Lee - Leit - Sistemas e Sinais
Trabalho Pratico (Matlab)

Folha 1 - Introdução ao Matlab

Preparação teórica

Introdução

O Matlab é um ambiente de trabalho dedicado ao cálculo científico, métodos númericos e processamento de sinal. A principal característica do Matlab é que qualquer variável declarada é uma matriz portanto, em princípio, qualquer operação entre duas variáveis é uma operação matricial. Se a matriz for de dimensões 1×1 mathend000#, é um escalar e se for de dimensão $1\times N$ mathend000# é um vector. Pode também ser de dimensão superior a 2, i.e., pode ser uma matriz de 3, 4, 5 ou mais dimensões.

O Matlab é uma linguagem interpretada portanto, cada comando é executado quando se faz *return*. É no entanto possível executar funções e scripts, assim como executáveis exteriores através dum *shell*.

Considere a seguinte matriz 2×2 mathend000#,

$$A = \begin{matrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{matrix}$$

a)
calcule $B = A \cdot A$ mathend000#

b)
calcule C mathend000# = produto ponto a ponto de A mathend000# com A mathend000#

c)
calcule A^{-1} mathend000#

d)
calcule o inverso ponto a ponto de A mathend000#, $1/A$ mathend000#.

e)
faça uma rotação vertical das linhas da matriz

f)
faça uma rotação horizontal das colunas da matriz

Trabalho prático

Exercício 1: declaração de matrizes e funções.

1. declare um eixo temporal discreto $\mathbf{t}$ mathend000# de dimensão $N = 1024$ mathend000#, para $t_1 = 0,..., t_N = 2$ mathend000# s, utilizando a função *linspace* [faça *help linspace*]. Qual o intervalo de tempo entre cada amostra em segundos ? Procure uma outra forma de fazer o mesmo eixo temporal sem utilizar a função *linspace*. E se quiser fazer um eixo temporal de $[-2, 2]$ mathend000# segundos ?
2. construa agora uma função $s(t) = \sin(x)$ mathend000# onde $x = \omega_0 t$ mathend000#. Se quisermos um seno de frequência $f_0 = 10$ mathend000# Hz, como fazer ? Construa o vector $\mathbf{s}$ mathend000# em função do vector $\mathbf{t}$ mathend000# do número anterior.
3. queremos agora aumentar a amplitude da função $s(t)$ mathend000# para um valor $A = 4.3$ mathend000#.
4. vamos agora construir uma nova função $g(t) = \exp(-\alpha t)$ mathend000#, onde $\alpha = 2$ mathend000#. Determine o vector $\mathbf{g}$ mathend000#.
5. utilizando a função *plot* represente os vectores $\mathbf{s}$ mathend000# e $\mathbf{g}$ mathend000#, primeiro em duas figuras separadas, depois no mesmo gráfico (função *hold*)e em seguida em dois gráficos da mesma figura utilizando a função *subplot*. Coloque legendas nos eixos do tempo e amplitude e titulos no vários gráficos.
6. determine agora a função $h(t) = g(t)s(t)$ mathend000# [*help* .*]. Represente $h(t)$ mathend000#.

Exercício 2: funções particulares.

1. construa a ``função'' Dirac unidade $\delta(n)$ mathend000# que vale 1 para $n = n_0$ mathend000# e vale zero para qualquer outro valor de n mathend000#. Representa a função para vários valores de n_0 mathend000#. Verifique a utilização da função *zeros* e *ones* do Matlab.
2. faça o help da função *function*, que explica como realizar um função do Matlab. Realizar o exemplo da média.
3. aplicar ao caso da ``função'' Dirac unidade, criando a função *dirac-unit* que tem como parâmetros de entrada o intervalo de definição $[n_1, n_2]$ mathend000# e a posição do Dirac n_0 mathend000#. O que se passa se n_0 mathend000# não se encontra entre n_1 mathend000# e n_2 mathend000# ?
4. faça help *for*, que indica com fazer ciclos ``for''. Imagine que quer fazer um sinal no qual o Dirac unidade se repete com um período de 10 amostras (``pente de Diracs''). Como fazer, utilizando a função definida acima ? Represente.
5. vamos agora fazer o mesmo sinal periódico utilizando as capacidades matriciais do Matlab, e em particular o comando matricial ``:'' . Para descobrir como funciona construa uma pequena matriz 3×3 mathend000#,

   $$A = \begin{matrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 9 \end{matrix}$$

   mathend000#

   O separador é ``;''. Agora faça B=A(:). Qual o resultado ? Imagine como pode utilizar esta função para criar um sinal periódico tendo um período T_0 mathend000#. Aplicar ao caso do Dirac unidade e compare a complexidade da solução do problema com o ciclo *for*.
6. fazer agora a ``função'' degrau unidade definida no intervalo n_1, n_2 mathend000# e que vale zero até um certo instante n_0 mathend000# a partir do qual passa a valer 1. O que se passa se n_0 mathend000# não se encontra entre n_1 mathend000# e n_2 mathend000#. Construa e represente a *function degrau-unit*.

Folha 2 - Sinais discretos em Matlab

Preparação teórica

Exercício 1: considere o sinal $x[n] = u[n] - u[n - 20]$ mathend000#.

a)
represente o sinal $x[n]$ mathend000#

b)
represente o sinal $x[- n]$ mathend000#

c)
represente o sinal $x[8 - n]$ mathend000#

d)
calcule a energia ϵ_x mathend000# do sinal $x[n]$ mathend000#

e)
calcule a energia p_x mathend000# do sinal $x[n]$ mathend000#. Dificuldades ?

Exercício 2: considere o sinal $x[n] = \exp[(-0.1+j0.3)n]$ mathend000#.

a)
calcule o módulo $|x[n]|$ mathend000# e a fase $\angle x[n]$ mathend000# do sinal $x[n]$ mathend000#

b)
represente o módulo e a fase de $x[n]$ mathend000# em função de n mathend000#

Trabalho prático

Exercício 1: operações com sinais e funções.

1. *atraso temporal:* partindo da função $s(t)$ mathend000# realizada no trabalho 1 construir uma função do Matlab capaz de realizar um atraso temporal de n_0 mathend000# amostras, i.e., em entrada $s[n]$ mathend000# e em saída $s[n - n_0]$ mathend000# onde n_0 mathend000# é um número inteiro positivo ou negativo.
2. *dobragem no tempo:* uma função muito útil, nomeadamente na operação de convolução é a dobragem temporal. Construir uma função do Matlab que permita obter como saída uma versão dobrada em relação ao eixo do tempo do sinal original, i.e., entra $s[n]$ mathend000# e sai $s[- n]$ mathend000# (explorar função *fliplr*).
3. *soma e produto - energia:* explorar as funções *sum* e *prod*. Aplicar estas funções num modo eficiente de calcular a energia contida num sinal $s[n]$ mathend000#, dada por

$$\epsilon = \sum_{n=-\infty}^{\infty} s^2[n]$$

   mathend000#

4. potência: como é sabido, a potência é a energia por unidade de tempo de onde, utilizando o resultado anterior, pretende-se calcular a potência do sinal num determinado intervalo de N mathend000# amostras (explorar a função *mean*, pode-se utilizar sempre ?).

Exercício 2:

Construa uma função porta a partir de dois degraus unidade, um atrasado em relação ao outro, de forma que

$$x[n] = u[n] - u[n - n_0]$$

mathend000#

onde a função degrau unidade já foi estudada no trabalho anterior e o atraso temporal definido acima. Represente o resultado. Faça agora uma dobragem em relação ao eixo do tempo, determinando $x[- n]$ mathend000#.

Exercício 3:

Gerar a função complexa

Exercício 3:

Gerar a função complexa

$$x[n] = \exp(-0.1+j0.3)n \quad com \quad -10 \leq n \leq 10$$

mathend000#

Representar o seu módulo, fase, parte real e parte imaginária numa única figura, particionada em quatro sub figuras. Cada figura terá o respectivo eixo, legendas e título [utilizar a função *stem* para a representação].

Folha 3 - Convolução

Preparação teórica

Exercício 1: considere o sinal $x[n] = u[n] - u[n - n_0]$ mathend000# como o sinal de entrada de um sistema de resposta impulsiva $h[n]$ mathend000# dada por

$$h[n] = a^{n}x[n]$$

mathend000#

onde $a = 0.9$ mathend000# é uma constante.

a) represente $x[n]$ mathend000# e $h[n]$ mathend000#.

b) efectue o cálculo literal do sinal de saída $y[n]$ mathend000# do sistema.

Exercício 2: considere a seguinte equação de diferenças representando a relação entre a entrada $x[n]$ mathend000# e a saída $y[n]$ mathend000# de um sistema linear invariante no tempo,

$$y[n] - y[n - 1] + 0.9y[n - 2] = x[n]$$

a) calcule e faça um esboço da resposta impulsiva do sistema $h[n]$ mathend000#

b) calcule e faça um esboço da resposta indicial do sistema $a[n]$ mathend000#

c) trata-se de um sistema estável ? Porquê ?

Trabalho prático

Exercício 1: considere o sinal porta rectangular $x[n] = u[n] - u[n - 20]$ mathend000# como o sinal de entrada de um sistema de resposta impulsiva $h[n]$ mathend000# dada por

$$h[n] = a^{n}x[n]$$

mathend000#

onde $a = 0.9$ mathend000# é uma constante.

1. verifique o cálculo do exercício 1 a) da preparação com o Matlab criando uma função própria utilizando, em particular, as funções de atraso e dobragem já desenvolvidas no trabalho anterior.
2. faça uma segunda verificação utilizando a função de convolução própria do Matlab.
3. compare e comente os resultados em termos de diferenças e semelhanças, precisão e tempo de cálculo (funções *tic*, *toc*, *etime*, *clock*, *cputime*, etc...) assim como em termos de operações, função *flops*.

Exercício 2:

Temos uma sequência de pontos $x[n]$ mathend000# formando um sinal triangular de duração $N = 10$ mathend000# amostras e de amplitude $A = 4$ mathend000#. Construa $x[n]$ mathend000# de forma eficiente. Filtre a sequência $x[n]$ mathend000# com um filtro $h[n]$ mathend000#, tal que

$$h[n] = \exp{-0.5n}$$

1. determine a resposta do filtro a um Dirac
2. determine a resposta indicial do filtro
3. calcule o sinal de resposta do filtro $y[n]$ mathend000# ao sinal de entrada $x[n]$ mathend000#
4. construa versões atrasadas de n_0 mathend000#=1, 2, 5 e 10 amostras do sinal de entrada $x[n]$ mathend000# e determine as respectivas respostas do filtro.

Exercício 3:

Considere a seguinte equação de diferenças representando a relação entre a entrada $x[n]$ mathend000# e a saída $y[n]$ mathend000# de um sistema linear invariante no tempo,

$$y[n] - y[n - 1] + 0.9y[n - 2] = x[n]$$

mathend000#

Calcule e represente com a ajuda da função *filter* comparando com os resultados obtidos na preparação:

1. a resposta impulsiva do sistema $h[n]; n = 0,..., 120$ mathend000#.
2. a resposta indicial do sistema $a[n]; n = 0,..., 120$ mathend000#.
3. verifique numericamente que se trata de um sistema estável.
4. calcule a energia do sinal.

Folha 4 - TF de sinais discretos no tempo

Preparação teórica

A TF discreta no tempo é, por definição, contínua na frequência e torna-se por isso difícil de representar em Matlab através de um número finito de pontos. Outro problema surge com a impossibilidade de calcular um número infinito de pontos discretos no tempo.

Exercício 1: considere o sinal $x[n] = 0.5^{n}u[n]$ mathend000# onde $u[n]$ mathend000# é a função degrau unidade.

Exercício 1: considere o sinal $x[n] = 0.5^n u[n]$ mathend000# onde $u[n]$ mathend000# é a função degrau unidade.

a) determine a expressão literal da TFDT $X(f)$ mathend000# de $x[n]$ mathend000#.

b) faça um esboço de $|X(f)|$ mathend000# e de $\angle X(f)$ mathend000#

c) admitindo agora que o sinal $x[n]$ mathend000# é finito com N mathend000# amostras, calcule a expressão literal de $X(f)$ mathend000#.

d) represente o módulo e a fase de $X(f)$ mathend000# da alínea c) e compare com os esboços da alínea b).

Exercício 2: utilizando a TFDT demonstre que se $y[n] = h[n]x[n]$ mathend000# então podemos escrever que $Y(f) = H(f)X(f)$ mathend000#, onde $Y(f)$ mathend000#, $H(f)$ mathend000# e $X(f)$ mathend000# são as TFDT de $y[n]$ mathend000#, $h[n]$ mathend000# e $x[n]$ mathend000#, respectivamente.

Trabalho prático

Exercício 1: considere o sinal $x[n] = 0.5^n u[n]$ mathend000# onde $u[n]$ mathend000# é a função degrau unidade.

a) represente $x[n]$ mathend000#

b) visto que o sinal $x[n]$ mathend000# é infinito no tempo somos levados apenas a calcular a representação gráfica da expressão calculada na preparação utilizando um número de pontos em f mathend000# razoável calcule e represente: 1) o módulo de $X(f)$ mathend000#, 2) a fase de $X(f)$ mathend000#, 3) a parte real e a parte imaginária de $X(f)$ mathend000#, colocando os eixos as legendas em todos os gráficos.

Exercício 2: vamos agora admitir que o sinal $x[n]$ mathend000# do exemplo anterior é finito com $N = 20$ mathend000# amostras.

a) calcule X(f) utilizando a implementação em Matlab da expressão de definição do TF de um sinal discreto em modo eficiente [o somatório pode ser representado como uma multiplicação matricial].

b) represente $X(f)$ mathend000# em módulo e fase

c) compare com os resultados do exercício 1 e com os resultados da preparação.

Exercício 1: considere o sinal $x[n] = 0.5^n u[n]$ mathend000# onde $u[n]$ mathend000# é a função degrau unidade.

a) determine a expressão literal da TFDT $X(f)$ mathend000# de $x[n]$ mathend000#.

b) faça um esboço de $|X(f)|$ mathend000# e de $\angle X(f)$ mathend000#

c) admitindo agora que o sinal $x[n]$ mathend000# é finito com N mathend000# amostras, calcule a expressão literal de $X(f)$ mathend000#.

d) represente o módulo e a fase de $X(f)$ mathend000# da alínea c) e compare com os esboços da alínea b).

Exercício 2: utilizando a TFDT demonstre que se $y[n] = h[n]x[n]$ mathend000# então podemos escrever que $Y(f) = H(f)X(f)$ mathend000#, onde $Y(f)$ mathend000#, $H(f)$ mathend000# e $X(f)$ mathend000# são as TFDT de $y[n]$ mathend000#, $h[n]$ mathend000# e $x[n]$ mathend000#, respectivamente.

Trabalho prático

Exercício 1: considere o sinal $x[n] = 0.5^n u[n]$ mathend000# onde $u[n]$ mathend000# é a função degrau unidade.

a) represente $x[n]$ mathend000#

b) visto que o sinal $x[n]$ mathend000# é infinito no tempo somos levados apenas a calcular a representação gráfica da expressão calculada na preparação utilizando um número de pontos em f mathend000# razoável calcule e represente: 1) o módulo de $X(f)$ mathend000#, 2) a fase de $X(f)$ mathend000#, 3) a parte real e a parte imaginária de $X(f)$ mathend000#, colocando os eixos as legendas em todos os gráficos.

Exercício 2: vamos agora admitir que o sinal $x[n]$ mathend000# do exemplo anterior é finito com $N = 20$ mathend000# amostras.

a) calcule X(f) utilizando a implementação em Matlab da expressão de definição do TF de um sinal discreto em modo eficiente [o somatório pode ser representado como uma multiplicação matricial].

b) represente $X(f)$ mathend000# em módulo e fase

c) compare com os resultados do exercício 1 e com os resultados da preparação.

c) compare com os resultados do exercício 1 e com os resultados da preparação.

Exercício 3: considere o sinal $p[n] = u[n] - u[n - n_0]$ mathend000#.

a) para $n_0 = 10$ mathend000#, calcule e represente $P(f)$ mathend000# utilizando a implementação eficiente do execício anterior

b) repita a alínea anterior com $n_0 = 20$ mathend000#. Qual a diferença no resultado ? Explique.

Exercício 4: considere agora um novo sinal $y[n] = x[n]p[n]$ mathend000#, onde $x[n]$ mathend000# é o sinal do exercício 1.

a) calcule e represente $Y(f)$ mathend000#.

b) prove numericamente que $Y(f) = X(f) * P(f)$ mathend000#. Explique as dificuldades encontradas.

Folha 5 - Densidade espectral

Preparação teórica

Exercício 1: sendo que $r_{xy}[n]$ mathend000# é a correlação entre os sinais $x[n]$ mathend000# e $y[n]$ mathend000#, demonstre que $r_{xy}[n] = y[l] * x[-l]$ mathend000#, i.e., que a correlação entre dois sinais é igual à convolução de um deles com a versão dobrada em relação ao tempo do outro.

Exercício 2: dado um sinal $x[n] = a^n u[n]$ mathend000#, onde a mathend000# é um número real < 1 mathend000# e $u[n]$ mathend000# é a função degrau unidade,

a) calcule a expressão da sua função de autocorrelação $r_{xx}[l]$ mathend000#,

b) calcule a sua densidade espectral de potência $P_{xx}(f)$ mathend000#

b)
calcule a sua densidade espectral de potência $P_{xx}(f)$ mathend000#

c)
determine e represente em módulo e fase de $P_{xx}(f)$ mathend000#

d)
calcule agora directamente a TFDT $X(f)$ mathend000# de $x[n]$ mathend000# e represente o quadrado do seu módulo $|X(f)|^2$ mathend000# e compare o resultado obtido com o gráfico da alínea anterior.

Exercício 3: considere o sistema linear de coeficientes constantes descrito pelo relação entrada-saída

$$y[n] = 0.8y[n-1] - x[n] \quad \text{(B.-5.1)}$$
mathend000#

a)
determine e represente (módulo e fase) da função de transferência $H(f)$ mathend000# do sistema.

b)
qual a atenuação e atraso de fase sofrido por um sinal $x[n]$ mathend000# sinusoidal com uma pulsação de 0.05π mathend000# rd/s quando passado pelo sistema de equação entrada-saída (C-7.2).

Trabalho prático

Exercício 1: utilização das funções do Matlab para a correlação e convolução:

a)
considere e represente dois sinais discretos $x[n] = 0.9^n u[n]$ mathend000# e $y[n] = u[n] - u[n-20]$ mathend000#.

b)
calcule e represente a sua função de correlação $r_{xy}[n]$ mathend000#.

c)
utilizando agora os mesmos sinais x mathend000# e y mathend000# e o produto de convolução com um dos sinais dobrados no tempo, demonstre que se obtem a mesma função de correlação r_{xy} mathend000#.

Exercício 2: utilizando o sinal $x[n]$ mathend000# do exercício anterior calcule:

b)
a sua função de autocorrelação $r_{xx}[l]$ mathend000#.

c)
determine e represente em módulo e fase da TF de $r_{xx}[l]$ mathend000#, $P_{xx}(f)$ mathend000# utilizando a implementação em Matlab da expressão de definição do TF de um sinal discreto em modo eficiente no seu intervalo de definição.

d)
calcule agora directamente a TF $X(f)$ mathend000# de $x[n]$ mathend000# e represente o quadrado do seu módulo $|X(f)|^2$ mathend000# e compare o resultado obtido com o gráfico da alínea anterior.

Exercício 3: considere o sistema linear de coeficientes constantes descrito pelo relação entrada-saída

$$y[n] = 0.8y[n-1] - x[n]$$

mathend000#

a)
determine e represente a função de transferência $H(f)$ mathend000# do sistema.

b)
calcule e represente a resposta do sistema ao sinal de entrada $x[n] = \cos(0.05\pi n)u[n]$ mathend000#.

Folha 6 - Filtros I

Preparação teórica

Pretende-se calcular um filtro FIR de tipo passa-baixo de frequência de corte f_c mathend000# e de atenuação A mathend000# dB entre a banda passante e a banda de corte.

1. a partir do filtro passa-baixo ideal com as características pretendidas, calcule a forma literal da sua resposta impulsiva discreta
2. implemente a resposta impulsiva discreta e torne-a finita através de uma janela de observação rectangular (função porta) de duração M mathend000# amostras. Calcule o espectro de amplitude do sinal obtido. Responde às características desejadas ? Explique porquê ?

3. consegue melhorar as características do filtro aumentand o valor de M mathend000# ? Porquê ?

Trabalho prático

Exercício 1: uma das formas de especificar um filtro é através de uma equação de diferenças. Por exemplo a equação

$$y[n] = 0.0181x[n] + 0.0543x[n-1] + 0.0543x[n-2] + 0.0181x[n-3] + 1.76y[n-1] - 1.1829y[n-2] + 0.2781y[n-3]$$

representa um filtro de terceira ordem.

a)
calcule e represente o seu módulo e fase e demonstre que se trata de um filtro passa-baixo.

b)
qual a sua frequência de corte ? E a sua banda passante ?

c)
utilizando a expressão da TFI determine a resposta impulsiva do sistema. Como pode obter essa resposta de outra forma utilizando funções próprias do Matlab ? Compare.

Exercício 2: pretende-se calcular um filtro FIR com as seguintes características:

- tipo: passa baixo
- frequência de corte: $f_c = 100$ mathend000# Hz.
- oscilação máxima na banda passante: 0.25 dB
- atenuação mínima na banda de corte: 50 dB
- largura da banda de transição: 40 Hz
- frequência de amostragem: f_s mathend000# = 1000 Hz

1. implemente a resposta impulsiva discreta calculada na preparação e torne-a finita através de uma janela de observação rectangular (função porta) de duração $M = 25$ mathend000# amostras. Calcule e represente o espectro de amplitude e de fase do filtro obtido e caracterize-o em termos dos parâmetros desejados
2. aumente o valor de M mathend000# e volte a calcular o espectro. Consegue obter o filtro que se pretende ? Porquê ?
3. substitua a função porta por uma função de Hanning, Hamming e Blackman. Consegue nesse caso obter o resultado pretendido ? Caracterize o filtro finalmente obtido.
4. explique como obter desde logo o tipo de janela necessário de acordo com as características do filtro desejado.

3. consegue melhorar as características do filtro aumentand o valor de M mathend000# ? Porquê ?

Trabalho prático

Exercício 1: uma das formas de especificar um filtro é através de uma equação de diferenças. Por exemplo a equação

$$y[n] = 0.0181x[n] + 0.0543x[n-1] + 0.0543x[n-2] + 0.0181x[n-3] + 1.76y[n-1] - -1.1829y[n-2] + 0.2781y[n-3]$$

representa um filtro de terceira ordem.

a)
calcule e represente o seu módulo e fase e demonstre que se trata de um filtro passa-baixo.

b)
qual a sua frequência de corte ? E a sua banda passante ?

c)
utilizando a expressão da TFI determine a resposta impulsiva do sistema. Como pode obter essa resposta de outra forma utilizando funções próprias do Matlab ? Compare.

Exercício 2: pretende-se calcular um filtro FIR com as seguintes características:

- tipo: passa baixo
- frequência de corte: $f_c = 100$ mathend000# Hz.
- oscilação máxima na banda passante: 0.25 dB
- atenuação mínima na banda de corte: 50 dB
- largura da banda de transição: 40 Hz
- frequência de amostragem: f_s mathend000# = 1000 Hz

1. implemente a resposta impulsiva discreta calculada na preparação e torne-a finita através de uma janela de observação rectangular (função porta) de duração $M = 25$ mathend000# amostras. Calcule e represente o espectro de amplitude e de fase do filtro obtido e caracterize-o em termos dos parâmetros desejados
2. aumente o valor de M mathend000# e volte a calcular o espectro. Consegue obter o filtro que se pretende ? Porquê ?
3. substitua a função porta por uma função de Hanning, Hamming e Blackman. Consegue nesse caso obter o resultado pretendido ? Caracterize o filtro finalmente obtido.
4. explique como obter desde logo o tipo de janela necessário de acordo com as características do filtro desejado.

Folha 7 - Filtros II

Preparação teórica

Leitura do capítulo 5.7 do texto de apoio de Sinais e Sistemas.

Trabalho prático

Exercício 1: pretende-se desenhar um filtro IIR a partir dos filtros analógicos tipo Butterworth, Chebyshev ou Elíptico, especificado pela sua resposta em frequência com as seguintes características:

- tipo: passa banda
- frequências de corte: $f_1 = 100$ mathend000# e $f_2 = 300$ mathend000# Hz.
- oscilação máxima na banda passante: 2 dB
- atenuação mínima na banda de corte: 80 dB
- largura da banda de transição: 30 Hz
- frequência de amostragem: f_s mathend000# = 1000 Hz

1. calcule a ordem mínima de cada um dos tipos de filtro que permitem realizar este filtro
2. calcule os coeficientes do vários tipos de filtro
3. calcule e represente a no mesmo gráfico as respostas em frequência em fase dos vários tipos de filtro. Determina quais são aqueles que melhor respondem aos critérios pedidos.

Exercício 2: utilizando o filtro mais complexo e o menos complexo do exercício anterior utilize-os para filtrar o seguinte sinal:

$$y(t) = \sin(2\pi f_1 t) + \sin(2\pi f_2 t) + \sin(2\pi f_3 t) + \sin(2\pi f_4 t)$$

mathend000#

com os seguinte valores de frequência em Hz $f_1 = 90$ mathend000#, $f_2 = 105$ mathend000#, $f_3 = 115$ mathend000# e $f_4 = 118$ mathend000#.

1. utilizando um filtro do tipo recursivo no tempo.
2. utilizando filtragem no domínio da frequência

truemm