

### Experiência E8: Projeto e implementação de filtros IIR

#### Objetivos

- Projeto e implementação de filtros digitais IIR.
- Prática na utilização do MATLAB para análise e projeto de sistemas em tempo discreto.

#### Introdução

Os filtros digitais IIR apresentam resposta à amostra unitária com duração infinita, decorrente da presença de realimentação do sinal de saída  $y[n]$ . Ao contrário dos filtros FIR, os filtros IIR não são garantidamente estáveis. A implementação de um filtro IIR requer normalmente um menor número de coeficientes do que um filtro FIR para atender os mesmos requisitos de projeto. A função de transferência, a equação de diferenças e a resposta em frequência de um filtro IIR são representadas respectivamente pelas equações (1), (2) e (3).

$$H(z) = \frac{\sum_{k=0}^M b_k z^{-k}}{1 + \sum_{k=1}^N a_k z^{-k}} \quad (1) \quad y[n] = \sum_{k=0}^M b_k x[n-k] - \sum_{k=1}^N a_k y[n-k] \quad (2)$$

$$H(f) = \frac{\sum_{k=0}^M b_k e^{-jk2\pi f / f_a}}{1 + \sum_{k=1}^N a_k e^{-jk2\pi f / f_a}} \quad (3)$$

#### Atividade Teórica

- Utilizando a Aproximação de Butterworth e Transformação Bilinear, determinar os coeficientes da função de transferência do filtro IIR rejeita-banda com as características indicadas na tabela do item a seguir. Considerar a máxima atenuação na banda passante  $\alpha_p = 1$  dB e a mínima atenuação na banda de rejeição  $\alpha_s = 20$  dB. **(3,0 pontos)**

Para projetar o filtro rejeita-banda desejado, seguir o roteiro abaixo:

- Pré-distorcer as quatro frequências especificadas em função da respectiva frequência de amostragem (ver Transformação Bilinear);
- Modificar adequadamente uma das frequências pré-distorcidas da banda de rejeição para que o gabarito fique simétrico ( $w_{is}.w_{ss}' = w_i'.w_s'$ );
- Transformar as especificações do filtro rejeita-banda pré-distorcido para especificações de um filtro passa-baixas normalizado ( $w_p' = 1$  rad/s);
- Calcular a ordem  $N$  e a frequência de corte  $w_0$  mínima do filtro de Butterworth passa-baixas analógico;
- Determinar os coeficientes do filtro de Butterworth analógico utilizando os valores de  $N$  e  $w_0$  calculados (utilizar a função *butter* do MATLAB);

6. Transformar o filtro passa-baixas analógico obtido em rejeita-banda com a frequência central e a banda calculadas com base nas frequências pré-distorcidas (utilizar a função *lp2bs* do MATLAB);
7. Aplicar a transformação bilinear para obter os coeficientes do filtro rejeita-banda digital (utilizar a função *bilinear* do MATLAB).

**Obs.** Nos passos 5, 6 e 7, utilizar preferencialmente a representação do filtro na forma de espaço de estados (coeficientes *A*, *B*, *C* e *D*). Caso não seja possível, utilizar a representação zero-pólo-ganho (*z*, *p* e *k*) e, em último caso, a representação na forma de coeficientes da função de transferência (*b*, *a*). As formas de espaço de estados (preferencial) e zero-pólo-ganho são menos sensíveis aos erros numéricos para o cálculo dos coeficientes do filtro.

- b) Plotar a resposta em frequência do filtro calculado (módulo e fase). O módulo deverá ser plotado com escala de amplitudes em dB. Determinar o ganho em módulo (dB) para as frequências especificadas na tabela para o projeto do filtro. Utilizar a função *fvtool* do MATLAB. **(1,0 pontos)**

Grupo	$f_i$ (kHz)	$f_{is}$ (kHz)	$f_{ss}$ (kHz)	$f_s$ (kHz)	$f_a$ (kHz)
1	1,5	1,8	2,2	2,5	16,0
2	2,5	2,8	3,2	3,5	16,0
3	3,5	3,8	4,2	4,5	16,0
4	4,5	4,8	5,2	5,5	16,0
5	5,5	5,8	6,2	6,5	16,0
6	1,5	1,8	2,2	2,5	24,0
7	2,5	2,8	3,2	3,5	24,0
8	3,5	3,8	4,2	4,5	24,0
9	4,5	4,8	5,2	5,5	24,0
10	5,5	5,8	6,2	6,5	24,0

#### Atividade Prática (utilizando o MATLAB)

- a) Executar a sequência de atividades abaixo:

1. Conectar um gerador de sinais na entrada de linha da placa de áudio do PC (conector P2 azul de 3,5 mm). Ajustar a saída do gerador para fornecer um sinal senoidal com frequência dentro da banda de passagem do filtro e amplitude de pico igual a 500 mV.
2. Conectar um osciloscópio na saída de áudio do PC (traseira ou frontal) utilizando um plugue P2 estéreo de 3,5 mm.

- b) Modificar o M-file *ExpE8.m* juntamente com a função *FuncaoE8.m* para implementar o filtro projetado com a função *filter* do MATLAB. **(2,0 pontos)**
- c) Modificar o M-file *ExpE8.m* juntamente com a função *FuncaoE8.m* para implementar o filtro projetado em Forma Direta II. **(3,0 pontos)**
- d) Medir as amplitudes das senóides de entrada e de saída e calcular o ganho em módulo do filtro em para as frequências utilizadas no projeto (ver tabela). Comparar com os resultados obtidos teoricamente. **(1,0 ponto)**