Treball de Fi de Grau

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials (GETI)

Aplicacions interactives per la docència del control automàtic

MEMÒRIA

18 de gener de 2021

Autor: Isaac Arumi

Director: Ramon Costa

Convocatòria: Gener 2021

ETSEIB

Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona

UPC

Resum

L'ésser humà sempre ha utilitzat la representació d'idees i conceptes pel seu enteniment i per millorar la comprensió de l'entorn. Així doncs, aquest projecte plasma aquesta idea adaptant-la en l'actualitat, realitzant un conjunt d'aplicacions per agilitzar la docència de l'assignatura de control automàtic. A partir de gràfics i les respectives interaccions amb els mateixos i les seves variables es pretén representar diferents conceptes de l'assignatura.

Les aplicacions realitzades en aquest projecte són una versió actualitzada d'un projecte anterior de la mateixa escola. De manera que s'ha buscat com utilitzar-les de forma més intuïtiva, també s'han afegit conceptes, així com s'ha millorat l'estètica de les aplicacions per fer-ne un disseny més actual.

Per cada aplicació s'ha realitzat un document, anomenat fitxa, que han de servir d'ajuda a l'estudiant i a qualsevol persona que vulgui utilitzar l'aplicació. En aquestes s'hi especifica una explicació de la teoria que hi ha al darrere de l'aplicatiu, la disposició de la pantalla, els paràmetres que hi ha i com diferenciar-los i la interacció amb l'aplicació.

En conclusió, l'objectiu de cada una d'aquestes aplicacions és ajudar a la comprensió d'un concepte de l'assignatura. La representació instantània de les figures i la interacció amb elles permet que l'estudiant vegi les relacions entre diferents variables, i així reforçar i agilitzar els conceptes obtinguts a partir de la teoria.

Índex

1 Prefaci **5**
1.1 Origen del projecte 6
1.2 Requeriments previs 6

2 Introducció **7**
2.1 Objectius del projecte 7
2.2 Abast del projecte 7

3 La interactivitat en el camp de la docència **9**
3.1 La rellevància que té la interactivitat en la docència del control automàtic 9

4 *Sysquake*, un programa pensat per interactuar **11**

5 Característiques generals dels aplicatius desenvolupats **13**
5.1 Objectius dels aplicatius 13
5.2 Procediment d'elaboració dels aplicatius 13
5.3 Estructura dels aplicatius 14
5.4 Elements dels aplicatius 15

6 Característiques generals de les fitxes desenvolupades **17**
6.1 Estructura de les fitxes 17

7 Justificació de l'elecció de les aplicacions **19**

8 Fitxes de les aplicacions **21**
8.1 Fitxa 1: Resposta temporal de sistemes d'ordre n en temps discret 21
8.1.1 Explicació de la teoria 21
8.1.2 Configuració de la pantalla 22
8.1.3 Interactivitat amb l'aplicatiu 24
8.1.4 Glossari d'elements 25
8.2 Fitxa 2: Resposta freqüencial de sistemes en temps discret i transformació bilineal 27
8.2.1 Explicació de la teoria 27
8.2.2 Configuració de la pantalla 28
8.2.3 Interactivitat amb l'aplicatiu 30
8.2.4 Glossari d'elements 31
8.3 Fitxa 3: Compensador d'avanç i retard de fase amb el mètode exacte 33
8.3.1 Explicació de la teoria 33
8.3.2 Configuració de la pantalla 34
8.3.3 Interactivitat amb l'aplicatiu 38
8.3.4 Glossari d'elements 39
8.4 Fitxa 4: Disseny d'un compensador dead-beat 41
8.4.1 Explicació de la teoria 41
8.4.2 Configuració de la pantalla 42
8.4.3 Interactivitat amb l'aplicatiu 43
8.4.4 Glossari d'elements 44

9 Comparació amb les versions antigues **47**
9.1 Resposta temporal de sistemes d'ordre n en temps discret 47

9.2 Resposta freqüencial de sistemes en temps discret i transformació bilineal 48
9.3 Compensador d'avanç i retard de fase amb el mètode exacte 49
9.4 Disseny d'un compensador dead-beat 51

10 Pressupost **53**

11 Estudi de l'impacte ambiental **55**

12 Conclusions **57**

13 Referències bibliogràfiques **59**

Índex de figures

1 Aspecte de l'aplicatiu 1 anterior al projecte 47
2 Aspecte de l'aplicatiu 1 posterior al projecte 47
3 Aspecte de l'aplicatiu 2 anterior al projecte 48
4 Aspecte de l'aplicatiu 2 posterior al projecte 49
5 Aspecte de l'aplicatiu 3 anterior al projecte 50
6 Aspecte de l'aplicatiu 3 posterior al projecte 50
7 Aspecte final de l'aplicatiu 4 51

Índex de taules

1 Distribució de la pantalla amb quatre figures 14
2 Distribució de la pantalla amb sis figures 14
3 Resum del pressupost 54

1 Prefaci

L'educació és un dels sectors que estan patint més canvis a la societat actual, respecte a èpoques passades. Anteriorment, les lliçons dels diferents temaris de les assignatures es realitzaven a partir de classes magistrals, o també a partir de l'autoaprenentatge mitjançant llibres fonamentalment teòrics. En els nous temps que corren, la docència ha canviat molt, els docents han desenvolupat tècniques per fer més eficaç la seva feina a partir d'involucrar més a l'alumne a les sessions de classe i així desenvolupar una interacció alumne-professor.

Les noves tecnologies han estat al darrere d'aquest canvi, cada vegada és menys freqüent trobar una escola que no tingui una pissarra interactiva i diferents recursos com les apps estan a l'ordre del dia a diferents escoles d'arreu. I és que realment és lògic pensar que recursos com la visualització instantània d'algun concepte ajuda a processar certa informació. Per posar un exemple senzill, és habitual que un professor en una sessió de teoria complementi les transparències amb algun vídeo, per observar un fenomen o quelcom altre. Això és degut al fet que en un vídeo es poden percebre múltiples accions que en una imatge és més difícil de visualitzar.

Ara bé, en el cas que pertoca aquest projecte és particular. Assignatures com la del control automàtic és més complicat mostrar un concepte a través d'un vídeo per la pròpia essència de l'assignatura. Els conceptes són abstractes i l'entorn on es treballa canvia constantment, treballant *"en el món de la z"* o bé *"en el món de la ω"*, ubicant les variables en diferents plans i totes les transformacions que hi ha al darrere. En definitiva, és un entorn que al començament és complicat situar cada element al seu lloc.[1]

A causa d'aquesta particularitat de la matèria, diferents doctors i professors durant aquestes últimes tres dècades han implementat eines informàtiques pel desenvolupament de la docència d'aquestes assignatures. Començant pel projecte *"Eines Interactives per l'Educació del control Automàtic"* liderat pel Professor K.J.Åström als anys noranta del segle passat, que va servir de referència a moltes idees i conceptes que es van realitzar posteriorment. Les *ICTools*, que és com es coneixien aquest conjunt d'eines, es van implementar al *Matlab* 5.3 i eren de lliure distribució, fet que va ajudar al seu desenvolupament.

Arran d'això sorgeix *Sysquake*, un nou llenguatge informàtic basat en el *Matlab*, desenvolupat per Yves Piguet. En aquest s'incorpora funcionalitats que faciliten l'escriptura per aplicacions interactives. Per això, *Sysquake* és l'entorn que s'utilitza en aquest projecte per desenvolupar els diferents aplicatius.

A partir d'aquí, s'ha intentat millorar algunes aplicacions desenvolupades anteriorment a l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona (ETSEIB) per un alumne del grau. Per així, actualitzar-ne el contingut i facilitar la interacció amb aquestes, agilitzant el procés d'aprenentatge per l'alumnat i assolint el coneixement necessari a través de les mateixes aplicacions.

Finalment, espero que el treball realitzat en aquest projecte sigui d'ajut per a futurs estudiants i docents de l'assignatura de control automàtic.

1.1 Origen del projecte

El present projecte sorgeix de la proposta per part del departament d'Enginyeria de Sistemes, Automàtica i Informàtica Industrial (ESAII), el qual van posar a disposició el projecte a partir de *borsa de treballs de fi de grau i màster de la UPC*. Per la meva part, em vaig interessar en el projecte a causa de l'interès sorgit en assignatures com Dinàmica de Sistemes i Control Automàtic estudiades en el grau, així com l'interès en la programació informàtica. I destacar la pròpia motivació per la complexitat del projecte i la satisfacció de realitzar quelcom amb una finalitat tan important com l'aprenentatge dels futurs enginyers.

1.2 Requeriments previs

Per la pròpia condició del projecte, els requeriments previs per la realització del mateix ha estat, sobretot, el coneixement sòlid de la teoria de l'assignatura de Control Automàtic, i no només la seva aplicació en problemes. El fet d'haver realitzat aquesta assignatura en el mateix grau ha estat clau per poder identificar quines necessitats i mancances hi havia a cada aplicació desenvolupada.

Per altra banda, el coneixement del llenguatge de *Sysquake*, que tot i partir del llenguatge de *Matlab*, ha estat necessari un aprenentatge intensiu previ al projecte, ja que amb els coneixements obtinguts en el grau eren insuficients per dur a terme les aplicacions satisfactòriament.

2 Introducció

La teoria del control automàtic té un cert grau de complexitat per la seva pròpia condició. El fet de relacionar conceptes tan abstractes com les matemàtiques amb el món físic i el que comporta en el disseny de sistemes, implica una dificultat afegida respecte a la majoria d'assignatures impartides en el grau. En aquest projecte s'han desenvolupat algunes aplicacions interactives per la docència del control automàtic, de tal manera que aquestes aportin una visió més panoràmica d'alguns dels conceptes més rellevants de l'assignatura. A causa de la situació actual de la Covid-19, ara més que mai els alumnes han d'utilitzar recursos més autodidàctics, ja que la relació alumne-professor ha esdevingut més distant, aquestes aplicacions seran d'ajuda a molts dels presents i futurs estudiants de l'assignatura.

Per cada aplicació interactiva creada, s'ha escrit la seva corresponent fitxa tècnica que servirà a l'estudiant entendre millor el funcionament de l'aplicació. En aquesta hi haurà els conceptes teòrics corresponents, així com l'explicació dels diferents elements que apareixen en pantalla i com interactuar amb aquests.

El fet de poder interactuar i observar els canvis simultanis en modificar les variables de l'aplicació, permet que l'estudiant relacioni alguns conceptes de manera més clara, entenedora i ràpida. De tal manera que tingui un aprenentatge més eficient, que el cap i a la fi és la finalitat del projecte.

2.1 Objectius del projecte

L'objectiu principal d'aquest projecte és millorar algunes de les aplicacions del projecte iniciat el 2008 per un alumne d'aquest mateix grau. De tal manera que les aplicacions s'adeqüin a l'actualitat i així inviti més fàcilment la utilització d'aquestes, ja que en aquest període de temps la tecnologia i la manera d'interactuar amb les pantalles ha tingut un canvi en majúscules.

A més, es volen redissenyar les aplicacions per uniformitzar-ne l'estructura, de tal manera que totes elles tinguin una interactivitat intuïtiva i que a l'hora d'utilitzar-les l'estudiant no tingui problemes.

Al cap i a la fi és crear una eina útil que estigui a l'abast dels futurs estudiants per així agilitzar el seu aprenentatge de l'assignatura. Ja sigui de manera autodidacta o com a eina utilitzada pel docent que imparteix el temari.

2.2 Abast del projecte

El projecte elaborat està pensat, sobretot, per aportar nous recursos a la docència del control automàtic dins l'Escola Tècnica d'Enginyeria Industrial de Barcelona (ETSEIB) impartida pel departament d'ESAII, ja que és on s'ha realitzat l'estudi del projecte. Tot i això, també pot ser útil per la docència de la mateixa assignatura o assignatures del mateix camp fora l'escola.

3 La interactivitat en el camp de la docència

Un exemple:

En Joan, no ha vist mai una calculadora i, com és evident, tampoc n'ha utilitzat una. Ara bé, en Joan que li agrada revisar el diccionari de l'Institut d'Estudis Catalans, s'ha llegit la seva definició una vegada i una altra.

Calculadora. *Aparell o dispositiu que permet fer determinades operacions aritmètiques, trigonomètriques, càlculs o altres operacions específiques.*

On, per cert, les paraules *trigonomètriques* i *aritmètiques* no sap el que signifiquen. També té un manual de com utilitzar una calculadora.
Així doncs, arriba dia que en Joan té per primera vegada una calculadora al davant. Què passarà? El més probable és que tardi una estona per identificar-la com a tal. El fet és que per molt que ell sàpiga la definició de memòria, no t'aporta el coneixement suficient per poder reconèixer-la. En Joan, que és curiós, començarà a utilitzar-la amb l'ajuda del manual, i finalment, el cap d'un cert temps sabrà com manipular la majoria de funcions de l'aparell.

En aquest senzill exemple es veu clar la influència de la interactivitat en el procés d'aprenentatge. Per això, durant aquests últims anys s'ha desenvolupat tant les aplicacions interactives en l'àmbit de la docència i han tingut tant èxit. Un clar exemple és el Kahoot que la seva utilització cada vegada és més que habitual ja sigui a les escoles, instituts i universitats.

Hi ha un altre tipus d'interactivitat en el camp de la docència que encara no se n'ha parlat; la interactivitat professor-alumnat. Segurament és el factor que influeix més a l'estudiant en la motivació per aprendre en cert camp. No és d'estranyar que una persona enfoqui la seva carrera professional cap a un camp o un altre a causa de la repercussió que ha tingut, sigui cap a bé o cap a malament, un professor en una matèria. És per això, que és molt important que s'utilitzin eines en l'ensenyament que ajudin i permetin a l'alumnat un mètode d'aprenentatge més visual i interactiu. En cap moment es vol donar a entendre que l'ensenyament de teoria no sigui important, el contrari, les aplicacions interactives pretenen ser una eina pel docent i per l'alumne per tal de simpatitzar certs continguts que per dificultat o per quantitat són més incòmodes d'estudiar.

També cal destacar que la simultaneïtat que aporten les aplicacions interactives fomenta l'agilització de l'aprenentatge. Fet que l'estudiant agraeix, ja que hi ha moments que la càrrega de matèria a estudiar per part de les diferents assignatures pot ser un veritable problema. Així doncs, aquestes aplicacions interactives estan pensades perquè els alumnes els hi sigui més fàcil el fet d'aprendre els coneixements teòrics de la matèria mitjançant la interactivitat i que un cop aprovat l'examen final de l'assignatura tinguin els coneixements necessaris com per poder exercir en el món laboral. [2]

3.1 La rellevància que té la interactivitat en la docència del control automàtic

Ara, un exemple equivalent a l'assignatura del control automàtic:

En Joan, ara estudiant del grau a l'ETSEIB, ha començat a cursar l'assignatura de control automàtic i en una de les primeres sessions llegeix:

Teorema del mostratge. *Si un senyal no conté components freqüencials per sobre de ω_c rad/s, quedarà completament caracteritzat pels seus valors en els instants del mostratge kT si T satisfà*

$$T < 2\pi/2\omega_c = \pi/\omega_c$$

o, equivalentment,

$$\omega_s = 2\pi/T > 2\omega_c$$

Segurament, en Joan tindrà una idea vaga del significat del teorema, però en cap moment l'ús que té a la pràctica i molt menys tindrà una representació gràfica mental d'aquest. I sí, és evident que a classe es realitzaran alguns exemples per poder entendre'l millor i, finalment, dedicant una certa quantitat d'hores entendrà els matisos i la utilització del teorema.
Per altra banda, si el professor quan explica el teorema, mostra una aplicació on a mesura que canvia les variables s'experimenten uns canvis en les gràfiques representades, en Joan entendrà més ràpidament i de forma més clara el significat del teorema i la seva importància dins la matèria.

El que es vol donar a entendre amb aquest exemple és que l'assignatura de control automàtic, com d'altres impartides en el grau tenen un factor clarament matemàtic i imaginari. Això provoca que el seu aprenentatge, generalment, suposi una dificultat afegida, ja que molts conceptes són difícils de visualitzar i imaginar. Per això, la rellevància que té la interactivitat en la docència d'aquesta assignatura té un punt d'afegit i, requereix més urgència que en altres camps de l'enginyeria.

Tot i això, no es pot entendre la interactivitat sense la visualització, i és que molts dels conceptes i procediments del control automàtic presenten una gran quantitat de continguts visuals que admeten una presentació gràfica intuïtiva. Alguns exemples clars poden ser la representació de la resposta temporal, els diagrames de Bode i Nyquist en la resposta freqüencial, el pla de pols i zeros (pla z), entre d'altres. El fet de voler percebre aquests conceptes matemàtics d'una manera visual, sigui per aprendre'n el contingut o per transmetre'l és una cosa totalment natural, a cas un no s'imagina quelcom quan en fa esment? Per tant, la visualització és una eina molt vàlida per a tot alumne i professor per compartir el coneixement.

Per resumir, la interactivitat en la docència del control automàtic cada dia està agafant més importància i amb raó. Els càlculs i representacions de diferents conceptes de la matèria, permeten veure relacions entre variables i que poden representar diferents versions d'una realitat. La comprensió d'aquestes relacions és una de les claus per aconseguir un bon aprenentatge dels conceptes bàsics i així permetre a l'alumne tenir cert coneixement per realitzar dissenys de sistemes de control.[3]

4 *Sysquake*, un programa pensat per interactuar

Per dur a terme el desenvolupament de les diferents aplicacions interactives d'aquest projecte s'ha utilitzat el programa *Sysquake*, adquirit pel departament d'ESAII de la UPC.

Com és evident, al mercat hi ha una gran quantitat de programes i eines que permeten realitzar la tasca que s'ha dut a terme en el present projecte. Tot i això, s'ha escollit *Sysquake* com a eina per implementar les aplicacions, ja que presenta un seguit de característiques seguidament esmentades que s'ajusten millor a la finalitat del projecte.

Segons la mateixa pàgina web del desenvolupador es diu que: *Sysquake* és una eina orientada a la simulació i a la visualització de dades científiques. A través de l'ús de gràfics interactius, Sysquake proporciona eines necessàries per a la resolució de problemes matemàtics complexos. [4]

En aquest sentit, *Sysquake* s'adapta millor a les necessitats del projecte per davant d'altres programes més coneguts, com per exemple *Matlab/Simulink*. Tot i això, el llenguatge de programació de *Sysquake* és majoritàriament compatible amb *Matlab*, fet que n'ha facilitat el seu aprenentatge, ja que en el grau és un llenguatge que s'utilitza freqüentment.

Per destacar algunes diferències entre ambdós programaris, la més significativa és la manipulació interactiva dels gràfics. Els gràfics amb *Matlab* són computacionalment més costosos amb una jerarquia d'objectes més complicada. Encara que teòricament és factible, és lenta i incòmode d'utilitzar. Una altra diferència important és la facilitat de desenvolupament, ja que *Sysquake* permet desenvolupar una interfície d'usuari raonable, amb menús i botons més fàcilment.

El llenguatge utilitzat per *Sysquake* permet escriure aplicacions de control d'una certa dificultat pel coneixement de conceptes i tècniques de control. Està basat en LME (Lightweight Matrix Engine), un intèrpret especialitzat en el càlcul numèric. Només es requereix el codi necessari per visualitzar les figures i manipulacions de processat de l'usuari. El complet accés al sistema de fitxers permet intercanviar dades amb altres aplicacions.

Per l'estil d'aplicacions que es volen dur a terme és necessari una integració entre l'ajust dels paràmetres, l'anàlisi de resultats i la integració del càlcul numèric, per això agafa protagonisme el fet que es pugui minimitzar al màxim possible el temps d'execució entre aquests. Aquesta és una de les qualitats principals del *Sysquake*, fet que la utilització del programa sigui l'òptima. Ja que aquest permet actualitzar els gràfics a temps real a mesura que canvien les variables i els paràmetres directament manipulats del sistema.

També cal destacar el manual que incorpora el mateix programa, ja que en facilita el seu aprenentatge a través dels anomenats SQ Files, que han servit d'inspiració pel desenvolupament d'alguna de les aplicacions del present projecte. *Sysquake* utilitza fitxers pels seus programes, fet que permet utilitzar qualsevol editor de text i així intercanviar dades amb altres aplicacions. [5]

Finalment, cal destacar que el fet més important pel que s'ha escollit el *Sysquake* com a programari per desenvolupar les aplicacions interactives del present projecte, a part de tots els beneficis esmentats anteriorment, es basa en la premissa del propi projecte. Al cap i a la fi, el que s'ha realitzat és una actualització d'alguns programes ja creats anteriorment, aquests es van desenvolupar amb *Sysquake*, per tant és lògica la seva utilització, bàsicament per poder reciclar

la feina realitzada anteriorment.

5 Característiques generals dels aplicatius desenvolupats

En aquest apartat s'explicarà diferents aspectes pel que fa a les aplicacions desenvolupades. Com ara quin ha estat el procediment emprat per realitzar les respectives aplicacions desenvolupades, quina estructura segueixen, els elements i els objectes interactius que s'hi poden trobar, etc.

5.1 Objectius dels aplicatius

Com ja s'ha explicat a la introducció d'aquest projecte, l'objectiu principal d'aquestes aplicacions interactives és que les puguin utilitzar els estudiants de l'assignatura de control automàtic, per això aquestes han de ser intuïtives i fàcils per treballar-hi. Amb aquesta base, s'han obtingut unes premisses principals que han servit de punt de partida per la realització dels aplicatius. Algunes d'aquestes han estat:

- L'aplicació ha de servir per fer més entenedor un concepte que l'estudiant no té clar.
- La majoria de les vegades que s'utilitzin l'estudiant no tindrà cap docent per demanar dubtes.
- La idea i els conceptes de l'aplicació s'ha de transmetre ràpidament, ja que si no, l'usuari deixarà d'utilitzar-la per falta d'efectivitat.
- Mantenir un codi de colors i d'elements per tal de facilitar la relació de conceptes de les diferents aplicacions.
- Si l'usuari està familiaritzat amb l'entorn que treballa, serà més còmode i fàcil entendre els conceptes, per això és necessari que les aplicacions tinguin certa semblança entre si.

5.2 Procediment d'elaboració dels aplicatius

El procediment emprat per realitzar cada una de les diferents aplicacions, ha estat el mateix, per així seguir una metodologia de treball eficient. Aquest procediment només s'ha hagut d'estudiar per a la primera aplicació, ja que un cop establerta la metodologia de treball ha servit per totes.

Recerca de la teoria
Per començar en una aplicació, primerament s'ha realitzat una recerca teòrica per poder valorar totes les variables que intervenen en un tema concret, els gràfics més rellevants i les relacions entre els diferents paràmetres. D'aquesta manera s'ha refrescat la memòria de les diferents equacions involucrades per així tenir una primera visió panoràmica del contingut necessari que ha d'haver-hi a l'aplicatiu.

Figures i plans
Amb la teoria ja aclarida, el següent pas ha estat realitzar un esbós a mà alçada de les diferents il·lustracions que són imprescindibles perquè l'aplicatiu tingui valor propi. És important que en aquest punt de l'elaboració no es vulgui plasmar més gràfics o plans dels necessaris, ja que això pot provocar confusió a l'usuari que utilitza l'aplicació, que podria veure algunes relacions *a priori* inexistents. Per altra banda, si falta alguna il·lustració important, l'aplicatiu deixaria de tenir valor propi, ja que l'usuari podria no percebre certes relacions entre variables que, en definitiva, és la causa del projecte.

Implementació del codi font
El mateix programa de *Sysquake* disposa d'un editor de text que et permet guardar el codi amb l'extensió (*arxiu.sq*), la qual cosa ha ajudat a agilitzar el procés d'elaboració del codi font. Abans, però, s'ha realitzat una lectura del codi font de l'aplicació equivalent anterior, d'aquesta manera s'ha pogut observar el treball realitzat anteriorment i tenir una segona visió de com pot ser l'aplicatiu. Alguns fragments d'aquests codis font s'han utilitzat per poder realitzar el nou, per així reduir temps a l'hora d'elaborar-los.
En aquest punt de l'elaboració s'implementen totes les relacions de les variables a partir de les diferents equacions i funcions natives del propi programa, també s'elaboren les il·lustracions i les diferents interactuacions que es volen.

Execució i retocs finals
Aquest punt del procés va molt lligat a l'anterior, ja que constantment s'ha anat executant el codi font, per així observar si el resultat vist en pantalla és realment el que es vol aconseguir a partir d'aquest. I de la mateixa manera passa amb els errors i retocs de l'aplicació, de mica en mica, a mesura que va avançant el desenvolupament del codi font, es van ajustant paràmetres i possibles errors que puguin sorgir. L'aplicatiu definitiu es guarda amb l'extensió *arxiu.exe*, perquè l'usuari que hagi de manipular l'aplicació no necessàriament hagi de tenir el *Sysquake* instal·lat a l'ordinador.

Fitxa
Finalment, es redacta un document que posteriorment serà guardat amb extensió *arxiu.pdf*. En aquest, s'hi dipositarà tota la informació necessària i ben ordenada per l'ús de l'aplicatiu. Explicant cada un dels paràmetres que hi apareixen, com interactuar-hi i una breu descripció de tota la teoria que hi ha al darrere de l'aplicatiu. L'accés a aquesta fitxa es podrà realitzar des del propi aplicatiu.

5.3 Estructura dels aplicatius

Cada aplicació s'ha estructurat de manera similar, per així obtenir una certa homogeneïtat dins el mateix projecte. És evident que cada aplicació tracta temes diferents de l'assignatura i les figures que apareixen no seran les mateixes per a totes les aplicacions. A la taula 1 es pot observar el patró que segueix la distribució de les aplicacions amb quatre figures.

Observació dels paràmetres	Figura relacionada 1
Pla z	Figura relacionada 2

Taula 1: Distribució de la pantalla amb quatre figures

També, si el temari ho requereix, s'afegiran més figures relacionades a l'aplicatiu, a la taula 2 es pot veure la distribució resultant.

Observació dels paràmetres	Figura relacionada 1	Figura Relacionada 3
Pla z	Figura relacionada 2	Figura relacionada 4

Taula 2: Distribució de la pantalla amb sis figures

Observació de paràmetres
Les figures comunes a totes les aplicacions són *l'observació dels paràmetres* i la *pla z*. La primera ens mostra els valors de les variables i paràmetres més rellevants de l'aplicatiu, ja sigui el valor de les variables d'un compensador, marges de guany i de fase, etc. Però hi ha dos conceptes que són comuns a totes les aplicacions desenvolupades, que són:

- La funció de transferència de la planta, $G(z)$, amb el numerador i el denominador en forma polinomial.
- El temps de mostratge del sistema, T_s amb forma de *slider*.

Pla z
És la figura en la qual s'observa el *pla z*, juntament amb la posició dels respectius pols i zeros de la funció de transferència de la planta, $G(z)$. La interacció de la figura permet afegir/treure els pols i zeros, així com desplaçar-los a la posició que més interessi a l'usuari.

La resta de figures depenen del tema el qual estigui referenciada l'aplicació. Ja sigui un gràfic de la resposta temporal, un diagrama de Nyquist o per exemple un pla per observar els pols i zeros amb la transformada bilineal.

La finestra *Settings*
A l'aplicatiu hi ha una sèrie de finestres predeterminades que serveixen per ajustar aspectes purament tècnics del propi *Sysquake*, per exemple fer zoom o guardar un estat de l'aplicatiu. Però n'hi ha una que es pot manipular des del codi font, la finestra *Settings*. Aquesta eina et permet anar més enllà pel que fa a la interacció de l'aplicatiu. Per començar, s'ha utilitzat per disposar-hi una sèrie d'exemples predefinits de la planta, $G(z)$. Però es pot fer servir, per exemple, per reiniciar l'aplicatiu.

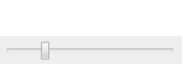
En aquesta finestra és on es disposa l'opció de *Fitxa* de l'aplicatiu, que et permet accedir al document que disposa de la informació necessària per entendre tots els conceptes de l'aplicatiu.

Però, el que fa destacar aquesta finestra, que el cap i a la fi és un mètode més d'interactuació, és que et permet introduir els valors exactes de les diferents variables. Com per exemple la funció de transferència de la planta, $G(z)$, el temps de mostratge al qual es vol observar les figures, o les restriccions necessàries per determinar les condicions d'un controlador, $C(z)$. Aquesta eina és molt potent, ja que pot permetre a l'estudiant visualitzar els paràmetres d'un exercici concret i, fins i tot, permetre autocorreccions d'exercicis proposats per l'assignatura.

5.4 Elements dels aplicatius

En els aplicatius desenvolupats hi ha una sèrie d'elements que es repeteixen, segons la seva funció i ubicació es poden distingir de dos tipus: Elements interactius associats a la selecció de valors i opcions, i elements interactius associats a la representació gràfica.

Elements interactius associats a la selecció de valors

- **Barres de desplaçament, *Sliders*,**  : Et permeten canviar el valor d'un paràmetre. Depenent del cas, l'augment i el decreixement del valor pot ser lineal o logarítmic, de manera que si s'arrossega la barra cap a l'esquerra el valor disminuirà, i cap a la dreta augmentarà. Estan delimitats per un interval finit.

- **Quadres de selecció, *Checkbox***, : Et permeten activar mitjançant un clic del ratolí, una opció determinada.

- ***Settings***: Fent referència el que s'ha esmentat a l'apartat 5.3.

Elements interactius associats a la representació gràfica

- **Pols**: Els pols d'un sistema es descriuen a partir d'una creu, $\times$.

- **Zeros**: Els zeros d'un sistema es descriuen a partir d'un cercle, $\circ$.

- **Pols de llaç tancat**: Els pols d'un sistema en llaç tancat es descriuen a partir d'un triangle, $\triangle$.

- **Altres punts**: Altres punts manipulables es descriuen amb un rombe, $\diamond$.

A part d'aquests elements hi ha algunes eines predefinides per part del programa *Sysquake* que són imprescindibles per la utilització de les aplicacions. Aquestes es troben a la barra d'eines que se situa just a la part superior de les figures de l'aplicatiu. D'aquestes eines, n'hi ha tres que mereixen una especial atenció:

- ***Manipulate***, : És l'eina principal per realitzar les interaccions dels elements interactius associats a la representació gràfica. Si aquesta opció no està seleccionada, no es pot dur a terme la interacció amb l'aplicatiu. Està seleccionada de forma nativa.

- ***Drag***, : És l'eina que et permet desplaçar pels diferents punts d'una figura, ja que el fet de tenir un espai limitat, hi haurà alguna configuració dels diagrames que no es podrà veure clarament tot el seu contingut.

- ***Zoom***, : És l'eina que et permet augmentar o reduir la visualització d'una figura en concret.

6 Característiques generals de les fitxes desenvolupades

Com ja s'ha expressat anteriorment en aquesta memòria, cada aplicació està acompanyada d'una fitxa. Aquestes estan pensades detingudament perquè realitzin la seva funció correctament i que qualsevol usuari pugui entendre el seu contingut. A més, es busca mostrar un document breu i concís per facilitar a l'usuari el contingut de la mateixa fitxa.

Cada aplicatiu conté una fitxa diferent que serveix de manual d'ús de la pròpia aplicació on es descriuen totes les seves funcionalitats. Aquestes estan pensades perquè siguin autocontingudes, és a dir, que es puguin utilitzar i entendre cada aplicatiu, sense haver-ne utilitzat un anteriorment. Per aquest motiu les fitxes poden semblar una mica repetitives, ja que hi ha alguns conceptes que són els mateixos per diferents aplicatius.

L'accés de les diferents fitxes, com ja s'ha especificat, es fa mitjançant l'opció *Fitxa* dins del menú *Settings*. Aquesta et redirigeix a un enllaç on es troba l'arxiu en format *pdf*.

6.1 Estructura de les fitxes

Cada una de les fitxes segueixen una estructura similar que es poden diferenciar en quatre grans blocs:

- Una breu explicació teòrica sobre el contingut que es pretén mostrar a l'aplicatiu.
- Explicació de les figures i elements que hi ha a la pantalla.
- Indicació de quins són els paràmetres amb els quals es pot interactuar i per tant, manipular.
- Un glossari dels diferents elements que apareixen a l'aplicació

Explicació de la teoria
En aquest primer bloc s'introdueix breument la teoria que està relacionada amb l'aplicatiu, ja siguin definicions d'alguns paràmetres, mencions alguns teoremes, o les equacions pertinents al tema en qüestió. En cap cas, l'objectiu d'aquesta explicació és substituir la teoria de classe o del llibre de l'assignatura, ja que el contingut que hi ha és el mínim per entendre l'aplicatiu i hi ha molts factors que no queden reflectits. Per complementar l'explicació teòrica s'indica com a mínim una referència a algun llibre de text perquè l'usuari pugui ampliar la teoria del tema.

Configuració de la pantalla
Aquest segon bloc explica les diferents figures que se situen a l'aplicació. Es realitza una descripció de cada una de les figures per separat indicant els paràmetres que hi surten i a la ubicació que estan per tal que no hi hagi cap dubte. Per altra banda, també s'exposa les limitacions del programa perquè no hi hagi peu a una possible confusió, per exemple que el nombre màxim de pols del sistema planta és de 6. També s'hi descriuen factors que poden aparèixer i el seu significat, per exemple si un valor no té sentit de calcular-se per certes condicions del sistema, aquest desapareix o dóna com a resultat 999,99.

Interactivitat amb l'aplicatiu
Finalment, en aquest tercer bloc, s'explica com s'ha de dur a terme la interactivitat amb cada figura de l'aplicatiu. Es defineixen els elements associats a la representació gràfica i els elements

associats a la selecció de valors, de manera que l'usuari pugui utilitzar l'aplicatiu sense cap confusió. A més a més, també es fa una breu explicació (i en algun cas un exemple) de com és aquesta interacció.

Glossari d'elements
A part dels tres blocs esmentats, també s'afegeix un glossari amb els elements que apareixen a l'aplicació. I es classifiquen segons si són específics de l'aplicació o són generals (que apareixen a altres aplicacions). D'aquesta manera l'usuari pot visualitzar i entendre de manera més immediata alguns dels paràmetres que apareixen a l'aplicació. Per cada element s'hi afegeix un símbol per reforçar aquest concepte.

7 Justificació de l'elecció de les aplicacions

Com ja s'ha exposat al llarg d'aquesta memòria, el present projecte es basa a actualitzar unes aplicacions realitzades en un projecte anterior del mateix grau. Tenint en compte que el temps per dur a terme aquest projecte és força limitat, hi ha hagut l'obligació de realitzar una tria exhaustiva de les aplicacions a millorar. En aquesta elecció s'han tingut en compte diferents aspectes. Cal destacar-ne alguns:

- **Dificultat progressiva:** Pel fet de no haver treballat anteriorment amb el llenguatge de *Sysquake*, s'han escollit els aplicatius tenint en compte la seva dificultat, de manera que la primera aplicació ha estat la més accessible, i l'última la més complexa, ja que a mesura que s'ha anat avançant aquest projecte, també es millorava la comprensió d'aquest llenguatge.

- **Incorporació de diferents camps:** L'assignatura de control automàtic té un gran ventall de camps d'aplicació, i s'han escollit les aplicacions per mostrar aquesta realitat. Així doncs, totes les aplicacions escollides estan pensades per treballar la major quantitat d'àrees possibles de l'assignatura.

Finalment, les aplicacions escollides són:

- **Resposta temporal de sistemes d'ordre n en temps discret:** Com indica el seu propi nom, aquest primer aplicatiu està pensat per reflectir la resposta temporal per sistemes d'ordre n en temps discret. S'hi mostren els paràmetres principals, plans i gràfics de la resposta temporal. Aquesta aplicació és imprescindible per entendre tota la resta, ja que és la base del control automàtic.

- **Resposta freqüencial de sistemes en temps discret i transformació bilineal:** La segona aplicació escollida, és la que expressa la resposta freqüencial de sistemes d'ordre n en el temps discret. En aquesta, es tracta la transformació bilineal i es comparen els diagrames de Bode d'aquesta transformació amb l'habitual de $z = e^{j\omega T_s}$.

- **Compensador d'avanç i retard de fase amb el mètode exacte:** Aquesta aplicació mostra el tercer bloc principal de l'assignatura: els controladors. En aquest cas, s'ha volgut fer una aplicació nova basada en un mètode exacte de resolució. Aquest, no s'imparteix a l'assignatura, ja que és un mètode difícil per resoldre manualment degut a la complexitat de les equacions. L'objectiu d'aquest aplicatiu és que l'alumnat conegui altres mètodes de resolució de compensadors més enllà dels ensenyats a classe.

- **Disseny d'un compensador dead-beat:** Aquesta aplicació vol mostrar que hi ha altres controladors a banda dels estudiats a l'assignatura de control automàtic, a més que poden tenir funcions molt diverses i de gran utilitat. En aquest cas el controlador estudiat és l'anomenat dead-beat.

8 Fitxes de les aplicacions

Al llarg d'aquest apartat es mostren el conjunt de fitxes realitzades pels diferents aplicatius.

8.1 Fitxa 1: Resposta temporal de sistemes d'ordre n en temps discret

8.1.1 Explicació de la teoria

Un senyal de temps discret correspon a una seqüència de valors. Aquesta seqüència queda definida pels valors que pren el senyal. Per indicar la posició d'un valor determinat de la seqüència, s'empra l'índex k de la forma y_k.

Els sistemes lineals d'ordre n constants es caracteritzen per una equació en diferències:

$$a_n y_{k+n} + a_{n-1} y_{k+n-1} + ... + a_1 y_{k-1} + a_0 y_k = b_m u_{k+m} + b_{m-1} u_{k+m-1} + ... + b_1 u_{k-1} + b_0 u_k$$

o per la seva funció de transferència:

$$W(z) = \frac{b_m z^m + b_{m-1} z^{m-1} + ... + b_0}{a_n z^n + a_{n-1} z^{n-1} + ... + a_0}$$

Estabilitat del sistema: Un sistema lineal de temps discret és estable sempre que tots els pols estiguin dins de la circumferència de radi 1 del pla z. També es pot observar la resposta del sistema, si aquesta tendeix a algun valor, és estable. El sistema també pot ser marginalment estable, aquesta situació ocorrerà si el pol de mòdul més gran és d'igual a 1. En aquest cas la resposta no tendirà a cap valor, però tampoc es desestabilitzarà el sistema.

Senyal graó unitari: Correspon al senyal en què tots els elements, amb $k \neq 0$, valen 1 i la resta de valors valen zero. Aquest senyal el designa μ i rep el nom de funció de *Heaveside*.

$$\mu_k = \begin{cases} 0 & \text{si } k < 0 \\ 1 & \text{si } k \geq 0 \end{cases}$$

Senyal impuls unitari: Aquest senyal val 1 en $k = 0$ i la resta de valors val 0. Es designa δ.

$$\delta_k = \begin{cases} 1 & \text{si } k = 0 \\ 0 & \text{si } k > 0 \end{cases}$$

Els pols en temps discret i els pols en temps continu tenen una relació clara $z = e^{sT}$, on T és el període de mostratge. Tenint en compte aquesta equivalència es poden observar algunes propietats del sistema a partir d'alguns paràmetres com el factor d'esmorteïment ξ i la freqüència natural ω_n.
Aquests dos valors només té sentit calcular-los si és un pol senzill $z < 0$ o si els pols dominants són pols conjugats. En el cas del pol senzill les seves expressions són:

$$\xi = \frac{-\ln \rho_1}{\sqrt{\ln^2 \rho_1 + \pi^2}}$$

i

$$\omega_n = \frac{1}{T_s} \sqrt{\ln^2 \rho_1 + \pi^2}$$

I en el cas que els pols dominants són conjugats, les expressions són:

$$\xi = \frac{-\ln \rho_1}{\sqrt{\ln^2 \rho_1 + \theta^2}}$$

i

$$\omega_n = \frac{1}{T_s}\sqrt{\ln^2 \rho_1 + \theta^2}$$

Teorema del valor final: Ens permet determinar a quin valor tendeix la resposta del sistema i diu que, si $\frac{z-1}{z}F(z)$ no té pols de $|z| \geq 1$, aleshores es verifica que

$$\lim_{k\to\infty} Y_k = \lim_{z\to 1}(\frac{z-1}{z}Y(z))$$

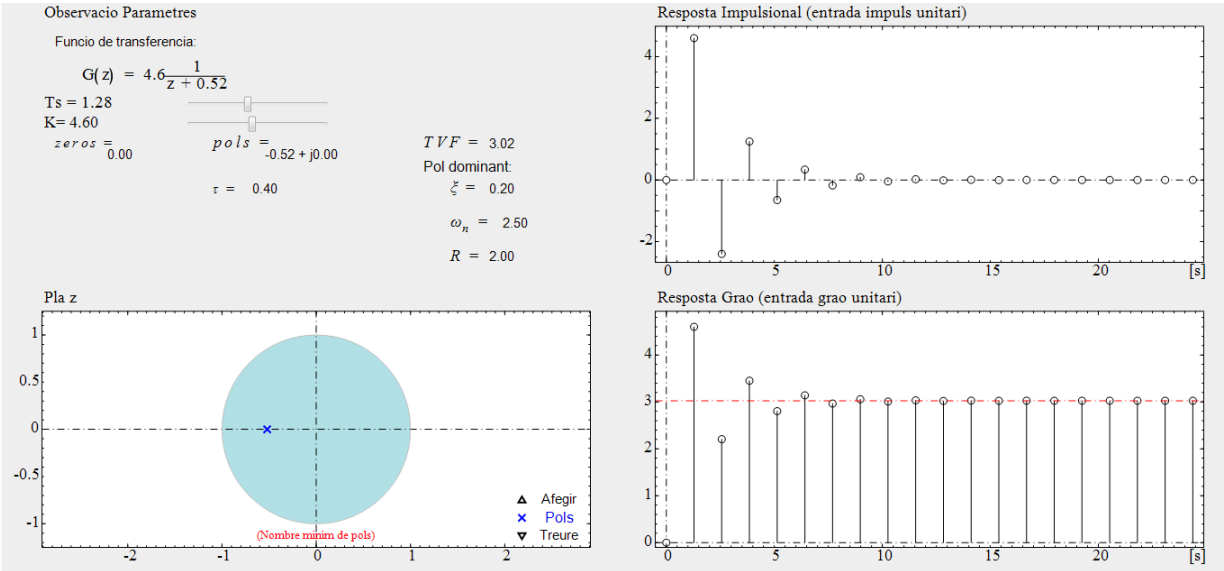
El ***nombre de mostres per període, R,*** ens indica com el seu nom indica les mostres que el sistema necessita per cada oscil·lació.

$$R = \frac{T_p}{T_s} = \frac{2\pi}{\omega_p T} = \frac{2\pi}{\theta}$$

Bibliografia

Ramon Costa Castelló i Enric Fossas Colet, *Sistemes de control en temps discret*, ENGINYERIES INDUSTRIALS, 2014. Capítol 5, secció 1-5, pàgines 101-109. [6]

8.1.2 Configuració de la pantalla



Observació paràmetres
En aquesta figura es poden veure diferents paràmetres que caracteritzen la resposta temporal del sistema.

El primer que s'hi observa és la **funció de transferència**, que està en un tamany de font més

gran respecte la resta de paràmetres, ja que n'és la protagonista. Per defecte, quan s'executi el programa, sempre hi haurà la mateixa, ja que és un exemple. A mesura que s'interactuï amb el programa s'anirà modificant.

A la part inferior de la funció de transferència es pot observar que hi ha dos *sliders*, corresponents al temps de mostratge, T_s, i al guany del sistema $G(z)$, K.

Ocupant el quart inferior esquerra de la figura hi ha **els zeros i els pols del sistema**. A mesura que s'afegeixin o s'anul·lin pols o zeros aniran apareixent en format vertical. A mesura que es modifiquin en el pla z, s'aniran actualitzant els valors.
En cas de tenir un sistema de primer grau, a més de tenir el pol també s'indicarà **la constant de temps,** τ.

Finalment, s'ha posat de manifest alguns paràmetres que caracteritzen el sistema, per així observar-ne la relació entre aquests i els gràfics. Per una banda tenim el valor que tendeix la resposta del sistema mitjançant **el teorema del valor final, TVF**. I també els valors de **la freqüència natural,** ω_n**, el coeficient d'esmorteïment,** ξ**, i el nombre de mostres per període, R,** del pol dominant del sistema. En cas que no tinguin sentit calcular-los retornaran un valor de 999.99.

Quan el sistema sigui **inestable**, s'indicarà amb majúscules i en vermell perquè no passi per alt.

Pla z
En aquesta figura hi ha representats els **pols i zeros** del sistema. Els pols són representats mitjançant una creu blava i els zeros amb uns cercles de color blau. Aquesta pantalla **és interactuable**, per tant els pols i zeros es poden moure al llarg de tot el pla.

S'hi pot veure representat un cercle de radi unitat de color blau cel, aquesta és necessari per determinar-ne l'estabilitat del sistema.

A la zona inferior dreta es pot observar tres diferents punts interactuables. El botó d'**afegir** i de **treure** zeros i pols del sistema, que com el seu nom indica permet modificar el sistema amb la quantitat de pols i zeros del propi.
Al centre es pot veure el **botó que commuta** segons si vols afegir/treure un pol o zero. De manera que si el que estàs modificant és la quantitat de pols apareixerà una creu blava juntament amb la paraula **'Pols'**. Per altra banda, si el que es modifica és la quantitat de zeros, apareixerà un cercle blau juntament amb la paraula **'Zeros'**.

A la zona inferior central de la figura s'hi observarà diferents indicacions en vermell, remarcant algunes **restriccions del sistema** perquè es compleixin tots els paràmetres que ha de tenir un sistema. Les restriccions posades són:

- Al pla sempre hi ha d'haver un mínim de pols, que serà: un pol senzill, o bé, en cas de tenir pols complexos, la parella de pols conjugats. El missatge que es mostrarà és: *'Nombre mínim de pols'*.

- Per mantenir la causalitat del sistema, no es podrà afegir ni treure zeros o pols en cas que el sistema esdevingui acausal. Els missatges que es mostraran segons el cas són: *'NO es poden afegir més zeros'*, *'NO es pot treure aquest pol'* o *'NO es poden treure aquests pols'*.

- Hi ha un altre cas, però que s'ha realitzat per una raó totalment estètica. I és que s'ha restringit la quantitat de pols que hi pot haver en el pla i, conseqüentment, la quantitat de zeros. El motiu és que si el valor de pols és massa elevat la funció de transferència no hi cap a la figura. Per tant, el nombre màxim de pols que hi pot haver en el sistema és de 6. El missatge que es mostrarà és: *'NO es poden afegir més pols'*.

Resposta graó
En aquesta figura es pot observar la representació gràfica de la resposta del sistema en temps discret per una entrada de graó unitari. També s'hi pot observar una línia vermella discontínua que ens indica el valor que tendeix la resposta, mitjançant el teorema del valor final. Com ja s'ha dit, el valor es pot veure representat a la figura *d'Observació paràmetres*.

Resposta impuls
En aquesta figura s'hi pot veure la representació gràfica de la resposta del sistema en temps discret davant una entrada impuls unitari.

8.1.3 Interactivitat amb l'aplicatiu

Respecte a la interactivitat de l'aplicatiu s'hi distingeixen tres parts. Per una banda, l'estudiant o docent pot interactuar amb les figures sempre que tingui l'opció *Manipulate* seleccionada. Ja que, per exemple, és la que permet modificar la posició dels pols i zeros i prémer els diferents botons de la figura.

- Zeros de temps discret (cercles de color blau).
- Pols de temps discret (creus de color blau).
- Botons d'afegir/treure zeros i pols (triangles de color **negre**).
- Botó de commutació d'element (Figura segons el tipus d'element).

A la part inferior esquerra de l'aplicatiu s'indica el valor del mòdul del zero o pol manipulat de temps discret.

A la barra de menú de l'aplicatiu hi ha l'opció de ***Settings***, en aquesta s'hi pot trobar diferents opcions per interactuar amb l'aplicatiu. Les possibilitats dins d'aquesta opció són:

- **Reset:** Permet tornar a la mateixa disposició de les figures que es troba en obrir l'aplicatiu.

Seguidament hi trobem l'opció de seleccionar exemples de casos predefinits, que són:

- **1 pol real:** Et retorna un sistema de temps discret format per un únic pol real, és el predefinit quan s'inicia l'aplicatiu.
- **2 pols complexos:** Et retorna un sistema format per una parella de pols complexos conjugats.
- **1 zero real/1 pol real:** Retorna un sistema format per un zero i un pol reals.
- **1 zero real/2 pols complexos:** Retorna un sistema format per un zero i una parella de pols complexos conjugats.

- **2 zeros complexos/2 pols complexos:** Retorna un sistema format per dues parelles de zeros i pols complexos conjugats.

També s'hi troba l'opció per accedir aquest document:

- **Fitxa:** És un enllaç que et porta al document que conté aquesta fitxa. Així l'estudiant es pot documentar de la teoria que conté l'aplicatiu i entendre el funcionament d'aquest, així com totes les opcions que s'hi contemplen.

Finalment, hi ha l'opció de poder introduir alguns paràmetres des del teclat, aquests són:

- **Introduir funció de transferència:** Aquesta opció et permet **introduir** una funció de transferència arbitrària des del teclat. En obrir l'opció apareix un espai que fa referència al **guany** que multiplica al numerador i dos vectors buits: el primer fa referència al **numerador** i el segon al **denominador**. S'ha d'introduir de manera polinomial, per exemple:

  $$2, [1, 0.3], [1, 0.5, -0.2]$$

  és equivalent a

  $$G(z) = 2\frac{z + 0.3}{z^2 + 0.5z - 0.2}$$

- **Temps de mostratge:** Et permet introduir qualsevol valor pel temps de mostratge, T_s.

8.1.4 Glossari d'elements

Elements generals

- **Barres de desplaçament, *Sliders*,** : Et permeten canviar el valor d'un paràmetre. En tots els casos l'augment i el decreixement del valor és lineal, de manera que si s'arrossega la barra cap a l'esquerra el valor disminuirà i cap a la dreta augmentarà. Estan delimitats per un interval finit.

- **Quadres de selecció, *Checkbox*,** : Et permeten activar mitjançant un clic del ratolí, una opció determinada.

- ***Settings***: Finestra del menú que permet accedir a més opcions.

- ***Manipulate*,** : És l'eina principal per realitzar les interaccions dels elements interactius associats a la representació gràfica, si aquesta opció no està seleccionada no es pot dur a terme la interacció amb l'aplicatiu. Està seleccionada de forma nativa.

- ***Drag*,** : És l'eina que et permet desplaçar pels diferents punts d'una figura, ja que el fet de tenir un espai limitat, hi haurà alguna configuració dels diagrames que no es podrà veure clarament tot el seu contingut.

- ***Zoom*,** : És l'eina que et permet augmentar i disminuir la visualització d'una figura en concret. Per disminuir cal mantenir la tecla *Shift*.

Elements específics

- Pol del sistema $G(z)$: $\times$
- Zero del sistema $G(z)$: $\circ$
- Teorema del valor final, TVF: - - - -

8.2 Fitxa 2: Resposta freqüencial de sistemes en temps discret i transformació bilineal

8.2.1 Explicació de la teoria

En un sistema continu $G(s)$, la resposta temporal s'obté fent el canvi $s = jw$ a la transmitància, per obtenir la transmitància isòcrona $G(jw)$. Així doncs, en temps discret s'haurà de fer el mateix a $G^*(s)$, obtenint $G^*(jw)$. Però en temps discret es complica una mica, ja que el mostrejador és un generador d'harmònics, i la resposta a un sinusoide de freqüència ω conté també freqüències superiors a ω.

Sabent que:

$$G^*(j\omega) = G(z)|_{z=e^{j\omega T}} = G(e^{j\omega T})$$

S'ha de tenir en compte que $G(z)$ relaciona l'entrada amb la sortida del sistema només en els instants de mostreig. Així doncs, $G(e^{j\omega T})$ dóna la resposta freqüencial del sistema representat amb $G(z)$ per a tota freqüència ω de la sinusoide d'entrada, mostrejada amb període T.

Diagrama de Bode. Transformació bilineal

La transformada bilineal (o transformada de Tustin) és una transformació que s'aplica a les funcions de transferència de temps discret per tal de convertir-les en funcions de transferència similars a les de temps continu. Un cop s'ha aplicat aquesta transformada, es poden dissenyar controladors en el camp freqüencial de forma anàloga a l'emprada en temps continu. Això és degut perquè $G(e^{j\omega T})$ és periòdica, no asimptòtica. La transformació bilineal consisteix en:

$$z = \frac{1 + \frac{T}{2}\omega}{1 - \frac{T}{2}\omega} \iff \omega = \frac{2}{T}\frac{z-1}{z+1}$$

Gràcies a aquesta transformació, el cercle unitat del pla z es transforma en el semiplà esquerre del pla ω, però sense variar el nombre de pols de $G(z)$.

Així doncs, partint de l'expressió següent:

$$\omega = \frac{2}{T}\frac{z-1}{z+1} = \frac{2}{T}\frac{e^{sT}-1}{e^{sT}+1}$$

que per aplicar Bode es considera $\sigma = 0$ i sabent que $s = \sigma + j\omega$ i $\omega = \sigma_\omega + j\omega_\omega$, es pot deduir que:

$$\omega_\omega = \frac{2}{T}tan\frac{\omega T}{2} \iff \omega = \frac{2}{T}arctan\frac{\omega_\omega T}{2}$$

Per freqüències petites ($\omega \ll 2/T$) es pot determinar:

$$\omega_\omega = \frac{2}{T}tan\frac{\omega T}{2} \simeq \frac{2}{T}\frac{\omega T}{2} = \omega$$

Per tant, ω i ω_ω són pràcticament iguals. Tot i això, aquest fet no restringeix que la zona de treball sigui a freqüències petites, ja que la transformació bilineal no altera la relació entre amplitud i fase.

El diagrama de Bode del sistema de funció de transferència $G(z)$ consisteix en el dibuix del guany en decibels (dB) i la fase en graus (o radians) de la funció de transferència $G(z)$, avaluada a $z = e^{j\theta}$. A l'eix d'abscisses, s'hi representa $log_{10}\theta$, per a $\theta \in [0, \pi]$.

Diagrama de Nyquist o Polar

El diagrama de Nyquist o Polar del sistema de funció de transferència $G(z)$ consisteix en la corba del pla complex definida per $G(e^{j\theta})$, parametritzada per $\theta \in [-\pi, \pi]rad$.

Dues característiques d'aquest diagrama:

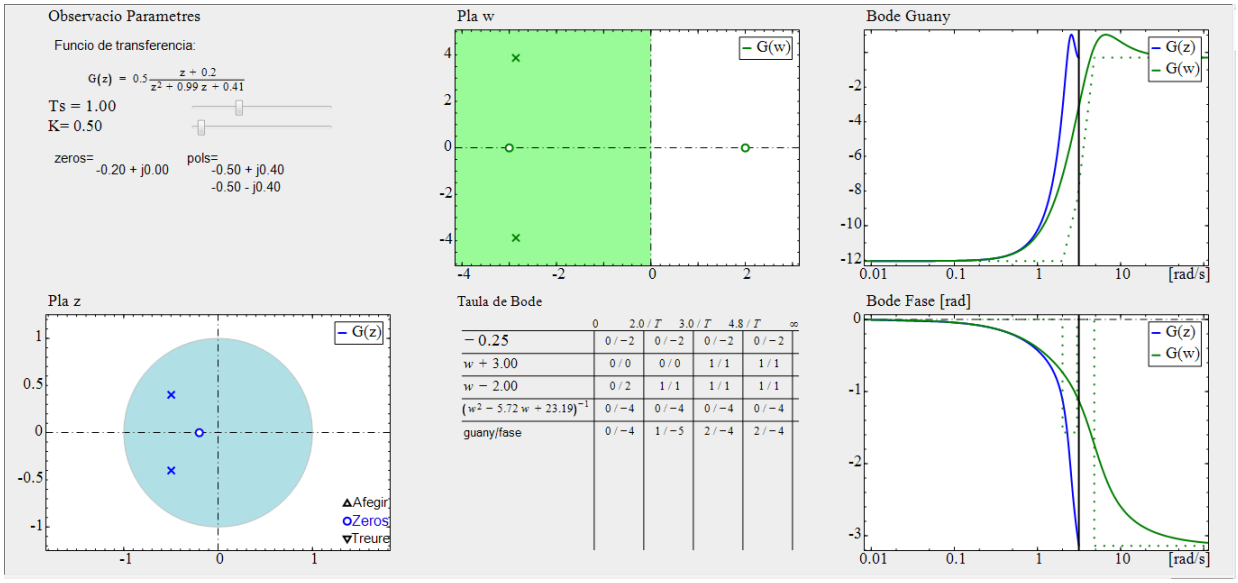
- És simètric respecte l'eix real, per això es pot representar únicament en $\theta \in [0, \pi]rad$.
- Comença pel valor del paràmetre $\theta = 0rad$ a l'eix real i acaba a $\theta = \pi rad$, també a l'eix real.

Bibliografia

Ramon Costa Castelló i Enric Fossas Colet, *Sistemes de control en temps discret*, ENGINYERIES INDUSTRIALS, 2014. Capítol 14, pàgines 309-317. [6]

K. Ogata, *Ingeniería de control moderna*, PEARSON EDUCATION, 2010, 5a edició. Capítol 7, pàgines 398-442. [7]

8.2.2 Configuració de la pantalla



Observació paràmetres
En aquesta figura es pot veure diferents paràmetres que caracteritzen tant la resposta temporal del sistema.

Pel que fa al caràcter de la resposta temporal hi apareix per poder tenir una referència i un punt per poder comprovar els resultats obtinguts en la resposta freqüencial. El primer que s'hi

observa és la **funció de transferència** en temps discret. Per defecte, quan s'executi el programa sempre hi haurà la mateixa, ja que és un exemple. A mesura que s'interactuï amb el programa s'anirà modificant.

A la part inferior de la funció de transferència es pot observar que hi ha dos *sliders*, corresponents al temps de mostratge, T_s, i al guany del sistema $G(z)$, K.

Ocupant la meitat inferior de la figura hi ha **els zeros i els pols del sistema**. A mesura que s'afegeixin o s'anul·lin pols o zeros aniran apareixent en format vertical. A mesura que es modifiquin en el pla z, se n'aniran actualitzant els valors.

Pla z
En aquesta figura hi ha representats els **pols i zeros** del sistema. Els pols són representats mitjançant una creu blava i els zeros amb uns cercles de color blau. Aquesta pantalla **és interactuable**, per tant els pols i zeros es poden moure al llarg de tot el pla.

S'hi pot veure representat un cercle de radi unitat de color blau cel, aquesta és necessari per determinar-ne l'estabilitat del sistema.

A la zona inferior dreta es pot observar tres diferents punts interactuables. El botó d'**afegir** i de **treure** zeros i pols del sistema, que com el seu nom indica permet modificar el sistema amb la quantitat de pols i zeros d'aquest.
Al centre es pot veure el **botó que commuta** segons si vols afegir/treure un pol o zero. De manera que si el que estàs modificant és la quantitat de pols apareixerà una creu blava juntament amb la paraula **'Pols'**. Per altra banda, si el que es modifica és la quantitat de zeros, apareixerà un cercle blau juntament amb la paraula **'Zeros'**.

A la zona inferior central de la figura s'hi observarà diferents indicacions en vermell, remarcant algunes **restriccions del sistema** perquè es compleixin tots els paràmetres que ha de tenir un sistema. Les restriccions posades són:

- Al pla sempre hi ha d'haver un mínim de pols, que serà: un pol senzill, o bé, en cas de tenir pols complexos, la parella de pols conjugats. El missatge que es mostrarà és: *'Nombre mínim de pols'*.

- Per mantenir la causalitat del sistema, no es podrà afegir ni treure zeros o pols en cas que el sistema esdevingui acausal. Els missatges que es mostraran segons el cas són: *'NO es poden afegir més zeros'*, *'NO es pot treure aquest pol'* o *'NO es poden treure aquests pols'*.

- Hi ha un altre cas, però que s'ha realitzat per una raó totalment estètica. I és que s'ha restringit la quantitat de pols que hi pot haver en el pla i, conseqüentment, la quantitat de zeros. El motiu és que si el valor de pols és massa elevat la funció de transferència no hi cap a la figura. Per tant, el nombre màxim de pols que hi pot haver en el sistema és de 6. El missatge que es mostrarà és: *'NO es poden afegir més pols'*.

Pla ω
En aquesta figura es pot observar la representació gràfica del pla ω, és a dir, la transformació bilineal dels pols i zeros que es poden, simultàniament, observar en el pla z. Aquest pla, a diferència del pla z no s'hi pot interactuar, és únicament d'observació.

Així com en el pla z, en aquest els pols i zeros també estan representats amb una creu i un cercle de color verd, respectivament. En aquest pla s'ha representat la zona estable, el semiplà esquerre, de color verd fluix.

Taula de Bode
En aquesta figura s'hi pot veure la representació de la taula necessària per crear el que posteriorment seran els diagrames de Bode de guany i de fase del sistema $G(\omega)$ del que s'ha obtingut mitjançant la transformació bilineal de $G(z)$.

A la primera columna de la taula es pot observar el guany, **k** del sistema $G(\omega)$. Seguidament, amb **potència positiva els zeros i amb potència negativa els pols** de $G(\omega)$, que també es poden observar en el **pla** ω. I a l'última fila hi ha el ***guany/fase*** on s'hi representarà el resultat de la suma de cada tram de freqüència.

També estan indicats els trams de freqüència que actua cada pol i zero.

Es recomana utilitzar l'opció de **drag** de la barra de submenú quan la taula sigui més gran que la figura que el conté per poder observar correctament tota la taula.

Bode Guany
En aquesta figura s'hi pot veure la representació de les corbes reals de guany dels de dos sistemes: el sistema de temps discret $G(z)$ i el sistema amb la transformació bilineal $G(\omega)$. El sistema $G(z)$ s'ha representat de color blau, com el pla z, i el sistema $G(\omega)$ de color verd, com el pla ω.

També s'ha representat amb una línia discontínua de color verd, les **línies asimptòtiques** de guany de Bode de la transformació bilineal $G(\omega)$.

Per últim d'aquesta figura, es pot observar la **barra indicadora** de la freqüència de Nyquist $\frac{\omega_s}{2} = \frac{\pi}{T_s}[rad/s]$. Es pot interactuar-hi movent-la d'esquerra a dreta.

Bode Fase
En aquesta figura s'hi pot veure la representació de les corbes reals de fase dels de dos sistemes: $G(z)$ i $G(\omega)$. L'explicació dels elements de la figura és anàloga al **Bode Guany**.

Diagrama Nyquist
En aquesta figura s'hi pot veure representat les dues corbes polars, en blau la corresponent al sistema en temps discret $G(z)$ i l'altra, de color verd, al sistema corresponent a la transformació bilineal $G(\omega)$.

8.2.3 Interactivitat amb l'aplicatiu

Respecte a la interactivitat de l'aplicatiu s'hi distingeixen tres parts. Per una banda, l'estudiant o docent pot interactuar amb algunes de les figures, sempre que tingui l'opció *Manipulate* seleccionada. Ja que, per exemple, és la que permet modificar la posició d'alguns paràmetres. Les figures que permeten la manipulació són el pla z, amb la modificació de pols.

- Zeros de temps discret (cercles de color blau).

- Pols de temps discret (creus de color blau).
- Botons d'afegir/treure zeros i pols (triangles de color **negre**).
- Botó de commutació d'element (Color i figura segons el tipus d'element).

Els diagrames de Bode (guany i fase) també permeten la interactuació amb la modificació de la barra de freqüència.

A la part inferior esquerra es pot observar el paràmetre que indica el cursor de qualsevol de les figures, per exemple, si el cursor del ratolí està a sobre d'un pol del pla ω, s'indicarà el valor d'aquest.

A la barra de menú de l'aplicatiu hi ha l'opció de ***Settings***, en aquesta s'hi pot trobar diferents opcions per interactuar amb l'aplicatiu. Les possibilitats dins d'aquesta opció són:

- **Reset:** Permet tornar a la mateixa disposició de les figures que es troba en obrir l'aplicatiu.

Seguidament hi trobem l'opció de seleccionar exemples de casos predefinits, que són:

- **1 zero real/2 pols complexos:** Et retorna un sistema format per un zero real i una parella de pols complexos conjugats.
- **1 zero real/1 pol real:** Retorna un sistema format per un zero i un pol reals.
- **2 zeros complexos/2 pols complexos i 1 pol real:** Retorna un sistema format per dues parelles de zeros i pols complexos conjugats i un pol real.

També s'hi troba l'opció per accedir a aquest document:

- **Fitxa:** És un enllaç que et porta al document que conté aquesta fitxa. Així l'estudiant es pot documentar de la teoria que conté l'aplicatiu i entendre el funcionament d'aquest, així com totes les opcions que s'hi contemplen.

Finalment, hi ha l'opció de poder introduir alguns paràmetres des del teclat, aquests són:

- **Introduir funció de transferència:** Aquesta opció et permet introduir una funció de transferència arbitrària des del teclat. En obrir l'opció apareixen un espai que fa referència al guany que multiplica al numerador i dos vectors buits: el primer fa referència al numerador i el segon al denominador. S'ha d'introduir de manera polinomial, per exemple:

  $$2, [1, 0.3], [1, 0.5, -0.2]$$

  és equivalent a

  $$G(z) = 2\frac{z + 0.3}{z^2 + 0.5z - 0.2}$$

- **Temps de mostratge:** Et permet introduir qualsevol valor pel temps de mostratge, T_s.

8.2.4 Glossari d'elements

Elements generals

- **Barres de desplaçament, *Sliders*,** : Et permeten canviar el valor d'un paràmetre. En tots els casos l'augment i el decreixement del valor és lineal, de manera que si s'arrossega la barra cap a l'esquerra el valor disminuirà, i cap a la dreta augmentarà. Estan delimitats per un interval finit.

- **Quadres de selecció, *Checkbox*,** : Et permeten activar mitjançant un clic del ratolí, una opció determinada.

- ***Settings***: Finestra del menú que permet accedir a més opcions.

- ***Manipulate***, : És l'eina principal per realitzar les interaccions dels elements interactius associats a la representació gràfica, si aquesta opció no està seleccionada no es pot dur a terme la interacció amb l'aplicatiu. Està seleccionat de forma nativa.

- ***Drag***, : És l'eina que et permet desplaçar pels diferents punts d'una figura, ja que el fet de tenir un espai limitat, hi haurà alguna configuració dels diagrames que no es podrà veure clarament tot el seu contingut.

- ***Zoom***, : És l'eina que et permet augmentar i disminuir la visualització d'una figura en concret. Per disminuir cal mantenir la tecla *Shift*.

Elements específics

- Pol del sistema $G(z)$: $\times$
- Zero del sistema $G(z)$: $\circ$
- Pol del sistema $G(\omega)$: $\times$
- Zero del sistema $G(\omega)$: $\circ$

8.3 Fitxa 3: Compensador d'avanç i retard de fase amb el mètode exacte

8.3.1 Explicació de la teoria

Per contextualitzar la següent aplicació, és necessari realitzar una breu explicació sobre el camp freqüencial. Partint de la base que la transformada bilineal d'un sistema de control no n'altera les característiques freqüencials, aquesta propietat es pot utilitzar en el disseny de controladors, ja que el camp freqüencial de temps discret presenta una estructura força complexa per fer dissenys intuïtius, tot el contrari que el camp freqüencial de temps continu.

El mètode ensenyat a classe es basa en aquest concepte, on el procediment a seguir és:

1. Donada una funció de transferència de la planta G(z), s'hi aplica la transformada bilineal i se n'obté $G_w(w)$.

2. Partint de $G_w(w)$ i unes especificacions en el domini de la freqüència (precisió, marge de guany/fase), s'hi aplica algun procediment de disseny, i se n'obté el controlador $C_w(w)$. El mètode emprat pot ser qualsevol mètode existent que treballi en el camp de la freqüència.

3. Finalment, s'hi aplica la transformada bilineal inversa i se n'obté C(z).

Per les propietats de la transformada bilineal, la resposta freqüencial de $C_w(w)G_w(w)$ presenta les mateixes característiques que les de $C(z)G(z)$.

Gràcies al mètode constructiu exposat anteriorment, es poden obtenir controladors sense la necessitat de fer càlculs complexos i que es poden realitzar a partir del diagrama de Bode. No obstant això, en aquesta aplicació s'estudia una alternativa basada en el plantejament de les equacions que defineixen les especificacions i la seva resolució numèrica directa.

Donada una planta $G(z)$ i un període de mostratge T_s i amb unes restriccions de precisió, K_p (que s'obté a partir de l'error estacionari, e_e) i el marge de fase, MF_{des}, les equacions que cal resoldre són de la forma següent (per un sistema de tipus 0):

$$K_p = C(1)G(1)$$

$$1 = |C(e^{j\omega_{MF}T_s})G(e^{j\omega_{MF}T_s})|$$

$$MF_{des} = 180 + \angle C(e^{j\omega_{MF}T_s})G(e^{j\omega_{MF}T_s})$$

Realitzant els pertinents desenvolupaments de les equacions i tenint en compte que l'estructura del controlador és $C(z) = k_c\frac{z-z_c}{z-p_c}$, s'obté:

$$K_p = k_c\frac{1-z_c}{1-p_c}G(1) \rightarrow K_p(1-p_c) = k_c(1-z_c)G(1)$$

$$e^{jMF_{des}} = -k_c\frac{e^{j\omega_{MF}T_s}-z_c}{e^{j\omega_{MF}T_s}-p_c}G(e^{j\omega_{MF}Ts}) \rightarrow e^{jMF_{des}}(e^{j\omega_{MF}T_s}-p_c) = -k_c(e^{j\omega_{MF}T_s}-z_c)G(e^{j\omega_{MF}T_s})$$

D'aquesta segona equació, se'n deriven dues més, distingint la part real de la imaginària, de tal manera que el sistema final és:

$$K_p(1-p_c) = k_c(1-z_c)G(1)$$

$$cos(MF_{des}+\omega_{MF}T_s)-cos(MF_{des})p_c = (z_c-cos(\omega_{MF}T_s))k_c\Re(G(e^{j\omega_{MF}T_s}))+sin(\omega_{MF}T_s)k_c\Im(G(e^{j\omega_{MF}T_s}))$$
$$sin(MF_{des}+\omega_{MF}T_s)-sin(MF_{des})p_c = (z_c-cos(\omega_{MF}T_s))k_c\Im(G(e^{j\omega_{MF}T_s}))+sin(\omega_{MF}T_s)k_c\Re(G(e^{j\omega_{MF}T_s}))$$

Com es pot observar, en aquestes equacions hi ha quatre incògnites: k_c, z_c, p_c i ω_{MF}, i tres equacions sobre els reals. Per això és necessari fixar una de les incògnites, ja que d'aquesta manera s'aconsegueix un sistema compatible determinat. En aquest cas, i el més natural, és fixar el valor de ω_{MF} com una especificació addicional.

Les equacions obtingudes són **no lineals i són complexos** de resoldre analíticament, de tal manera que s'ha de recórrer a un mètode computacional per a la seva resolució.

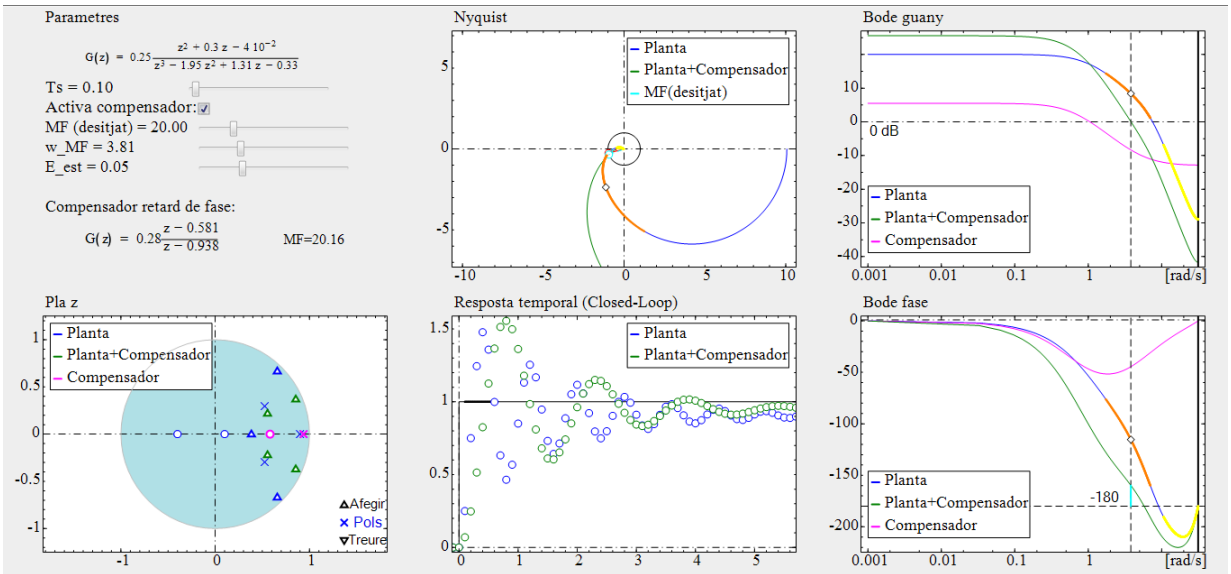
Comentari 1: Cal destacar que, en aquest plantejament, no s'utilitza la transformada bilineal i, al tractar-se d'un mètode exacte, no és necessari emprar un marge de seguretat.

Comentari 2: Per la realització d'aquesta aplicació es considera que la ***realimentació del sistema és unitària****.*

Bibliografia

Ramon Costa Castelló i Enric Fossas Colet, *Sistemes de control en temps discret*, ENGINYERIES INDUSTRIALS, gener 2014. Capítol 14, secció 5, pàgines 339-342. [6]

8.3.2 Configuració de la pantalla



Observació paràmetres
En aquesta figura es poden veure diferents paràmetres que caracteritzen la resposta temporal del sistema, i també especificacions per dissenyar el compensador segons la teoria exposada anteriorment.

Des de l'execució del programa es pot observar a la part superior de la figura la funció de transferència de la planta $G(z)$ que va variant segons els pols i zeros que se li especifiquen. Per

defecte, quan s'executa el programa sempre hi ha la mateixa. A la part inferior de la funció de transferència es pot observar un *Slider* per modificar el temps de mostratge, T_s, juntament amb el valor d'aquest. Seguidament, s'hi observa el valor del marge de fase, *MF*, en graus. I finalment, un polsador per activar la funció del compensador calculat mitjançant el mètode exacte.

En activar-se el compensador, canvia la configuració de la figura (aquest fet succeeix en totes les figures).

Amb el compensador activat es pot observar que apareixen nous paràmetres a la figura. Els tres primers formen part de les restriccions que se li imposa al compensador. Se les representa mitjançant *sliders* i són:

- El **marge de fase desitjat**, *MF*(*desitjat*), en graus, amb una escala lineal de 0 fins a 90º.
- La **freqüència de marge de fase o de tall**, w_{MF}, en rad/s, (en aquest cas també se'n diu *freqüència de disseny*) que anirà del valor mínim del rang de les freqüències de tall amb solució pel compensador de retard de fase, fins a π/T_s. En cas que no hi hagi cap solució pel compensador de retard de fase l'interval és de 0 fins a π/T_s. L'escala de l'*slider* és logarítmica.
- L'**error estacionari**, E_{est} en tant per u, que està delimitat entre 1 i el 15%, en escala lineal.

Finalment, a la part inferior de la figura, es pot observar el **compensador d'avanç/retard de fase** amb l'estructura $C(z) = k_c \frac{z-z_c}{z-p_c}$ juntament amb el marge de fase final per C(z)G(z).

Pla z
Compensador desactivat:
En aquesta figura hi ha representats els **pols i zeros** del sistema de llaç obert i els **pols** del sistema de llaç tancat. Els pols del sistema de llaç obert, $G(z)$, són representats mitjançant una creu blava i els zeros amb cercles de color blau. Aquesta pantalla **és interactuable**, per tant els pols i zeros es poden moure al llarg de tot el pla. Els pols del sistema de llaç tancat es representen amb triangles de color blau.

S'hi pot veure representat un cercle de radi unitat de color blau cel, aquesta és necessari per determinar-ne l'estabilitat del sistema.

A la zona inferior dreta es pot observar tres diferents punts interactuables. El botó d'**afegir** i de **treure** zeros i pols del sistema de llaç obert, que com el seu nom indica permet modificar el sistema amb la quantitat de pols i zeros del mateix.
Al centre es pot veure el **botó que commuta** segons si es vol afegir/treure un pol o zero. De manera que si el que s'està modificant és la quantitat de pols, apareixerà una creu blava juntament amb la paraula **'Pols'**. Per altra banda, si el que es modifica és la quantitat de zeros, apareixerà un cercle blau juntament amb la paraula **'Zeros'**.

A la zona inferior central de la figura s'hi observarà diferents indicacions en vermell, remarcant algunes **restriccions del sistema** perquè es compleixin tots els paràmetres que ha de tenir un sistema. Les restriccions posades són:

- Al pla sempre hi ha d'haver un mínim de pols, que serà: un pol senzill, o bé, en cas de

tenir pols complexos, la parella de pols conjugats. El missatge que es mostrarà és: *'Nombre mínim de pols'*.

- Per mantenir la causalitat del sistema, no es podrà afegir ni treure zeros o pols en cas que el sistema esdevingui acausal. Els missatges que es mostraran segons el cas són: *'NO es poden afegir més zeros'*, *'NO es pot treure aquest pol'* o *'NO es poden treure aquests pols'*.

- Hi ha un altre cas, però que s'ha realitzat per una raó totalment estètica. I és que s'ha restringit la quantitat de pols que hi pot haver en el pla i, conseqüentment, la quantitat de zeros. El motiu és que si el valor de pols és massa elevat la funció de transferència no hi cap a la figura. Per tant, el nombre màxim de pols que hi pot haver en el sistema és de 6. El missatge que es mostrarà és: *'NO es poden afegir més pols'*.

Compensador activat:
Cal destacar que, amb el compensador activat, tots els paràmetres esmentats amb el compensador desactivat, es mantenen. A més a més, s'afegeixen altres dades referents al compensador.

Per una banda, es poden observar els pols del sistema de llaç tancat de $C(z)G(z)$. Aquests estan representats amb triangles de color verd. Per altra banda, representats de color magenta, es pot observar el paràmetre z_c amb un cercle i el paràmetre p_c amb una creu.

Resposta temporal
Compensador desactivat:
En aquesta figura es pot observar la representació gràfica de la **resposta en llaç tancat del sistema $G(z)$** en temps discret per una entrada de graó unitari. La línia de color **negre** representa el senyal d'**entrada del graó unitari**. I els cercles de color blau, la resposta del sistema de llaç tancat a aquesta entrada. En cas que la sortida sigui inestable el gràfic de la resposta no apareix i s'hi observa *'La resposta és inestable'*, igualment de color blau.

Compensador activat:
A més dels paràmetres descrits amb el compensador desactivat, també s'hi pot observar la **resposta del sistema en llaç tancat de $C(z)G(z)$**, aquesta és la representada amb cercles de color verd. Com en el cas anterior, en cas que la resposta sigui inestable, a la figura hi apareix *'La resposta és inestable'*, en color verd.

Nyquist
Compensador desactivat:
A la present figura s'hi pot observar la representació gràfica del **diagrama de Nyquist** del sistema planta $G(z)$ en color blau. Al centre del diagrama es pot observar el cercle de radi unitat, que pot servir d'ajut per preveure inestabilitats del sistema. També, en color vermell s'observa el **marge de fase** en forma d'angle, a més a més del cercle vermell que indica el punt d'intersecció de la corba de Nyquist de la planta $G(z)$ amb el cercle de radi unitat.

Compensador activat:
A més dels paràmetres esmentats amb el compensador desactivat, es poden observar altres representacions vinculades a la compensació del controlador.

La corba del Nyquist que anteriorment era únicament de color blau, ara es pot observar que està formada per més d'un color. Cal destacar, que la corba és la mateixa, ja que els valors d'a-

questa no han variat i si s'observa bé encara es pot veure part blava de la corba. Els altres dos colors (groc i taronja) representats sobre la corba són indicadors de la freqüència de marge de fase:

- En groc es representa el rang de freqüències de marge de fase que hi ha solució per un **compensador d'avanç de fase** amb les restriccions i la planta $G(z)$ proposades. És a dir, que es pot aconseguir el marge de fase desitjat, amb un compensador d'avanç de fase.

- En taronja es representa el rang de freqüències de marge de fase que hi ha solució per un **compensador de retard de fase** amb les restriccions i la planta $G(z)$ proposades. És a dir, que es pot aconseguir el marge de fase desitjat, amb un compensador de retard de fase.

Es pot observar que a la mateixa corba hi ha una figura en forma de **rombe**. Aquesta representa la posició del valor de la **freqüència del marge de fase.**

La corba de color verd, és la **corba de Nyquist que correspon al sistema $C(z)G(z)$**. En cas que no hi hagi una solució per les restriccions donades, aquesta corba no apareix.

En color cian (el blau més clar), es pot observar l'angle que forma el **marge de fase desitjat** a l'interior del cercle de radi unitat. El punt d'intersecció amb el cercle, format per un cercle més petit de color cian, és manipulable.

Bode guany
Compensador desactivat:
En aquesta figura s'hi representa el **diagrama de guany de Bode pel sistema planta, $G(z)$** en color blau. A més, hi ha tres línies (dues discontínues i una contínua) que marquen alguns paràmetres del diagrama:

- La línia horitzontal discontínua marca la referència de 0dB del diagrama.

- La línia vertical discontínua marca la freqüència on es troba el marge de fase. És a dir, el valor de la freqüència quan la corba de guany talla pel 0 dB.

- La línia contínua vertical que es troba a la part dreta de la figura és la que marca el límit de la freqüència, que equival a π/T_s.

Compensador activat:
Amb el compensador activat, s'afegeixen alguns elements al diagrama. Per una banda, la corba de color magenta, que representa la corba de guany del **compensador**. En color verd, es representa la **corba de guany del sistema $G(z)C(z)$**, que igualment que en el diagrama de Nyquist no apareix en cas que la situació definida no tingui solució.

Igual que el diagrama de Nyquist sobre la corba de la planta, $G(z)$ hi ha unes franges el color groc i taronja. De la mateixa manera, aquests indiquen els **rangs de freqüència de tall** per a la que hi ha solució per la situació definida. Essent de color groc el rang de solucions pel **compensador d'avanç** de fase, i en taronja el rang de solucions pel **compensador de retard** de fase.

De la mateixa manera que en el Nyquist, el **rombe** representa la posició del valor de la **freqüència del marge de fase**. En aquest cas és manipulable.

Bode fase
En aquesta figura s'hi pot veure la representació de les corbes de fase de Bode. L'explicació dels elements de la figura és anàloga al **Bode Guany**.

A més, s'hi representa el **marge de fase**. En color vermell quan el **compensador està desactivat** i en color cian quan el **compensador està activat**, seguint així el mateix codi de colors que en el diagrama de Nyquist.

8.3.3 Interactivitat amb l'aplicatiu

Respecte a la interactivitat de l'aplicatiu s'hi distingeixen tres parts. Per una banda, l'usuari pot interactuar amb algunes de les figures, sempre que tingui l'opció *Manipulate* seleccionada. Segons la figura, els paràmetres manipulables varien.

La figura de paràmetres són manipulables els *sliders* així com el botó per **activar el compensador**. El valor dels paràmetres dels *sliders*, es modifiquen arrossegant la barra d'esquerra a dreta. I el compensador s'activa clicant amb el cursor sobre la *checkbox*.

El pla z es poden manipular els pols i zeros que corresponen al sistema de llaç obert format per la planta $G(z)$. És a dir, que es poden arrossegar pel pla les creus i el cercles, essent els **pols i zeros** del sistema planta, respectivament. A la part inferior dreta de la figura és la zona que permet modificar la quantitat de pols i zeros es volen **afegir o treure**. El botó central és el que permet fer el **canvi de pol a zero**, de tal manera que si apareix "$\times$ *Pols*", el que l'element que s'afegeix/treu és un pol, i igualment en cas de "$\circ$ *Zeros*".

A més, a la part inferior esquerra de la pantalla es pot observar el valor que prenen un pol/zero del *pla z* quan se li col·loca el cursor al damunt.

En referència al diagrama de Nyquist el paràmetre que permet interactuació és el **marge de fase desitjat**, $MF(desitjat)$. Per modificar aquest paràmetre cal arrossegar el cercle de color cian, pel voltant del cercle de radi unitat.

El diagrames de guany i fase de Bode, la seva interactuabilitat és la mateixa. El que es permet modificar és la **freqüència de tall**, ω_{MF}, representada amb el **rombe** sobre la corba del sistema planta, $G(z)$.

A part de la interactuació directa amb les figures, hi ha una altra manera d'interactuar amb l'aplicatiu. La finestra de *Settings* de la barra del menú s'hi pot trobar diferents opcions:

- **Reset:** Permet tornar a la mateixa posició de les figures que es troba en obrir l'aplicatiu. En aquest cas, és la representació de l'**exemple 105** del llibre *Sistemes de control en temps discret*, que forma part de la literatura recomanada per l'assignatura de Control automàtic.

També hi ha un altre exemple amb una funció de transferència de G(z) arbitrària, que és:

$$G(z) = 0.01\frac{(z+0.6)(z+0.8)}{(z-0.7)(z-0.8)(z-0.9)}$$

Seguidament, hi ha dues opcions que et permeten introduir alguns paràmetres des del teclat, aquestes són:

- **Introduir funció de transferència:** Com el seu propi nom indica, aquesta opció permet **introduir** una funció de transferència des del teclat. En obrir l'opció apareix un espai que fa referència al **guany** que multiplica al numerador i dos vectors buits: el primer fa referència al **numerador** i el segon al **denominador**. S'ha d'introduir amb la forma polinomial, per exemple:
$$2, [1, 0.3], [1, 0.5, -0.2]$$
és equivalent a
$$G(z) = 2\frac{z + 0.3}{z^2 + 0.5z - 0.2}$$

- **Restriccions:** Aquesta opció et permet **introduir** les restriccions del compensador a dissenyar, sempre que aquest estigui activat. Les restriccions a introduir són: T_s (en segons), e_e (en tant per u), ω_{MF} (rad/s) i $MF(desitjat)$ (en graus).

Finalment, hi ha l'opció fitxa:

- **Fitxa:** És un enllaç que et porta al document que conté aquesta fitxa. Així l'usuari es pot documentar de la teoria que conté l'aplicatiu i entendre el funcionament d'aquest, així com totes les opcions que s'hi contemplen.

8.3.4 Glossari d'elements

Elements generals

- **Barres de desplaçament, *Sliders*** : Et permeten canviar el valor d'un paràmetre. De manera que si s'arrossega la barra cap a l'esquerra el valor disminuirà, i cap a la dreta augmentarà. Estan delimitats per un interval finit.

- **Quadres de selecció, *Checkbox*,** : Et permeten activar mitjançant un clic del ratolí, una opció determinada.

- ***Settings***: Finestra del menú que permet accedir a més opcions.

- ***Manipulate*** : És l'eina principal per realitzar les interaccions dels elements interactius associats a la representació gràfica, si aquesta opció no està seleccionada no es pot dur a terme la interacció amb l'aplicatiu. Està seleccionada de forma nativa.

- ***Drag*** : És l'eina que et permet desplaçar pels diferents punts d'una figura, ja que el fet de tenir un espai limitat, hi haurà alguna configuració dels diagrames que no es podrà veure clarament tot el seu contingut.

- ***Zoom*** : És l'eina que et permet augmentar i disminuir la visualització d'una figura en concret. Per disminuir cal mantenir la tecla *Shift*.

Elements específics

- Pol del sistema llaç obert $G(z)$: $\times$

- Pol del sistema llaç tancat $G(z)$: $\triangle$

- Zero del sistema de llaç obert $G(z)$: $\circ$
- Pol del sistema llaç tancat $C(z)G(z)$: $\triangle$
- Pol del compensador $C(z)G(z)$: $\times$
- Zero del compensador $C(z)G(z)$: $\circ$
- Freqüència de tall o marge de fase, ω_{MF}: $\diamond$

8.4 Fitxa 4: Disseny d'un compensador dead-beat

8.4.1 Explicació de la teoria

A banda dels controladors vistos a l'assignatura de control automàtic, hi ha altres controladors que tenen funcions molt diverses. Un d'aquests controladors és l'anomenat dead-beat o, en català, "mort sobtada".

Com ja se sap, una de les característiques desitjades en el disseny de sistemes de control és que arribin a l'estat estacionari el més ràpid possible. El controlador dead-beat busca arribar a l'estat estacionari en *n+1* mostres, on *n* és l'ordre del controlador. En essència, aquest controlador cancel·la tots els pols discrets del sistema i els substitueix per pols a l'origen.

És a dir, tenint un sistema planta $G(z)$ amb l'estructura:

$$G(z) = \frac{N(z)}{D(z)}$$

Es buscarà un controlador $C(z)$ que sigui:

$$C(z) = \frac{z^{-1}}{G(z)(1-z^{-1})} = \frac{z^{-1}D(z)}{N(z)(1-z^{-1})} = \frac{D(z)}{N(z)(z-1)}$$

D'aquesta manera sempre s'obtindrà una $T(z)=1/z$ de tal manera que, si la realimentació és unitària negativa:

$$C(z)G(z) = \frac{N(z)D(z)}{D(z)N(z)(z-1)} = \frac{1}{z-1}$$

$$T(z) = \frac{C(z)G(z)}{1+C(z)G(z)} = \frac{\frac{1}{z-1}}{1+\frac{1}{z-1}} = \frac{1}{1+z-1} = \frac{1}{z}$$

En cas d'haver-hi retard al sistema planta, el compensador té aquesta estructura:

$$C(z) = \frac{z^{-N}D(z)}{N(z)(1-z^{-N})} = \frac{D(z)}{N(z)(z^N-1)}$$

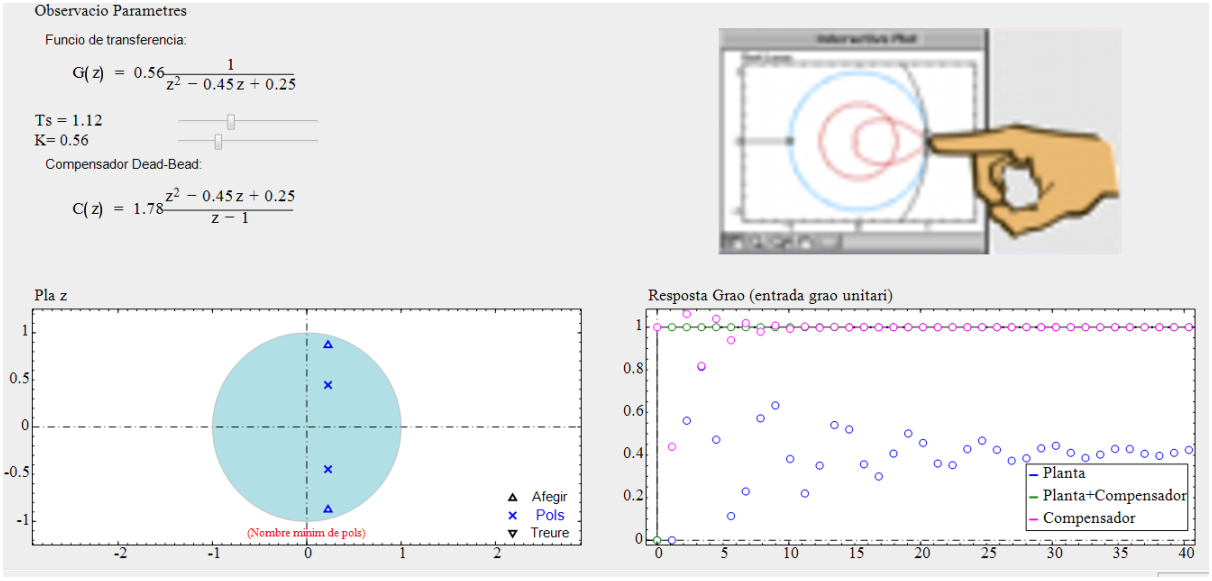
On N és el nombre de retards del sistema planta. I anàlogament amb el procediment anterior s'obté:

$$T(z) = \frac{1}{z^N}$$

Bibliofrafia

Louis C. Wastphal, *Handbook of Control Systems Engineering*, SPRINGER, 2001. Capítol 21, pàgines 461-471. [8]

8.4.2 Configuració de la pantalla



Observació de paràmetres
En aquesta figura es poden veure diferents paràmetres que caracteritzen la resposta temporal del sistema, i també especificacions per dissenyar el compensador segons la teoria exposada anteriorment.

Es pot observar a la part superior de la figura la funció de transferència de la planta $G(z)$ que va variant segons els pols i zeros que se li especifiquen. Per defecte, quan s'executa el programa sempre hi ha la mateixa. A la part inferior de la funció de transferència es pot observar un *Slider* per modificar el temps de mostratge, T_s, juntament amb el valor d'aquest. Anàlogament pel guany, K, del sistema planta, $G(z)$.

A la part inferior de la figura s'hi dibuixa el controlador dead-beat, $C(z)$ amb la forma polinomial, que anirà canviant de valor segons els pols i zeros del sistema $G(z)$.

Pla z
En aquesta figura hi ha representats els **pols i zeros** del sistema de llaç obert i els **pols** del sistema de llaç tancat. Els pols del sistema de llaç obert, $G(z)$, són representats mitjançant una creu blava i els zeros amb cercles de color blau. Aquesta pantalla **és interactuable**, per tant els pols i zeros es poden moure al llarg de tot el pla. Els pols del sistema de llaç tancat es representen amb triangles de color blau.

S'hi pot veure representat un cercle de radi unitat de color blau cel, aquesta és necessari per determinar-ne l'estabilitat del sistema.

A la zona inferior dreta es pot observar tres diferents punts interactuables. El botó d'**afegir** i de **treure** zeros i pols del sistema de llaç obert, que com el seu nom indica permet modificar el sistema amb la quantitat de pols i zeros d'aquest.
Al centre es pot veure el **botó que commuta** segons si es vol afegir/treure un pol o zero. De manera que si el que s'està modificant és la quantitat de pols, apareixerà una creu blava juntament amb la paraula **'Pols'**. Per altra banda, si el que es modifica és la quantitat de zeros, apareixerà

un cercle blau juntament amb la paraula **'Zeros'**.

A la zona inferior central de la figura s'hi observarà diferents indicacions en vermell, remarcant algunes **restriccions del sistema** perquè es compleixin tots els paràmetres que ha de tenir un sistema. Les restriccions posades són:

- Al pla sempre hi ha d'haver un mínim de pols, que serà: un pol senzill, o bé, en cas de tenir pols complexos, la parella de pols conjugats. El missatge que es mostrarà és: *'Nombre mínim de pols'*.

- Per mantenir la causalitat del sistema, no es podrà afegir ni treure zeros o pols en cas que el sistema esdevingui acausal. Els missatges que es mostraran segons el cas són: *'NO es poden afegir més zeros'*, *'NO es pot treure aquest pol'* o *'NO es poden treure aquests pols'*.

- Hi ha un altre cas, però que s'ha realitzat per una raó totalment estètica. I és que s'ha restringit la quantitat de pols que hi pot haver en el pla i, conseqüentment, la quantitat de zeros. El motiu és que si el valor de pols és massa elevat la funció de transferència no hi cap a la figura. Per tant, el nombre màxim de pols que hi pot haver en el sistema és de 6. El missatge que es mostrarà és: *'NO es poden afegir més pols'*.

Resposta temporal
En aquesta figura es pot observar la representació gràfica de la **resposta en llaç tancat del sistema** $G(z)$ en temps discret per una entrada de graó unitari. La línia de color **negre** representa el senyal d'**entrada del graó unitari**. I els cercles de color blau, la resposta del sistema de llaç tancat a aquesta entrada. També s'hi pot observar la **resposta del sistema en llaç tancat de** $C(z)G(z)$, aquesta és la representada amb cercles de color verd. Finalment, els cercles de color magenta representen la resposta de l'acció que realitza el compensador en el llaç tancat.

8.4.3 Interactivitat amb l'aplicatiu

Respecte a la interactivitat de l'aplicatiu s'hi distingeixen tres parts. Per una banda, l'usuari pot interactuar amb algunes de les figures, sempre que tingui l'opció *Manipulate* seleccionada. Segons la figura, els paràmetres manipulables varien.

A la figura de d'*observació de paràmetres* són manipulables els *sliders*. El valor dels paràmetres dels *sliders*, es modifiquen arrossegant la barra d'esquerra a dreta.

Al pla z es poden manipular els pols i zeros que corresponen al sistema de llaç obert format per la planta $G(z)$. És a dir, que es poden arrossegar pel pla les creus i el cercles, essent els **pols i zeros** del sistema planta, respectivament. A la part inferior dreta de la figura és la zona que permet modificar la quantitat de pols i zeros es volen **afegir o treure**. El botó central és el que permet fer el **canvi de pol a zero**, de tal manera que si apareix *"× Pols"*, el que l'element que s'afegeix/treu és un pol, i igualment en cas de *"∘ Zeros"*.

A més, a la part inferior esquerra de la pantalla es pot observar el valor que prenen un pol/zero del *pla z* quan se li col·loca el cursor al damunt.

A part de la interactuació directa amb les figures, hi ha una altra manera d'interactuar amb l'aplicatiu. La finestra de *Settings* de la barra del menú s'hi pot trobar diferents opcions:

- **Reset:** Permet tornar a la mateixa posició de les figures que es troba en obrir l'aplicatiu.

Seguidament hi trobem l'opció de seleccionar exemples de casos predefinits, que són:

- **2 pols complexos:** Et retorna un sistema format per una parella de pols complexos conjugats.
- **1 zero real/1 pol real:** Retorna un sistema format per un zero i un pol reals.
- **1 zero real/2 pols complexos:** Retorna un sistema format per un zero i una parella de pols complexos conjugats.
- **2 zeros complexos/2 pols complexos:** Retorna un sistema format per dues parelles de zeros i pols complexos conjugats.

També s'hi troba l'opció per accedir aquest document:

- **Fitxa:** És un enllaç que et porta al document que conté aquesta fitxa. Així l'estudiant es pot documentar de la teoria que conté l'aplicatiu i entendre el funcionament d'aquest, així com totes les opcions que s'hi contemplen.

Finalment, hi ha l'opció de poder introduir alguns paràmetres des del teclat, aquests són:

- **Introduir funció de transferència:** Aquesta opció et permet **introduir** una funció de transferència arbitrària des del teclat. En obrir l'opció apareix un espai que fa referència al **guany** que multiplica al numerador i dos vectors buits: el primer fa referència al **numerador** i el segon al **denominador**. S'ha d'introduir de manera polinomial, per exemple:

  $$2, [1, 0.3], [1, 0.5, -0.2]$$

  és equivalent a

  $$G(z) = 2\frac{z + 0.3}{z^2 + 0.5z - 0.2}$$

- **Temps de mostratge:** Et permet introduir qualsevol valor pel temps de mostratge, T_s.

8.4.4 Glossari d'elements

Elements generals

- **Barres de desplaçament, *Sliders*,** : Et permeten canviar el valor d'un paràmetre. En tots els casos l'augment i el decreixement del valor és lineal, de manera que si s'arrossega la barra cap a l'esquerra el valor disminuirà, i cap a la dreta augmentarà. Estan delimitats per un interval finit.
- **Quadres de selecció, *Checkbox*,** : Et permeten activar mitjançant un clic del ratolí, una opció determinada.
- ***Settings***: Finestra del menú que permet accedir a més opcions.
- ***Manipulate*,** : És l'eina principal per realitzar les interaccions dels elements interactius associats a la representació gràfica, si aquesta opció no està seleccionada no es pot dur a

terme la interacció amb l'aplicatiu. Està seleccionada de forma nativa.

- ***Drag***, : És l'eina que et permet desplaçar pels diferents punts d'una figura, ja que el fet de tenir un espai limitat, hi haurà alguna configuració dels diagrames que no es podrà veure clarament tot el seu contingut.

- ***Zoom***, : És l'eina que et permet augmentar i disminuir la visualització d'una figura en concret. Per disminuir cal mantenir la tecla *Shift*.

Elements específics

- Pol del sistema planta $G(z)$ en llaç obert: $\times$
- Zero del sistema planta $G(z)$ en llaç obert: $\circ$
- Pol del sistema planta $G(z)$ en llaç tancat: $\triangle$

9 Comparació amb les versions antigues

Un cop realitzades les diferents aplicacions, és necessari realitzar una comparació d'aquestes amb les seves versions anteriors. D'aquesta manera es pot observar els canvis qualitatius i quantitatius, a més de comprovar si s'han assolit els objectius proposats a l'inici del projecte.

9.1 Resposta temporal de sistemes d'ordre n en temps discret

A la figura 1 es pot veure l'aspecte que tenia l'aplicatiu anterior al projecte:

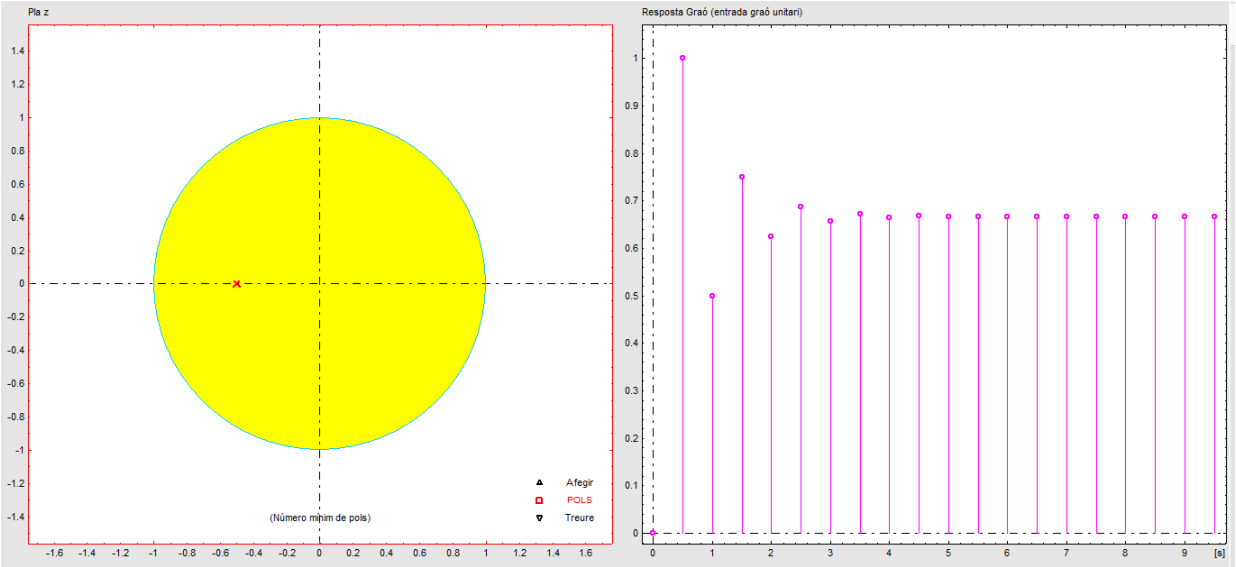


Figura 1: Aspecte de l'aplicatiu 1 anterior al projecte

I a la figura 2 l'aspecte final que té l'aplicatiu:

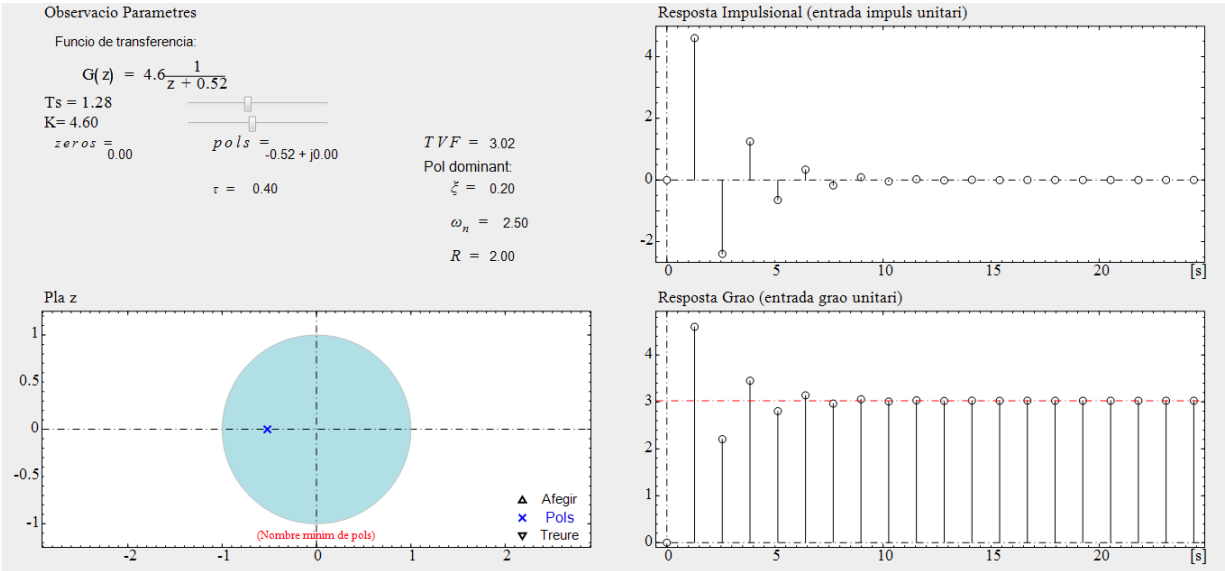


Figura 2: Aspecte de l'aplicatiu 1 posterior al projecte

Un dels objectius principals del projecte era actualitzar les aplicacions i donar-les-hi un aspecte més actual. Tot i ser un tema força subjectiu i que els gustos de cada un són diferents, es considera que els canvis són suficientment notables. A part de l'estètica, hi ha hagut una varietat de canvis i modificacions a esmentar.

El canvi més gran que es pot observar a simple vista és sobre la quantitat d'informació que aporta l'aplicatiu amb un sol cop d'ull. La figura d'*Observació de paràmetres* queda representada la funció de transferència la qual s'està treballant a cada instant. Es dóna informació del valor del temps de mostratge, T_s així com la possibilitat de modificar el seu valor. Anàlogament, passa amb el guany, K. També es dóna informació del sistema a partir dels paràmetres de TVF, el factor d'esmorteïment, ξ, la freqüència natural, ω_n i el nombre de mostres per període, R.
Cal destacar també la possibilitat de veure el valor de tots els pols i zeros en cada instant. Anteriorment també es podien veure, però únicament quan es tenia el cursor col·locat damunt del pol i zero corresponent.

Un altre canvi, és que la resposta temporal i impulsional es poden veure simultàniament sense haver de realitzar cap acció interactiva. A més d'afegir la línia discontínua del TVF.

També s'ha afegit la possibilitat d'introduir els valors de la funció de transferència i del temps de mostratge a partir del teclat.

9.2 Resposta freqüencial de sistemes en temps discret i transformació bilineal

A la figura 3 es pot observar l'aspecte de l'aplicatiu abans de realitzar els canvis pertinents:

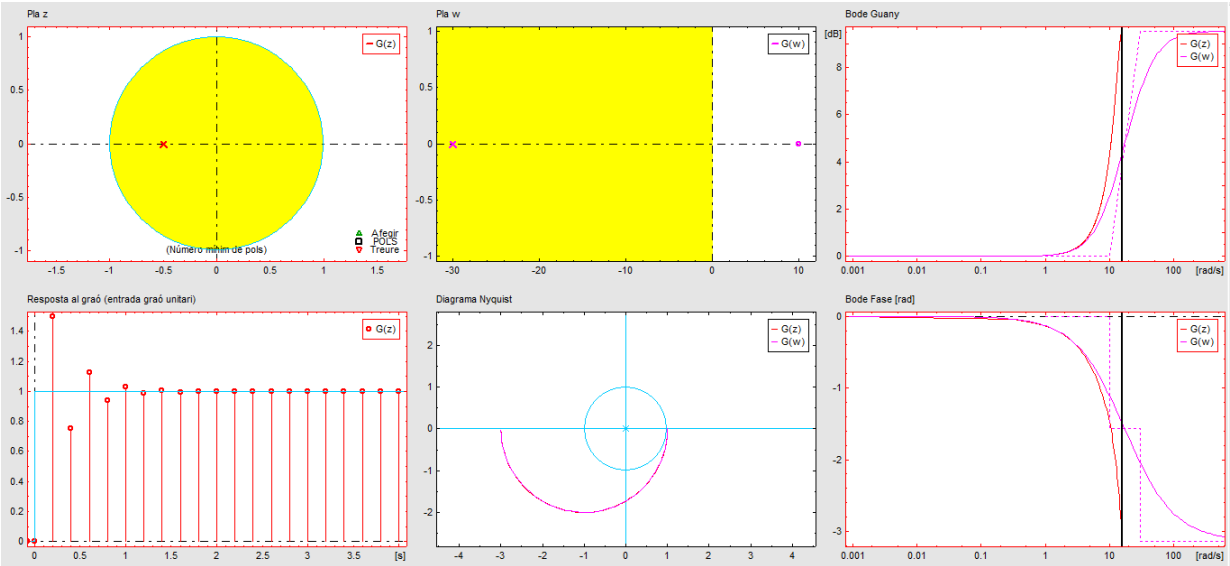


Figura 3: Aspecte de l'aplicatiu 2 anterior al projecte

I a la figura 4 es pot observar l'aspecte final:

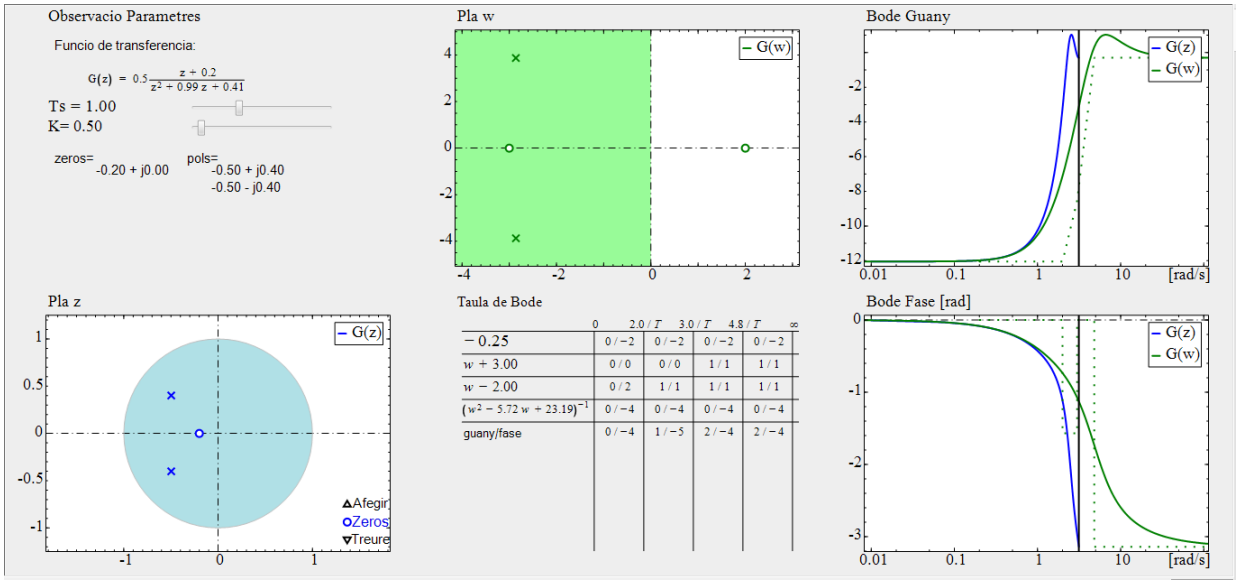


Figura 4: Aspecte de l'aplicatiu 2 posterior al projecte

De la mateixa manera que en la primera aplicació, es pot observar que els canvis estètics són evidents, per així buscar un estil més modern, tot i ser un tema bastant subjectiu.

Una altra vegada s'ha buscat mostrar tota la informació necessària per a l'usuari a un sol cop de vista. D'aquesta manera no només s'aporta informació qualitativa, sinó que també quantitativa. En aquest cas s'han eliminat les figures de la resposta temporal i la del diagrama de Nyquist. La primera ha estat eliminada, ja que era informació poc rellevant pel tema tractat, a més que la resposta temporal ja és subjecte de la primera aplicació. Respecte al diagrama de Nyquist, no s'ha eliminat del tot, sinó que es pot accedir a ell a través de la finestra de *Settings*.

En substitució de la resposta temporal s'ha col·locat la figura d'observació de paràmetres, per així, com ja s'ha dit, recopilar informació d'un caire més quantitatiu. En aquesta s'hi pot observar la funció de transferència a l'instant. També s'ha afegit la possibilitat de modificar els paràmetres del temps de mostratge, T_s, i del guany, K, del sistema $G(z)$. Finalment, en aquesta figura també s'hi mostra els valors dels zeros i pols en temps discret del sistema.

Però el gran canvi ha estat l'addició de la Taula de Bode. Tenint en compte que l'objectiu d'aquestes aplicacions és millorar l'experiència d'aprenentatge dels estudiants, es va creure necessària la implementació de la taula. De què serveix saber interpretar un diagrama de Bode si no el saps dibuixar? Així, l'aplicatiu té el valor afegit de mostrar el procediment previ a la realització dels diagrames de guany i fase de Bode. A més, a partir de la mateixa taula, es pot intuir la funció de transferència en el camp freqüencial.

De la mateixa manera que la primera aplicació, s'ha implementat l'opció d'introduir la funció de transferència del sistema $G(z)$, així com del temps de mostratge, T_s.

9.3 Compensador d'avanç i retard de fase amb el mètode exacte

Aquesta tercera aplicació no té cap versió anterior, tot i això, s'ha inspirat amb les aplicacions del càlcul de compensadors d'avanç i de retard de fase utilitzant la transformada bilineal. A la

figura 5 es pot observar el seu aspecte:

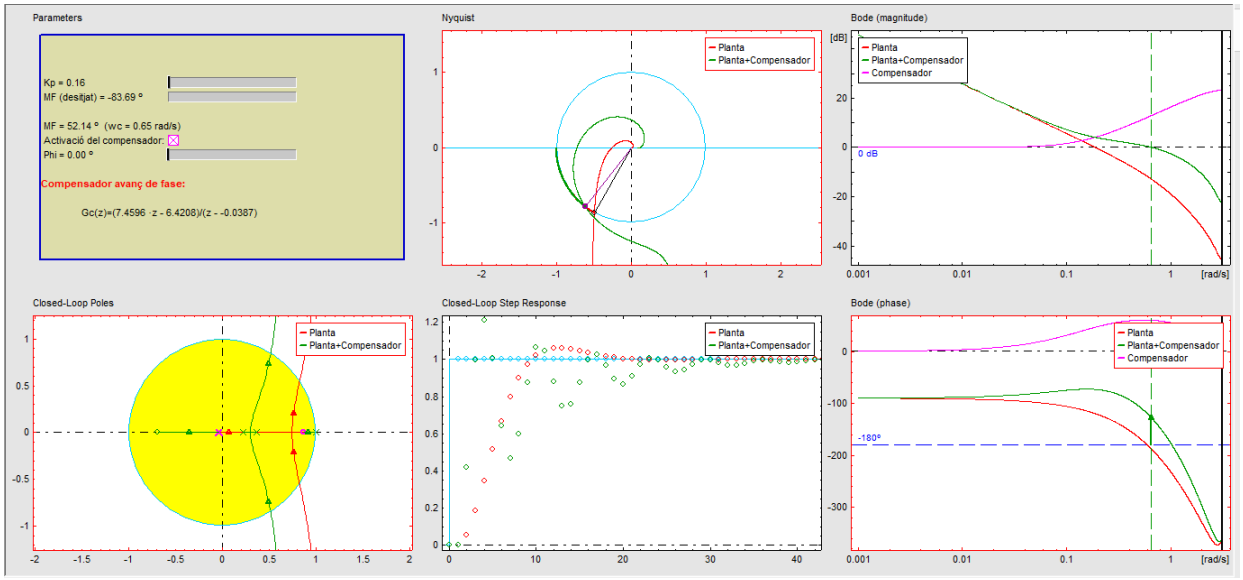


Figura 5: Aspecte de l'aplicatiu 3 anterior al projecte

I a la figura 6 es pot observar l'aspecte actual de l'aplicatiu realitzat:

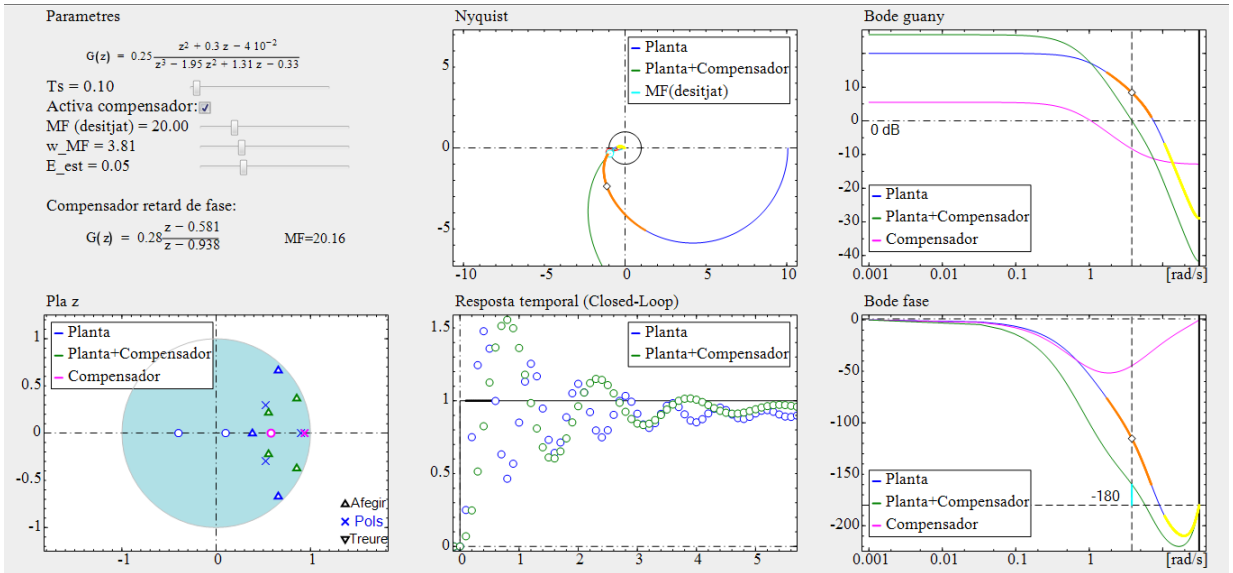


Figura 6: Aspecte de l'aplicatiu 3 posterior al projecte

Pel que fa a l'estètica de l'aplicatiu, és el que ha tingut menys canvis a simple vista. Les figures de la pantalla, són molt semblants entre si, tot i que, s'han realitzat alguns canvis estètics per donar-li un toc més actual.

A la figura d'observació de paràmetres, s'hi representa tant el sistema $G(z)$ com la funció de transferència del compensador $C(z)$. També en tractar-se d'un mètode de resolució diferent, les

variables de les restriccions canvien. Les variables que es poden modificar a partir dels sliders són: el temps de mostratge, T_s, l'error estacionari, E_{est}, la freqüència de tall, ω_{MF} i el marge de fase desitjat, $MF(desitjat)$.

Pel que fa a la interacció amb el pla z, s'ha inclòs la possibilitat d'afegir i treure els pols i zeros del sistema planta, ja que anteriorment no hi havia aquesta possibilitat.

També s'ha afegit la possibilitat de modificar la freqüència de tall a través dels diferents diagrames. I s'ha representat amb colors els rangs de freqüència pels quals es dóna una solució pel compensador d'avanç i de retard de fase.

Finalment, s'ha donat la possibilitat d'introduir els valors de la funció de transferència i de les restriccions que ha de complir el compensador pel seu correcte disseny.

9.4 Disseny d'un compensador dead-beat

Aquest aplicatiu és creat íntegrament des de zero, per això no hi ha cap comparació possible. Es pot observar el seu aspecte final a la figura 7.

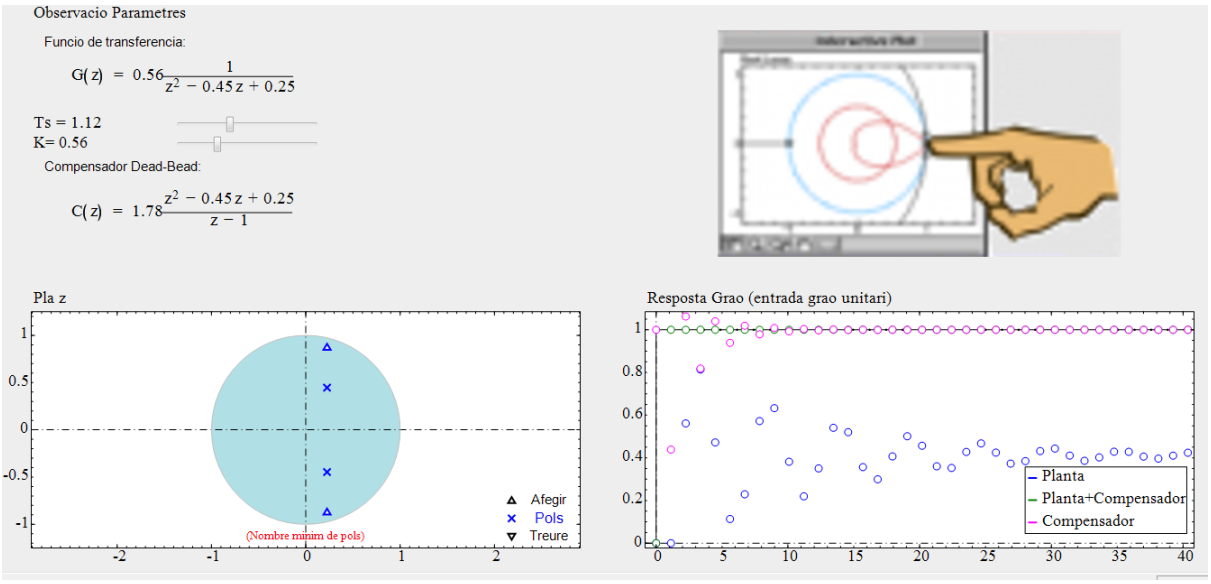


Figura 7: Aspecte final de l'aplicatiu 4

10 Pressupost

El pressupost que s'ha realitzat és hipotètic i tenint en compte les consideracions que podria tenir una empresa en cas d'executar aquest projecte. S'ha tingut en compte dos tipus de despeses: les materials i les de personal.

Les despeses de material fan referència a les que estan relacionades amb el material necessari per poder dur a terme el projecte, com pot ser material d'oficina. Les partides que s'han tingut en compte han estat:

- L'ordinador d'ús personal
- Llicència del programa *Sysquake*
- Material d'oficina

Segons la pàgina web del distribuïdor (*Calerga Sarl*) del programa *Sysquake*, la llicència val 1000 CHF, que al dia de realització del pressupost, equival a 923,71€.

D'altra banda, les despeses de personal es deuen a les hores que han estat necessàries per dur a terme el projecte. La feina realitzada s'ha distingit en diferents parts:

- Aprenentatge del llenguatge i l'entorn de *Sysquake*. També s'inclou la recerca de teoria del control automàtic.

Per cada aplicatiu les tasques realitzades s'han classificat segons:

- Disseny de l'aplicació
- Programació (realització del codi font)
- Documentació (elaboració de les fitxes i memòria)

Per considerar el preu unitari de cada hora, s'ha agafat com a referència el sou mínim d'un estudiant amb un conveni de pràctiques curriculars que cursa a l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona (ETSEIB). Aquest preu és de 8€/hora.

El resum del pressupost es pot veure a la taula 3:

Concepte	Quantitat	Cost unitari	Cost
Material	**[u]**	**[€/u]**	**[€]**
Ordinador portàtil	1	500	500
Llicència *Sysquake*	1	923,71	923,71
Material d'oficina			20
Total material			1443,71
Personal	**[h]**	**[€/h]**	**[€]**
Aprenentatge personal	70	8	560
Disseny de l'aplicatiu	30	8	240
Programació	190	8	1520
Documentació	70	8	560
Total personal	360		2880
Total pressupost			4323,71

Taula 3: Resum del pressupost

A la taula es pot veure que el pressupost final del projecte ha estat de 3.683,71€. Es pot observar que més de la meitat del cost del projecte és degut a la despesa de personal, és a dir, les hores del programador. El percentatge del cost de personal respecte el total ha estat:

$$\%Despesa_{personal} = \frac{2880}{4323,71} \times 100 = 66,61\%$$

11 Estudi de l'impacte ambiental

Pel que fa a l'impacte ambiental, aquest projecte no presenta cap implicació directa negativa al medi ambient. Indirectament, però, es pot considerar el consum elèctric que s'ha necessitat per realitzar al projecte i el consum de combustible per desplaçar-se a la zona d'estudi amb cotxe.

Tenint en compte la Directiva 2011/92/UE del Parlament Europeu i del Consell, del 13 de desembre del 2011, relativa a l'avaluació de les repercussions de determinats projectes públics i privats sobre el medi ambient, el present projecte no s'ha de sotmetre a cap avaluació d'impacte ambiental.

12 Conclusions

Pel que fa a l'aspecte general del present projecte, s'ha iniciat fent èmfasi a la necessitat i la rellevància que tenen les aplicacions interactives en l'àmbit de la docència. També de la necessitat d'actualitzar les que ja s'havien realitzat anteriorment per adaptar-se als nous temps per així ser una eina més atractiva d'utilitzar.

També s'ha justificat la utilització del programari utilitzat, *Sysquake*, i tots els avantatges que aporta a l'hora de realitzar aplicacions interactives. I com és evident també s'ha justificat l'elecció de les aplicacions escollides per executar aquest projecte.

Per altra banda, s'ha explicat el mètode de treball emprat per a la realització de cada aplicació així com l'estructura que segueixen per aconseguir assolir els objectius proposats. I anàlogament s'ha realitzat el mateix per la documentació de les diferents aplicacions.

Pel que fa a les aplicacions han estat renovades estèticament per així aconseguir una visió més actual. També s'ha incrementat les possibilitats d'interacció amb els diferents aplicatius i s'ha millorat en fer-los més intuïtius.
Les fitxes realitzades per cada una de les aplicacions han estat realitzades perquè qualsevol persona amb nocions bàsiques de control pugui entendre el seu contingut sense dificultat. I també realitzen perfectament la funció de manual d'ús de les diferents aplicacions, expressant-ne tots els detalls.

Finalment, s'ha realitzat una comparació de les versions antigues de les aplicacions actualitzades amb les actuals, per poder plasmar el treball realitzat i demostrar les diferències significatives que hi ha amb el treball realitzat.

Així doncs, tal com s'ha anat veient al llarg d'aquesta memòria, la realització del projecte ha estat satisfactòria tenint en compte els objectius proposats. Tot i que, des d'un principi la intenció havia estat realitzar un nombre superior d'aplicacions a les finalment realitzades. Això ha estat conseqüència de les problemàtiques sorgides durant el projecte i la desconeixença inicial de l'entorn *Sysquake*, que han endarrerit el procés d'elaboració de les aplicacions.

Per últim, destacar que aquest projecte no és més que una petita aportació del material docent per l'assignatura del control automàtic, i s'espera que les hores de treball dedicades en aquest siguin una oportunitat per a altres persones d'endinsar-se en aquest camp de l'enginyeria.

13 Referències bibliogràfiques

Bibliografia

[1] J.P. Keller, *Interactive control system design*, Suissa, 2006.

[2] S. Dormido, *The role of interactivity in control learning*, IFAC Advances in Control Education, 2003.

[3] J.L. Guzmán, R. Costa, M. Berenguel i S. Dormido, *Control automático con herramientas interactivas*, PEARSON EDUCATION, 2012.

[4] Calerga Sarl. *https://www.calerga.com/products/Sysquake/index.html*

[5] Y. Piguet, *Sysquake 6: User Manual*, CALERGA SARL, 2016.

[6] R. Costa i E. Fossas, *Sistemes de control en temps discret*, ENGINYERIES INDUSTRIALS, 2016.

[7] K. Ogata, *Ingeniería de control moderna*, PEARSON EDUCATION, 2010, 5a edició.

[8] Louis C. Wastphal, *Handbook of Control Systems Engineering*, SPRINGER, 2001.

Agraïments

Primer de tot m'agradaria donar les gràcies en Ramon Costa per haver-me donat l'oportunitat de dur a terme aquest projecte. Sempre ha estat disponible quan he requerit la seva atenció, i en tot moment m'ha facilitat els recursos necessaris per poder avançar amb el projecte. Sense la seva ajuda aquest projecte no hauria estat possible.

Per altra banda, voldria donar les gràcies a la meva família: en Pep, la Núria, en Joel i l'Axel. Per la paciència que han tingut des de sempre, i sobretot en aquests últims quatre anys. Amb la seva estima el camí realitzat ha estat més senzill.

I finalment, donar les gràcies a la Berta per ajudar-me amb la literatura de la memòria, realitzant així un text entenedor i lliure d'errors. També donar-li les gràcies pel seu suport incondicional durant tot el temps que ha estat el meu costat.