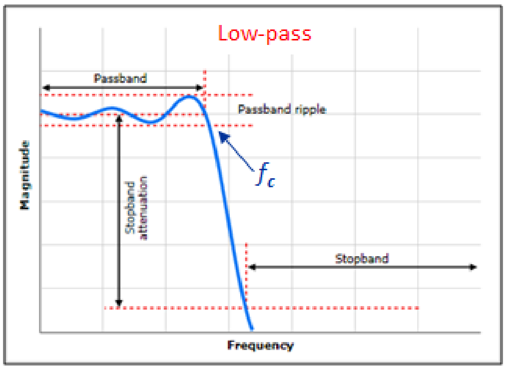
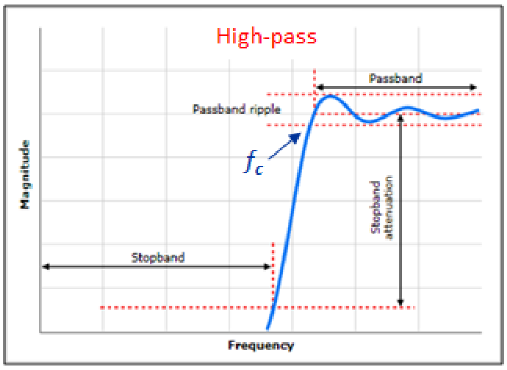
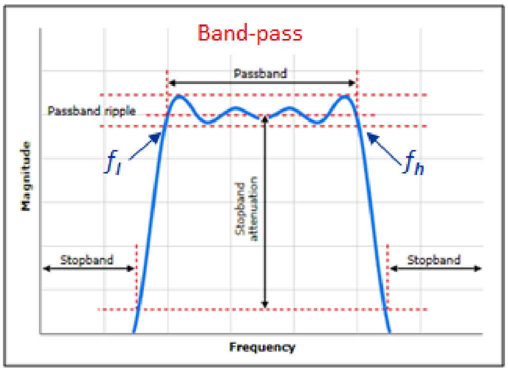
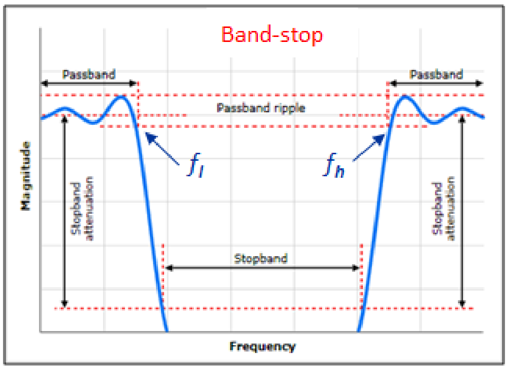
Circuits i Sistemes Lineals

Treball: filtres analògics









Núria Duffo
Orestes Mas
Olga Muñoz
Margarita Sanz

Índex

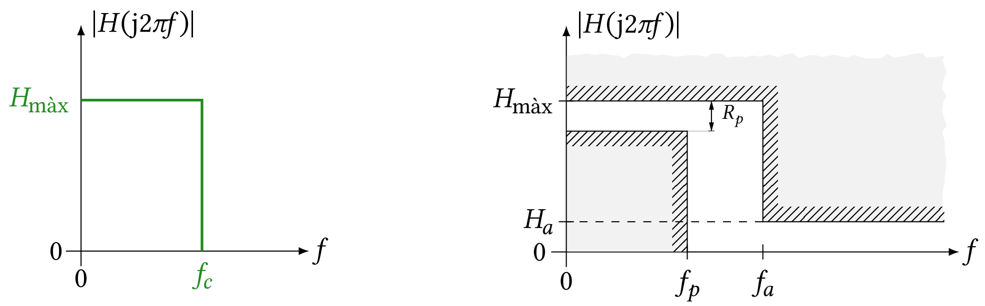
1 Introducció

En aquest treball ens endinsarem una mica més en l'estudi dels filtres analògics, introduint tipus de filtres diferents als vistos a classe, generalitzant les seves especificacions i explicant de forma més sistemàtica el procés de disseny. L'objectiu final serà dissenyar un filtre *antialiàsing* utilitzat en sistemes d'adquisició de dades per eliminar els components d'alta freqüència abans de la conversió analògica-digital (A/D) del senyal.

2 Fonaments del disseny de filtres analògics

2.1 Fase 1: Especificació freqüencial d'un filtre. La plantilla.

Quan dissenyem un filtre, idealment ens agradaria que tingués amplificació constant a la banda de pas, amplificació zero a la banda atenuada, i que la transició entre la banda de pas i l'atenuada fos instantània. Malauradament, a la pràctica s'observa que és impossible aconseguir dissenyar un filtre real amb aquestes característiques ideals, ja que això requeriria un nombre infinit d'elements (ordre infinit).

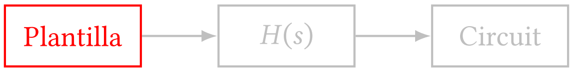


(a) Resposta freqüencial ideal passabaix

(b) Plantilla realista

Figura 1: Diferències entre la resposta freqüencial del filtre ideal que volem aconseguir i els compromisos que haurem d'acceptar

A la pràctica intentarem aproximar-nos com més millor a la resposta ideal, tot admetent una certa **tolerància** pels valors d'amplificació a les bandes de pas i atenuada. A més haurem d'acceptar una **banda de transició** entre ambdues, de manera que l'amplificació pugui canviar gradualment i no de forma tan abrupta. Per això, el primer que haurem de fer sempre és especificar quines són les toleràncies màximes que es poden permetre a la resposta en freqüència del filtre segons l'aplicació que es farà d'ell. Això es fa mitjançant una **plantilla** que ens marca la zona per la qual pot passar la resposta freqüencial.



A tall d'exemple, suposem que volem dissenyar un filtre passabaix. Idealment ens agradaria que el filtre presentés una resposta freqüencial com la que es mostra a la figura 1a, però com que això no serà possible aconseguir-ho ens conformarem amb una resposta freqüencial **aproximada**, que estigui compresa dins la zona delimitada per la plantilla de la figura 1b.

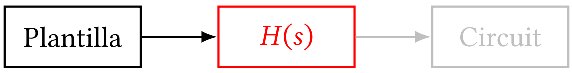
Els elements bàsics d'una plantilla són:

- Tipus de característica (passabaix, passaalt, etc.).
- f_p: Freqüència on acaba la banda de pas. Pot haver-n'hi més d'una si la característica a implementar és passabanda o banda eliminada.
- f_a: Freqüència on comença la banda atenuada. També pot haver-n'hi més d'una segons el tipus de característica.
- H_{max}: Amplificació màxima del filtre en la banda de pas.
- R_p: És la tolerància permesa per l'amplificació a la banda de pas, anomenada també **arrissat** (*rizado*, *ripple*).
- H_a: Amplificació màxima admissible a la banda atenuada.

En aquesta plantilla la banda de pas comprèn l'interval freqüencial $[0, f_p]$, essent f_p usualment la freqüència de tall a -3 dB. La banda de transició queda definida per les freqüències compreses entre f_p i f_a.

2.2 Fase 2: Aproximació a la resposta ideal. Determinació de la funció de xarxa.

Una vegada assumida la impossibilitat de dissenyar un filtre amb una resposta ideal, resulta que podem plantejar **multitud de funcions matemàtiques** que transcorren dins dels límits imposats per la plantilla, i haurem d'escollir-ne una. Ho fem com ho fem, l'objectiu és arribar a determinar una funció de xarxa amb una resposta freqüencial que verifiqui la plantilla:



Les tècniques més populars per a obtenir l'$H(s)$ donen lloc als denominats filtres de Butterworth, Txebixov[1] de tipus I, Txebixov de tipus II (també anomenat Txebixov invers) i el·líptic. Altres tipus de filtres que no es discuteixen a continuació són els de Bessel, Gaussians, de Legendre o de Linkwitz-Riley. Si us interessa el tema, comenceu consultant aquest article de la Viquipèdia i seguiu-ne els enllaços.

[1]Llegiu l'entrada del glossari que s'enllaça. És important.

- **Filtres de Butterworth**. Són els que més s'utilitzen. El seu disseny està basat en polinomis de Butterworth (el polinomi de denominador de H(s)). Presenten una amplificació maximalment plana a la banda de pas. La banda de transició decau més lentament que la d'un filtre de Txebixov. No hi ha arrissat ni a la banda de pas ni a la banda eliminada.
- **Filtres de Txebixov de tipus I**. L'amplificació a la banda de pas presenta un arrissat d'amplitud constant determinat per una posició específica dels pols del circuit. La magnitud de l'arrissat, R_p és un paràmetre de disseny. En general, un increment de R_p disminueix l'amplada de la banda de transició. Aquesta amplada és sempre menor que als filtres de Butterworth i Bessel. No hi ha arrissat a la banda atenuada. La seva característica de fase és menys desitjable.
- **Filtres de Txebixov de tipus II**. Són derivats del tipus anterior amb la diferència que l'amplificació decreix de forma monòtona a la banda de pas i en canvi és en la banda atenuada on presenta un arrissat.
- **Filtres el·líptics**. També anomenats filtres de Cauer. Són una combinació dels Txebixov tipus I i II, amb arrissat tant a la banda de pas com a l'atenuada. De tots els filtres possibles d'un ordre concret, els de Cauer són els que presenten una transició més ràpida entre la banda de pas i l'atenuada, però també són els més complexos des del punt de vista matemàtic i d'implementació.

La figura 2 mostra de forma visual les semblances i diferències entre aquests quatre tipus de filtres, dissenyats amb paràmetres semblants (mateix ordre, mateixa característica passabaix, etc.) per tal de poder-los comparar.

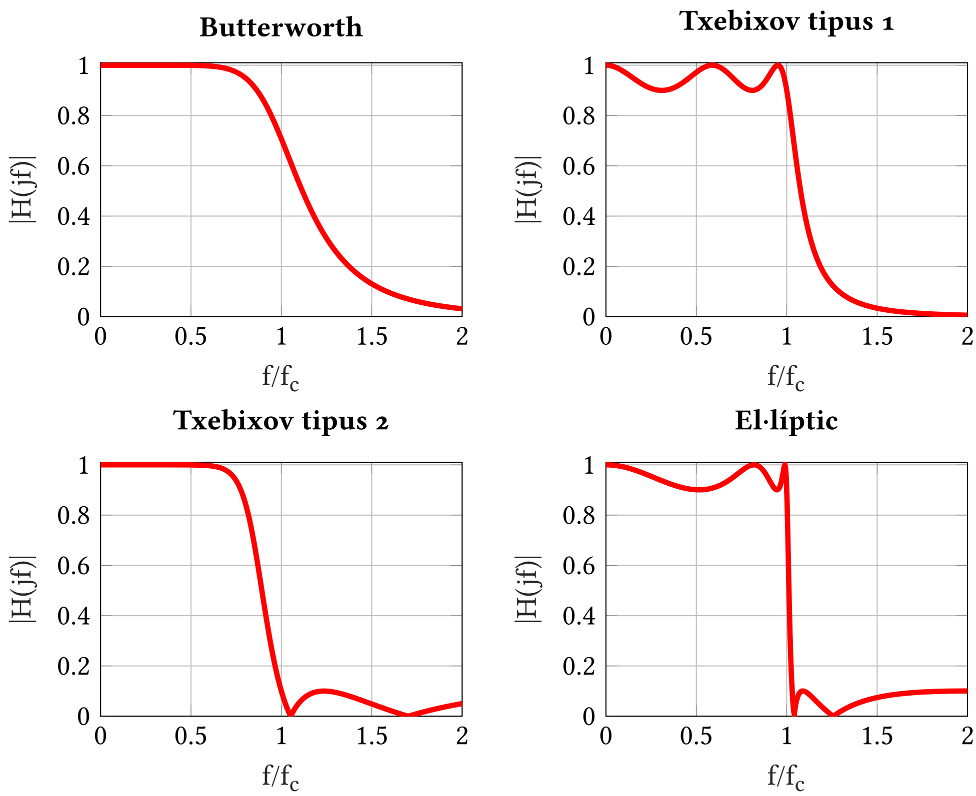


Figura 2: Comparació entre les diferents corbes d'amplificació dels 4 tipus de filtre esmentats

En aquest treball usarem unes funcions específiques d'Octave que encapsulen tots els càlculs necessaris per determinar la $H(s)$ del filtre desitjat a partir de les especificacions de la plantilla. D'aquesta manera la tasca de disseny se simplifica moltíssim.

2.3 Fase 3: Implementació circuital del filtre.

En la fase final del disseny caldrà escollir el circuit que implementi la funció de xarxa determinada en el pas anterior. Això implica decantar-se per una estructura concreta i assignar valors a tots els seus elements. En aquest procés sovint haurem de prendre també decisions (o com a mínim tenir en compte) sobre altres factors que no queden reflectits en la $H(s)$, com ara les impedàncies d'entrada i sortida del filtre.

$$\boxed{\text{Plantilla}} \longrightarrow \boxed{H(s)} \longrightarrow \boxed{\text{Circuit}}$$

Els filtres es poden implementar amb circuits passius, actius, o una combinació d'ambdós. Alguns **avantatges** dels filtres actius envers els passius són:

- **L'ús d'amplificadors operacionals** permet evitar els efectes de càrrega entre etapes. Aquest fet **simplifica enormement la realització del filtre** perquè podrem descompondre-lo en una successió de cèl·lules de primer o segon ordre connectades en cascada, i dissenyar cada etapa de forma independent de les altres.
- Permet d'escollir de forma senzilla la resistència de sortida i entrada.
- Amb elements actius, R's i C's es poden implementar tot tipus de filtres. Això implica que **no ens calen inductors** per realitzar-los i, per tant, el filtre resultant probablement **ocupa menys espai** i és **és més lleuger** que el seu equivalent passiu.
- Possibilitat d'amplificació.
- Facilitat d'ajustament.
- Admeten la integració i, per tant, la seva producció en massa és econòmica.

Tanmateix els filtres actius presenten també **desavantatges** envers els passius:

- Necessiten alimentació.
- Possible inestabilitat.
- Marge dinàmic limitat (possible saturació).
- Amplades de banda més reduïdes que els passius.

D'acord amb això, els filtres passius tenen especial interès en aplicacions d'alta freqüència o d'alta potència. Tanmateix, fora d'aquestes dues excepcions i dels casos més simples, els filtres s'implementen principalment amb amplificadors operacionals (filtres actius). En aquest treball usarem el següent procediment de disseny simplificat:

1. Descompondrem la funció de transferència en un **producte de funcions més simples**, cadascuna d'elles amb coeficiens reals i d'ordre 1 o 2 com a màxim. Per exemple, suposem que tenim la funció de xarxa:

$$H(s) = \frac{6s^2 + 30\,s}{s^3 + 14\,s^2 + 73\,s + 200}$$

Correspon a un circuit amb 2 zeros i 3 pols, de valors

$$\text{zeros: } \begin{cases} z_1 = 0 \\ z_2 = -5 \end{cases} \qquad \text{pols: } \begin{cases} p_1 = -8 \\ p_2 = -3 + 4\text{j} \\ p_2 = -3 - 4\text{j} \end{cases}$$

Hi ha dos pols complexos conjugats, per la qual cosa els haurem d'agrupar formant un polinomi de segon grau si volem que aquest polinomi tingui coeficients reals. El pol que queda, així com els dos zeros, són reals i els podem agrupar o no. Així, algunes possibles descomposicions són:

$$H(s) = \frac{6\,s}{s+8} \cdot \frac{s+5}{s^2+6\,s+25} \qquad \text{o bé} \qquad H(s) = \frac{6\,s}{s^2+6\,s+25} \cdot \frac{s+5}{s+8}$$

Per raons pràctiques, **l'etapa de guany més baix ha de ser la primera**, i la de guany màxim hauria de ser l'última. Això ajudarà a prevenir saturació d'un amplificador a la cadena.

2. Una vegada feta la descomposició de la $H(s)$ en funcions $H_i(s)$ de primer i/o segon ordre, caldrà dissenyar els circuits que implementin cadascuna d'elles i **connectar-los en cascada** per tal d'obtenir la funció de transferència global. En aquest procés les possibilitats són també molt altes ja que el circuit a escollir dependrà de l'ordre de $H_i(s)$, del tipus de característica freqüencial que té, de si els pols són només reals o també complexos, de si la funció té zeros o no, de si inverteix el signe, etc. El dissenyador expert ha de conèixer molt bé els diferents circuits disponibles, les seves possibilitats i els seus avantatges i inconvenients principals.

   A tall d'exemple a la figura 3 es mostren quatre estructures circuitals de primer i segon ordre que es poden utilitzar per implementar **algunes** funcions de xarxa de tipus passa-baixes, concretament funcions de primer i segon ordre que **només tinguin pols**. Així, per exemple, amb aquests circuits no podríem implementar un filtre de Txebixov tipus II o el·líptic, encara que fos passabaixes, ja que aquest tipus de filtres presenten també zeros.

3. Quan s'hagi escollit l'estructura o estructures necessàries per implementar les diverses etapes del filtre, caldrà assignar valors als seus elements. Per fer-ho, analitzarem els circuits per tal d'obtenir les seves respectives funcions de xarxa amb els coeficients dels polinomis numerador i denominador en funció dels elements del circuit. Identificant aquests coeficients amb els de les funcions de xarxa calculades al punt 1, podrem determinar els valors dels elements.

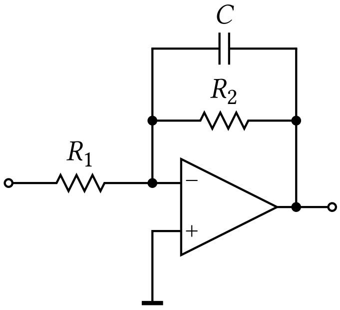
4. Abans de donar el disseny per bo i implementar-lo, es farà **sempre** una simulació del circuit final per tal de comprovar el seu correcte funcionament.

3 Disseny d'un filtre analògic d'antialiàsing

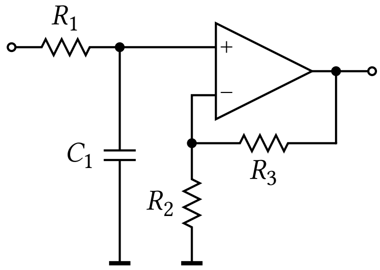
Tot i que el contingut d'aquesta secció no és estrictament necessari per tal de resoldre satisfactòriament el treball, oferim a continuació una breu explicació sobre els filtres antialiàsing per tal de contextualitzar una mica el disseny que es demana a l'apartat següent.

Un conversor A/D converteix un senyal analògic (com és el cas de les tensions i corrents) en un senyal digital. En el procés de digitalització d'un senyal analògic es fan dues operacions bàsiques: el **mostratge** i la **quantificació**.

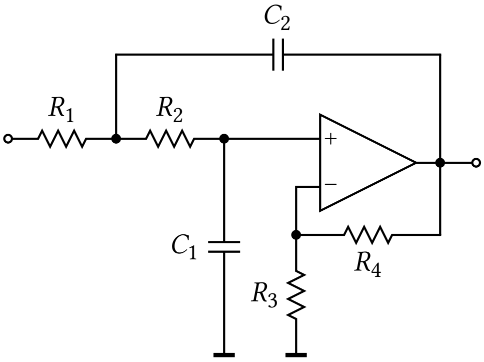
En el mostratge, mesurem el valor del senyal analògic només a instants concrets (cada T_s segons), és a dir, prenem mostres.



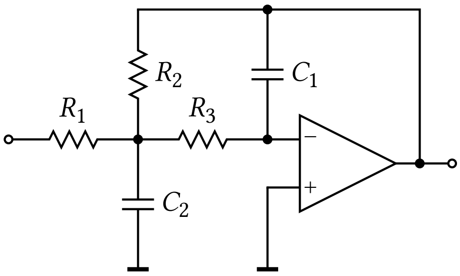
(a) Estructura d'ordre 1 inversora



(b) Estructura d'ordre 1 no inversora



(c) Estructura *Sallen-Key*



(d) Estructura MFB (*Multiple FeedBack*)

Figura 3: Algunes estructures circuitals típiques per implementar funcions de transferència passabaixes de primer i segon ordre que únicament tenen pols.

En la quantificació, representem (aproximem, arrodonim) les mostres mitjançant un conjunt finit de nivells. D'aquesta forma podem representar cada mostra amb un nombre finit de bits. Aquest procés d'arrodoniment introdueix evidentment un error. Aquest error però es pot considerar petit si el nombre de nivells de representació és suficientment gran (més nivells requereixen però un nombre més gran de bits).

Pel que fa al mostratge, els conversors A/D prenen les mostres amb freqüència de mostratge constant $f_s = \frac{1}{T_s}$. Una sinusoide amb freqüència inferior a $0{,}5 f_s$ es podrà digitalitzar i recuperar després a partir de les mostres digitals, quan tornen a convertir el senyal digital en analògic al conversor D/A. En canvi, una sinusoide amb freqüència superior a $0{,}5 f_s$ no es podrà distingir d'una altra de freqüència inferior a $0{,}5 f_s$. Aquest fenomen es denomina aliàsing. Quan en un senyal estan presents freqüències inferiors i superiors a $0{,}5 f_s$, l'amplitud que recuperem, amb el procés D/A, per a les freqüències d'interès (inferiors a $0{,}5 f_s$) no serà correcta perquè estarà afectada pels components d'alta freqüència.

Per evitar el problema descrit a l'apartat anterior es fa servir un filtre pas baix (filtre antialiàsing) abans del conversor A/D. Aquest filtre té com a objectiu preservar la banda de freqüències d'interès atenuant força totes les freqüències per sobre de $0{,}5 f_s$. Així, ens assegurem que el senyal a digitalitzar amb freqüència de mostratge f_s no tingui components per sobre de $0{,}5 f_s$. L'atenuació requerida per a freqüències superiors a $0{,}5 f_s$ depèn de l'error que podem tolerar a causa de l'aliàsing i això està relacionat amb l'error introduït a la quantificació, tot i que ara no entrarem en més detalls perquè aquest tema l'estudiareu en futurs cursos de la titulació.

4 Enunciat

Objectiu del treball

L'objectiu del treball és dissenyar un filtre *antialiàsing* amb les següents especificacions:

- Volem un filtre analògic **actiu**, fet amb un o més Amplificadors Operacionals.
- El senyal analògic només s'ha de filtrar, no s'ha d'amplificar ni invertir.
- El **guany** entre 0 i 2 kHz ha de ser superior o igual que −3 dB.
- A 20 kHz, l'**atenuació** ha de ser com a mínim 74 dB.

4.1 Consideracions prèvies

Per fer el treball necessiteu algunes funcions contingudes a les extensions «control» i «signal» de l'Octave, que teniu instal·lades a la màquina virtual però que **no** es carreguen automàticament en iniciar Octave. Per això, tot just després d'obrir l'Octave i abans de començar a fer el treball, carregueu l'extensió executant l'ordre `pkg load control signal`.

Octave disposa d'una sèrie de funcions per calcular filtres, que faciliten enormement la tasca del dissenyador. A aquestes funcions cal passar-los els paràmetres que defineixen el filtre (ordre, freqüència de tall, etc.) i ens retornen el numerador i denominador de l'$H(s)$. Consulteu l'ajuda de les funcions i assegureu-vos de passar les opcions correctes a per tal d'obtenir el filtre desitjat.

Per conveniència vostra **a continuació es mostren alguns exemples d'ús de les funcions d'Octave** que haureu d'utilitzar:

- Per obtenir els polinomis del numerador i denominador dels filtres analògics **passabaixes** de tipus Butterworth o Txebixov de tipus I utilitzarem:
  ```
  [num,den]=butter(n,wp,'s')
  [num,den]=cheby1(n,Rp,wp,'s')
  ```

  El paràmetre 's' indica a Octave que ha de calcular un filtre analògic en el domini transformat de Laplace. És essencial posar-lo perquè, si no ho fem, Octave entén que es vol obtenir un filtre digital, els quals s'estudien en cursos posteriors. Les freqüències s'indiquen en rad/s, essent «`wp`» la freqüència més alta de la banda de pas i «`wa`» la freqüència més baixa de la banda atenuada. Per al filtre de Butterworth, el paràmetre «`Rp`» de la plantilla està fixat a 3 dB i no el podem escollir. Per tant, «`wp`» és la freqüència de tall. Per al filtre Txebixov tipus I, en canvi, podem escollir del valor de «`Rp`» tot i que si volem comparar filtres és convenient fer $R_p = 3$ i així ω_p també serà la freqüència de tall.

  Les funcions d'Octave sempre retornen un filtre amb $H_{\text{màx}} = 1$. Si volem un valor diferent, haurem de multiplicar en numerador per la constant desitjada.

- Per obtenir la resposta temporal i freqüencial dels filtres:
  `H=tf(num,den)`
  `step(H)`
  `bode(H)` o bé `[mag,fas,w]=bode(H,[w1 ... wn])`

- Per obtenir el mòdul i el logaritme d'un nombre o vector amb elements complexos:
  `abs()`, `log10()`.

- Per fer gràfiques:
  `semilogx(f,G)`, `grid`, `title('El filtre')`, `xlabel('Freqüència')`, `ylabel('Guany')`.

Per més informació sobre cada funció, podeu fer «`help funció`» sense paràmetres. Per exemple: «`help butter`».

4.2 Passos a seguir

Es demana[2]:

1. Dibuixeu la plantilla del filtre a partir de les especificacions indicades a l'enunciat. Indiqueu els valors d'amplificació en escala lineal i, entre parèntesis, el guany en dB.

A continuació anem a familiaritzar-nos amb les funcions i procediments de càlcul i representació de filtres. Abordarem primer un cas senzill i posteriorment ho repetirem a fi de poder comparar filtres.

2. Obteniu la funció de xarxa d'un filtre passabaixes de Butterworth d'ordre $n = 2$ amb guany -3 dB a $f_p = 2$ kHz. `butter`

3. Amb l'ajut de l'ordre `bode` calculeu els guanys a les freqüències $f = 0$ Hz, $f = f_p$ (2 kHz) i $f = f_a$ (20 kHz). Justifiqueu per quin motiu aquest filtre **NO** satisfà les especificacions demanades. `tf` `bode`

4. Repetiu el procediment per ordres creixents del filtre, i completeu la taula 1. Adjunteu el codi d'Octave emprat per obtenir la informació demanada.

Taula 1: Filtre de Butterworth

Ordre	Guany en contínua	Guany a $f_p = 2$ kHz	Guany a $f_a = 20$ kHz
2			
3			
4			
5			

5. Repetiu els passos 2, 3 i 4 però ara per un filtre Txebixov tipus I amb $R_p = 3$ dB i $f_p = 2$ kHz. `cheby1`

Taula 2: Filtre de Txebixov tipus I

Ordre	Guany en contínua	Guany a $f_p = 2$ kHz	Guany a $f_a = 20$ kHz
2			
3			
4			
5			

6. A partir de les taules anteriors, indiqueu quin és l'ordre mínim per a cada tipus de filtre (Butterworth i Txebixov de tipus I) per tal de complir les especificacions del filtre anti-aliasing que volem dissenyar.

7. Per demostrar que efectivament es compleixen les especificacions amb els ordres especificats a l'apartat anterior, representeu amb detall el guany dels dos filtres escollits en funció de

[2] A la dreta del text en color blau trobareu les ordres d'Octave que poden ser útils en cada pas (recordeu que per cada ordre podeu fer «`help ordre`» per saber com cal invocar-la).

la freqüència en Hz. Adjunteu les gràfiques i expliqueu les diferències observades entre ambdues respostes freqüencials. A continuació es detallen els diferents passos a seguir:

- Genereu un vector de freqüències, f, entre 1 Hz i 100 kHz amb escalat logarítmic entre mostres. `logspace`
- Obteniu el guany (dB) com $20\log_{10}|H(\mathrm{j}\omega)|$. `bode` `log10`
- Representeu la gràfica de guany en funció de la freqüència utilitzant un escalat lineal per l'eix d'ordenades i un de logarítmic per l'eix d'abscisses. `semilogx`

Podeu pintar les gràfiques utilitzant Octave, però el resultat queda molt millor si exporteu a un fitxer de text les dades que voleu pintar, i les importeu al *Grace*. Per exemple, si volguéssiu pintar l'evolució de dues funcions H_1 i H_2 en funció de la freqüència, faríeu el següent: `save`

```
% Em creo una variable auxiliar amb els vectors columna a exportar
% Si són vectors fila, primer els hauré de transposar
aux=[f H1 H2]
% Exporto aquesta variable a un fitxer de nom «dades.dat»
save -ascii dades.dat aux
```

Finalment importeu les dades al Grace amb l'ordre «`xmgrace -nxy dades.dat`» i les manipuleu de la forma habitual.

De tota manera, si les gràfiques són correctes i es poden interpretar bé, és indiferent el programa que utilitzeu per generar-les.

8. Dissenyeu un circuit (estructura i valor dels components) per tal d'implementar el filtre de Txebixov tipus I que verifiqui les especificacions amb el mínim nombre possible d'amplificadors operacionals. Feu servir el procediment i estructures descrites a la secció 2.3. En cas que calgui emprar cèl·lules de segon ordre, utilitzeu la estructura MFB (*Multiple FeedBack*) convenientment adaptada a les necessitats del problema.

Important

No oblideu consignar tots els passos intermedis, inclosa l'obtenció de l'$H(s)$, en el fitxer PDF que heu d'entregar.

9. Finalment, feu una simulació amb gnucap per tal de verificar el comportament del circuit dissenyat. Adjunteu al document la gràfica obtinguda per simulació, i pugeu al Moodle el fitxer «`.cir`» que heu usat per obtenir-la.

5 Presentació del treball

El treball el realitzareu atenent-vos a les següents directrius:

- Realitzareu el treball en processador de textos (us suggerim LibreOffice), incloent les fórmules. Si la incorporació de fórmules us resulta molt complicada, aquest manual us pot ajudar. També podeu consultar nombrosos *tutorials* en vídeo que trobareu a internet. Si us cal un manual complet sobre l'editor d'equacions del LibreOffice, el trobareu aquí (en anglès). **No s'acceptarà en cap cas la inclusió de fulls escrits a mà i fotografiats o escanejats**.
- En el camp «**Títol**» de la tramesa posareu únicament el vostre **DNI/NIF**.

- En el camp **«Adjunció»** agregareu 3 fitxers:

  1. La resolució del treball en un fitxer **en format PDF**. No s'acceptaran altres formats.
  2. Un fitxer de text, sense comprimir i amb extensió «`.cir`», amb el codi que heu utilitzat per fer la simulació que es demana al punt 9.
  3. Un fitxer de text, sense comprimir i amb extensió «`.m`», amb el codi Octave que heu utilitzat per fer els càlculs que es demanen als punts 2 a 7.

  Tant el codi Octave com el codi GnuCap que entregueu s'han de poder executar **sense errors** i han de donar els **mateixos resultats** que consigneu al document PDF.

- Tot i que demanem que ho entregueu en uns fitxers apart, en el document PDF **haureu d'incorporar també els codis** que heu utilitzat per fer els càlculs en Octave i en la simulació amb Gnucap, fent els comentaris que cregueu convenients en cada cas. **Podeu fragmentar el codi si ho creieu convenient** per tal de fer més amenes i entenedores les explicacions. D'aquesta manera el PDF queda autocontingut, i els fitxers de codi entregats a banda faciliten la comprovació per part dels correctors del treball.

- Les gràfiques heu d'incloure al document hauran d'estar convenientment **etiquetades**, amb les **llegendes** corresponents si és el cas i tenir prou qualitat per poder llegir els valors amb precisió suficient.

Glossari

amplificació

L'amplificació d'un circuit o sistema és el **quocient** entre el valor de la magnitud de sortida i el valor de la magnitud d'entrada que s'hagin definit.

En el context dels circuits electrònics, les variables d'entrada i sortida involucrades en el càlcul de l'amplificació són sempre tensions, corrents o potències, i ambdues són del mateix tipus, per la qual cosa l'amplificació és una magnitud adimensional. En funció del tipus escollit parlarem d'amplificació de tensió (A_v), amplificació de corrent (A_i) o amplificació de potència (A_p).

Si les variables d'entrada i sortida tenen dimensions diferents, ja no parlem d'amplificació sinó d'altres conceptes com ara transresistència o transconductància.

Butterworth

Prenen el nom del físic britànic Stephen Butterworth, que els va descriure per primera vegada.

maximalment plana

Dit d'aquella corba en la que, en algun punt, les seves n primeres derivades són zero. Això fa que els filtres amb resposta maximalment plana presentin la corba més suau possible de tots els filtres d'ordre equivalent. Els filtres de Butterworth presenten per disseny una corba **d'amplificació** maximalment plana.

plantilla

La plantilla d'un filtre és un diagrama on s'especifiquen de forma gràfica les zones per on és acceptable o no que passi la resposta freqüencial del filtre

Txebixov

Prenen el nom del matemàtic rus Pafnuti Txebixov[3], que va descriure una família de polinomis que presenten oscil·lacions afitades en una certa regió i que per aquest motiu s'utilitzen en filtres que presenten una resposta oscil·lant o *arrissada*.

[3]El cognom d'aquest matemàtic rus (Чебышёв) s'ha transliterat de formes molt variades a les llengües occidentals. Els anglesos en diuen «Chebyshev» i per aquest motiu la funció Octave que genera aquest tipus de filtres es diu «cheby». En castellà es translitera normalment com a «Chebyshov» i en català, «Txebixov».