

# PRINCÍPIOS de TELECOMUNICAÇÕES

PRT60806

AULA 11: FILTROS ANALÓGICOS

PROFESSOR: BRUNO FONTANA DA SILVA

2014

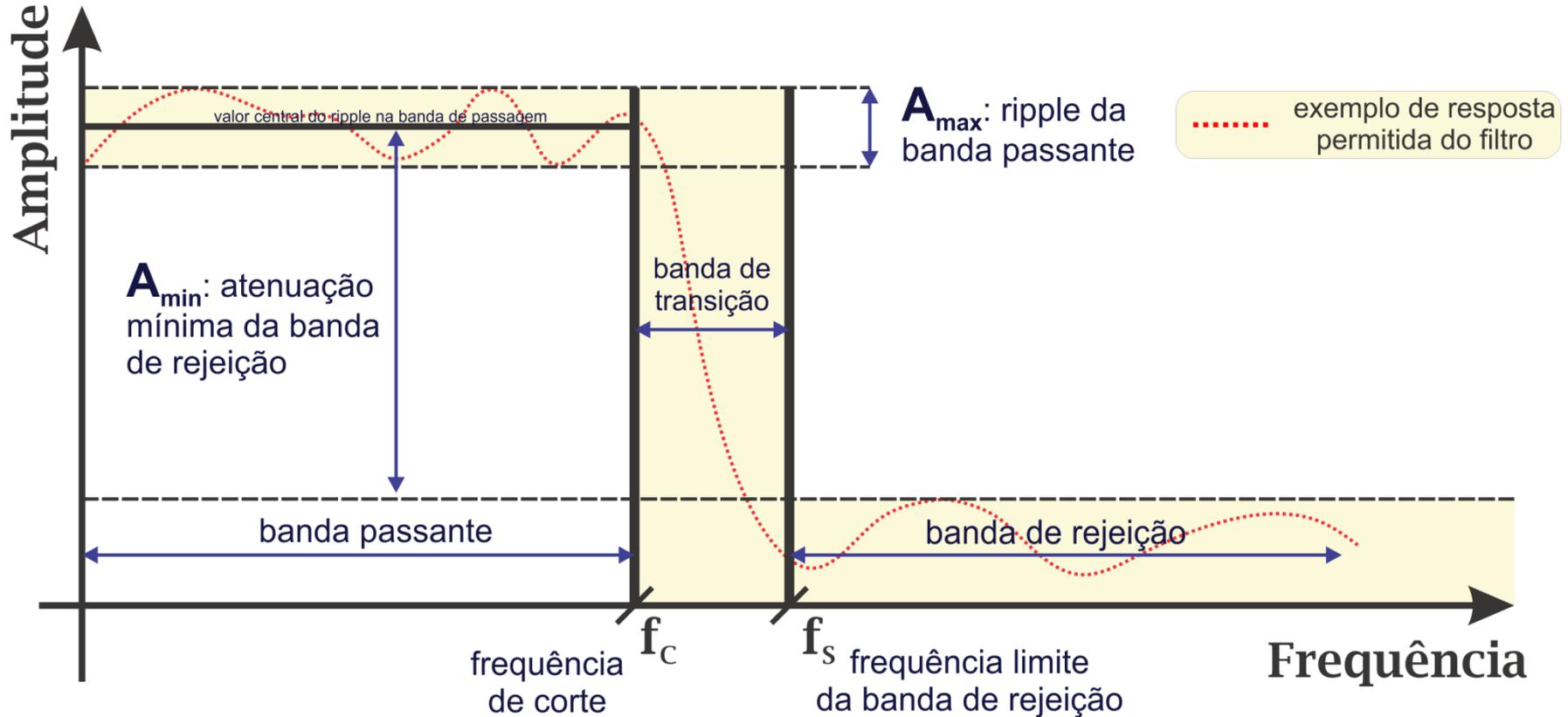


PARÂMETROS USADO NO PROJETO E ANÁLISE DE FILTROS

# GABARITO DE UM FILTRO



# Gabarito de amplitude da função de transferência de um filtro



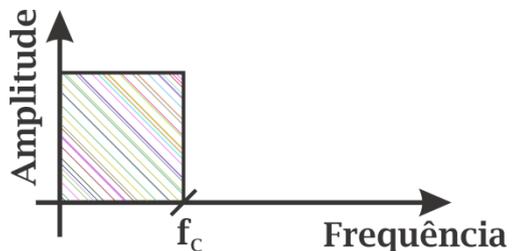
RESPOSTAS (LP, HP, BP, BS), ordem e síntese

**TIPOS DE FILTROS**

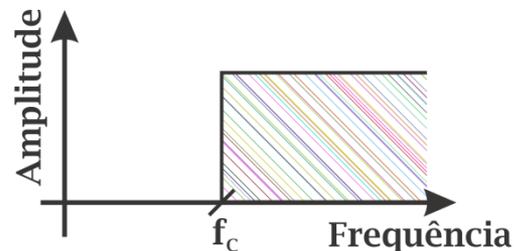
**QUANTO AO GANHO DE AMPLITUDE**



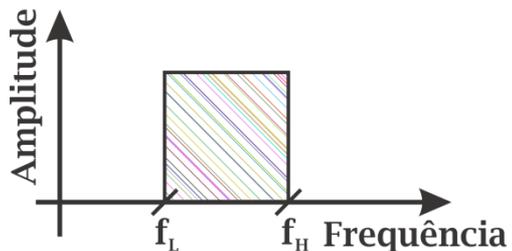
# TIPOS de RESPOSTAS ideais



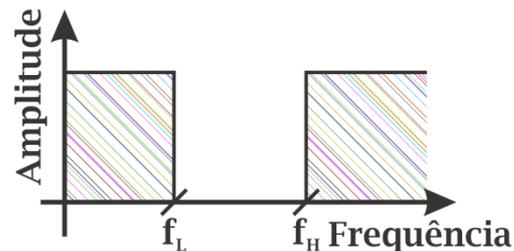
(a) Filtro Passa-Baixas (LPF)



(b) Filtro Passa-Altas (HPF)

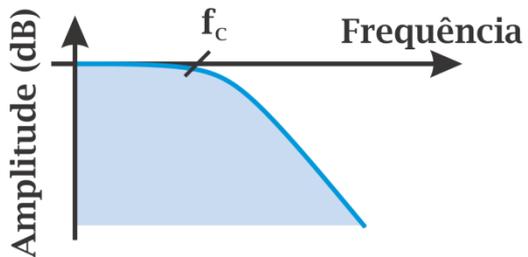


(c) Filtro Passa-Banda (BPF)

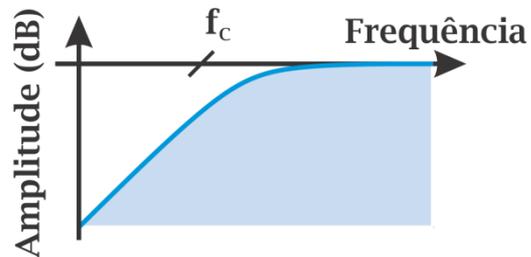


(d) Filtro Rejeita-Banda (BSF)

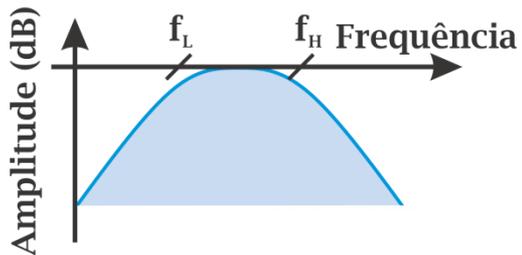
# TIPOS DE RESPOSTAS REAIS



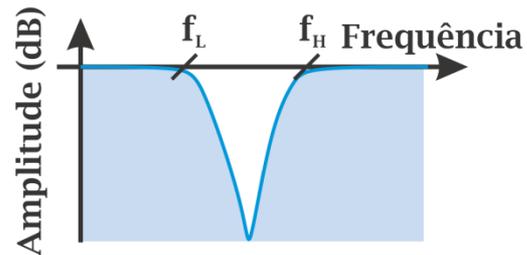
(a) Filtro Passa-Baixas (LPF)



(b) Filtro Passa-Altas (HPF)



(c) Filtro Passa-Banda (BPF)



(d) Filtro Rejeita-Banda (BSF)

# FILTROS REAIS: ORDEM E SÍNTESES

- Não possuem decaimento/amplificação “vertical” .
- A **ordem do filtro** determina sua taxa de ganho/atenuação em função da frequência. Está relacionada à “complexidade” do filtro.
- Para aproximar-se da resposta de um filtro ideal na prática, existem diferentes **métodos de síntese de filtros analógicos**.

# Ordem de Filtros (n)

A **ordem do filtro** é um número inteiro que relaciona-se com a taxa de atenuação (ou ganho) do filtro em função da frequência.

- Por exemplo, um filtro butterworth passa-baixas de **ordem 1** apresenta atenuação de **20 dB/década** (6 dB por oitava)\*.

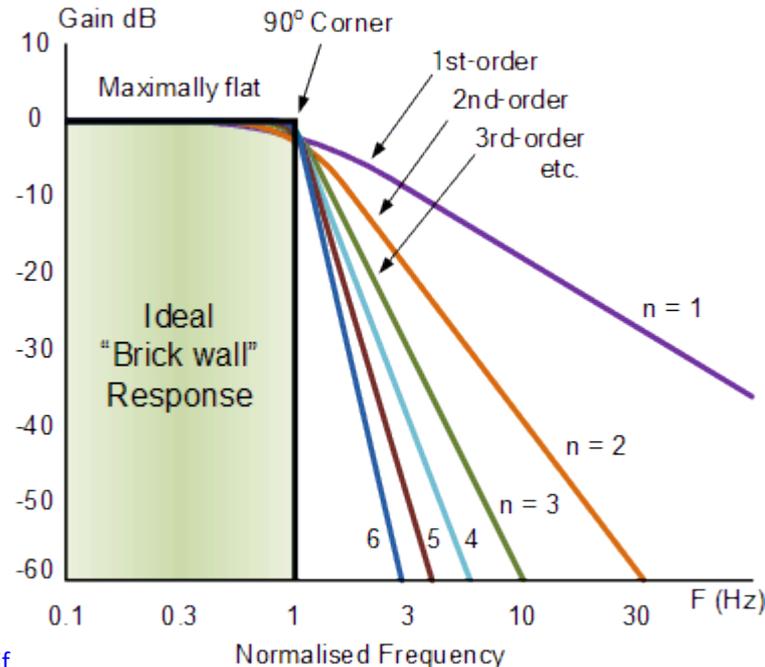
**Cada aumento de unidade** na ordem do filtro aumenta 10x a taxa de atenuação/ganho (na escala decibel, **+20 dB/década**)\*.

- Um filtro butterworth passa-baixas de **ordem 5**, por exemplo, possui uma atenuação de **100 dB/década** (30 dB/oitava)\*.

*\*Essa relação entre ordem e taxa de decaimento é válida apenas para o filtro Butterworth.*

# Ordem de Filtros (n)

Impacto de diferentes ordens na função de transferê ncia do filtro (*exemplo: filtros butterworth*).



# TIPOS de SÍNTESE de FILTROS ANALÓGICOS

Para sintetizar um filtro analógico, podemos utilizar diferentes métodos de projeto.

**Algumas das sínteses existentes são:**

**Filtros Butterworth**

**Filtros Chebyshev**

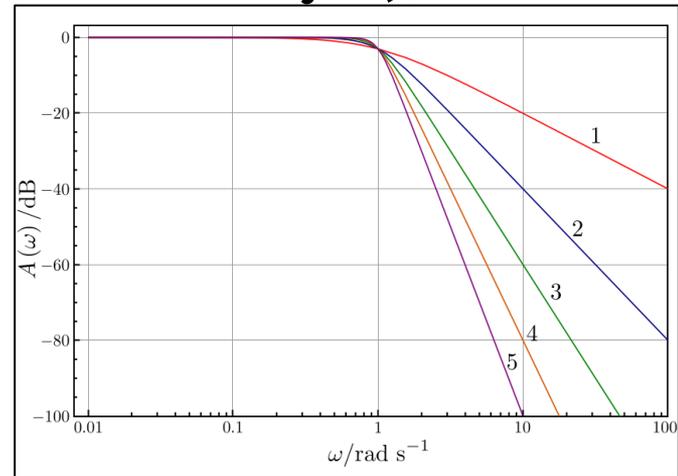
**Filtros Elípticos (Cauer)**

**Filtros de Bessel**

# FILTROS BUTTERWORTH

## Características principais:

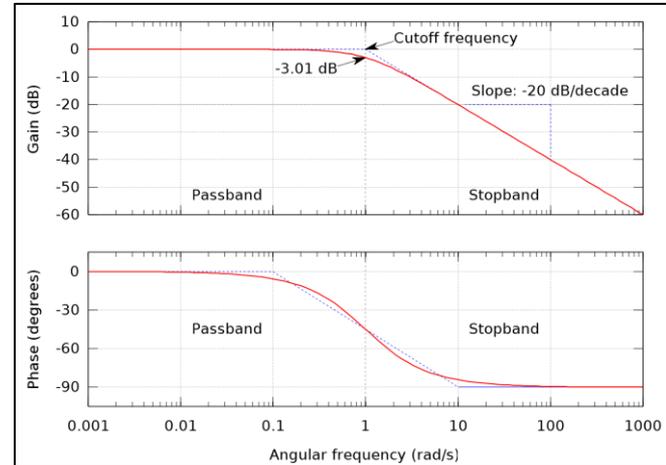
- resposta maximamente plana (em todas as bandas), ou seja, não há oscilações no ganho da função de transferência.
- lento ( $n \times 20$  dB/década na banda de transição);
- amplitude decai até zero (LPF);
- Exemplos de respostas da FT:



# FILTROS BUTTERWORTH

## Características principais:

- resposta maximamente plana (em todas as bandas), ou seja, não há oscilações no ganho da função de transferência.
- lento ( $n \times 20$  dB/década na banda de transição);
- amplitude decai até zero (LPF);
- Exemplos de respostas da FT:

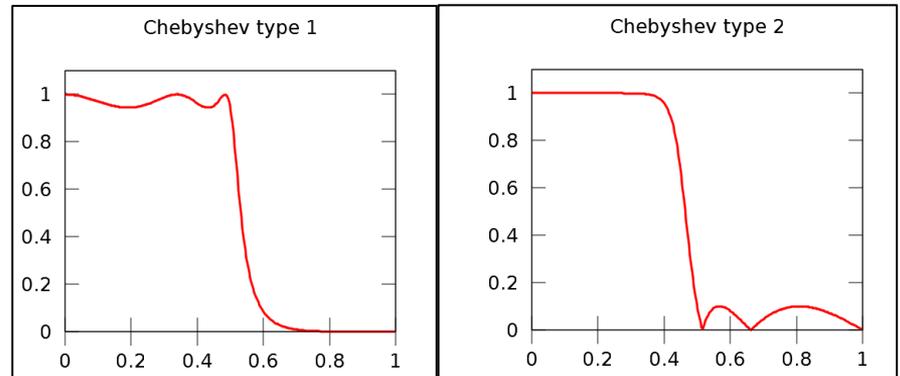


# FILTROS CHEBYSHEV

## Características principais:

- decaimento mais rápido que o Butterworth na banda de transição;
- o ganho da FT apresenta ripple na banda de passagem (tipo 1) ou na banda de transição (tipo 2)

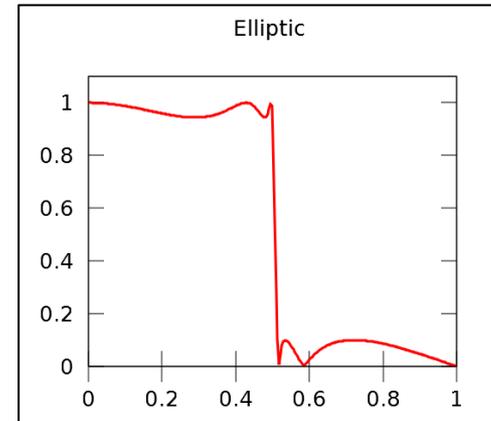
- Exemplos de respostas da FT:



# FILTROS ELÍPTICOS (CAUER)

## Características principais:

- possui ripple ajustável tanto na banda de passagem quando na banda de rejeição;
- maior taxa de decaimento em relação a outros filtros (assumindo mesma ordem e ripple);
- Exemplos de respostas da FT:

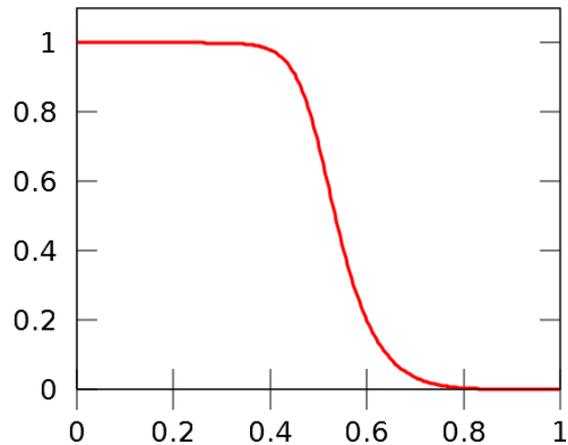


# FILTROS de BESSEL

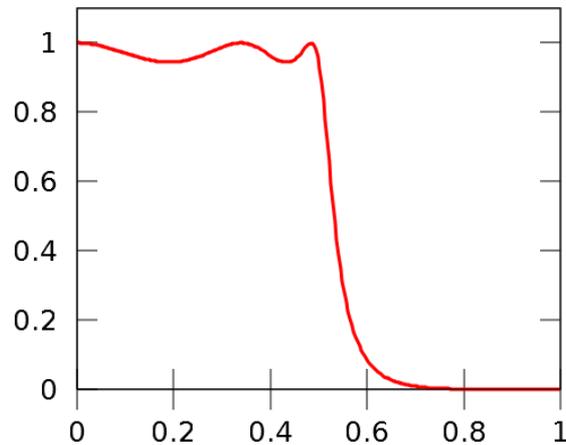
## **Características principais:**

- é um filtro cuja fase da FT é maximamente plana (fase linear), preservando o formato (desenho da forma de onda) dos sinais filtrados na banda passante;
- todas as frequências (banda passante) sofrem do mesmo atraso;
- possui uma resposta muito lenta de ganho/atenuação;

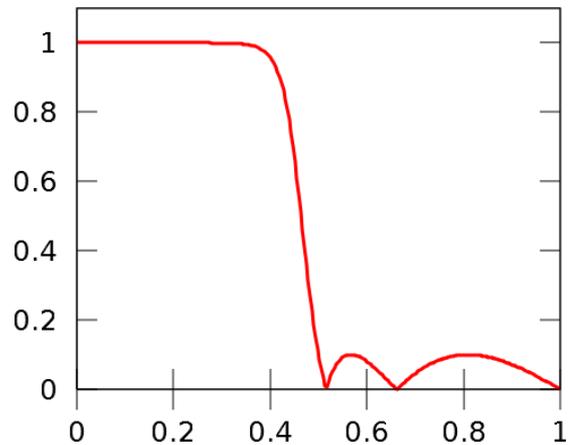
Butterworth



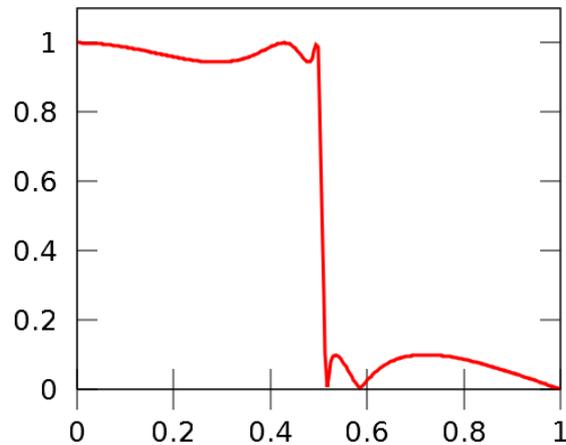
Chebyshev type 1

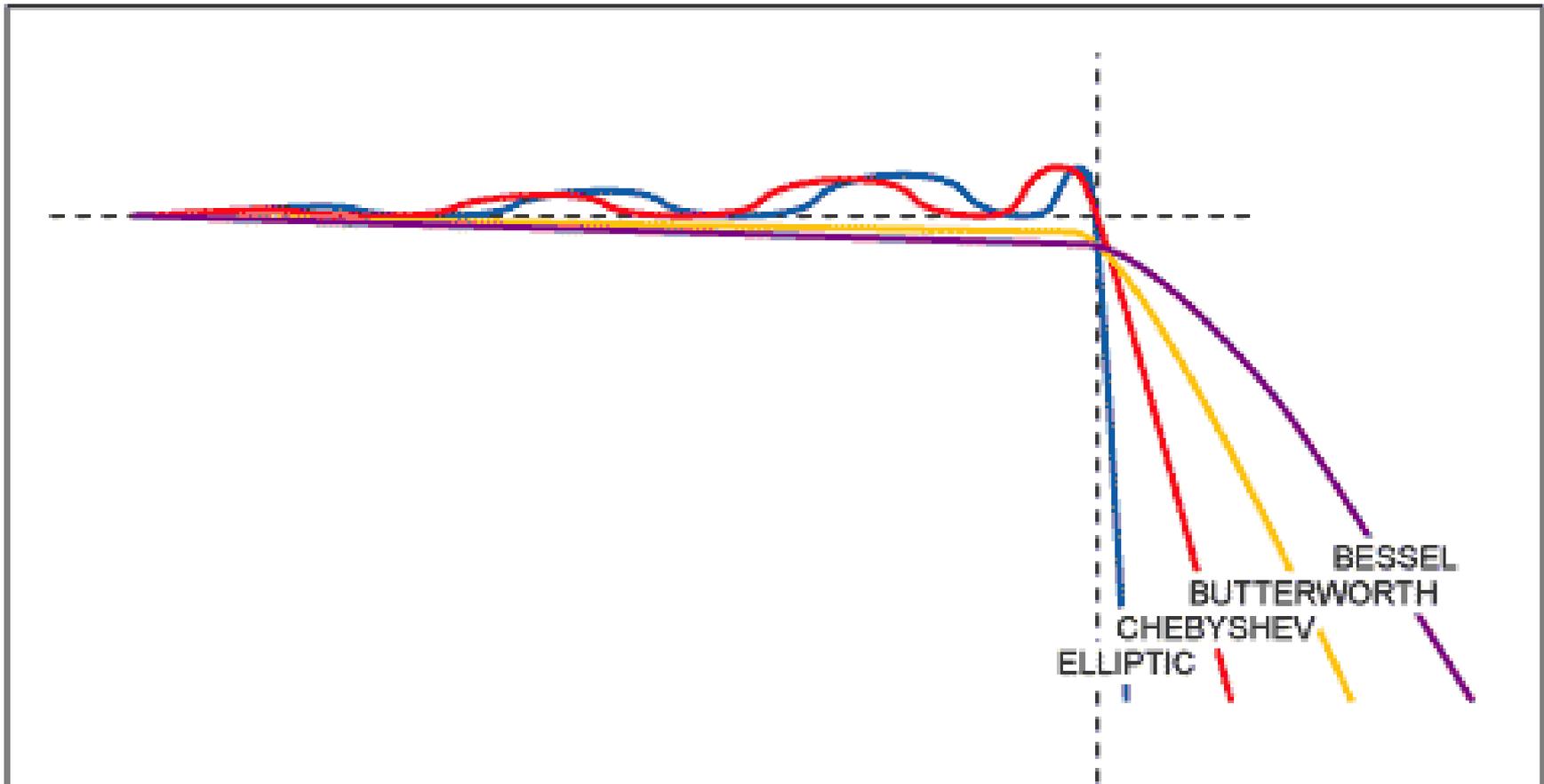


Chebyshev type 2



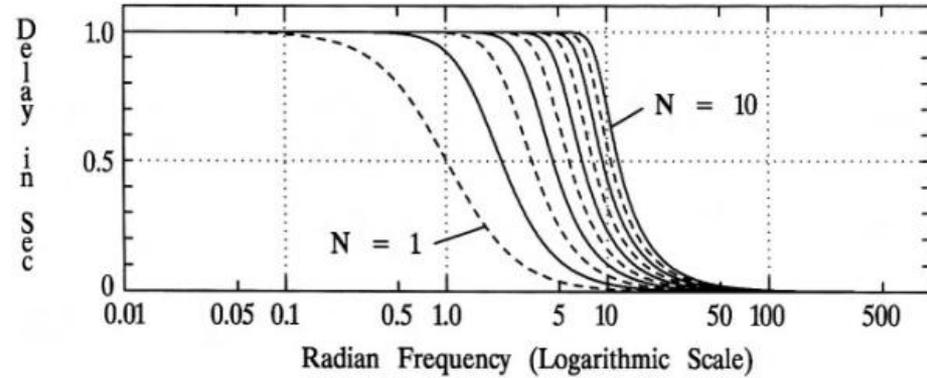
Elliptic



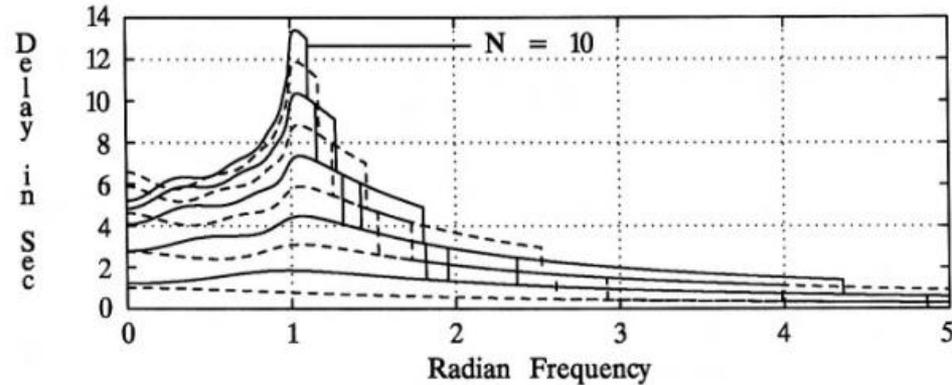


**Filtros de Bessel:** Atraso (s) x frequência  
Possuem atraso constante na banda passante.

**Filtros Elípticos:** Atraso (s) x frequência  
Possuem atraso altamente não-linear na banda passante.



**Figure 7.1** The Bessel filter normalized group delay response for values of  $N$  from 1 through 10.



**Figure 6.14** A plot of the phase delay for an elliptic filter with normalized  $\omega_c = 1$ ,  $A_p = 1$  dB,  $A_s = 80$  dB, and for values of  $N$  from 1 through 10.

TOPOLOGIAS DE FILTROS PASSIVOS E ATIVOS

# FILTROS ANALÓGICOS EM CIRCUITOS ELÉTRICOS



# CATEGORIAS DE FILTROS ANALÓGICOS

## Filtros Passivos

São circuitos elétricos (projetados para sintetizar alguma resposta de filtro) realizados apenas com componentes passivos (em geral, redes de capacitores, indutores, resistores). Seus elementos não “produzem” energia.

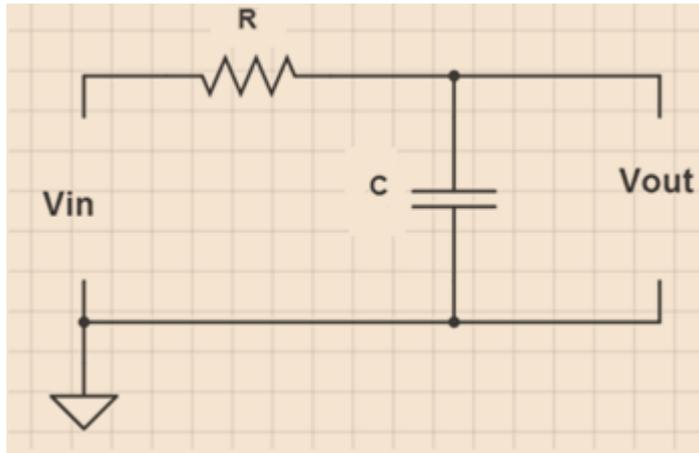
## Filtros Ativos

São circuitos elétricos (projetados para sintetizar alguma resposta de filtro) realizados com pelo menos algum componente que não seja passivos, ou seja, que atue como fonte de energia (necessitam de alimentação externa). Exemplos: filtros com transistores e amplificadores operacionais.

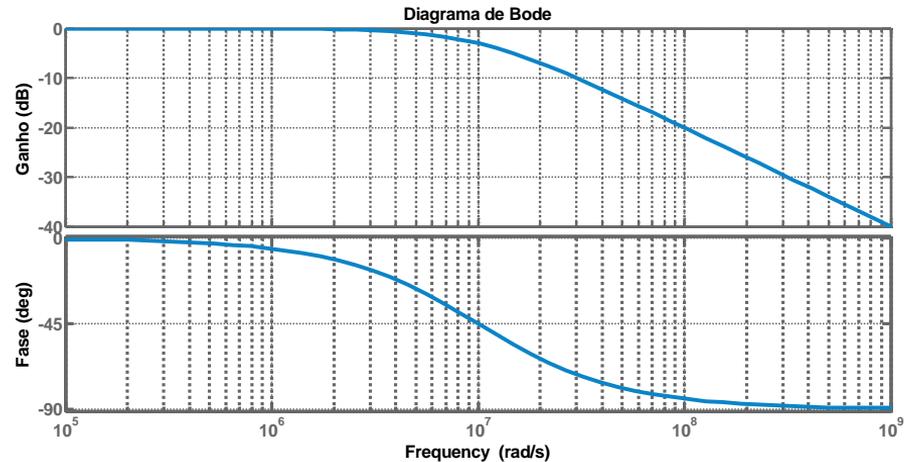
# TOPOLOGIAS DE FILTROS

## Exemplo: filtro **passa-baixa**

Filtro passa-baixas **passivo** Butterworth de ordem 1



$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{Z_C}{R + Z_C} = \frac{1}{j\omega RC + 1}$$



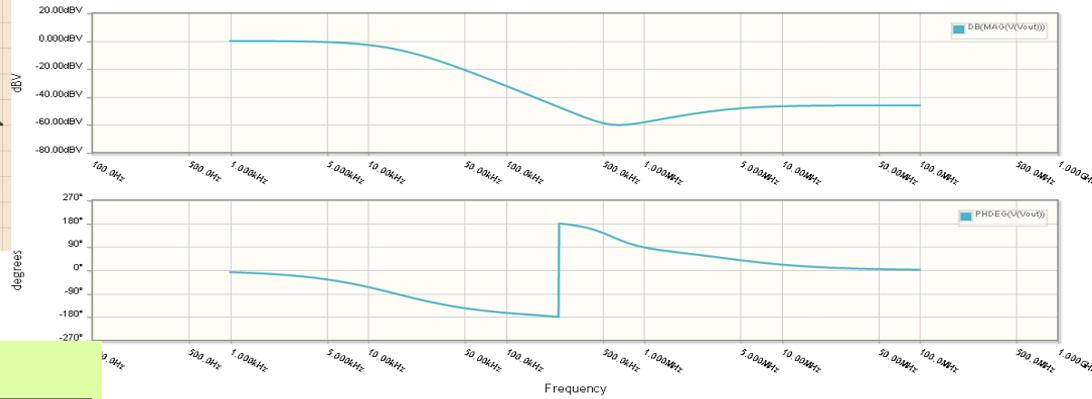
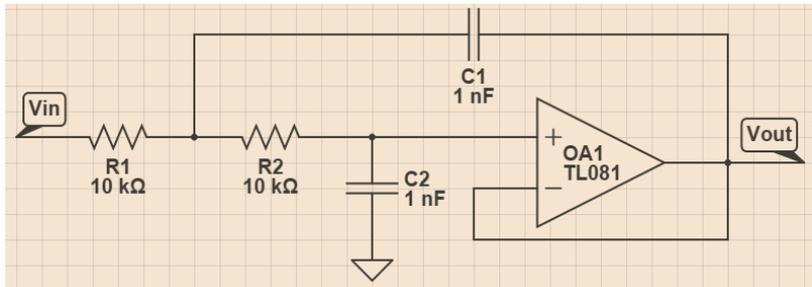
Resposta em frequência do RC passa-baixas de ordem 1 (decaimento: 20 dB/década)

$R = 100 \Omega$ ,  $C = 1 \mu F$

# TOPOLOGIAS DE FILTROS

## Exemplo: filtro **passa-baixa**

Filtro passa-baixas **ativo** Butterworth de ordem 2  
(topologia conhecida como Sallen-key)

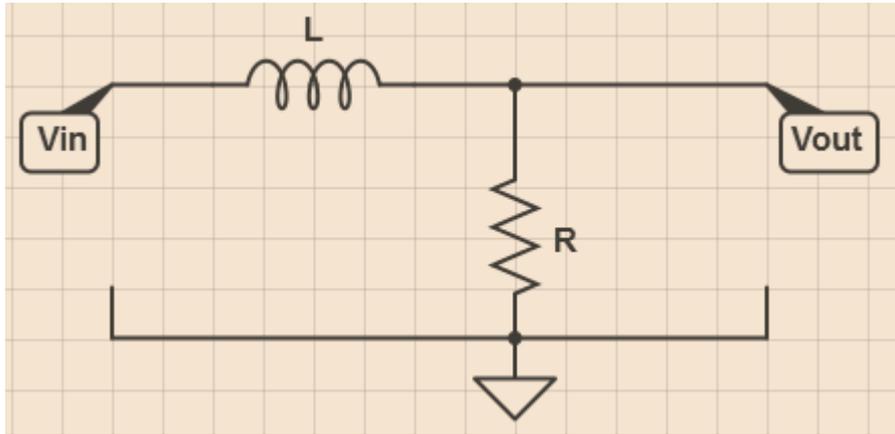


$$H(\omega) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1 + jC_2(R_1 + R_2)\omega - C_1C_2R_1R_2\omega^2}$$

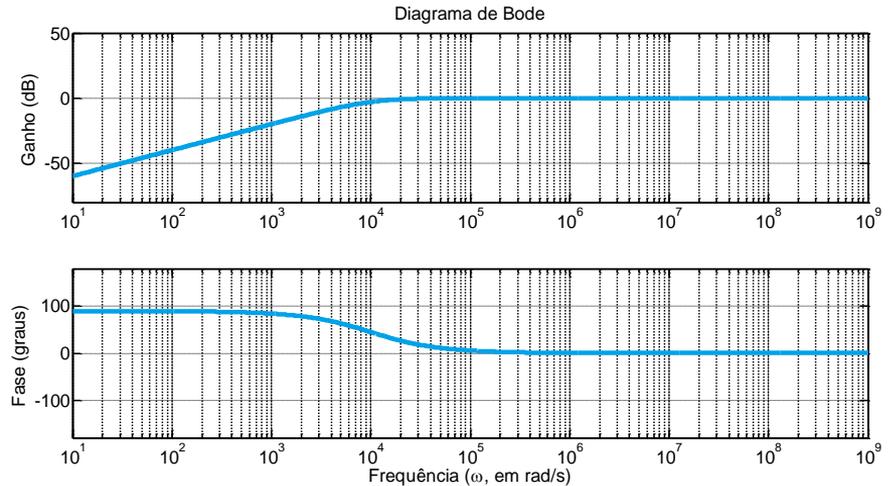
# TOPOLOGIAS DE FILTROS

## Exemplo: filtro **passa-altas**

Filtro passa-altas **passivo** Butterworth de ordem 1



$$H(\omega) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{j\omega L}{R + j\omega L}$$

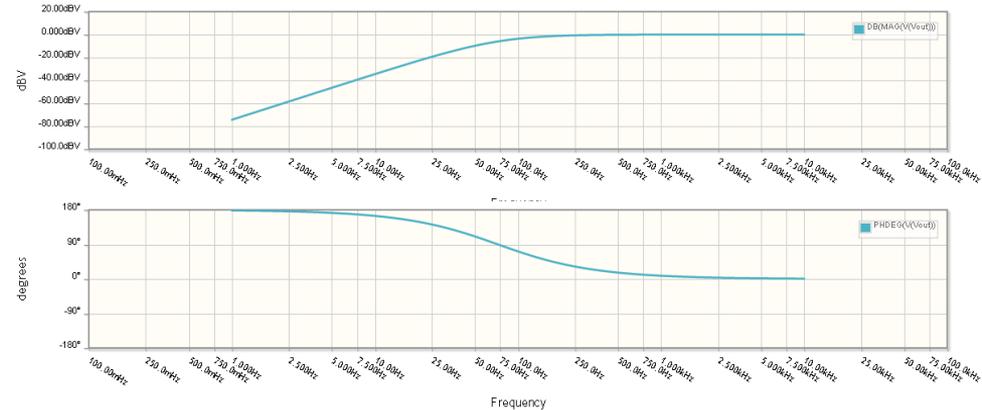
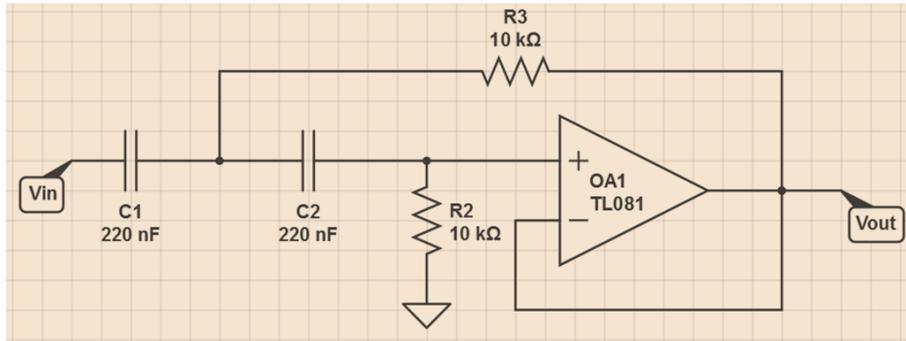


Resposta em frequência do LR passa-baixas de ordem 1 (ganho transição: 20 dB/década)  
 $R = 100 \Omega$ ,  $L = 1 \text{ mH}$

# TOPOLOGIAS DE FILTROS

## Exemplo: filtro **passa-altas**

Filtro passa-altas **ativo** Butterworth de ordem 2



$$H(\omega) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{\omega^2}{\omega^2 - j \left( \frac{C_1 + C_2}{R_2 C_1 C_2} \right) \omega - \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

# FREQUÊNCIA DE CORTE DE FILTROS PASSA-BAIXAS/PASSA-ALTAS

Para **filtros passivos de ordem 1** (RC ou LC), a frequência de corte é dada pelo inverso da constante de tempo do circuito.

Frequências  
de corte:

$$\omega_c = \frac{1}{\tau}$$
$$f_c = \frac{1}{2\pi\tau}$$

Constante de tempo  
dos circuitos RC/RL :

$$\tau_{RC} = RC$$
$$\tau_{RL} = \frac{L}{R}$$

TIPOS (BW, CAUER, ETC), CÁLCULOS DE FREQ. CORTE E  
SIMULADOR FALSTAD

# PROJETO DE FILTROS ANALÓGICOS



