas:

$$C = \frac{C_n}{2\pi f_c R_L}$$

$$L = \frac{R_L L_n}{2\pi f_c}$$

Onde:

- ✓  $C$ = valor final de capacitância;
- ✓  $L$ = valor final de indutância ;
- ✓  $C_n$ =valor encontrado na tabela de capacitância;
- ✓  $L_n$  valor encontrado na tabela de indutância;
- ✓  $R$ =resistor de carga;
- ✓  $f_c$ = frequência de corte



- **Filtros**
  - Passivos
  - Projeto Butterworth
  - Projeto Chebyshev
  - Projeto Bessel
  - Transformação passa-alta
  - Transformação passa-banda
  - Transformação rejeita-banda
- **Referências para estudo**

**Exemplo:** projete um filtro passa-baixas tal que:

- $f_c = 35\text{MHz}$
- atenuação seja de pelo menos 60dB após 105MHz
- $R_s = 50$  e  $R_L = 500$  ohms



# Projeto filtro Chebyshev

Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo 4:  
Filtros passivos RF

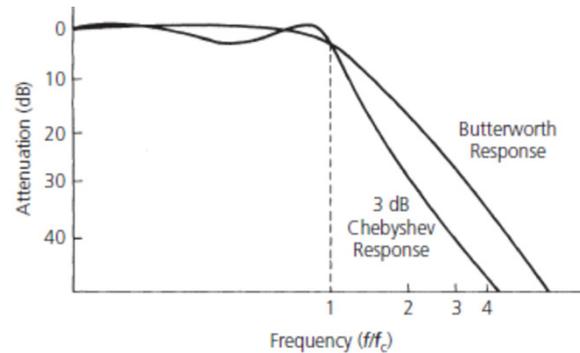
• Filtros

- Passivos
- Projeto Butterworth
- Projeto Chebyshev
- Projeto Bessel
- Transformação passa-alta
- Transformação passa-banda
- Transformação rejeita-banda

• Referências para estudo

• Resposta do filtro

- Alto Q (tem ripple)
- Transição atenua 10dB a mais que Butterworth



n	Chebyshev Polynomial
1	$\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)$
2	$2\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2 - 1$
3	$4\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^3 - 3\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)$
4	$8\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^4 - 8\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2 + 1$
5	$16\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^5 - 20\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^3 + 5\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)$
6	$32\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^6 - 48\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^4 + 18\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2 - 1$
7	$64\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^7 - 112\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^5 + 58\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^3 - 7\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)$

$$A_{dB} = 10 \log \left[ 1 + \varepsilon^2 C_n^2 \left( \frac{\omega}{\omega_c} \right)' \right]$$

$$\left( \frac{\omega}{\omega_c} \right)' = \left( \frac{\omega}{\omega_c} \right) \cosh B$$

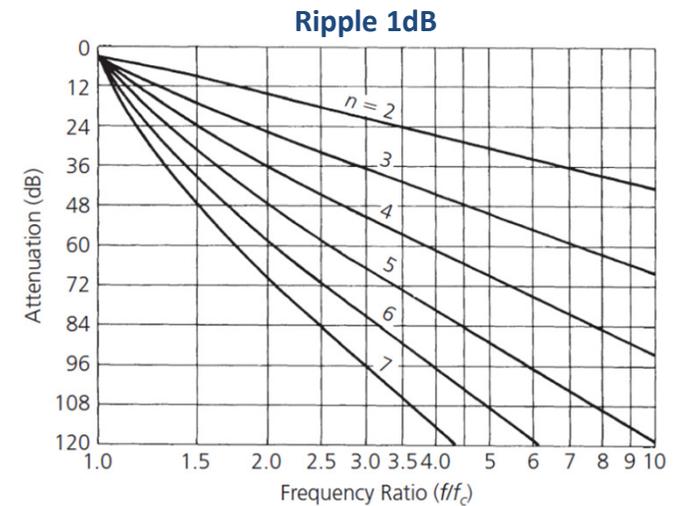
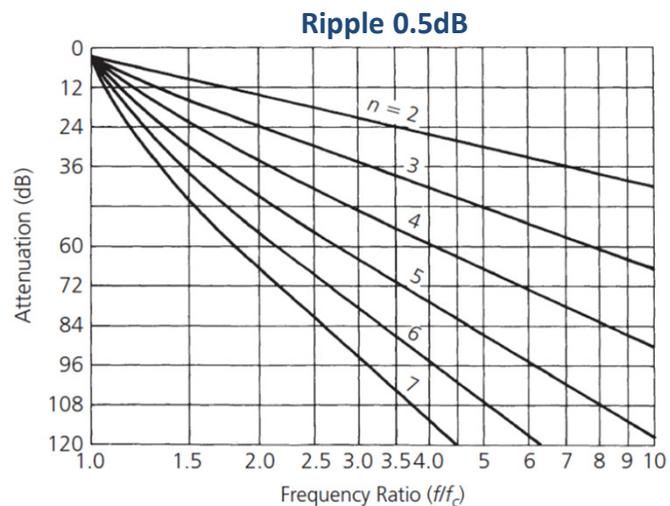
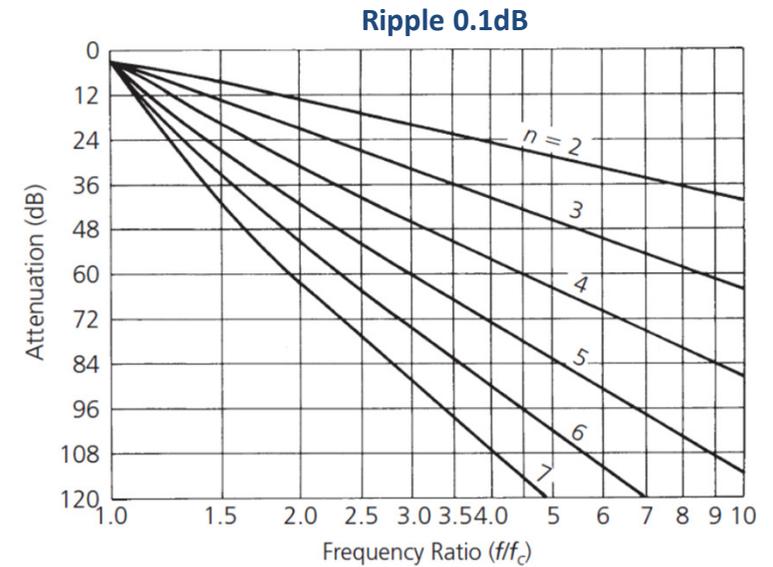
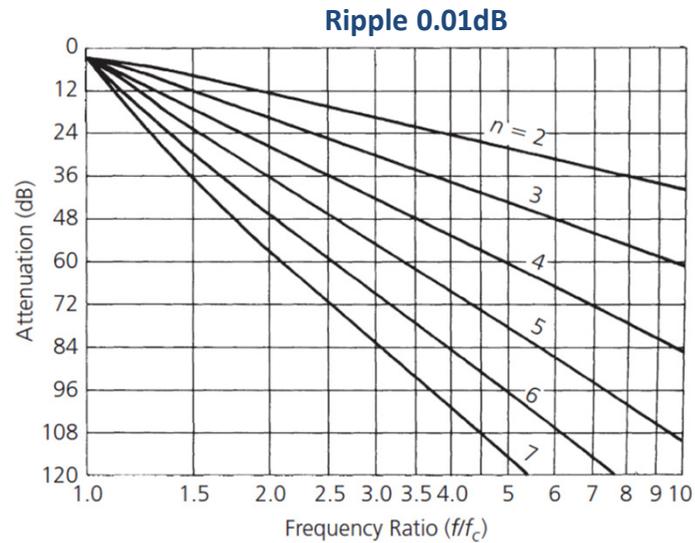
$$B = \frac{1}{n} \cosh^{-1} \left( \frac{1}{\varepsilon} \right)$$

$$\varepsilon = \sqrt{10^{R_{dB}/10} - 1}$$



- Filtros
  - Passivos
  - Projeto Butterworth
  - Projeto Chebyshev
  - Projeto Bessel
  - Transformação passa-alta
  - Transformação passa-banda
  - Transformação rejeita-banda
- Referências para estudo

## • Características de atenuação do Chebyshev:





- Filtros
  - Passivos
  - Projeto Butterworth
  - Projeto Chebyshev
  - Projeto Bessel
  - Transformação passa-alta
  - Transformação passa-banda
  - Transformação rejeita-banda
- Referências para estudo

## • Tabela valores Chebyshev 0.01dB ripple

$n$	$R_S/R_L$	$C_1$	$L_2$	$C_3$	$L_4$	
2	1.101	1.347	1.483			
	1.111	1.247	1.595			
	1.250	0.943	1.997			
	1.429	0.759	2.344			
	1.667	0.609	2.750			
	2.000	0.479	3.277			
	2.500	0.363	4.033			
	3.333	0.259	5.255			
	5.000	0.164	7.650			
	10.000	0.078	14.749			
	$\infty$	1.412	0.742			
	3	1.000	1.181	1.821	1.181	
		0.900	1.092	1.660	1.480	
0.800		1.097	1.443	1.806		
0.700		1.160	1.228	2.165		
0.600		1.274	1.024	2.598		
0.500		1.452	0.829	3.164		
0.400		1.734	0.645	3.974		
0.300		2.216	0.470	5.280		
0.200		3.193	0.305	7.834		
0.100		6.141	0.148	15.390		
$\infty$		1.501	1.433	0.591		
4		1.100	0.950	1.938	1.761	1.046
		1.111	0.854	1.946	1.744	1.165
	1.250	0.618	2.075	1.542	1.617	
	1.429	0.495	2.279	1.334	2.008	
	1.667	0.398	2.571	1.128	2.461	
	2.000	0.316	2.994	0.926	3.045	
	2.500	0.242	3.641	0.729	3.875	
	3.333	0.174	4.727	0.538	5.209	
	5.000	0.112	6.910	0.352	7.813	
	10.000	0.054	13.469	0.173	15.510	
	$\infty$	1.529	1.694	1.312	0.523	
$n$	$R_L/R_S$	$L_1$	$C_2$	$L_3$	$C_4$	

$n$	$R_S/R_L$	$C_1$	$L_2$	$C_3$	$L_4$	$C_5$	$L_6$	$C_7$
5	1.000	0.977	1.685	2.037	1.685	0.977		
	0.900	0.880	1.456	2.174	1.641	1.274		
	0.800	0.877	1.235	2.379	1.499	1.607		
	0.700	0.926	1.040	2.658	1.323	1.977		
	0.600	1.019	0.863	3.041	1.135	2.424		
	0.500	1.166	0.699	3.584	0.942	3.009		
	0.400	1.398	0.544	4.403	0.749	3.845		
	0.300	1.797	0.398	5.772	0.557	5.193		
	0.200	2.604	0.259	8.514	0.368	7.826		
	0.100	5.041	0.127	16.741	0.182	15.613		
$\infty$	1.547	1.795	1.645	1.237	0.488			
6	1.101	0.851	1.796	1.841	2.027	1.631	0.937	
	1.111	0.760	1.782	1.775	2.094	1.638	1.053	
	1.250	0.545	1.864	1.489	2.403	1.507	1.504	
	1.429	0.436	2.038	1.266	2.735	1.332	1.899	
	1.667	0.351	2.298	1.061	3.167	1.145	2.357	
	2.000	0.279	2.678	0.867	3.768	0.954	2.948	
	2.500	0.214	3.261	0.682	4.667	0.761	3.790	
	3.333	0.155	4.245	0.503	6.163	0.568	5.143	
	5.000	0.100	6.223	0.330	9.151	0.376	7.785	
	10.000	0.048	12.171	0.162	18.105	0.187	15.595	
	$\infty$	1.551	1.847	1.790	1.598	1.190	0.469	
7	1.000	0.913	1.595	2.002	1.870	2.002	1.595	0.913
	0.900	0.816	1.362	2.089	1.722	2.202	1.581	1.206
	0.800	0.811	1.150	2.262	1.525	2.465	1.464	1.538
	0.700	0.857	0.967	2.516	1.323	2.802	1.307	1.910
	0.600	0.943	0.803	2.872	1.124	3.250	1.131	2.359
	0.500	1.080	0.650	3.382	0.928	3.875	0.947	2.948
	0.400	1.297	0.507	4.156	0.735	4.812	0.758	3.790
	0.300	1.669	0.372	5.454	0.546	6.370	0.568	5.148
	0.200	2.242	0.242	8.057	0.360	9.484	0.378	7.802
	0.100	4.701	0.119	15.872	0.178	18.818	0.188	15.652
	$\infty$	1.559	1.867	1.866	1.765	1.563	1.161	0.456
$n$	$R_L/R_S$	$L_1$	$C_2$	$L_3$	$C_4$	$L_5$	$C_6$	$L_7$



- Filtros
  - Passivos
  - Projeto Butterworth
  - Projeto Chebyshev
  - Projeto Bessel
  - Transformação passa-alta
  - Transformação passa-banda
  - Transformação rejeita-banda
- Referências para estudo

## • Tabela valores Chebyshev 0.1dB ripple

$n$	$R_s/R_L$	$C_1$	$L_2$	$C_3$	$L_4$
2	1.355	1.209	1.638		
	1.429	0.977	1.982		
	1.667	0.733	2.489		
	2.000	0.560	3.054		
	2.500	0.417	3.827		
	3.333	0.293	5.050		
	5.000	0.184	7.426		
	10.000	0.087	14.433		
	$\infty$	1.391	0.819		
3	1.000	1.433	1.594	1.433	
	0.900	1.426	1.494	1.622	
	0.800	1.451	1.356	1.871	
	0.700	1.521	1.193	2.190	
	0.600	1.648	1.017	2.603	
	0.500	1.853	0.838	3.159	
	0.400	2.186	0.660	3.968	
	0.300	2.763	0.486	5.279	
	0.200	3.942	0.317	7.850	
1.100	7.512	0.155	15.466		
$\infty$	1.513	1.510	0.716		
4	1.355	0.992	2.148	1.585	1.341
	1.429	0.779	2.348	1.429	1.700
	1.667	0.576	2.730	1.185	2.243
	2.000	0.440	3.227	0.967	2.856
	2.500	0.329	3.961	0.760	3.698
	3.333	0.233	5.178	0.560	5.030
	5.000	0.148	7.607	0.367	7.614
	10.000	0.070	14.887	0.180	15.230
	$\infty$	1.511	1.768	1.455	0.673
$n$	$R_L/R_s$	$L_1$	$C_2$	$L_3$	$C_4$

$n$	$R_s/R_L$	$C_1$	$L_2$	$C_3$	$L_4$	$C_5$	$L_6$	$C_7$
5	1.000	1.301	1.556	2.241	1.556	1.301		
	0.900	1.285	1.433	2.380	1.488	1.488		
	0.800	1.300	1.282	2.582	1.382	1.738		
	0.700	1.358	1.117	2.868	1.244	2.062		
	0.600	1.470	0.947	3.269	1.085	2.484		
	0.500	1.654	0.778	3.845	0.913	3.055		
	0.400	1.954	0.612	4.720	0.733	3.886		
	0.300	2.477	0.451	6.196	0.550	5.237		
	0.200	3.546	0.295	9.127	0.366	7.889		
	0.100	6.787	0.115	17.957	0.182	15.745		
$\infty$	1.561	1.807	1.766	1.417	0.651			
6	1.355	0.942	2.080	1.659	2.247	1.534	1.277	
	1.429	0.735	2.249	1.454	2.544	1.405	1.629	
	1.667	0.542	2.600	1.183	3.064	1.185	2.174	
	2.000	0.414	3.068	0.958	3.712	0.979	2.794	
	2.500	0.310	3.765	0.749	4.651	0.778	3.645	
	3.333	0.220	4.927	0.551	6.195	0.580	4.996	
	5.000	0.139	7.250	0.361	9.261	0.384	7.618	
	10.000	0.067	14.220	0.178	18.427	0.190	15.350	
	$\infty$	1.534	1.884	1.831	1.749	1.394	0.638	
	7	1.000	1.262	1.520	2.239	1.680	2.239	1.520
0.900		1.242	1.395	2.361	1.578	2.397	1.459	1.447
0.800		1.255	1.245	2.548	1.443	2.624	1.362	1.697
0.700		1.310	1.083	2.819	1.283	2.942	1.233	2.021
0.600		1.417	0.917	3.205	1.209	3.384	1.081	2.444
0.500		1.595	0.753	3.764	0.928	4.015	0.914	3.018
0.400		1.885	0.593	4.618	0.742	4.970	0.738	3.855
0.300		2.392	0.437	6.054	0.556	6.569	0.557	5.217
0.200		3.428	0.286	8.937	0.369	9.770	0.372	7.890
0.100		6.570	0.141	17.603	0.184	19.376	0.186	15.813
$\infty$	1.575	1.858	1.921	1.827	1.734	1.379	0.631	
$n$	$R_L/R_s$	$L_1$	$C_2$	$L_3$	$C_4$	$L_5$	$C_6$	$L_7$



- Filtros
  - Passivos
  - Projeto Butterworth
  - Projeto Chebyshev
  - Projeto Bessel
  - Transformação passa-alta
  - Transformação passa-banda
  - Transformação rejeita-banda
- Referências para estudo

## • Tabela valores Chebyshev 0.5dB ripple

$n$	$R_s/R_L$	$C_1$	$L_2$	$C_3$	$L_4$
2	1.984	0.983	1.950		
	2.000	0.909	2.103		
	2.500	0.564	3.165		
	3.333	0.375	4.411		
	5.000	0.228	6.700		
	10.000	0.105	13.322		
	$\infty$	1.307	0.975		
3	1.000	1.864	1.280	1.834	
	0.900	1.918	1.209	2.026	
	0.800	1.997	1.120	2.237	
	0.700	2.114	1.015	2.517	
	0.500	2.557	0.759	3.436	
	0.400	2.985	0.615	4.242	
	0.300	3.729	0.463	5.576	
	0.200	5.254	0.309	8.225	
	0.100	9.890	0.153	16.118	
$\infty$	1.572	1.518	0.932		
4	1.984	0.920	2.586	1.304	1.826
	2.000	0.845	2.720	1.238	1.985
	2.500	0.516	3.766	0.869	3.121
	3.333	0.344	5.120	0.621	4.480
	5.000	0.210	7.708	0.400	6.987
	10.000	0.098	15.352	0.194	14.262
	$\infty$	1.436	1.889	1.521	0.913
	$n$	$R_L/R_s$	$L_1$	$C_2$	$L_3$

$n$	$R_s/R_L$	$C_1$	$L_2$	$C_3$	$L_4$	$C_5$	$L_6$	$C_7$
5	1.000	1.807	1.303	2.691	1.303	1.807		
	0.900	1.854	1.222	2.849	1.238	1.970		
	0.800	1.926	1.126	3.060	1.157	2.185		
	0.700	2.035	1.015	3.353	1.058	2.470		
	0.600	2.200	0.890	3.765	0.942	2.861		
	0.500	2.457	0.754	4.367	0.810	3.414		
	0.400	2.870	0.609	5.296	0.664	4.245		
	0.300	3.588	0.459	6.871	0.508	5.625		
	0.200	5.064	0.306	10.054	0.343	8.367		
	0.100	9.556	0.153	19.647	0.173	16.574		
$\infty$	1.630	1.740	1.922	1.514	0.903			
6	1.984	0.905	2.577	1.368	2.713	1.299	1.796	
	2.000	0.830	2.704	1.291	2.872	1.237	1.956	
	2.500	0.506	3.722	0.890	4.109	0.881	3.103	
	3.333	0.337	5.055	0.632	5.699	0.635	4.481	
	5.000	0.206	7.615	0.406	8.732	0.412	7.031	
	10.000	0.096	15.186	0.197	17.681	0.202	14.433	
	$\infty$	1.630	1.740	1.922	1.514	0.903		
7	1.000	1.790	1.296	2.718	1.385	2.718	1.296	1.790
	0.900	1.835	1.215	2.869	1.308	2.883	1.234	1.953
	0.800	1.905	1.118	3.076	1.215	3.107	1.155	2.168
	0.700	2.011	1.007	3.364	1.105	3.416	1.058	2.455
	0.600	2.174	0.882	3.772	0.979	3.852	0.944	2.848
	0.500	2.428	0.747	4.370	0.838	4.289	0.814	3.405
	0.400	2.835	0.604	5.295	0.685	5.470	0.669	4.243
	0.300	3.546	0.455	6.867	0.522	7.134	0.513	5.635
	0.200	5.007	0.303	10.049	0.352	10.496	0.348	8.404
	0.100	9.456	0.151	19.649	0.178	20.631	0.176	16.665
$\infty$	1.646	1.777	2.031	1.789	1.924	1.503	0.895	
$n$	$R_L/R_s$	$L_1$	$C_2$	$L_3$	$C_4$	$L_5$	$C_6$	$L_7$



• Filtros

– Passivos

– Projeto Butterworth

– Projeto Chebyshev

– Projeto Bessel

– Transformação passa-alta

– Transformação passa-banda

– Transformação rejeita-banda

• Referências para estudo

• Tabela valores Chebyshev 1dB ripple

$n$	$R_s/R_L$	$C_1$	$L_2$	$C_3$	$L_4$
2	3.000	0.572	3.132		
	4.000	0.365	4.600		
	8.000	0.157	9.658		
	$\infty$	1.213	1.109		
	3	1.000	2.216	1.088	2.216
0.500		4.431	0.817	2.216	
0.333		6.647	0.726	2.216	
0.250		8.862	0.680	2.216	
0.125		17.725	0.612	2.216	
$\infty$	1.652	1.460	1.108		
4	3.000	0.653	4.411	0.814	2.535
	4.000	0.452	7.083	0.612	2.848
	8.000	0.209	17.164	0.428	3.281
	$\infty$	1.350	2.010	1.488	1.106
	$n$	$R_L/R_s$	$L_1$	$C_2$	$L_3$

$n$	$R_s/R_L$	$C_1$	$L_2$	$C_3$	$L_4$	$C_5$	$L_6$	$C_7$
5	1.000	2.207	1.128	3.103	1.128	2.207		
	0.500	4.414	0.565	4.653	1.128	2.207		
	0.333	6.622	0.376	6.205	1.128	2.207		
	0.250	8.829	0.282	7.756	1.128	2.207		
	0.125	17.657	0.141	13.961	1.128	2.207		
	$\infty$	1.721	1.645	2.061	1.493	1.103		
6	3.000	0.679	3.873	0.771	4.711	0.969	2.406	
	4.000	0.481	5.644	0.476	7.351	0.849	2.582	
	8.000	0.227	12.310	0.198	16.740	0.726	2.800	
	$\infty$	1.378	2.097	1.690	2.074	1.494	1.102	
	7	1.000	2.204	1.131	3.147	1.194	3.147	1.131
0.500		4.408	0.566	6.293	0.895	3.147	1.131	2.204
0.333		6.612	0.377	9.441	0.796	3.147	1.131	2.204
0.250		8.815	0.283	12.588	0.747	3.147	1.131	2.204
0.125		17.631	0.141	25.175	0.671	3.147	1.131	2.204
$\infty$		1.741	1.677	2.155	1.703	2.079	1.494	1.102
$n$	$R_L/R_s$	$L_1$	$C_2$	$L_3$	$C_4$	$L_5$	$C_6$	$L_7$



## Cir. Eletrônica Aplica.

### Capítulo 4: Filtros passivos RF

- **Filtros**
  - Passivos
  - Projeto Butterworth
  - Projeto Chebyshev
  - Projeto Bessel
  - Transformação passa-alta
  - Transformação passa-banda
  - Transformação rejeita-banda
- **Referências para estudo**

Exemplo: projete um filtro passa-baixas Chebyshev tal que:

- $f_c=35\text{MHz}$
- atenuação seja de pelo menos 60dB após 105MHz
- $R_s=50$  e  $R_L=500$  ohms
- ripple máximo de 0.5dB

Ainda, observe que este enunciado igual ao exemplo anterior.



# Projeto filtro Bessel

Cir. Eletrônica Aplica.

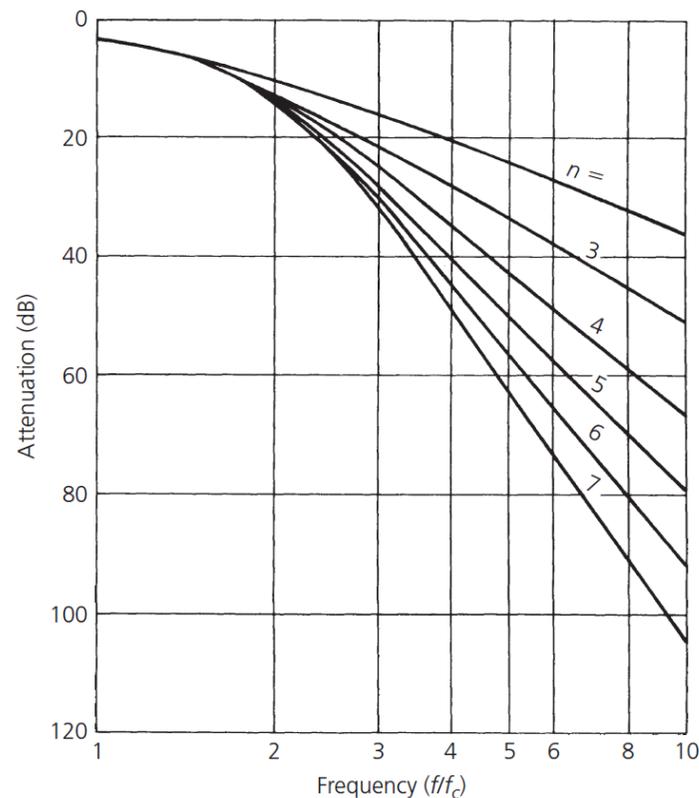
Capítulo 4:  
Filtros passivos RF

- Filtros
  - Passivos
  - Projeto Butterworth
  - Projeto Chebyshev
  - Projeto Bessel
  - Transformação passa-alta
  - Transformação passa-banda
  - Transformação rejeita-banda
- Referências para estudo

- Atenuação pobre, mas linearidade de fase boa

$$A_{dB} = 3 \left( \frac{w}{w_c} \right)^2$$

- Curva característica:





Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo 4:  
Filtros passivos RF

- Filtros
  - Passivos
  - Projeto Butterworth
  - Projeto Chebyshev
  - Projeto Bessel
  - Transformação passa-alta
  - Transformação passa-banda
  - Transformação rejeita-banda
- Referências para estudo

• Tabelas Bessel:

$n$	$R_f/R_L$	$C_1$	$L_2$	$C_3$	$L_4$
2	1.000	0.576	2.148		
	1.111	0.508	2.310		
	1.250	0.443	2.510		
	1.429	0.380	2.764		
	1.667	0.319	3.099		
	2.000	0.260	3.565		
	2.500	0.203	4.258		
	3.333	0.149	5.405		
	5.000	0.097	7.688		
	10.000	0.047	14.510		
$\infty$	1.362	0.454			
3	1.000	0.337	0.971	2.203	
	0.900	0.371	0.865	2.375	
	0.800	0.412	0.761	2.587	
	0.700	0.466	0.658	2.858	
	0.600	0.537	0.558	3.216	
	0.500	0.635	0.459	3.714	
	0.400	0.783	0.362	4.457	
	0.300	1.028	0.267	5.689	
	0.200	1.518	0.175	8.140	
	0.100	2.983	0.086	15.470	
$\infty$	1.463	0.843	0.293		
4	1.000	0.233	0.673	1.082	2.240
	1.111	0.209	0.742	0.967	2.414
	1.250	0.184	0.829	0.853	2.630
	1.429	0.160	0.941	0.741	2.907
	1.667	0.136	1.089	0.630	3.273
	2.000	0.112	1.295	0.520	3.782
	2.500	0.089	1.604	0.412	4.543
	3.333	0.066	2.117	0.306	5.805
	5.000	0.043	3.142	0.201	8.319
	10.000	0.021	6.209	0.099	15.837
$\infty$	1.501	0.978	0.613	0.211	
$n$	$R_f/R_s$	$L_1$	$C_2$	$L_3$	$C_4$

$n$	$R_f/R_L$	$C_1$	$L_2$	$C_3$	$L_4$	$C_5$	$L_6$	$C_7$
5	1.000	0.174	0.507	0.804	1.111	2.258		
	0.900	0.193	0.454	0.889	0.995	2.433		
	0.800	0.215	0.402	0.996	0.879	2.650		
	0.700	0.245	0.349	1.132	0.764	2.927		
	0.600	0.284	0.298	1.314	0.651	3.295		
	0.500	0.338	0.247	1.567	0.538	3.808		
	0.400	0.419	0.196	1.946	0.427	4.573		
	0.300	0.555	0.146	2.577	0.317	5.843		
	0.200	0.825	0.096	3.835	0.210	8.375		
	0.100	1.635	0.048	7.604	0.104	15.949		
$\infty$	1.513	1.023	0.753	0.473	0.162			
6	1.000	0.137	0.400	0.639	0.854	1.113	2.265	
	1.111	0.122	0.443	0.573	0.946	0.996	2.439	
	1.250	0.108	0.496	0.508	1.060	0.881	2.655	
	1.429	0.094	0.564	0.442	1.207	0.767	2.933	
	1.667	0.080	0.655	0.378	1.402	0.653	3.300	
	2.000	0.067	0.782	0.313	1.675	0.541	3.812	
	2.500	0.053	0.973	0.249	2.084	0.429	4.577	
	3.333	0.040	1.289	0.186	2.763	0.319	5.847	
	5.000	0.026	1.289	0.123	4.120	0.211	8.378	
	10.000	0.013	3.815	0.061	8.186	0.105	15.951	
$\infty$	1.512	1.033	0.813	0.607	0.379	0.129		
7	1.000	0.111	0.326	0.525	0.702	0.869	1.105	2.266
	0.900	0.122	0.292	0.582	0.630	0.963	0.990	2.440
	0.800	0.137	0.259	0.652	0.559	1.080	0.875	2.656
	0.700	0.156	0.226	0.743	0.487	1.231	0.762	2.932
	0.600	0.182	0.193	0.863	0.416	1.431	0.649	3.298
	0.500	0.217	0.160	1.032	0.346	1.711	0.537	3.809
	0.400	0.270	0.127	1.285	0.276	2.130	0.427	4.572
	0.300	0.358	0.095	1.705	0.206	2.828	0.318	5.838
	0.200	0.534	0.063	2.545	0.137	4.221	0.210	8.362
	0.100	1.061	0.031	5.062	0.068	8.397	0.104	15.917
$\infty$	1.509	1.029	0.835	0.675	0.503	0.311	0.105	
$n$	$R_f/R_s$	$L_1$	$C_2$	$L_3$	$C_4$	$L_5$	$C_6$	$L_7$



# Transformação passa-alta

Cir. Eletrônica Aplica.

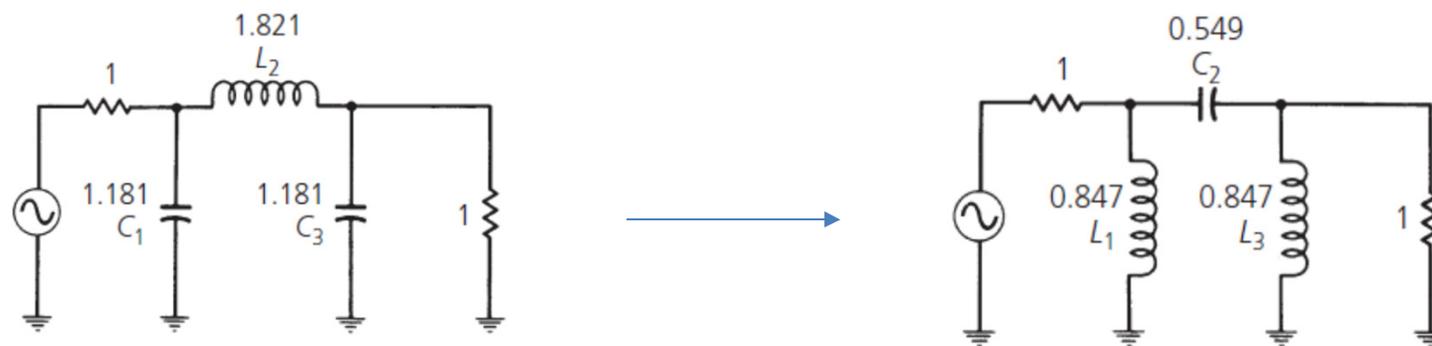
Capítulo 4:  
Filtros passivos RF

- Filtros
  - Passivos
  - Projeto Butterworth
  - Projeto Chebyshev
  - Projeto Bessel
  - Transformação passa-alta
  - Transformação passa-banda
  - Transformação rejeita-banda
- Referências para estudo

- Inverte elementos e valores.

– Exemplo:

- Indutor vira capacitor e vice-versa
- Nova relação normalização:  $\frac{f_c}{f}$
- $C_2 = 1/L_2$  e  $L_1 = 1/C_1$





# Passa-banda

Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo 4:  
Filtros passivos RF

• Filtros

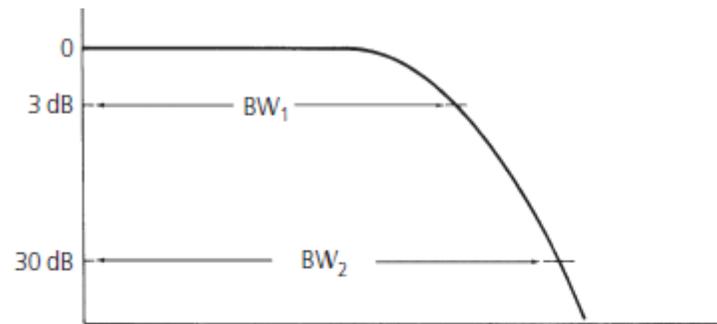
- Passivos
- Projeto Butterworth
- Projeto Chebyshev
- Projeto Bessel
- Transformação passa-alta
- Transformação passa-banda
- Transformação rejeita-banda

• Referências para estudo

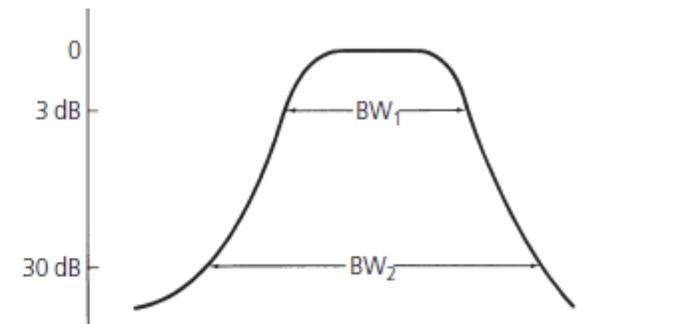
• Geralmente expresso em larguras de banda

- Simetria (se em escala log)
- Relação das bandas :

$$\frac{BW_C}{BW_{3dB}} > 1$$



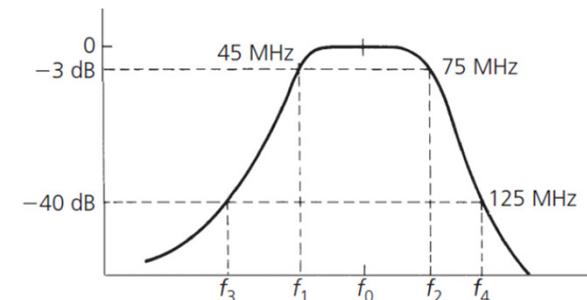
Low-pass prototype response



Bandpass response

- Estimativa frequência central:

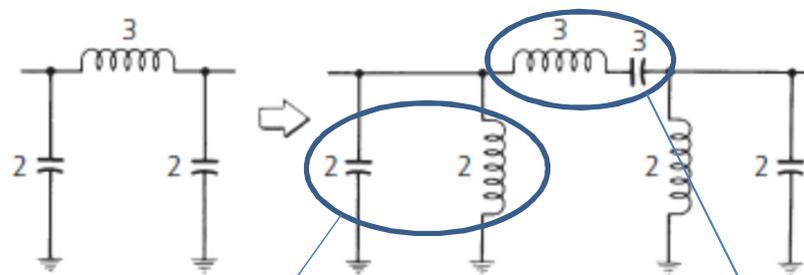
$$f_c = f_0 = \sqrt{f_a f_b}$$





- Filtros
  - Passivos
  - Projeto Butterworth
  - Projeto Chebyshev
  - Projeto Bessel
  - Transformação passa-alta
  - Transformação passa-banda
  - Transformação rejeita-banda
- Referências para estudo

• Conversão circuitos:



• Escalonar impedância e frequência:

$$C = \frac{C_n}{2\pi RB}$$

$$L = \frac{RB}{2\pi f_c^2 L_n}$$

Elementos em paralelo

$$C = \frac{B}{2\pi f_c^2 C_n R}$$

$$L = \frac{RL_n}{2\pi B}$$

Elementos em série

$R$  = the final load impedance,  
 $B$  = the 3-dB bandwidth of the final design,  
 $f_o$  = the geometric center frequency of the final design,  
 $L_n$  = the normalized inductor *bandpass* element values,  
 $C_n$  = the normalized capacitor *bandpass* element values.



• Filtros

– Passivos

– Projeto Butterworth

– Projeto Chebyshev

– Projeto Bessel

– Transformação passa-alta

– Transformação passa-banda

– Transformação rejeita-banda

• Referências para estudo

## Exemplo: projete um filtro passa-faixas com os requerimentos:

- $f_0=75\text{MHz}$
- Ripple passagem=1dB
- $BW_{3\text{dB}}=7\text{MHz}$
- $BW_{45\text{dB}}=35\text{MHz}$
- $R_s=50\text{ ohm}$
- $R_L=100\text{ ohm}$



# Rejeita-banda

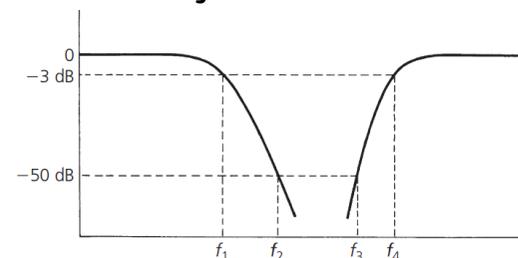
Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo 4:  
Filtros passivos RF

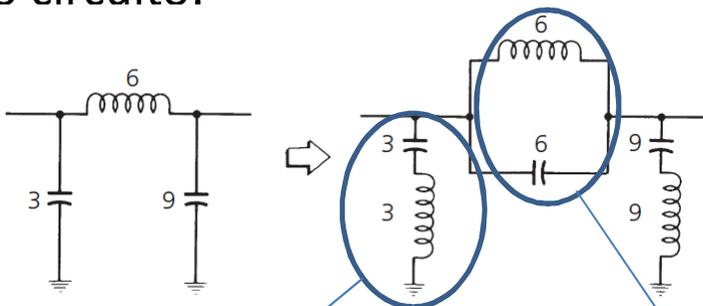
- Filtros
  - Passivos
  - Projeto Butterworth
  - Projeto Chebyshev
  - Projeto Bessel
  - Transformação passa-alta
  - Transformação passa-banda
  - Transformação rejeita-banda
- Referências para estudo

- Procedimento similar ao passa-banda com a alteração:

$$\frac{BW_c}{BW} = \frac{f_4 - f_1}{f_3 - f_2}$$



- Reconfigurar o circuito:



- Estimar os valores:

$$C = \frac{C_n}{2\pi RB}$$

$$L = \frac{RB}{2\pi f_c^2 L_n}$$

$$C = \frac{B}{2\pi f_c^2 R C_n}$$

$$L = \frac{R L_n}{2\pi B}$$