

Escola Universitària Politécnica de Mataró

Centre adscrit a:



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA

Grau en Enginyeria Electrònica Industrial i Automàtica

CONTROL D'UN SISTEMA DE DIPÒSITS DESACOBLATS

Memòria

ADRIÁN SÁEZ BERMÚDEZ

PONENT: JOAN TRIADÓ

TARDOR 2015



TecnoCampus
Mataró-Maresme

Agraïments

Agraïixo al ponent del present projecte, Joan Triadó, la seva total implicació en el seguiment del projecte, la absoluta disponibilitat a resoldre qualsevol problema sempre que ha sigut necessari i la seva capacitat didàctica per ajudar a entendre conceptes necessaris pel desenvolupament del projecte.

Per altra banda, agrair a l'equip de becaris del Tecnocampus, en especial a Albert Simó Dalmau, per la seva disponibilitat i ajuda a la hora d'obtenir part de les eines necessàries per a la realització mecànica de la maqueta.

Resum

En aquest projecte es realitza el disseny i construcció del prototip d'un sistema de dipòsits desacoblats. Amb aquesta implementació es pretén millorar l'antiga maqueta que hi havia al Laboratori de control per un posterior estudi didàctic en l'àrea de Control.

Primer es distribueixen els elements físics de la manera més òptima i s'estudia l'electrònica associada al prototip, per després realitzar, a través de la lectura d'uns sensors, el control automàtic de l'entrada i sortida del líquid al sistema i finalment, aconseguir validar el seu ús didàctic dissenyant un controlador.

Resumen

En este proyecto se realiza el diseño y construcción del prototipo de un sistema de depósitos desacoplados. Con esta implementación se pretende mejorar la antigua maqueta que había en el Laboratorio de control para un posterior estudio didáctico en el área de Control.

Primero se distribuyen los elementos físicos de la manera más óptima y se estudia la electrónica asociada al prototipo, para después realizar, a través de la lectura de unos sensores, el control automático de la entrada y salida del líquido al sistema y finalmente, conseguir validar su uso didáctico diseñando un controlador.

Abstract

In this project the design and construction of a prototype system uncoupled are made. With this implementation it pretends improve the old model that was in the control laboratory for educational study in the area of Control.

First the physical elements are distributed in the most optimally manner and associated electronics are studied, then perform, through the reading of sensors, an automatic control of the input and output of liquid to the system and finally studies, get validate his educational uses designing a controller.

Índex.

Índex de figures.....	III
Índex de taules.....	VII
Glossari de termes.....	IX
1. Objectius.....	1
1.1. Propòsit.....	1
1.2. Finalitat.....	1
1.3. Objecte.....	1
1.4. Abast.....	1
2. Introducció al projecte.....	3
2.1. Antecedents.....	5
2.2. Estat de l'art.....	7
3. Plantejament i selecció de les possibles solucions alternatives.....	9
4. Descripció de la solució dels elements físics.....	15
4.1. El sistema físic.....	17
4.2. Els actuadors.....	18
4.2.1. Bombes de buidatge.....	18
4.2.2. Electrovàlvules.....	19
4.3. Sensors.....	20
4.4. Electrònica associada.....	21
4.4.1. Fonts d'alimentació.....	21
4.4.2. Circuit de control (Arduino).....	24
4.4.3. Targeta d'adquisició.....	25
4.4.4. Caixa de connexions i connectors.....	26
5. Obtenció del model del sistema.....	29
5.1. Experiment 1. Cabal en funció de la tensió.....	30
5.2. Experiment 2. Altura en funció del cabal.....	32
5.3. Funció de transferència.....	35
5.4. Conversió a tensió de la font regulable i sortida dels sensors.....	38
6. Disseny del software de control.....	43
6.1. Aspectes tècnics abans de programar.....	43

6.1.1.	Processament dels senyals de lectura dels sensor d'ultrasò.....	43
6.1.2.	Resposta de l'acció de control.....	44
6.2.	Procés de programació de l'algorisme amb Arduino i processament del senyal.	44
6.2.1.	Programació per obtenir el nivell de líquid i obtenció del senyal.	45
6.2.2.	Filtre RC (PWM).....	48
6.2.3.	Circuit d'adaptació d'alimentació de la bomba secundària i l'electrovàlvula d'entrada.....	52
6.3.	Leds indicatius, interruptors i seguretat.....	55
6.4.	Disseny del retorn d'estat.	57
6.4.1.	Obtenció de les equacions d'estat.....	57
6.4.2.	Càlcul de l'acció de control (K).	59
6.5.	Aspectes que s'han considerat per un correcte control.....	64
6.6.	Simulació del model lineal.	66
6.7.	Simulació del model no-lineal.....	70
6.7.1.	Simulació sense limitador.....	72
6.7.2.	Simulació amb compensació ANTI-WINDUP	74
6.8.	Disseny del control del sistema real.	79
6.8.1.	Explicació del model i paràmetres del sistema real.....	79
6.8.2.	Filtre passa-baixos per eliminar el soroll.....	81
7.	Resultats.....	85
8.	Desviacions.....	91
9.	Planificació.....	95
10.	Impacte Mediambiental.	99
11.	Conclusions.....	103
12.	Referències.....	107

Índex de figures.

Figura 2.1. Sistema de tancs desacoblats.....	3
Figura 2.2. Sistema de dipòsit de l'antiga maqueta.....	5
Figura 3.1 Taula d'aplicació de sensors de nivell de líquid	11
Figura 4.1. Esquema del sistema físic i els respectius elements.....	15
Figura 4.2. Bomba TMC 03301	19
Figura 4.3. Electrovàlvula 24Vcc.	20
Figura 4.4. Sensor ultrasò HC-SR04	21
Figura 4.5. Font remota Kikusui.....	23
Figura 4.6. Arduino UNO.....	25
Figura 4.7. Caixa de connexions.	27
Figura 5.1. Procés sobre el qual es realitza el control	29
Figura 5.2. Variació de cabal respecte la variació de tensió de la bomba.	32
Figura 5.3. Variació de l'altura del dipòsit 1 respecte la variació de cabal d'entrada.....	33
Figura 5.4. Variació de l'altura del dipòsit 2 respecte la variació de cabal d'entrada.....	34
Figura 5.5. Esquema dipòsits desacoblats amb els paràmetres referents a la funció de transferència.....	36
Figura 5.6. Diagrama de blocs de la funció de transferència desglossada.	37
Figura 5.7. Sistema llaç tancat.....	37
Figura 5.8. Recta de regressió de V_{font} respecte $V_{targeta}$	39
Figura 5.9. Recta de regressió de V_{out} respecte el nivell del dipòsit 1.....	41

Figura 5.10. Recta de regressió de Vout respecte el nivell del dipòsit 2.	41
Figura 6.1. E/S Microcontrolador Arduino UNO.	45
Figura 6.2. Connexions Arduino-HC-SR04.	47
Figura 6.3. Efecte del filtre sobre la senyal PWM.	48
Figura 6.4. Filtre RC.	49
Figura 6.5. Modulació per ample de pols.	50
Figura 6.6. Efecte Filtre amb PWM 100% cicle de treball.	50
Figura 6.7. Efecte Filtre amb PWM 0% cicle de treball.	51
Figura 6.8. Efecte Filtre amb PWM 75% cicle de treball.	51
Figura 6.9. Efecte Filtre amb PWM 25% cicle de treball.	51
Figura 6.10. Efecte Filtre amb PWM 50% cicle de treball.	51
Figura 6.11. Efecte Filtre amb PWM 5% cicle de treball.	52
Figura 6.12. Circuit d'adaptació de les alimentacions.	53
Figura 6.13. Funcions de transferència del sistema en forma de diagrama de blocs.	58
Figura 6.14. Pla z.	60
Figura 6.15. Pla s.	61
Figura 6.16. Realimentació del retorn d'estat.	63
Figura 6.17. Retorn d'estat incorporat al model.	64
Figura 6.18. Controlador lineal per retorn d'estat.	67
Figura 6.19. Resposta del control lineal amb un esglaió de 15 cm (dip2).	68
Figura 6.20. Resposta del control lineal amb un esglaió de 15 cm (dip1).	68

Figura 6.21. Resposta del control lineal amb un esglaió de 15 cm i $K = 1,2$ (dip2).	69
Figura 6.22. Resposta del control lineal amb un esglaió de 15 cm i $K = 1,2$ (dip1).	70
Figura 6.23. Controlador per retorn d'estat del sistema no-lineal.	72
Figura 6.24. Resposta del model no-lineal amb consigna 0 i sense limitador (dip 1).....	73
Figura 6.25. Resposta del model no-lineal amb consigna 0 i sense limitador (dip 2).....	73
Figura 6.26. Senyal de control no-lineal sense limitació de tensió.	74
Figura 6.27. Saturador anti-windup.....	75
Figura 6.28. Controlador no-lineal de retorn d'estat + saturador anti-windup.....	76
Figura 6.29. Condicions inicial del sistema.....	76
Figura 6.30. Comportament del nivell del model no-lineal amb 3cm de consigna (dip1)..	77
Figura 6.31. Comportament del nivell del controlador no-lineal amb 3cm de consigna (dip2).	77
Figura 6.32. Comportament dVh1 del model no-lineal amb 3cm de consigna (dip1).	77
Figura 6.33. Comportament dVh2 del model no-lineal amb 3cm de consigna(dip2).	78
Figura 6.34. Disseny del controlador per retorn d'estat del sistema real.	80
Figura 6.35. Configuració d'entrades i sortides de la targeta d'adquisició.	80
Figura 6.36. Filtre RC.....	82
Figura 6.37. Diagrama de blocs de la funció de transferència d'un filtre RC.	82
Figura 7.1. Controlador del sistema real.....	85
Figura 7.2. Comportament del nivell del sistema real amb 4 cm de consigna (dip2).	86
Figura 7.3. Comportament del nivell del sistema real amb 4 cm de consigna (dip1).	86

Figura 7.4. Comportament dh2 del sistema real amb 4 cm de consigna (dip2).	86
Figura 7.5. Comportament dh1 del sistema real amb 4 cm de consigna (dip1).	87
Figura 7.6. Comportament dVh2 del sistema real amb 4 cm de consigna (dip2).	87
Figura 7.7. Comportament dVh1 del sistema real amb 4 cm de consigna (dip1).	87
Figura 7.8. Volums del dipòsit 1 i 2 amb 4 cm de consigna.	87
Figura 7.9. Comparativa entre el comportament real i la simulació del control no lineal ..	88

Índex de taules.

Taula 3.1. Selecció dipòsits	12
Taula 3.2. Selecció dels sensors	12
Taula 3.3. Selecció del controlador.	12
Taula 3.4. Selecció de la situació dels dipòsits.....	13
Taula 5.1. Cabal en funció de la tensió.....	31
Taula 5.2. Nivells d'estabilització en funció del cabal.....	33
Taula 5.3. Equivalències entre voltatge de la targeta i voltatge de la font.	39
Taula 5.4. Equivalències entre el nivell dels dipòsits i el voltatge de sortida dels sensors.	40
Taula 9.1. Durada de les tasques del projecte.....	98

Glossari de termes.

BP	Bomba primària
BS	Bomba secundària
CPU	Unitat central de processament (<i>Central Processing Unit</i>)
dip	Dipòsit
EV	Electrovàlvula
FA	Font d'alimentació
f_c	Freqüència de tall
GND	Terra (<i>Ground</i>)
K	Acció de control
LED	Diode emissor de llum (<i>Light-Emitting Diode</i>)
PC	Computadora personal (<i>Personal Computer</i>)
PCB	Placa de circuit imprès (<i>Printed Circuit Board</i>)
PWM	Modulació de l'ample de pols (<i>Pulse Width Modulation</i>)
q	Cabal
R	Resistència
S	Sensor
τ	Constant de temps (<i>Tau</i>)
T_{ss}	Temps d'estabilització
ω_o	Freqüència angular natural del circuit

1. Objectius.

1.1. Propòsit

Disseny i construcció d'un sistema de dos dipòsit desacoblats i elements auxiliars: bombes, vàlvules, fonts i un dipòsit per a subministrar aigua al sistema.

1.2. Finalitat

El disseny del sistema de dos dipòsits desacoblats es fa amb la finalitat d'incorporar-lo com a sistema de pràctiques en les assignatures i projectes de l'àrea de control.

1.3. Objecte

Disseny d'un prototip de sistema de tancs, capaç de funcionar de manera automatitzada, aprofitant els components i millorant el sistema d'una antiga maqueta situada al Tecnocampus. Possibilitar el seu ús didàctic per a la realització de diversos controls de nivell de líquid a través de Simulink.

1.4. Abast

Disseny i construcció de la part mecànica constituïda pels dipòsits, les prestatgeries, les mànegues, bombes i electrovàlvules. Programació de l'algorisme d'automatització de l'entrada i sortida del líquid a un dipòsit d'emmagatzematge, per mantenir el seu nivell. Disseny de l'electrònica relacionada amb l'adaptació del processament dels senyals i la lectura dels nivells dels dipòsits a ser controlats. Finalment, control del nivell de líquid dels dipòsits i validació dels resultat.

2. Introducció al projecte.

En l'estudi d'aquest projecte es pretén reformar una antiga maqueta situada al Laboratori de Control del Tecnocampus sobre la qual es realitzaven pràctiques de control. Aquesta estava formada per dos tancs desacoblats i un dipòsit auxiliar (dip0) encarregada de distribuir el líquid al sistema. Per dur a terme la reconstrucció cal realitzar un estudi previ de la funció d'aquesta antiga maqueta, dels components a aprofitar i dels conceptes que aquesta implica.

El concepte bàsic a la hora de dissenyar la nova maqueta serà el mateix en termes de funcionament i mecanismes. Per tant, estarà formada per dos dipòsits desacoblats amb un tercer dipòsit auxiliar encarregat de permetre l'accés i evacuació del líquid al sistema. Evidentment també haurà de permetre el seu estudi didàctic en l'àmbit de Control.

En un sistema de dipòsits desacoblats s'acostuma a situar un dipòsit més elevat que l'altre per fer que el líquid de sortida d'un dels dipòsits es dirigeixi directament a la part superior de l'altre dipòsit descarregant el líquid a l'atmosfera abans de caure-hi. A la Figura 2.1 s'observa un sistema d'aquest tipus:

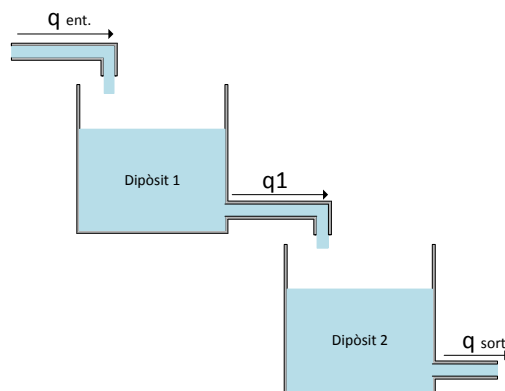


Figura 2.1. Sistema de tancs desacoblats.

On:

q_{ent} : cabal d'entrada.

q_1 : cabal de sortida del dipòsit 1.

q_{sort} : cabal de sortida.

L'antiga maqueta que hi havia feia servir un sensor de boia que situava la boia dins dels dipòsit, es feien servir quatre barres metàl·liques per el manteniment del nivell del dipòsit auxiliar que donaven informació a una targeta de control, per posteriorment activar l'electrovàlvula d'entrada de líquid o extreure aigua del sistema. Per altre banda, havia sofert un desgast tant per part dels components com pel que fa als dipòsits i alguns d'ells no funcionaven. Conseqüentment es va decidir plantejar un nou prototip amb un sensors més precisos, uns dipòsits més preparats i menys corrosius als efectes de l'aigua, dissenyar una nova electrònica fent servir un microcontrolador per aconseguir l'automatització que abans li mancava.

Es pretén llavors aconseguir una millora respecte l'antiga maqueta pel que fa a precisió i a automatització. Aleshores es vol aconseguir un total control del dipòsit auxiliar per permetre l'entrada o sortida del líquid en funció d'uns nivells de seguretat i posteriorment permetre realitzar probes de control per aconseguir estabilitzar algun dels altres dos dipòsits al nivell desitjat.

Per aconseguir controlar els dipòsits s'aprofita l'ajuda d'uns sensors per realitzar unes lectures de dades capaces de ser rebudes per una targeta d'adquisició de dades.

També cal disposar d'un microcontrolador, capaç de processar la lectura del nivell de líquid i controlar els actuadors mitjançant la programació d'un algorisme.

Per realitzar un control eficaç primer s'estudia la manera més òptima per posicionar els dipòsit i els diferents actuadors per aconseguir un correcte control i a continuació es procedeix a la seva construcció.

Posteriorment, es busca la manera ideal de situar els sensors a efecte que aquests no es vegin afectats per l'aigua i siguin capaços d'adquirir uns valors el més precisos possible.

Aleshores s'estudia i dissenya l'electrònica associada al microcontrolador per tal de processar correctament els senyals, alimentar els corresponents actuadors i adquirir les dades necessàries per controlar el sistema.

En acabat, es realitzen el experiments necessaris per obtenir les dades del model pertinents al sistema en qüestió i els valors que permetran controlar aquest sistema. A continuació, amb l'ajut del software Simulink es dissenyarà el model teòric en forma de diagrama de

blocs amb un control qualsevol per simular quina haurà de ser la resposta esperada per després intentar aplicar aquest model al sistema real i demostrar la seva viabilitat en usos didàctics.

2.1. Antecedents.

Els principals antecedents dels que es disposen per a la realització d'aquest treball és troba al dossier de pràctiques de Servosistemes i Servotècnica (1994-95) a l'apartat de *Control de nivell de tancs per ordinador* on s'explica el funcionament bàsic i el disseny de l'antiga maqueta que cal reformar ja que el funcionament ha quedat obsolet.

En aquest apartat s'estudia la manera de realitzar un procés de disseny d'un sistema de control a través de:

1. La realització d'un model matemàtic.
2. L'anàlisi del sistema.
3. Realització d'un controlador digital.

L'esquema de la maqueta és el següent:

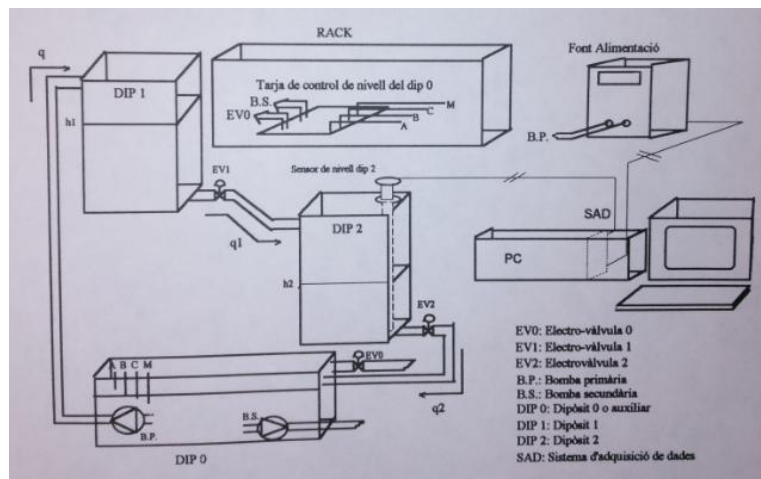


Figura 2.2. Sistema de dipòsit de l'antiga maqueta.

Font: Pràctiques *Servosistemes i Servotècnica* (1994-95).

També s'esmenta la descripció de la maqueta a nivell físic i els elements dels quals disposa:

- Dos dipòsit més un tercer auxiliar (dip0), aquest últim té la funció de subministrar el líquid al sistema de dos tancs a través d'una bomba primària.
- Cal mantenir constant el nivell del dip0 per no variar la característica de la bomba primària. Per mantenir el nivell es disposa de quatre barres metàl·liques.
- Aquestes barres donen informació del nivell del dip0 a una targeta de control per tal d'activar la EV0 (per deixar entrar el líquid) o la bomba (per extreure el líquid cap a la claveguera).
- Es disposa d'una font d'alimentació que subministrarà corrent a la BP per a que aquesta comenci a enviar líquid. Aquesta font pot ésser controlada per control remot.
- Per tancar i obrir les electrovàlvules 1 i 2 es disposa de 2 commutadors.

Per trobar el model del sistema:

Com que el model matemàtic d'un sistema de fluid es basa en equacions no-lineals en aquesta pràctica es pretén linealitzar el sistema a l'entorn d'un punt de treball i escollint un certs valors respecte aquest punt.

Explica que s'han de trobar unes corbes característiques de les dues electrovàlvules, de la bomba d'entrada i del sensor d'alçada per obtenir un model lineal. Cal escollir un punt de treball sobre les corbes de les vàlvules i interpretar els pendents de les rectes tangents com les seves resistències. Aquestes corbes són en concret:

- Cabal en funció de tensió aplicada a la bomba.
- Alçada de líquid en el dip1 en funció del cabal de sortida del dip1
- Alçada del líquid del dip2 en funció del cabal de sortida del dip2.
- Tensió de sortida dels transductor de nivell del dip2 en funció de l'alçada del líquid del dip2.

En el document es fa un breu resum de com realitzar el experiments necessaris per obtenir les corbes anteriorment esmentades.

Pel que fa a les formes d'adquirir i processar els senyals, en l'antiga maqueta es tenen un conjunt de dispositius electrònics destinats a la captura, en uns certs instants, de dades analògiques per ser digitalitzades. La base d'aquests sistemes és un convertidor

analògic/digital, dues targetes d'adquisició de dades (SAD) que es connecten a un Bus de PC que permet captar les dades per ser tractades per feines de monitorització i control.

Per l'estudi de l'obtenció de la funció de transferència, el controlador per retorn d'estat, la programació requerida en Matlab per realitzar i processar els senyals de control i trobar solució a determinats problemes que puguin sorgir respecte el model es fan servir els llibres recomanats a la assignatura de Control Digital i Control de Processos. (*Dorf, Richard C; Bishop, Robert H.. Sistemas de Control Moderno. 10a. Pearson-Prentice-Hall, 2005*) i (*Ogata K. Ingeniería de Control Moderna, 5a. Pearson Education, 2010*). I també treballs de final de grau d'estudiants d'altres universitats basats en controls de tancs o dipòsits.

2.2. Estat de l'art.

Els controladors de nivells són dispositius que garanteixen el manteniment d'un cert nivell de líquid o fluid en un rang de variació establert. Aquests controls són molt importants tant per processos de producció com d'emmagatzematge, és per això que s'ha creat la necessitat de fer-los servir en control automatitzat de processos per proporcionar major precisió en la fabricació de peces, l'ompliment de recipients (per exemple envasos) i en aquest cas per controlar el nivell de líquid d'un dipòsit d'emmagatzematge.

Poder establir un control sobre els diferents dipòsits ens permetrà obtenir informació del volum de líquid en tot moment, el temps d'ompliment, el cabal necessari per controlar el nivell de líquid, també a nivell industrial podria ser útil haver de mantenir el nivell de líquid per a que no sobrepassi o es buidi un determinat dipòsit sense haver d'estar controlant-lo manualment amb vàlvules manuals i si es necessari mantenir-ho a un cert nivell constant (estabilitzar-ho) imprescindible per a realitzar determinades operacions amb el líquid o fluid corresponent.

A nivell didàctic es troben empreses encarregades de la venda de sistema de controls, sobretot a universitats i centres docents especialitzats en control, d'un alt valor adquisitiu degut a les prestacions que aquests incorporen. Aquestes empreses inclouen en la venda del seu producte característiques com:

- Sistemes SCADA amb Control avançat.

- Diversos tipus de control i multicontrols en temps real.
- El propi software de control específic.
- Targeta d'adquisició de dades.
- Exercicis de calibratge per comprovar la precisió dels sensor abans de mesurar.
- Compatibilitat de l'equip amb un projector o pissarra electrònica per explicar el funcionament de l'equip a tota una classe.
- Compatibilitat amb estàndards de la indústria i sistemes operatius com Windows.
- Total flexibilitat a la hora de modificar texts o instruccions.
- Anàlisi comparatiu de les dades obtingudes, posterior al procés i modificació de les condicions durant el procés.
- Visualització de totes les variables de procés de forma automàtica i simultània.
- Preparat per realitzar investigacions aplicades, simulacions industrials reals i cursos de formació.
- L'equip disposa de sistemes de seguretat (mecànic, elèctric i de software)
- Dissenyat sota normativa de qualitat.

Entre moltes d'altres característiques segons el models.

Aquestes empreses venen poques unitats a l'any degut al preu que tenen al mercat, però cal dir que el resultat que obtenen és realment molt complet pel que fa el seu estudi didàctic, sobretot per totes les prestacions d'aprenentatge que inclouen i la informació que faciliten per tal d'entendre tot el sistema des del muntatge fins la part de software. Una de les empreses més famoses a Espanya podria ser EDIBON. Un model de tancs acoblats amb aquestes característiques és el model CTAC de EDIBON.

3. Plantejament i selecció de les possibles solucions alternatives

Per a la realització d'aquest projecte es plantegen diferents possibilitats tant per a el disseny i construcció de la maqueta com per el control d'aquest.

- Alternatives per als dipòsits.

Com ja s'ha esmentat anteriorment aquest sistema de dipòsits ha funcionar amb els dipòsits desacoblat.

La situació d'aquest dipòsits dependrà de les mides de les prestatgeries on aniran situats, del pes que aquestes puguin suportar i de la comoditat alhora de visualitzar el comportament del líquid. Per tant, es podrien situar de la mateixa manera que l'antic model, un dels dipòsits a més alçada que l'altre i desplaçats, o un exactament a sobre de l'altre en un altre prestatgeria i d'aquesta manera es podrien fer servir prestatgeries de menys llargada.

Pel que fa al material cal tenir present que els dipòsits han de ser translúcids per a poder controlar visualment el nivell del líquid i la variació que es va produint. Per aquest motiu, el material a utilitzar podria ser PVC, metacrilat o vidre.

Aquests dipòsits podran ser prefabricats amb unes mides convenientes per tal de manipular un cert nivell de líquid o, seguint les mides dels dipòsits en desús del Laboratori de Control, es podrien construir tallant, en diferents parts, cadascuna de les parets que formarien part del dipòsit i a continuació ajuntar-les amb silicona o collant-los a través d'uns orificis fets prèviament.

- Alternatives per al control de nivell de líquid

Pel control del nivell del líquid als dipòsits es pot fer servir una placa microprocessadora comercial, tipus Arduino o similar, o es podria dissenyar i materialitzar una pròpia placa. Aquest control serà simulat a través de Matlab-Simulink. O per altre banda, es podrien

controlar els nivells amb PC, fet que comporta engegar tot el PC i el software de control abans d'engegar l'electrònica associada per tal que el Dipòsit 0 es controli. Aquest últim també serà simulat amb Simulink amb el qual també duria a terme el control real. Per tant, aquest control es pot dur a terme a través de dos possibles habilitacions:

Habilitació 1: control de tot l'equip per placa microprocessadora.

Habilitació 2: control dels nivells amb PC (Simulink en aquest cas).

- Alternativa per a la mesura de nivell de líquid

A l'hora de determinar el nivell de l'aigua d'ambdós dipòsits caldrà fer servir sensors, els més destacats per aquest objectiu són:

Sensors de pressió: aquest tipus de sensors s'acostumen a utilitzar per a pressions més altes que les que es mesuraran en aquest projecte. La seva instal·lació s'hauria de dur a terme a la part de baix dels dipòsits. El pes del líquid genera una pressió sobre les parets del fons del dipòsit provocant una força perpendicular que varia amb el nivell del líquid. Aquesta pressió dependrà de la densitat del líquid i de l'altura amb referència al punt on es mesura.

Sensors capacitius: Permeten altes pressions i temperatures. La sonda capacitiva i la paret del recipient (si és metàl·lic) formen les plaques del capacitor, aquesta capacitat ve determinada per la distància entre elles i també de les propietats dielèctriques del líquid a mesurar. A mesura que s'omple el dipòsit augmenta la capacitat, aquesta es mesura i un senyal proporcional es genera mitjançant un circuit electrònic. El senyal seria avaluat per altre unitat electrònica connectada al sistema. Com que els dipòsits del nostre projecte no es preveuen que siguin de parets metàl·liques s'hauria d'introduir una barra o xapa metàl·lica dins del dipòsit, cosa que crearia certs problemes de manteniment

Sensors ultrasònics: permeten una mesura continua del nivell de líquid. El principi de funcionament està basat en l'emissió d'un pols d'energia que viatja a la velocitat del so, el senyal és reflectit per la superfície del líquid i torna al receptor per tant, es mesura el temps entre el senyal emès i el senyal rebut. A partir d'aquest mecanisme es calcula la distància

des de el receptor a la superfície del líquid. Aquest sensor aplicat de forma adequada pot ser un dels sensor més precisos per aquest cas amb l'avantatge que fa la mesura sense cap tipus de contacte amb el líquid i que es muntaria sobre la tapa del dipòsit a la qual no arriba mai el líquid.

Sensor de boia i potenciómetre: permet obtenir lectures contínues i directes del nivell del líquid, tot i això presenta diverses inexactituds i només es apte per a indicar. Pot presentar problemes alhora d'impactar el líquid provinent de les vàlvules o al colpejar amb les parets del dipòsit.

Sensor de conductància: es fa servir per líquids conductors de corrent. A partir d'un interruptor que genera corrent entre les dos sondes i mitjançant el propi líquid el circuit es tanca indicant el nivells quan el líquid està en contacte amb ambdues sondes.

A continuació es mostra una figura resum de l'aplicació d'aquests sensors i d'altres de menor importància per al nostre projecte:

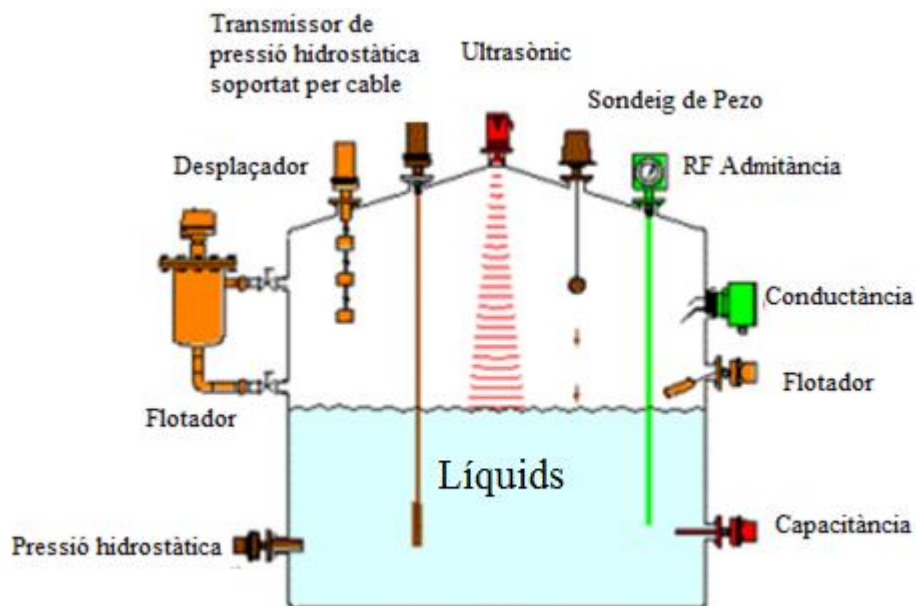


Figura 3.1 Taula d'aplicació de sensors de nivell de líquid

Font: Herrera, CONTROL DE PROCESSOS tema 3

En un inici es realitza una avaluació multicriteri per determinar la alternativa més adequada:

Dipòsits

	Resistència	Durabilitat	Mecanitzat	Translúcid	Preu	Resultat
Metacrilat	10	8	10	10	6	9
Vidre	6	10	9	10	8	8,65
PVC	7	9	8	7	9	7,95
Pes relatiu	25%	30%	15%	20%	10%	100%

Taula 3.1. Selecció dipòsits

Sensors

	Instal·lació	Precisió	Preu	Resultat
Pressió	4	8	8	6,4
Ultrasons	10	10	7	9,4
Boia	7	4	10	6,4
Capacitiu	9	7	9	8,2
Conductància	10	8	8	8,8
Pes relatiu	40%	40%	20%	100%

Taula 3.2. Selecció dels sensors

A partir de la taula observem quins són els sensors més adients, en aquest cas el sensors d'ultrasons pels dipòsits 1 i 2 i el sensor de conductància pel dipòsit 0. La major part del pes alhora de definir una importància pels sensors és per la instal·lació i per la precisió. La instal·lació ja que com més apartat del líquid estigui el sensor millor per a que així alhora de muntar-ho no hi hagi fugues de líquid i fer que el sistema sigui el més lineal possible.

Controlador

	Eficàcia	Compatibilitat	Ús	Preu	Resultat
Arduino	10	10	6	8	9,2
PC-Matlab	7	8	7	8	7,5
Pes relatiu	40%	30%	10%	20%	100%

Taula 3.3. Selecció del controlador.

El controlador escollit ha estat l'Arduino ja que és el que ens proporciona major eficàcia a un preu bastant reduït, bona compatibilitat amb la majoria d'equips disponibles al Tecnocampus i fàcil d'utilitzar ja que es disposa de molta informació proporcionada per la mateixa companyia via Internet.

Situació dels dipòsits

	Espai	Comoditat	Estabilitat	Resultat
Disposició vertical	9	7	8	8,4
Disposició desalineat	10	5	7	8,3
Pes relatiu	50%	10%	40%	100%

Taula 3.4. Selecció de la situació dels dipòsits.

La disposició dels dipòsits era vertical ja que li donem molt valor a l'espai però també a la comoditat ja que està pensat per que els estudiants puguin treballar amb facilitat amb la maqueta.

A la hora de realitzar el projecte de detall aquestes alternatives varen ser substituïdes sobre la marxa degut a la ineficàcia o problemes que algunes solucions plantejaven:

- Material i disposició dels dipòsits.

Es decideix finalment fer servir vidre com a material dels dipòsits ja que en el anterior prototip el desgast sofert pel metacrilat havia estat molt significatiu, aleshores es va decidir comprar unes peixeres per mantenir líquids, com aigua, sense permetre un gran desgast al llarg del temps.

Per altre banda com s'explica en Annex II després d'algunes proves es determina que amb una disposició vertical no s'aconseguien els cabals de sortida idonis per estabilitzar els dipòsits i per tant es disposen els dipòsits desalineats.

- Element controlador.

Finalment no es decideix implementar un controlador intern en el microcontrolador Arduino ja que es considera que aquest s'ha de limitar a controlar el dip0 (entrada de EV0 i sortida de BS), enviar la informació de

lectura dels sensors a la targeta i verificar les condicions de seguretat de l'equip i per tant fer que el tema del control resti obert per fer estudis didàctics implementant el controlador en un entorn comú com seria Matlab-Simulink.

- Sensor del dip0.

Es decideix no utilitzar un sensor de conductància per realitzar el control del dip0 i s'implementa un altre sensor d'ultrasons per guanyar més eficàcia i exactitud en el resultats. Això permet realitzar més proves variant només l'algorisme del controlador i no la disposició del sensor com seria en el cas dels sensors de conductància.

4. Descripció de la solució dels elements físics.

En aquest apartat es descriu generalment els elements que componen el present projecte i la seva disposició ja que és necessària una descripció per conèixer les limitacions del hardware abans de realitzar el control:

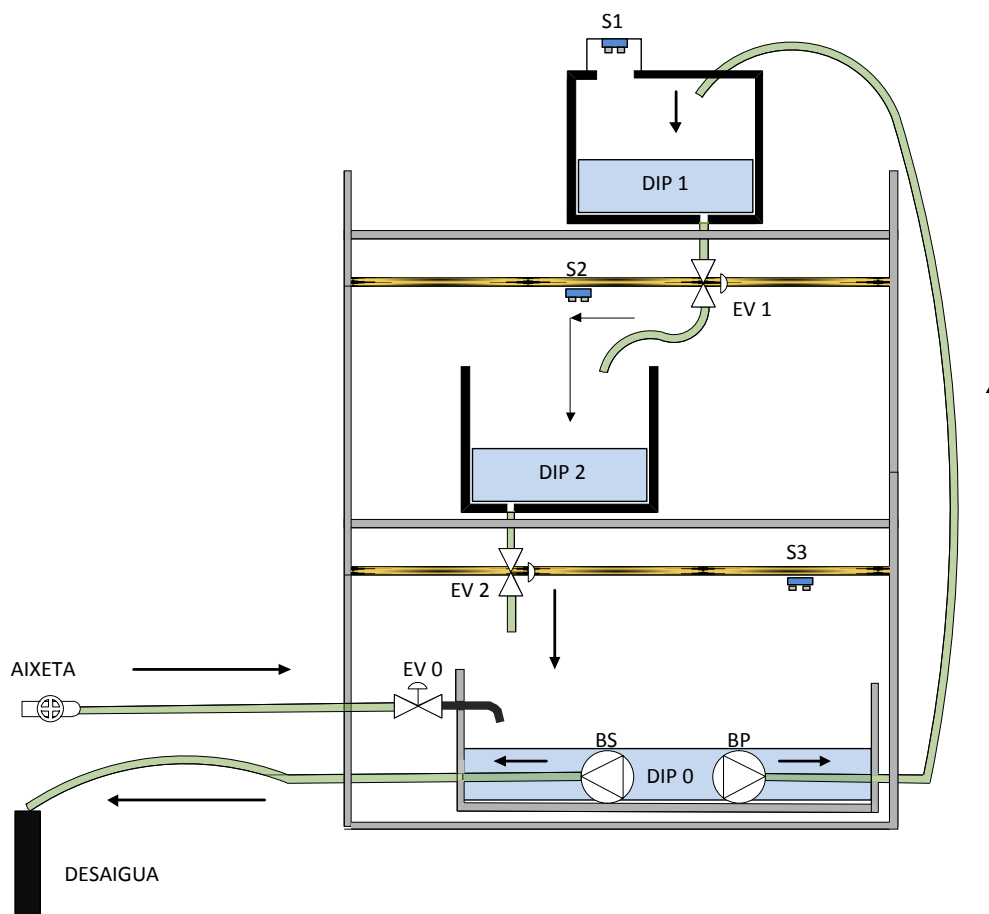


Figura 4.1. Esquema del sistema físic i els respectius elements.

Com es pot observar el sistema disposa dels següents elements:

- Dip1, Dip2, Dip0: El dipòsit 1 i 2 són els que es volen controlar i el dipòsit 0 l'encarregat de subministrar el líquid i mantenir-lo a un nivell constant per no variar la característica de la BP.

- EV1: electrovàlvula encarregada de permetre o evitar el pas del líquid del dipòsit 1 al dipòsit 2 a través d'un interruptor.
- EV2: electrovàlvula encarregada de permetre o evitar el pas del líquid del dipòsit 2 al 0 a través d'un altre interruptor.
- EV0: electrovàlvula situada en el dipòsit 0 o auxiliar que permet o evita l'entrada del líquid des de l'exterior del sistema al dipòsit en funció del nivell en el qual es troba aquest.
- BS: bomba secundària que permet evacuar el líquid del dipòsit 0 al desaigua quan aquest hagi superat una determinat nivell de seguretat.
- BP: bomba primària que permet enviar el líquid al sistema. Aquesta serà la bomba que caldrà controlar per així controlar els nivells del dipòsits 1 i 2.
- S1 i S2: sensors d'ultrasons encarregats de la lectura dels nivells dels dipòsits 1 i dos per posteriorment poder efectuar un control sobre ells. Estan situats a 43 i 47 cm respectivament de la base de cada dipòsit.
- S3: sensor d'ultrasons que llegeix els nivells del dipòsit 0 per controlar l'entrada o sortida del líquid al sistema. Aquest es troba a 40 cm de la base del dipòsit.

D'aquests elements alguns s'han pogut aprofitar a l'anterior maqueta d'altres han estat renovats. S'adjunta una taula de l'estat dels materials, que s'aprofiten i dels que no, a l'Annex II.

El circuit del líquid és el següent: la bomba primària impulsa el líquid fins al dip1, després el líquid surt del dipòsit a través de la EV1 cap al dip2, i finalment surt del dip2 cap al dip0 a través de l'EV2.

4.1. El sistema físic.

A continuació es descriu el disseny del sistema físic quant a posicions i mesures tant de les prestatgeries com dels dipòsits.

A través dels errors i solucions que es conclouen d'un primer disseny del sistema explicat a l'Annex II, es decideix definitivament disposar de les tres prestatgeries que es disposaven per fer de suport dels dipòsits, dues taules de fusta per subjectar l'EV1 i EV2 i situar els dipòsits de forma desalineada.

El dip1 es situa a la prestatgeria més alta a uns 189 cm entre la base del dipòsit i el terra per facilitar la seva manipulació. El dip2 es col·loca la prestatgeria del mig però desplaçat uns 28 cm horitzontalment respecte el dipòsit de dalt i girant-lo uns 180° per tal que els orificis de sortida de líquid d'ambdós dipòsits estiguin oposats per evitar l'evacuació directe de líquid del dipòsit 1 a l'orifici del 2. Aquests estan situats a una distància de 79 cm entre base i base.

Per últim, es situa el dipòsit auxiliar a 69 cm entre la seva base i la del segon dipòsit i a 6,9 cm de terra ja que, en un primer moment l'altura des del terra era més elevada però això produïa que al estar més alta la sortida del dipòsit que la sortida del desaigua es perdés líquid degut al efecte de la gravetat.

Respecte els materials dels dipòsits, els dos dipòsits a controlar estan fets de vidre segellat amb silicona amb unes mesures de 40x20x36 cm. El dip0 o auxiliar està fet de plàstic (polipropilè), i es va aprofitar de l'anterior maqueta degut a la seva capacitat volumètrica (59x40x35 cm).

A 29 cm de la base del primer dipòsit i 28 cm del segon s'han situat dues fustes de 15x78,5x2cm on reposen de les dues electrovàlvules aprofitades de l'antiga maqueta i aquestes exerceixen un pes excessiu a suportar per part de les bases dels dipòsits que amb el temps es podria veure afectat greument. Aquestes electrovàlvules estan situades justament a sota dels orificis de sortida dels respectius dipòsits a controlar.

La taula de fusta que està situada a la sortida del dip1 inclou, a la sortida, un tros de mànega i un adaptador per tal de fer arribar el líquid al segon dipòsit sense precipitar directament sobre el orifici d'aquest, de forma desacoblada i disposada de tal manera per

evitar afectar el cabal de sortida. A la segona electrovàlvula, al no tenir rosca per tal de disminuir el cabal de sortida a través d'un adaptador, se li ha afegit un tap amb un orifici de diàmetre similar al de la mànega del primer per aconseguir que el cabal de ambdós sortides fossin similars i per tant també les resistències de les electrovàlvules.

El següent pas ha estat la instal·lació al dip0, de l'electrovàlvula d'entrada de líquid de 24Vca, la bomba de sortida i la bomba controlada per la font regulable que connecta a través d'una mànega al dip1. Les mànegues fetes servir són de 18mm de diàmetres.

Totes aquestes mesures i cotes, incloses las disposicions de les electrovàlvules, es poden veure reflectides en la secció de plànols i esquemes (Document A-1)

4.2. Els actuadors.

En aquests apartat es fa una breu explicació teòrica dels actuadors que formen part del sistema.

4.2.1. Bombes de buidatge.

Per tal d'aconseguir automatitzar lo màxim possible el nivell líquid del sistema de dipòsits es disposa dues bombes de buidatge. Una d'elles (BS) encarregada d'evacuar el líquid i de mantenir constant el nivell del dip0 conjuntament amb una electrovàlvula, per tal de garantir un nivell òptim per al funcionament de l'altre bomba i també conservar ambdues bombes submergides en el líquid. L'altre bomba (BP) serà sobre la qual es durà a terme el control per tal de transferir el líquid al primer dipòsit aconseguint un control capaç d'estabilitzar els dos dipòsits.

El model que s'ha escollit (Figura 4.2) ha estat el mateix que en l'antic sistema de dipòsits, el TMC-03301 de la família TMC TECHNOLOGY CORP, que va alimentat a 12Vcc amb una capacitat de 2274 LPH (litres per hora), un consum de 2,25A (12V), un màxim de 4 A, fusible si sobrepassa els 6 A (12V), un adaptador per mànegues de 17 mm, amb unes dimensions de 120,1x98x123 mm i capaç de subministrar líquid fins a una altura de 3 metres.

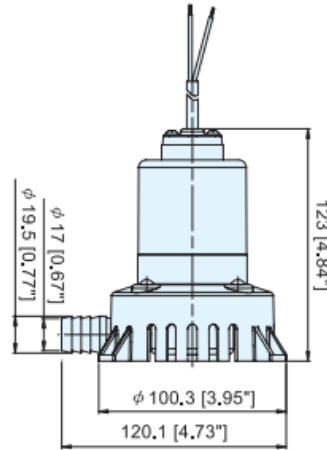


Figura 4.2. Bomba TMC 03301

Font: pàgina oficial TMC

4.2.2. Electrovàlvules.

Entre dipòsit i dipòsit s'inclouen dos electrovàlvules (EV1 i EV2) NC (normalment tancades) activades per interruptor per tal ajustar el nivell de líquid de qualsevol dels dos dipòsits i en cas que convingui, agilitzar la estabilització.

Aquestes electrovàlvules estan fabricades amb coure i les seves respectives bobines treballen amb un voltatge d'entrada de 24Vcc i un consum de 0,4 A. L'obertura i tancament de la vàlvula s'efectua a través d'un camp magnètic generat per la bobina en una base fixa que atrau a l'èmbol.

Per altre banda, s'aprofita una electrovàlvula (EV0) de 24Vca amb un consum de 0,3 A en escomesa i un mínim de 0,2 A en manteniment que controla automàticament el pas d'aigua dins del dipòsit 0, tancant-se quan aquest ja es troba prou ple. Conjuntament amb la bomba BS permet el manteniment constant del dipòsit 0.

La cobertura d'aquest electrovàlvula està feta d'un plàstic resistent a la corrosió provocada per l'aigua.

Les tres electrovàlvules es consideren d'acció directa ja que el flux electromagnètic actua directament sobre l'èmbol que tanca l'orifici, permetent que el líquid circuli a través d'ells.



Figura 4.3. Electrovàlvula 24Vcc.

4.3. Sensors.

Els sensors de mesura que es fan servir són d'ultrasons, concretament el model HC-SR04 (Figura 4.4). Estan dissenyats especialment per a mesurar distàncies o per superar obstacles, en aquest cas es fa servir per mesurar la distància d'aquest sensor respecte l'augment o disminució del nivell del líquid per tal de saber en tot instant el seu nivell. Aquest sensor aconsegueix mesurar distàncies enviant un ultrasò a alta freqüència a través d'un del parell de cilindres dels que disposa (transductor) i espera a que el so reboti contra l'objecte en qüestió i torni, aleshores serà captat per l'altre cilindre, només caldrà mesurar el temps del pols de resposta.

Aquest model inclou tota l'electrònica de control, transmissió i recepció continguda en PCB i permet mesurar rangs d'entre 3 cm a 3 m amb una precisió de 3 mm.

Les característiques són les següents:

- Alimentació de 5 Volts.
- Interfície: 4 fils, Vcc, Trigger (dispara ultrasò), Echo (rep l'ultrasò), GND.
- Corrent d'alimentació de 15 mA.
- Freqüència de pols de 40 KHz.
- Obertura de pols ultrasònic de 15°.
- Duració del pols eco de sortida (nivell TTL) de 100-25000 μ s
- Senyal de sortida de 10 μ s (nivell TTL).
- Temps mínim d'espera entra una mesura i el inici d'altre de 20 ms.

- Dimensions: 45x20x15 mm.



Figura 4.4. Sensor ultrasò HC-SR04

Font: pàgina oficial ARDUINO

El sensor està format per 4 pins, un VCC que estarà connectat a la sortida de 5 V de la placa, “Trig” connectat al un pin digital de la placa i que servirà per enviar un pols ultrasònic, “Echo” que anirà a un pin que sigui una entrada digital i s’encarrega de rebre l’eco del pols prèviament enviat i per últim un GND.

4.4. Electrònica associada.

Cal disposar d’una electrònica associada per tal d’alimentar els actuadors, adquirir les lectures de nivells, controlar l’entrada i evacuació de líquid al sistema i permetre també el control dels dipòsits 1 i 2.

4.4.1. Fonts d’alimentació.

Pel que fa al circuit de potència es disposa de 4 fonts d’alimentació per tal d’alimentar bàsicament les electrovàlvules, les bombes i el microcontrolador.

Les fonts d’alimentació aniran connectades a la xarxa monofàsica a 220V. Les fonts són les següents:

- Font de 24Vca feta servir per realitzar les pràctiques de laboratori.
- Font de 24Vcc/2,5A comprada un usuari via Internet que s’encarregava del disseny i la construcció de diferents fonts d’alimentació.

- Una altre de los fonts es va obtenir del magatzem del Tecnocampus que al estar en desús i no haver de realitzar cap inversió es va decidir aprofitar-la, aquesta font és una font d'ordinador que ja no es feia servir.

La font d'ordinador està basada en el model DPS-240FB-2A de la marca HP amb una entrada de 100-240Vac/5A i 47-63 Hz amb una potència de sortida màxima de 240W.

Les sortides que ofereix aquesta font per tal d'alimentar el diferents dispositius són:

+3,33Vcc/15 A.

+5,08Vcc/17 A.

+12Vcc/7,5A.

-12Vcc/0,15A.

+5,08 Vaux/3A.

+12Vcpu/11,5 A.

Els pins estan dissenyats de diferents colors per distingir de manera més intuïtiva les diferents sortides disponibles:

Groc = 12V

Vermell = 5V

Lila = -12V

Taronja = 3,3V

- Font regulable i remota feta servir en l'antiga maqueta i que servirà per controlar la bomba primària.

La font encarregada d'enviar el senyal de control a la bomba primària és el model PAB-A Series de la marca Kikusui (Figura 4.5). Aquesta font de DC és capaç de regular tant tensió com corrent manualment o remotament amb un rang de 3-1/2 dígit. Té la capacitat de poder utilitzar també un voltatge extern com a terminal d'entrada connectant-ho a la part davantera de la font. El circuit de control està basat en un circuit monolític IC (*Integrated Circuit*). El mode d'operació es pot apreciar a través d'uns LEDS situats a la part frontal que indiquen si es treballa en mode de voltatge constant o en mode d'intensitat constant.

Amb la finalitat de poder utilitzar-se com un sistema d'automatització, el PAB-A incorpora un panell posterior en el qual hi ha uns terminals de control remot (terminal 4 i 5) per a poder controlar una tensió o corrent de sortida a través d'una senyal de tensió externa. L'ajust del valor d'aquesta tensió o corrent de sortida es pot realitzar des de el panell frontal, mitjançant un interruptor LOCAL/REMOTE que serà sempre convenient en el cas que es vulgui controlar algun senyal extern.

Per a la realització d'aquest treball el model empleat és el PAB 18-3A. Les especificacions tècniques d'aquesta font regulable són les següents:

- Voltatge d'entrada: 120 Vac \pm 10%, 50/60 Hz, monofase.
- Potència de consum, valor nominal: 130 VA aproximadament.
- Voltatge de sortida: 0 – 18 V.
- Resolució de voltatge: 2,5 mV.
- Corrent de sortida: 0 – 3 A.
- Resolució del corrent: 4,5 mA.
- Ona i soroll del terminal *constant-voltage* (5 Hz – 1 MHz): 500 μ V.
- Control remot (ràtio de voltatge de control a voltatge de sortida): 10 V / 18 V.
- Ona i soroll del terminal *constant-current* (5 – 1 MHz)(rms): 1mA.
- Control remot (ràtio de voltatge de control a corrent de sortida): 10V / 3 A.

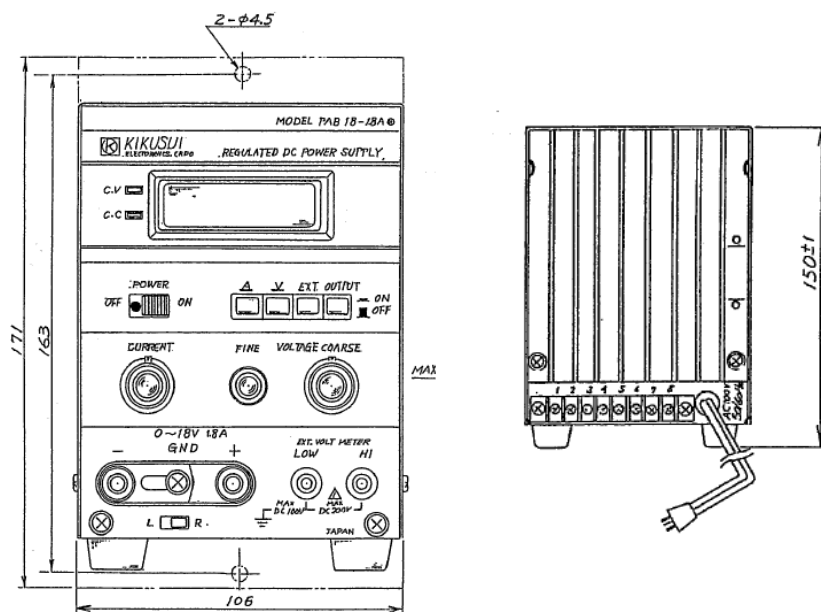


Figura 4.5. Font remota Kikusui

Font: Fulla característiques KIKUSUI

En un primer moment es volia alimentar tant l'Arduino, les bombes de 12V com les electrovàlvules de 24V amb la font de PC (aprofitant els +12V i els -12V per obtenir els 24V) però la intensitat que proporciona el pin dels -12V no era suficient per tal d'aguantar el consum de les electrovàlvules i es va decidir disposar d'una font auxiliar de 24V a partir de la qual també es podrien aconseguir els 12V (a través d'un divisor de tensió per exemple). Però tenint present que la bomba consumeix uns 2,3 V i entre les dos electrovàlvules es consumeix un total de 0,8 V i sabent que la font de 24Vcc només pot suportar un corrent de 2,5 A, s'ha vist obligat preservar la font de PC i la de 24Vcc.

4.4.2. Circuit de control (Arduino).

A continuació es descriuen les característiques que cal conèixer del circuit de control per permetre una correcta interpretació dels valors llegits pels sensors i a continuació realitzar la resposta corresponent.

El controlador empleat en aquest projecte és un microcontrolador Arduino, exactament el model UNO basat en el circuit integrat ATmega328P.

Les principal característiques d'aquesta placa extretes de la pàgina oficial d'Arduino són:

- Microcontrolador	ATmega328
- Voltatge de funcionament	5V
- Voltatge d'alimentació (recomanat)	7-12V
- Voltatge d'alimentació (límits)	6-20V
- Voltatge de sortida digital	0 V (Low), 5 V (High)
- Voltatge de sortida analògica (PWM)	0-5V (precisió de 8 bits)
- Voltatge d'entrada digital	0-2V (Low) i 3-5V (High)
- Voltatge d'entrada analògica	0-5V (precisió de 10 bits)
- Pins E/S digital	14 (6 d'ells amb sortida PWM)
- Pins d'entrada analògica	6
- Corrent DC per pins E/S	40mA
- Corrent DC per pins de 3.3V	50mA
- Memòria Flash	32 KB, 0.5 KB per gestió d'arrencada
- SRAM	2 KB (ATmega328)

- EEPROM 1 KB (ATmega328)
- Velocitat de rellotge 16MHz
- Longitud 68.6 mm
- Ample 53.4 mm
- Pes 25 g



Figura 4.6. Arduino UNO

Font: pàgina oficial Arduino

4.4.3. Targeta d'adquisició.

La targeta d'adquisició adquireix les dades (volts de sortida) dels sensors i així poder realitzar el control sobre la font Kikusui, és el model PCI6014 de National Instruments, aprofitant que és la targeta disponible al laboratori de Control per tal de realitzar les pràctiques. A continuació es descriuen les principals característiques d'aquesta targeta d'adquisició:

- 3 entrades analògiques de 16 bits de resolució amb un rang de mostreig màxim de 200 kS/s (kilosamplejos/segon).
- 2 sortides analògiques de 16 bits de resolució.
- Rang de sortida de ± 10 V.
- Bus PCI (Peripheral Component Interconnect), bus estàndard per connectar dispositius perifèrics directament a la seva placa base.
- *Steady state*: ± 250 mV.
- *Glitch* (fallo) al encendre: ± 6 V amb una duració de 4 ms.
- *Glitch* (fallo) al resetejar: ± 3 V amb una duració de 3 ms.

- *Slew rate*: 4V/ μ s.
- Soroll: 360 μ Vrms, de DC a 400 KHz.

Només s'ha especificat els detalls que poden ser útils en aquest cas, per informació més detallada consultar el annexos.

4.4.4. Caixa de connexions i connectors.

En aquest apartat es fa referència a la caixa en la qual s'haurà de situar l'electrònica associada. Aquest element ha estat aprofitat de l'anterior maqueta. Tot i que l'electrònica que contenia en el seu interior ha estat completament substituïda ja que el funcionament en aquest cas serà pràcticament automàtic.

Dins de la caixa es duran a terme totes les connexions associades al microcontrolador (s'expliquen a l'apartat de control) i a les alimentacions dels diferents elements.

L'estructura de la caixa de connexions estava composta de diversos connectors cannon o XLR, femella i mascle, d'entrades i sortides. La majoria d'aquests connectors s'han pogut aprofitar.

Les connexions de les entrades estan formades per:

- Els tres sensors d'ultrasò (S1, S2, S3).
- La font de 24 Vac (24 VAC).
- Sortida de la font de control remot (Sort FA).

I en les sortides es troben:

- Bomba primària (BP).
- Bomba secundària (BS).
- Electrovàlvula 0 (EV 0)
- Electrovàlvula 1 (EV 1)
- Electrovàlvula 2 (EV 2)
- Sortida de lectura de nivell del sensor 1 (Vh1).
- Sortida de lectura de nivell del sensor 2 (Vh2).

A més es disposa de tres commutadors, un interruptor principal ON/OFF amb LED incorporat i dos LEDS que s'explicaran amb més detall a l'apartat de Control.

A la Figura 4.7 es mostra el disseny de la caixa (part frontal i lateral) realitzada amb Microsoft Visio:

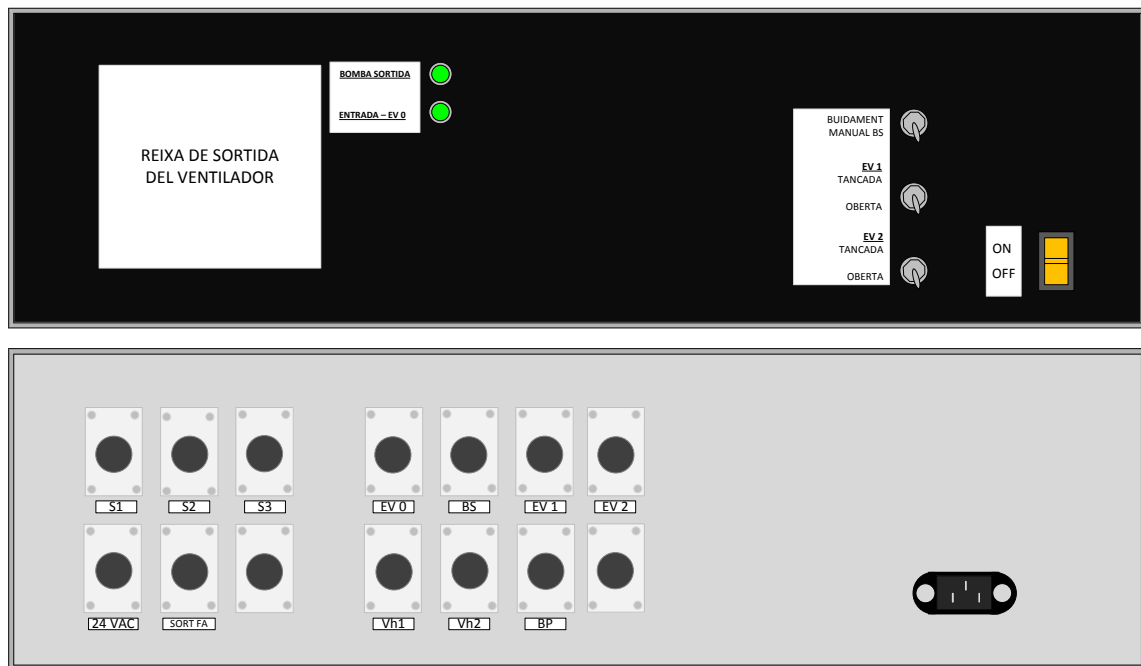


Figura 4.7. Caixa de connexions.

Les connexions realitzades a l'interior i a l'exterior de la caixa s'adjunten a la documentació de plànols i esquemes (Document A-2).

5. Obtenció del model del sistema

Una vegada construïda la maqueta, sense cap pèrdua de líquid, es procedeix a realitzar l'estudi de la funció de transferència i dels guanys necessaris. Aquesta documentació teòrica necessària s'obté de la bibliografia [1] - [3].

En els pròxims apartats es realitzaran dos experiments. Un primer experiment previ que ens permetrà conèixer el cabal que proporciona la bomba en funció de la tensió de la font i el seu guany i a partir d'aquest experiment es realitza un segon per determinar els guanys relacionats amb les resistències de les electrovàlvules emprades en la funció de transferència.

També es trobaran les equivalències entre la tensió de la targeta d'adquisició i la font de control això vol dir que s'ha d'estudiar els volts que pot proporcionar la targeta d'adquisició i els que haurà d'entregar la font regulable a la bomba. I per altre banda l'equivalència entre tensió i nivell al dipòsit.

Aquests experiments estudiats a continuació s'han realitzat varies vegades per tal de poder fer un promig. També s'han realitzat al voltant d'un punt de treball que s'explicarà més endavant a la hora d'explicar el model no-lineal.

El procés que ha de seguir el model per tal de apropar-se al comportament del sistema real es pot veure a continuació:

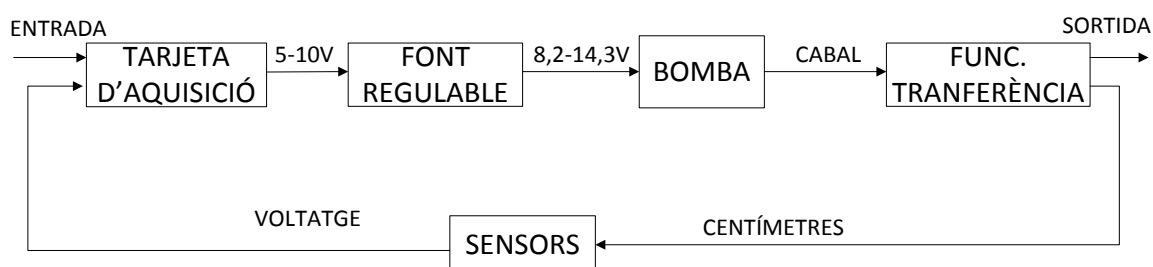


Figura 5.1. Procés sobre el qual es realitza el control

Per tant, basant-nos en la Figura 5.1, en aquest apartat es realitzaran els experiments apropiats per adaptar cadascuna de les sortides i entrades de cada bloc.

5.1. Experiment 1. Cabal en funció de la tensió.

Per poder conèixer el cabal en funció de la tensió atorgada a la bomba primària:

- Es regularà la font de tensió a diferents voltatges
- Es deixarà passar un cert temps comptat amb cronòmetre i es mesurarà el nivell de líquid en centímetres.
- Conseqüentment es podrà obtenir el volum de líquid, coneixent les dimensions dels dipòsits, en aquest cas el volum serà igual a $20 \times 40 \times \text{nivell cm}^3$.

L'experiment es fa mitjançant el primer dipòsit ja que la sortida de la bomba primària es dirigeix directament al dipòsit 1 i les condicions de treball haurien de ser similars per ambdós dipòsits, però la falta de precisió, com és evident no permetrà que siguin exactament iguals.

Un cop finalitzat l'experiment es troben el següents valors:

Vin (Volts)	I (amp)	Δh (cm)	Δv (cm ³)	Δt (segons)	Q ($\Delta v/\Delta t$)
8,41	1,20	5,1	4080	120	34,000
8,63	1,25	7,1	5680	120	47,333
8,75	1,30	9,6	7680	120	64,000
8,82	1,35	10,8	8640	120	72,000
8,91	1,40	11,4	9120	120	76,000
9,12	1,47	12,5	10000	120	83,333
9,28	1,50	15,2	12128	120	101,067
9,39	1,55	17,5	14000	120	116,667
9,60	1,60	9,4	7520	60	125,333
9,90	1,65	10,4	8320	60	138,667
9,94	1,70	11,5	9200	60	153,333
10,10	1,75	12,0	9600	60	160,000
10,29	1,78	12,5	10000	60	166,667
10,51	1,85	13,3	10640	60	177,333
10,68	1,90	14,1	11280	60	188,000
10,99	1,95	14,8	11840	60	197,333
11,10	2,00	15,3	12240	60	204,000
11,36	2,05	16,2	12960	60	216,000
11,46	2,10	16,9	13520	60	225,333
11,64	2,15	17,2	13760	60	229,333
11,88	2,20	8,9	7120	30	237,333
11,96	2,25	9,2	7360	30	245,333
12,16	2,30	9,4	7520	30	250,667
12,34	2,35	9,8	7840	30	261,333
12,43	2,40	10,1	8080	30	269,333
12,56	2,50	10,5	8400	30	280,000
12,94	2,60	10,9	8720	30	290,667
13,30	2,70	11,4	9120	30	304,000
13,77	2,84	11,9	9520	30	317,333
13,94	2,90	12,2	9760	30	325,333
14,09	3,00	12,5	10000	30	333,333
14,46	3,15	13,0	10400	30	346,667

Taula 5.1. Cabal en funció de la tensió

Aquests cabals obtinguts permeten obtenir el valor o guany encarregat de convertir la variació de tensió que entra a la bomba en variació de cabal (cm³/s) necessari ja que l'entrada de la funció de transferència d'aquest sistema és el cabal q_0 com es veurà més endavant. El resultat és el següent (Figura 5.2):

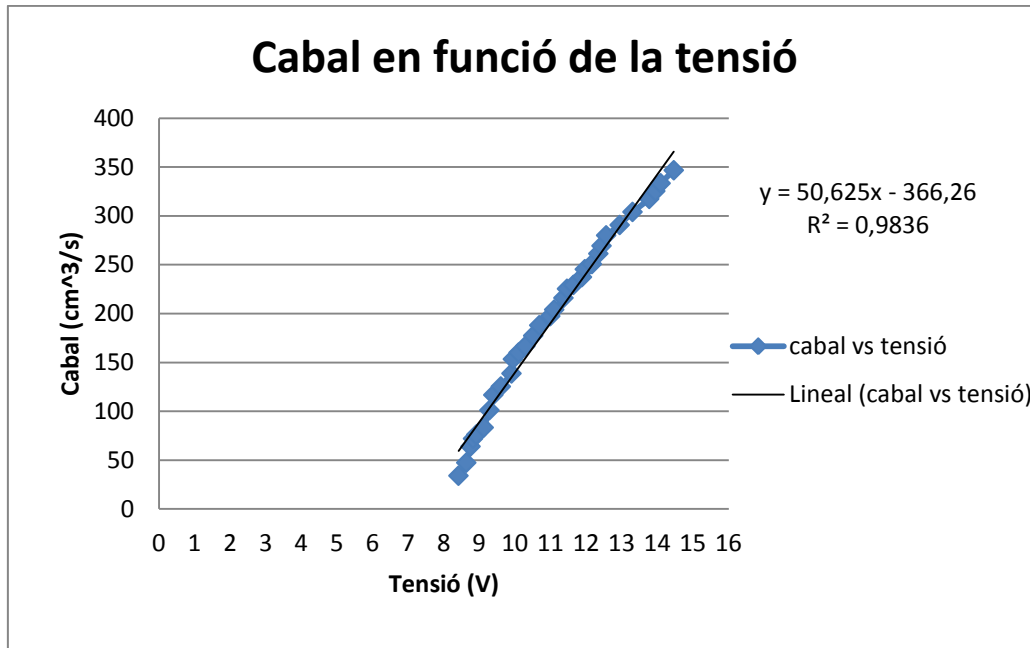


Figura 5.2. Variació de cabal respecte la variació de tensió de la bomba.

El pendent de la recta tangent és el valor desitjat, en aquest cas és de $50,625 \text{ cm}^3/\text{sV}$. És el guany que multiplicat a la variació de voltatge (x) ens permet realitzar la conversió a variació de cabal (y).

La simulació del model teòric haurà d'incorporar aquest guany degut que cal fer-li entendre al simulador que el nostre sistema físic treballa amb entrades de variació cabal i no pas amb tensió.

A continuació, una vegada trobats els valors previs al càlcul de les resistències, es prossegueix amb el següent experiment.

5.2. Experiment 2. Altura en funció del cabal.

Segons el nivell de líquid del dipòsit i tenint present el cabal respecte la tensió de la font extret en l'experiment 1, podem trobar les resistències que ofereixen les electrovàlvules a través de l'equació $Q = H/R$.

Amb aquestes premisses es conclou que cal:

- S'escullen diferents valors de cabal d'entrada q_0 .
- Es troba el moment en que l'entrada de líquid i el de sortida són iguals (estabilització) per cada valor de cabal.
- S'anoten els nivells d'ambdós dipòsits.

Q (cm ³ /s)	Vin (V)	h1 (cm)	h2 (cm)
177,33	10,50	4,2	7,5
186,60	10,60	7,0	10,5
193,91	10,80	10,5	14,0
201,98	11,00	15,5	17,9
204,00	11,11	17,7	19,6
204,73	11,15	22,1	23,4
205,28	11,18	23,0	24,2
205,64	11,20	26,3	26,6

Taula 5.2. Nivells d'estabilització en funció del cabal

Cada hora i mitja s'ha agafat una mostra fent servir tensions (cabals) que no permetessin sobrepassar el límits de nivell dels dipòsits. El valor màxim de tensió aportat ha estat d'11,2V ja que l'altura que s'obtenia era crítica d'uns 26 centímetres.

Com a resultat s'obté:

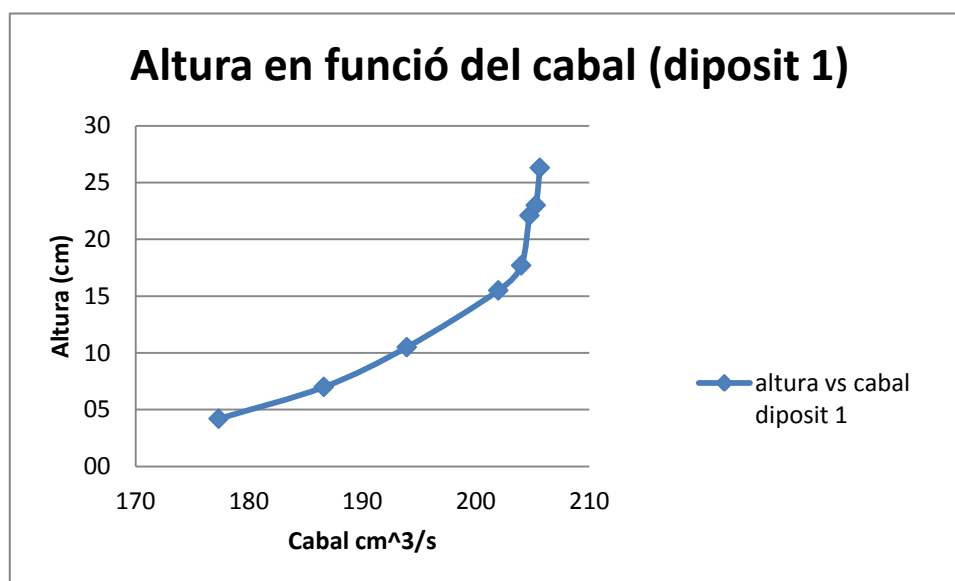


Figura 5.3. Variació de l'altura del dipòsit 1 respecte la variació de cabal d'entrada.

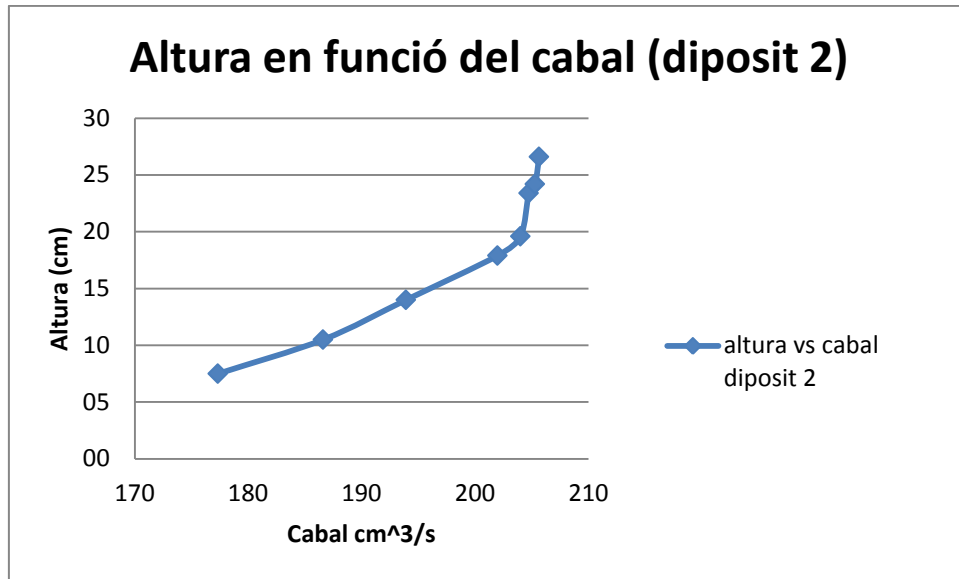


Figura 5.4. Variació de l'altura del dipòsit 2 respecte la variació de cabal d'entrada.

A les Figures 5.3 i 5.4 es poden apreciar la corba característica de la bomba (Q – H), que movent-nos sobre ella s'obté el nivell del dipòsit relacionat amb el cabal subministrat.

Com es pot apreciar en els resultats, el segon dipòsit sempre tendeix a omplir-se més sobretot a nivells d'altura baixos, igualant-se a mesura que augmenta el nivell, això últim pot ser degut que a mesura que la bomba s'alimenta a la seva tensió nominal aquesta va millorant el seu funcionament.

Seguidament es calcula el pendent de les gràfiques agafant els punts en els que la seva unió és recta, al voltant d'un punt de treball en concret, per trobar les resistències de les electrovàlvules:

$$m = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (5.1)$$

$$m1 = R1 = \frac{15,5 - 4,2}{201,98 - 177,33} = 0,458 \quad (5.2)$$

$$m2 = R2 = \frac{17,9 - 10,5}{201,98 - 186,6} = 0,481 \quad (5.3)$$

$$R1 = 0,458 \text{ s/cm}^2$$

$$R2 = 0,481 \text{ s/cm}^2$$

Com s'aprecia en l'anterior càlcul la segon electrovàlvula ofereix més resistència al pas del líquid, és per aquest motiu que a la hora d'estabilitzar ambdós dipòsits, el segons dipòsit s'omple més que el primer. Per tant amb aquest valors ja podem obtenir les funcions de transferència.

5.3. Funció de transferència.

En aquest apartat es pretén trobar la funció de transferència que regirà el sistema real de la manera més aproximada possible per posteriorment poder realitzar unes simulacions acords amb la realitat.

Per obtenir l'equació diferencial del sistema podem fer servir:

- Lleis físiques: segons la naturalesa del sistema, es regeix una relació causal entre les variables d'interès i el comportament del sistema.
- Probes experimentals (anàlisi de la resposta transitòria del sistema).
- Per analogies de comportaments entre sistemes que guarden un comportament similar, tot i ser de naturalesa diferent.
- Aplicació d'algoritmes i recursos computacionals per processar les dades obtingudes de probes experimentals.

Una de les maneres per trobar la funció de transferència en aquest projecte és a través de les lleis físiques, a continuació es mostrarà l'equació fonamental de la funció de transferència a través dels paràmetres físics, tot i que en aquest cas un cop trobada la funció típica per aquest tipus de sistema s'ha utilitzat una metodologia experimental i s'han aprofitat el recursos computacionals per tal de processar correctament les dades.

A l'Annex III s'inclou la forma de calcular la funció de transferència de la dinàmica d'un dipòsit a través de Laplace a partir de la qual es validaran els càlculs del sistema en qüestió. Ja que en aquest cas volem controlar dos dipòsits, aleshores aquesta funció en servirà pel segon dipòsit però per el primer, la funció de transferència tindrà alguna

modificació per la qual cosa s'estudia el sistema a nivell de diagrama de blocs per trobar les dos equacions de transferència.

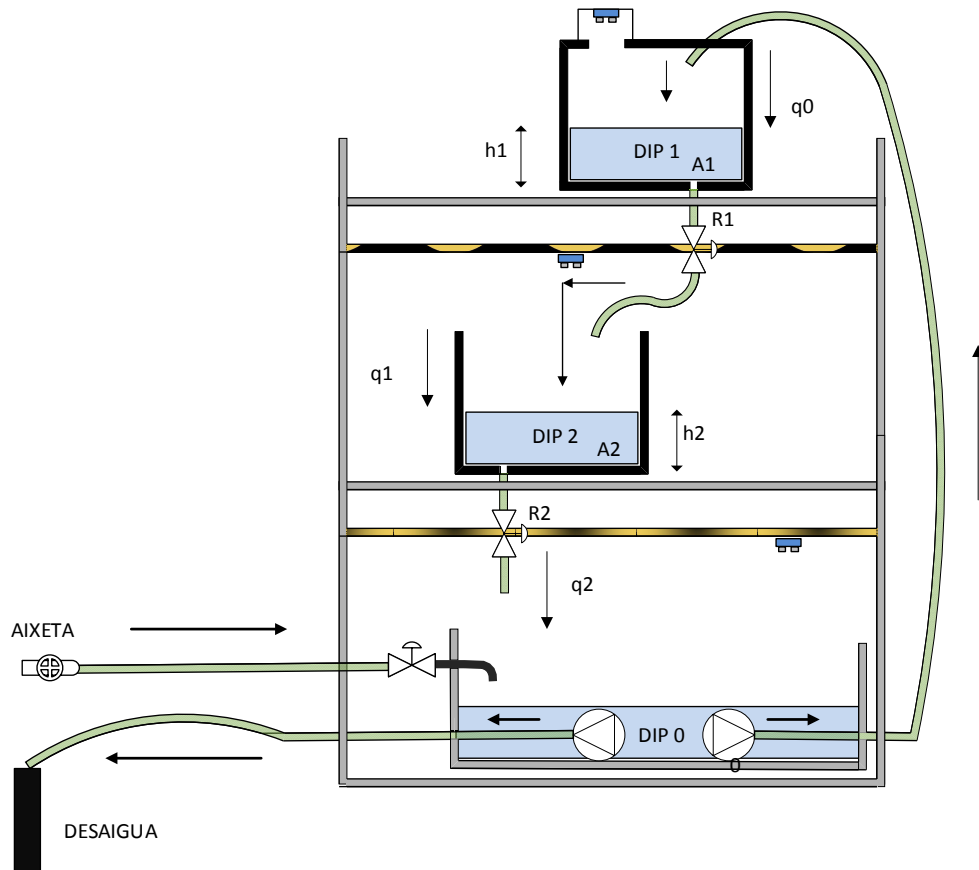


Figura 5.5. Esquema dipòsits desacoblats amb els paràmetres referents a la funció de transferència.

Tenint en compte que:

$$q_1 = \frac{h_1}{R_1} \quad (5.4)$$

$$q_2 = \frac{h_2}{R_2} \quad (5.5)$$

$$q_{ent} - q_{sort} = \frac{A * dh}{dt} \quad (5.6)$$

$$h1 = \frac{1}{A1} \int (q0 - q1) dt \tag{5.7}$$

$$h2 = \frac{1}{A2} \int (q1 - q2) dt \tag{5.8}$$

Podem concloure que el diagrama de blocs de la funció de transferència del sistema dels dos dipòsits és el següent (en esquema Simulink):

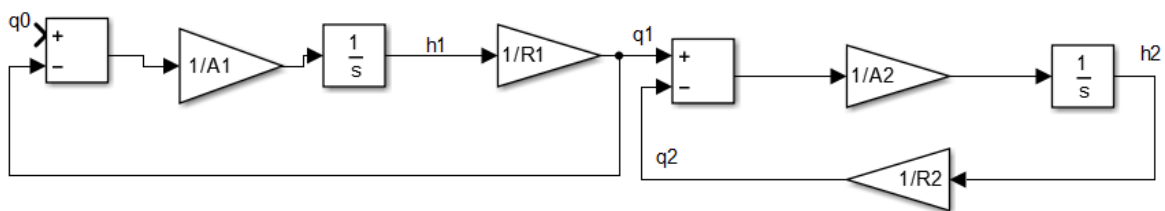


Figura 5.6. Diagrama de blocs de la funció de transferència desglossada.

Sabent que un sistema en llaç tancat és:

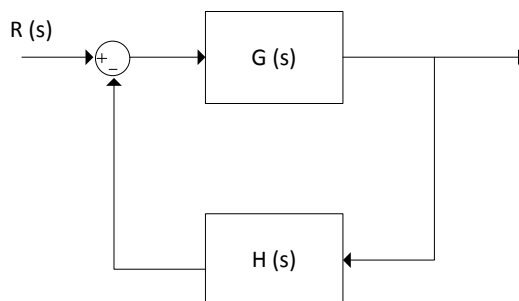


Figura 5.7. Sistema llaç tancat.

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \tag{5.9}$$

Podem deduir que:

$$F1 = \frac{\frac{1}{R1A1s}}{1 + \frac{1}{R1A1s}} = \frac{1}{1 + R1A1s} \tag{5.10}$$

$$F2 = \frac{\frac{1}{A2s}}{1 + \frac{1}{R2A2s}} = \frac{R2}{1 + R2A2s} \quad (5.11)$$

Coneixent les resistències de les electrovàlvules i que l'àrea o capacitat del dipòsit és de 800 cm² (40cm * 20cm) obtenim la funció de transferència teòrica del sistema lineal.

$$F1 = \frac{1}{1 + 365,5s} \quad (5.12)$$

$$F2 = \frac{0,481}{1 + 384,88s} \quad (5.13)$$

El valor de τ és: $F = \frac{k}{1+\tau s}$, és a dir el valor que es representa en negreta a les equacions (5.12) i (5.13) i és igual a al producte de l'àrea del respectiu dipòsit i la resistència de l'electrovàlvula que controla el seu cabal.

Aquesta τ és la constant de temps que ens indica el temps en el qual el sistema arriba a un 63% del valor en estat estacionari quan es fa una resposta a un esglaió.

A continuació s'estudiaran les equivalències per concloure amb els últims valors necessaris per obtenir el model.

5.4. Conversió a tensió de la font regulable i sortida dels sensors.

Com s'ha observat en la Figura 5.1, la targeta d'adquisició proporcionarà a la sortida una tensió de 5 a 10 V (el seu rang és de -10 a 10V) i com s'ha comprovat prèviament la bomba comença a bombejar el líquid a uns 8,2V fins a un màxim de 14,3V, per la qual cosa es busca el guany proporcional de la variació de tensió de la targeta a la variació de la tensió de la font amb una recta de regressió.

S'ha establert una taula amb uns valors lineals basant-se en els resultats de l'experiment 1:

Vtargeta	Vfont
5	8,41
6	9,6
7	11,1
8	12,43
9	13,77
10	14,46

Taula 5.3. Equivalències entre voltatge de la targeta i voltatge de la font.

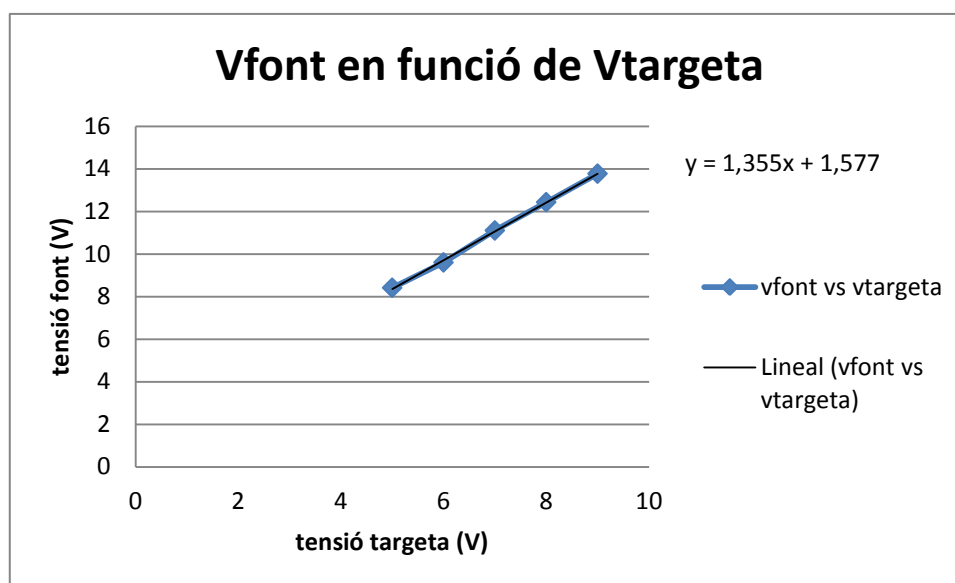


Figura 5.8. Recta de regressió de Vfont respecte Vtargeta.

El guany a aplicar en el sistema per ser interpretat per la font té un valor de 1,355. Ja que el guany en el sistema real vindrà donat per la pròpia font.

Per altre banda els sensors d'ultrasons en el sistema real interpreten i capten a l'entrada la distància que va incrementant el líquid i proporcionen a la sortida una tensió en funció d'aquest nivell, per tant en la simulació caldrà fer una traducció de distància a tensió per exercir un correcte control i obtenir un comportament coherent.

Després de l'experiment s'obtenen els valors següents:

DIPÒSIT 1		DIPÒSIT 2	
alçada(cm)	Vout (V)	alçada(cm)	Vout (V)
0	0,49	0	0,01
1	0,66	1	0,162
2	0,816	2	0,336
3	0,989	3	0,489
4	1,143	4	0,668
5	1,316	5	0,813
6	1,469	6	1,142
7	1,642	7	1,254
8	1,796	8	1,468
9	1,969	9	1,541
10	2,122	10	1,641
11	2,295	11	1,794
12	2,34	12	1,968
13	2,449	13	2,121
14	2,621	14	2,293
15	2,775	15	2,448
16	2,989	16	2,621
17	3,275	17	2,774
18	3,428	18	2,948
19	3,6	19	3,101
20	3,754	20	3,287
21	3,927	21	3,427
22	4,08	22	3,753
23	4,254	23	3,8
24	4,407	24	3,927
25	4,58	25	4,081
26	4,734	26	4,254
27	4,906	27	4,58

Taula 5.4. Equivalències entre el nivell dels dipòsits i el voltatge de sortida dels sensors.

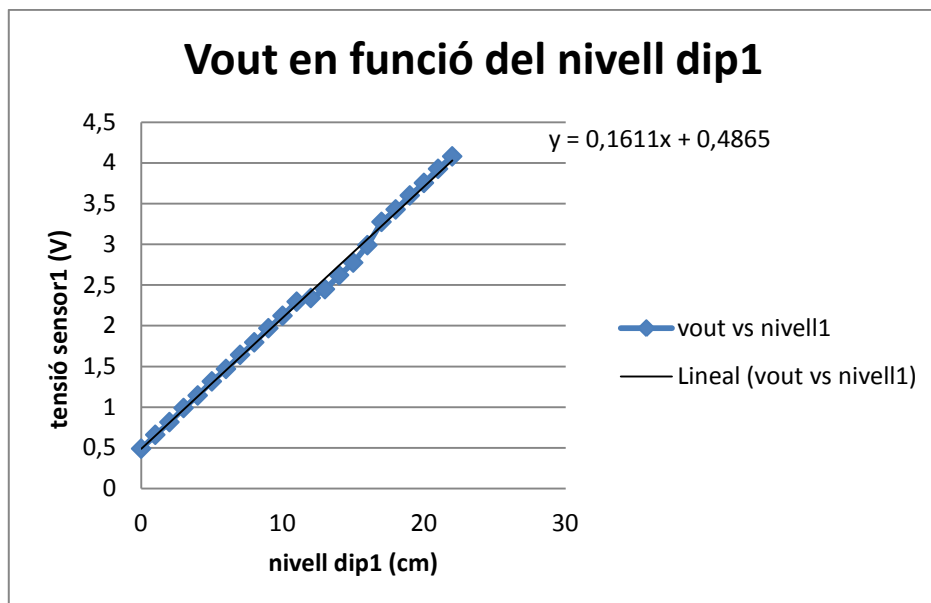


Figura 5.9. Recta de regressió de Vout respecte el nivell del dipòsit 1.

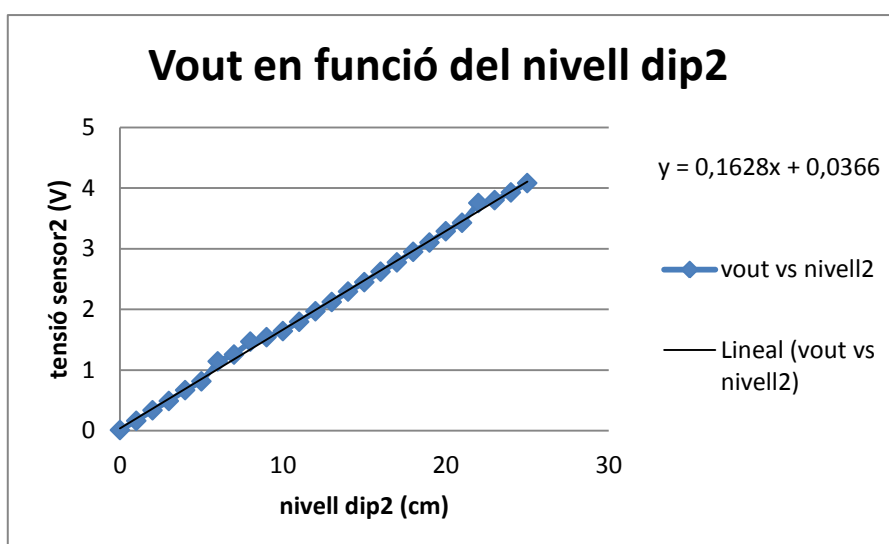


Figura 5.10. Recta de regressió de Vout respecte el nivell del dipòsit 2.

Amb aquest valor de la recta de regressió de 0,1611 pel primer dipòsit i 0,1628 pel segon ja disposem de l'últim guany de conversió per tal de realitzar el controlador per retorn d'estat però abans cal determinar les equacions d'estat.

Una vegada conegudes totes aquestes dades i paràmetres es pot procedir a realitzar l'estudi del disseny de control.

6. Disseny del software de control.

A continuació s'estudia l'adequació del senyal de lectura dels sensors per procedir a realitzar la programació per automatitzar el sistema, els circuits que es requereixen per adaptar els senyals i les alimentacions, el control de seguretat i per últim el controlador i les simulacions per dur a terme el control del sistema real.

6.1. Aspectes tècnics abans de programar.

Prèviament es defineixen els aspectes que cal considerar abans d'obtenir la lectura dels sensor per prosseguir amb la programació.

6.1.1. Processament dels senyals de lectura dels sensor d'ultrasò.

Cal considerar que l'Arduino està limitat en termes de mostreig, és a dir, en aquest cas que volem implementar tres sensors d'ultrasò en una mateixa placa, això implica que el temps o freqüència de mostreig es vegi afectat a la hora de processar el tres senyals alhora. També es veurà afectat per la velocitat en funció del nivell de líquid ja que si un dipòsit està més omplert que l'altre, aquest obtindrà el valor de la ona de rebot abans.

Els sensors d'ultrasò no són capaços de mesurar directament la distància del nivell de líquid, per la qual cosa s'ha de programar a través de l'algorisme, això farà que la precisió no pugui ser del tot correcte degut a la manca de decimals a la hora de la de realitzar la conversió.

Aquesta distància que obtenim a través del temps de rebot de la ona serà la distància del sensor fins el líquid però el que es vol saber és en quants centímetres augmenta el nivell, aleshores cal tenir present la distància entre el sensor i la base del dipòsit per tal d'implementar-ho al algorisme. Aquesta distància tampoc acabarà de ser molt precisa per temes de precisió amb l'aparell de mesura.

Per últim, els sensors poden ser molt precisos però sorgeix el problema de que la base no és estàtica, sinó que al contenir un líquid la pròpia dinàmica d'aquest podria provocar problemes a la hora de rebre la ona ja que el rebot no seria el mateix. Evidentment cal evitar qualsevol tipus d'obstacle o objecte que s'interposi davant del sensor.

6.1.2. Resposta de l'acció de control.

Respecte l'acció de control, el microcontrolador utilitzat (Arduino UNO) no disposa de sortides analògiques però sí que disposa de senyals moduladores PWM. Per tant, s'ha de dissenyar una electrònica associada capaç de filtrar aquest senyal amb l'objectiu d'obtenir una senyal analògica i no pas quadrada com ho és el senyal PWM.

Aquest senyal proporciona una sortida en volts de 0 a 5 V en funció del nivell de líquid, per això cal tenir en consideració la relació entre l'altura i el voltatge de sortida, aquest tampoc serà del tot precís degut a l'oscil·lació creada per el moviment del líquid i a la distància mesurada manualment entre el sensor i la base del dipòsit. A través de l'algorisme i del control realitzat amb Simulink caldrà limitar el valors del nivell de líquid per tal que no hi hagi desbordament, per la qual cosa es treballarà amb un rang de 0 a 30 cm i quan passi d'aquest valor el sensor entengui que està al seu màxim.

6.2. Procés de programació de l'algorisme amb Arduino i processament del senyal.

Per dur a terme la programació del codi ha estat necessari conèixer més en profunditat les eines de les quals disposa el microcontrolador. Per això s'estudia la documentació a nivell hardware i software d'Arduino [4].

Arduino proporciona molts exemples a la seva pàgina web oficial dels diferents recursos del propi controlador. Un cop estudiat els diferents recursos s'ha procedit a descriure quina és la solució o a que volem que respongui el controlador. A l'Annex I es pot trobar l'algorisme de programació.

En aquest projecte la funció del microcontrolador és:

- Adquirir la informació del nivell de líquid del dipòsit 1 i 2 a través de dos sensor d'ultrasons.
- Mitjançant un tercer sensor situat al dipòsit 0 permetre la entrada de líquid fins a una altura de 13 cm aleshores tancar el pas de líquid de l'electrovàlvula. Si el líquid sobrepassa els 17 cm, degut al buidatge del segons dipòsit, activar una bomba que

buidi el dipòsit fins els 13 cm, i així aconseguir que la EV0 no hagi de continuar omplint i al mateix temps mantenir las bombes sota líquid.

Aquest rang òptim de treball permet mantenir el nivell de líquid del dipòsit 0 constant i també permet que no variï la característica de la bomba primària.

A continuació (Figura 6.1) s'adjunta un disseny del microcontrolador que inclou les sortides i entrades utilitzades en el present projecte:

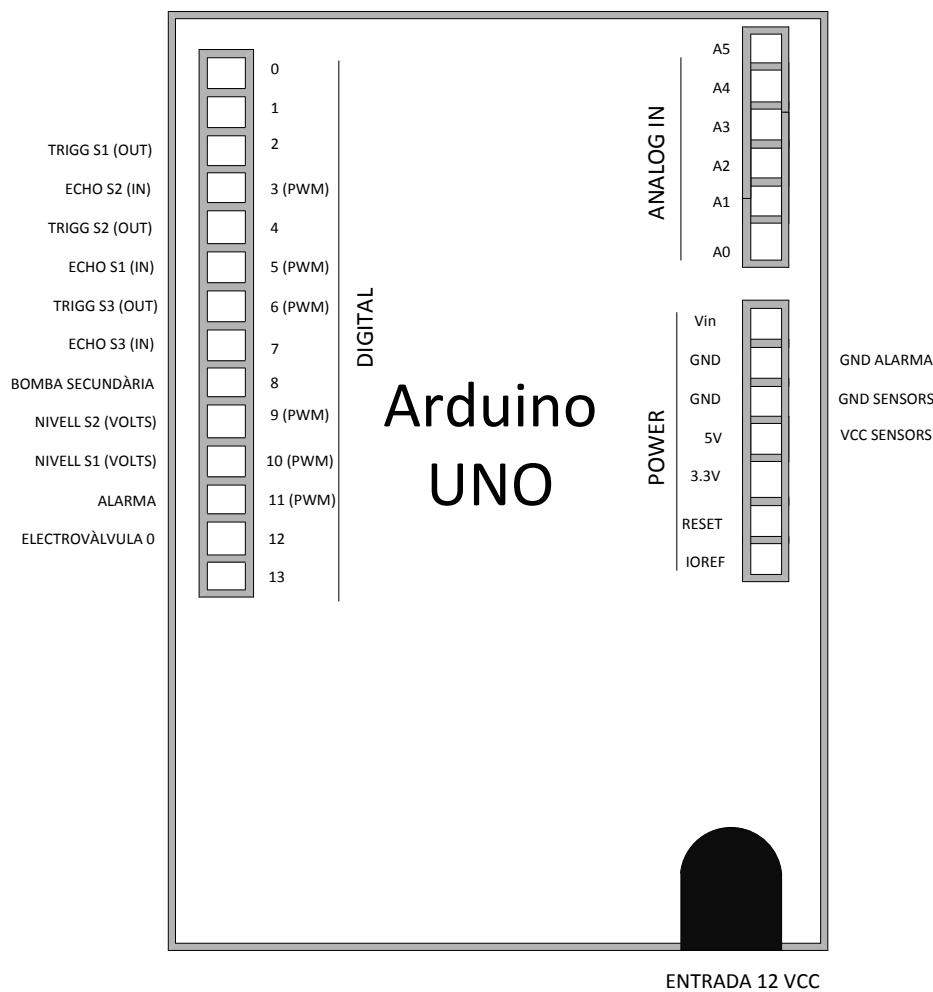


Figura 6.1. E/S Microcontrolador Arduino UNO.

6.2.1. Programació per obtenir el nivell de líquid i obtenció del senyal.

En aquest apartat es posa solució a alguns dels aspectes tècnics que s'han considerat anteriorment per obtenir una correcte lectura dels nivells.

Com s'ha vist en la descripció dels elements físics, es disposa de tres sensors d'ultrasons, un d'ells està situat en un petit suport dissenyat a partir de la pròpia tapa del dipòsit 1, i els altres dos estan situats a la cara inferior de dos suports de fusta que també fan de suport de les electrovàlvules .

Cadascun d'ells està situat a una determinada distància dels dipòsits que cal tenir present a la hora de dur a terme la programació per tal de calcular la distància entre el sensor i el líquid dels dipòsits. Aquestes distàncies són de 43 cm pel primer sensor, de 47 cm pel segon i 40 pel dipòsit 0 o auxiliar.

Les distàncies no seran exactes però s'ha dissenyat de manera que el dos dipòsits enviïn un voltatge de sortida similar quan estiguin al mateix nivell.

El funcionament d'aquests sensors es basa en:

- Enviar un pols '1' de 40 KHz de al menys 10µs per el pin *Trigger*.
- Després posa la sortida *Echo* a nivell alt.
- Un cop rebut comença la compta de temps.

Per determinar la distància o nivell en centímetres es coneix que:

- Una de les especificacions d'aquest model és que la seva velocitat d'ultrasò en el aire és de 340 m/s o 0,034 cm/microsegon.
- Sabem que la velocitat és la distància recorreguda en un determinat temps (velocitat = distància/temps).
- El temps mesurat es divideix entre dos ja que el temps que es rep és d'anada i tornada.

Aleshores aïllant la distància:

$$\text{Distància (cm)} = \text{Temps } \mu\text{s (entre Trigg i Echo)} * 0.017 \quad (6.1)$$

Pel que fa a les connexions es fa servir un model facilitat per l'empresa Arduino:

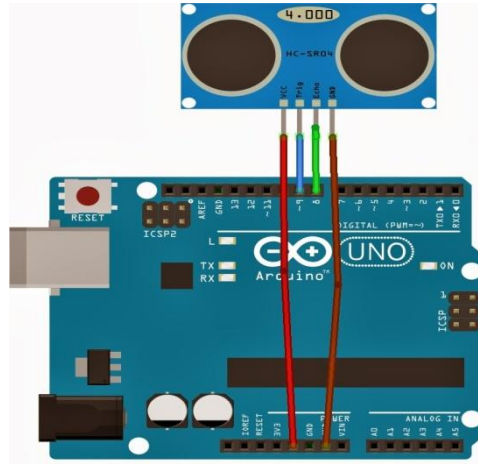


Figura 6.2. Connexions Arduino-HC-SR04.

Font: Pàgina oficial Arduino

Respecte a l'obtenció del senyal, com s'ha esmentat a les consideracions, no es disposa de sortides analògiques i s'ha decidit programar a la sortida una senyal PWM (pulse with modulation) que anirà augmentant el període del senyal a mesura que el nivell augmenti.

Pel que fa a la programació d'aquest tipus de sortida:

- La relació entre el temps en què el senyal està alt en comparació amb el temps que està baix és el cicle de treball i normalment s'expressa en (%).
- Quan el nivell de l'aigua arribi a un màxim de 30 cm. el senyal arribarà al 100% del cicle de treball i estarà a 0% quan el nivell sigui 0 cm.
- Aquest senyal està format per un valor alt i un de baix, en aquest cas 5 i 0V respectivament.
- Per últim es fa servir la funció analogWrite (pin, valor PWM), ja que es pot considerar com una sortida analògica segons el dispositiu a controlar, on aquest valor serà un número entre el 0 i el 255 ja que el generador PWM d'ARDUINO és de 8 bits i conté 256 valors diferents per a la codificació del senyal. Això es veu afectat en quant a la precisió per codificar el senyal.

Un cop obtingut el senyal PWM cal acoblar un filtre per tal de quedar-nos només amb la component de continua i obtenir la sortida analògica del sensor en funció de la distància i el temps.

6.2.2. Filtre RC (PWM).

A continuació es realitzaran els càlculs pertinents per poder filtrar el senyal PWM de sortida del microcontrolador en funció de la lectura de nivell dels sensors, per després ser adquirits per la targeta.

Aquest filtre s'ha de dissenyar amb una freqüència de tall lo suficientment baixa per fer desaparèixer les components d'alterna ($f_c \ll f$). Més detalladament, en aquest cas el que volem és atenuar les freqüències més altes (respecte la freqüència a la qual treballa el PWM), permetent el pas de freqüències baixes per sota de la freqüència de tall, per així quedar-nos només amb les components de continua.

Per tant, es fa servir el filtre que es fa servir és un RC amb configuració de passa baixos (senyal de sortida recollida en bornes del condensador) format simplement per una resistència i un condensador.

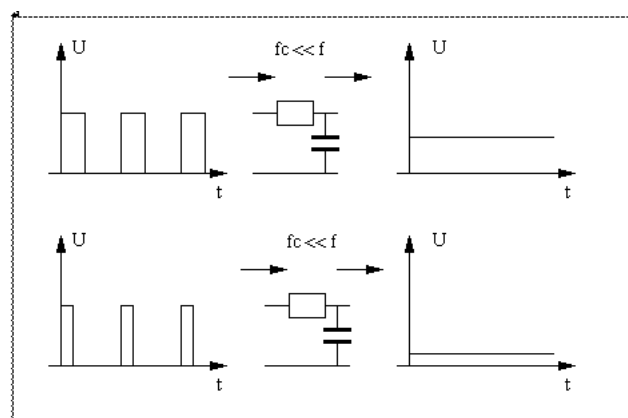


Figura 6.3. Efecte del filtre sobre la senyal PWM.

La freqüència de treball (f) del senyal PWM de l'ARDUINO és de 490 Hz per tant cal trobar un valor lo suficientment petit per tal de filtrar les components alternes per fer-ho es té en compte que:

$$\omega_o = \frac{1}{RC} \quad (6.2)$$

$$490 \text{ Hz} * \frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ cicle}} = 3078,76 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad (6.3)$$

Aleshores s'ha decidit utilitzar una freqüència angular aproximadament sis vegades més petita per obtenir una freqüència de tall que permeti mantenir només les components continues. El valor escollit és de 500 rad/s per tant:

$$500 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = \frac{1}{RC} \quad (6.4)$$

$$RC = 2 * 10^{-3}$$

$$f_c = \frac{500 \text{ rad}}{\text{s}} * \frac{1 \text{ cicle}}{2\pi \text{ rad}} = 79,6 \text{ Hz} \quad (6.5)$$

Segons aquest resultat s'opta per escollir una resistència de **220 k Ω** i un condensador de **100 nF**.

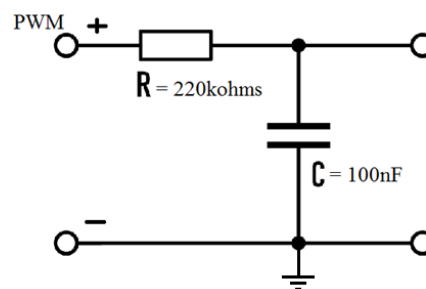


Figura 6.4. Filtre RC.

Els resultats són els següents:

Per saber si el senyal obtingut és correcte cal tenir present que mentre l'ample del pols del senyal PWM augmenta el voltatge del senyal filtrat també haurà d'augmentar i a mesura que disminueix el senyal de sortida filtrat també haurà de disminuir, tot això en funció del nivell de l'aigua segons s'apropa o s'allunya del sensor d'ultrasons. El resultat que cal esperar és el següent:

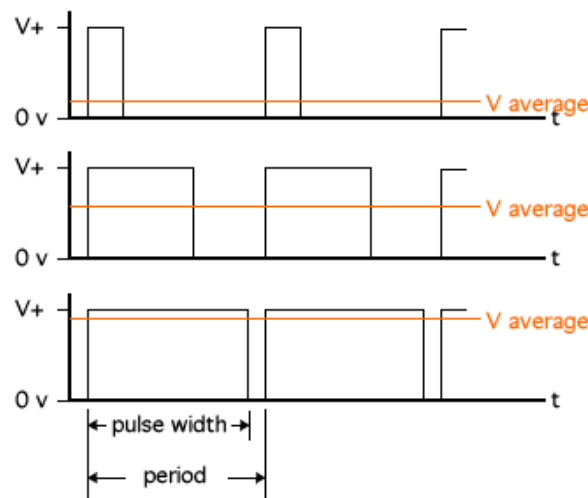


Figura 6.5. Modulació per amplitud de pols.

Font: Fabrica digital, *Salidas analógicas-PWM*.

Quan el sensor detecta un màxim del nivell de l'aigua de 30 cm el resultat obtingut és:

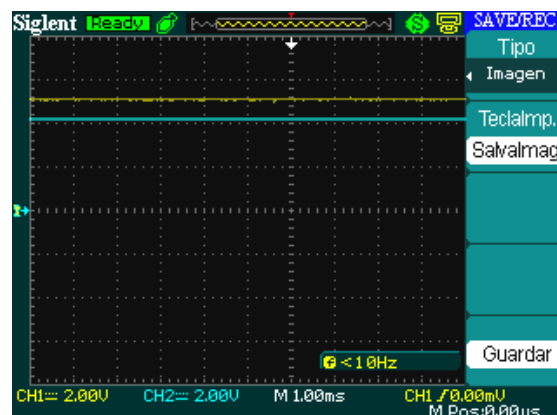


Figura 6.6. Efecte Filtre amb PWM 100% cicla de treball.

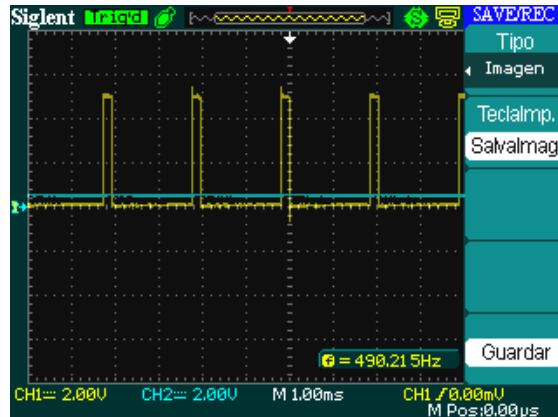


Figura 6.11. Efecte Filtre amb PWM 5% cycle de treball.

En blau s'aprecia el senyal filtrat i en groc el senyal PWM. Es comprova que el senyal de sortida filtrat conté pràcticament només els components de continua del senyal PWM per la qual cosa es dona per vàlid tot i que es podria afegir un filtre que encara filtrés més.

També es conclou que el propi filtre pot fer que el senyal de sortida indueixi a error pel fet que als 30 cm el voltatge de sortida no sigui el màxim de 5 V sinó menys degut a l'efecte del condensador.

6.2.3. Circuit d'adaptació d'alimentació de la bomba secundària i l'electrovàlvula d'entrada.

A part de la programació per controlar l'activació de la bomba (BS) i l'electrovàlvula (EV0) s'ha d'incorporar un circuit capaç d'alimentar aquests actuadors. En aquesta secció s'executen el càlculs i es dissenya el circuit pertinents. Per el càlcul es consulta la referència [5].

La necessitat de no poder prescindir d'aquest circuit és causat que el microcontrolador Arduino UNO només es capaç de proporcionar una sortida digital d'entre 0 V (Low) i 5V (High) però la bomba (BS) encarregada d'enviar el líquid del dipòsit 0 al desaigua s'ha d'alimentar a uns 12V i l'electrovàlvula (EV 0) que permet l'entrada d'aigua a 24Vca. Conseqüentment s'han realitzat dos circuits formats per un transistor i un relé situat al col·lector, que permeten l'activació d'un circuit auxiliar format per la bomba per una costat i l'electrovàlvula per altre amb les seves respectives alimentacions. El circuit és el següent:

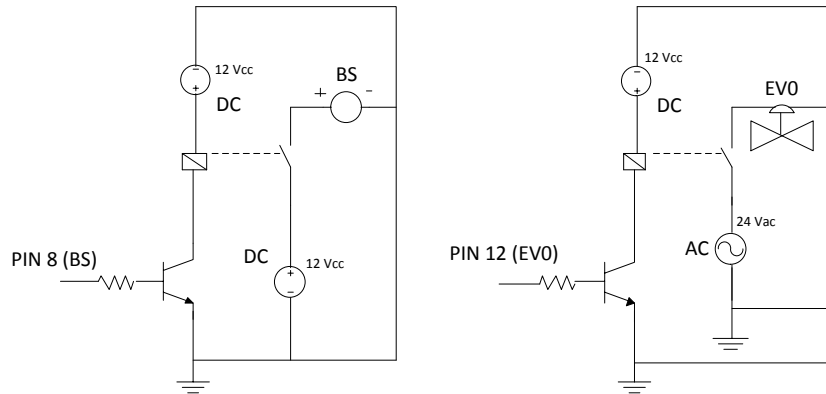


Figura 6.12. Circuit d'adaptació de les alimentacions.

Aquesta és la manera que s'ha considerat és la més senzilla de connectar els relés, mitjançant un transistor NPN, tancant el circuit posant a massa el terminal de la bobina mentre que l'altre terminal es troba connectat a positiu.

Una connexió d'aquest tipus té l'avantatge de permetre l'ús de relés amb tensions d'alimentació de la bobina diferents respecte a la tensió de treball del circuit de control o microcontrolador.

El funcionament consisteix en què quan la sortida del circuit de control és de 0 V també ho serà la base del transistor no permetent d'aquesta manera el pas de corrent entre l'emissor i el col·lector per activar la bobina del relé. I quan la sortida del microcontrolador sigui de 5V es superarà el voltatge llindar de la base del transistor (0,6V) i començarà a circular corrent entre la base i la massa portant al transistor a l'estat de conducció entre col·lector i emissor, tancant el circuit de la bobina del relé i per tant activant-lo.

Per obtenir una correcte activació del relé cal que el transistor estigui en estat de 'saturat', és a dir, que permeti passar tot el corrent possible com si es tractés d'un interruptor tancat. Per aconseguir-ho el corrent de base ha de ser lo suficientment gran, tot i això cal tenir present que el transistor no és ideal i existeix una caiguda de tensió entre col·lector i emissor (0,2 V).

Com que la tensió de control és independent a la tensió d'alimentació del relé podem treballar amb tensions separades per així evitar qualsevol tipus d'interferència provocada per la bobina del relé sobre el circuit de control, ja que les bobines generen pics de tensió quan commuten i es propaguen a través de les línies d'alimentació.

En el projecte el tipus de relé empleat és el model E3206 de NPE Electronics alimentat a 12Vcc. La seva sortida pot suportar fins a 10 A, 250Vca .

Els transistors són del tipus BD175 amb un voltatge màxim de 45 V, una intensitat màxima del col·lector de 3A i una guany de corrent 'hfe' mínima de 40 i màxima de 250. No calia un transistor que suporti un màxim de 3 A al col·lector però són els que han estat proporcionats per la pròpia universitat.

Per controlar els relés cal una resistència en la base per que aquesta superi els 0,6 V per a que entri en conducció i que el corrent que el transistor deixa passar entre l'emissor i el col·lector pugui dependre del corrent que entra en la base multiplicat per el guany (hfe).

Per calcular aquesta resistència es fan servir el càlculs bàsics per un transistor en saturació:

$$I_c = I_b * hfe \quad (6.6)$$

$$I_c = I_{relé}$$

$$V_{in} = V_b$$

$$I_b = \frac{(V_b - 0,6)}{R_b} \quad (6.7)$$

$$R_b = \frac{(V_{in} - 0,6) * hfe}{I_{relé}} \quad (6.8)$$

On:

Ic: corrent del col·lector.

Ib: corrent de base.

Irelé: corrent del relé.

Hfe: guany de corrent.

Vin: voltatge d'entrada.

Vb: voltatge de base.

Rb: resistència de base.

Amb el tester es comprova quin és el corrent que circula per la bobina i és d'uns 39mA i pel que fa al guany de corrent del transistor agafarem el valor mínim que és de 40, això suposa que augmenti el valor de la resistència. Per últim el valor de Vin són els 5V proporcionats per el microcontrolador.

Per tant el resultat seria:

$$Rb = \frac{(5V - 0,6) * 40}{0,039 A} = 4,512 k\Omega \quad (6.9)$$

Com ja s'ha esmentat, s'està fent servir el valor mínim del guany de corrent (hfe), per la qual cosa s'ha provat el circuit amb un potenciòmetre augmentant progressivament des d'un valor mínim de 4.5 kΩ fins arribar al valor de 5,6 kΩ amb el qual el sistema semblava treballar en condicions més òptimes.

Després de dissenyar i realitzar el circuit, quan a través de l'algorisme de programació es detecti que s'ha d'activar o desactivar la bomba o l'electrovàlvula, mitjançant dos pins diferents de sortides digitals s'enviarà un senyal de 5V a les respectives bases dels transistors activant el relé i permetent que la bomba o l'electrovàlvula quedin connectades.

6.3. Leds indicatius, interruptors i seguretat.

També formen part del control els elements que faciliten i informen el procés de control. Algunes de les sortides del microcontrolador s'han aprofitat per incorporar elements informatius visuals i elements de seguretat situats a l'exterior de la caixa de connexions:

Leds indicatius. El soroll provocat per les precipitacions dels líquids dificulta saber en quin moment la bomba de sortida (BS) o l'electrovàlvula d'entrada (EVO) estan activades per la qual cosa s'han aprofitat els dos Leds que ja hi havia per aquesta tasca.

En l'anterior maqueta també es disposava de Leds indicatius de nivells de seguretat i també un per la bomba a ser controlada. En aquest cas s'ha vist innecessari la seva utilització ja que el nivell del dipòsit 0 sempre es manté a un nivell més o menys constant i en el cas dels altres dos dipòsits com que se li ha introduït un valor màxim de 30 cm on els

sensors envien un voltatge màxim de sortida de 5 V i com que treballem amb consignes d'increments sabem que no es sobrepassarà aquest nivell amb tanta facilitat.

Pel que fa al Led que indica l'activació de la bomba controlada no té un ús especialment important ja que aquest pot ser activat o desactivat a través de la pròpia font regulable, per tant en tot instant coneixerem la seva activació.

Avís acústic. Per estabilitzar els dipòsits es podria trigar fins i tot 1 hora, aleshores instal·lar Leds de seguretat en funció del nivell seria ineficaç degut a que caldria estar constantment atent tant als Leds com al nivell. És per aquest motiu que s'ha decidit extreure un altaveu d'una CPU en desús i a través del propi algorisme del microcontrolador permetre la seva activació i avís si qualsevol dels dipòsits comença a estar en un nivell d'emergència. L'altaveu està format per un material piezoelèctric que vibra quan són sotmesos a tensions elèctriques variables per la qual cosa caldrà un senyal PWM. El PWM passarà de 0V a donar tensió cada 200 mil·lisegons provocant un avís en aquest interval de temps. Aquesta informació s'obté de la webgrafia [6].

Els nivells de seguretat són, pel dipòsit 1, 25 cm; 25 cm pel 2; i 28 cm pel dipòsit 0 o auxiliar.

L'algorisme es pot consultar a l'Annex I.

Interruptors. Dels interruptors/commutadors disponibles dos d'ells s'han aprofitat per tal d'obrir i tancar les electrovàlvules dels dipòsits amb la finalitat de poder agilitzar el procés d'estabilització portant els nivells a un punt de treball o també pel cas de sobrepassament del nivell en el dipòsit 2 o en el 0, ja que el del primer es pot evitar desactivant la font regulable.

L'altre commutador permet el buidatge del dipòsit 0 en cas que es produeixi un error en el microcontrolador o quan ja s'ha finalitzat la feina i es vol acabar de buidar el dipòsit ja que el sistema automatitzat només redueix l'aigua del 17 cm als 13 cm per mantenir les bombes sota aigua i no treballin en buit.

L'encesa de la caixa es realitza a través d'un interruptor amb Led que és l'encarregat de connectar tant la font general del sistema (12V) com la font de 24V a la vegada, ja que les

connexions estan pontejudes entre l'interruptor i la xarxa monofàsica, amb el l'indicatiu de Led quan es troba en l'estat d'encès.

Per últim, degut que la font d'alterna per la electrovàlvula de 24Vca, és la feta servir a les pràctiques de laboratori del Tecnocampus, està situada fora de la caixa de connexions i posseeix el seu propi interruptor s'ha decidit no incloure-la en un interruptor de la caixa de connexions i fer servir el propi interruptor en cas de voler reduir el desgast d'aigua i així reduir el consum o també en cas de fallada del microcontrolador.

6.4. Disseny del retorn d'estat.

El tipus de controlador que s'ha escollit ha estat el de variable d'estat ja que es pot aplicar tant a sistemes lineals com no-lineals, permet analitzar sistemes de més d'una entrada o més d'una sortida, els sistemes poden ser variants o invariants en el temps, permet ubicar els pols del sistema en la situació on es produeixi millor resposta, les condicions inicials poden ser diferents de zero, ens proporciona informació que passa dins del sistema i la utilitza tota per calcular l'entrada manipulada.

El tipus de controlador manca d'importància donat que el prototip servirà per realitzar estudis didàctics de diferents controladors. Però ens servirà per comprovar que els paràmetres calculats han estat els correctes per a una propera implementació respecte el control.

Un cop dissenyat el retorn d'estat i dut a terme les simulacions convenientes es connectaran les dos sortides dels sensors d'ultrasò a les entrades de la targeta d'adquisició i la sortida d'aquesta al control remot de la font regulable i seguidament es comprovarà el control del sistema real per tal de realitzar els ajustos adients.

6.4.1. Obtenció de les equacions d'estat.

En aquest apartat coneixent les lleis físiques que regeixen cada dipòsit podem procedir al càlcul de les equacions d'estats o paràmetres de les matrius:

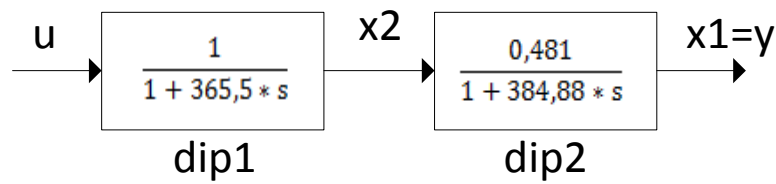


Figura 6.13. Funcions de transferència del sistema en forma de diagrama de blocs.

Sabent que la funció de transferència és igual a la seva sortida dividit entre la seva entrada:

$$\frac{x1}{x2} = \frac{0,4811}{384,88s + 1}$$

$$x1s = \dot{x}1 = \frac{0,4811 * x2 - x1}{384,88} \quad (6.10)$$

$$\frac{x1}{u} = \frac{1}{365,6s + 1}$$

$$x2s = \dot{x}2 = \frac{u - x2}{365,6} \quad (6.11)$$

Les variables de sortida a controlar els nivells d'ambdós dipòsits, coneixent les seves derivades i sabent que l'equació de variable d'estat és la següent:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}1 \\ \dot{x}2 \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} x1 \\ x2 \end{pmatrix} + Bu \quad (6.12)$$

Es poden trobar les seves respectives matrius que descriuen el comportament físic del sistema en qüestió.

$$\begin{pmatrix} \dot{x}1 \\ \dot{x}2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 0,4811 \\ \frac{384,88}{384,88} & \frac{384,88}{384,88} \\ 0 & \frac{-1}{365,6} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x1 \\ x2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ \frac{1}{365,6} \end{pmatrix} u \quad (6.13)$$

I com que es pretén controlar el nivell del dipòsit 2 i coneixem l'equació:

$$\begin{pmatrix} \dot{y}1 \\ \dot{y}2 \end{pmatrix} = C \begin{pmatrix} x1 \\ x2 \end{pmatrix} + Du \quad (6.14)$$

$$C = [1 \ 0]$$

$$D = 0$$

Després d'obtenir les equacions d'estat es pot realitzar el càlcul de l'acció de control. Però abans s'adjunta a l'Annex III la comprovació de la seva controlabilitat.

6.4.2. Càlcul de l'acció de control (K).

Per calcular el controlador per Retorn d'estat cal tenir present una sèrie de conceptes.

Primerament cal fer una distinció bàsica entre un control en llaç tancat clàssic i el de retorn d'estat. La informació d'aquest apartat s'obté de la bibliografia [2] i [7].

En aquest primer cas les accions de control són calculades per la mesura de les sortides (variables controlades) mentre que el control per retorn d'estat es basa en realitzar les accions de control a través dels valors mesurats dels estats del sistema amb l'objectiu de determinar l'acció de control (K) de tal manera que els pols de la funció de transferència, del sistema en llaç tancat, s'han d'ubicar de forma convenient en el pla complex per satisfer estabilitat i especificacions d'amortiment, velocitat, etc.

Existeixen moltes més formes per tal de calcular l'acció de control, com per exemple a través de la forma canònica de controlabilitat però en el present projecte ens basarem en el càlcul de la matriu K amb l'equació d'Ackermann on:

$$K = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1][B \ AB \ A^2B \ \dots \ A^{n-1}B]^{-1} \alpha c(A) \quad (6.15)$$

$$\alpha c(A) = A^n + \alpha_{n-1}A^{n-1} + \dots + \alpha_1A + \alpha_0A \quad (6.16)$$

On $\alpha c(A)$ és el polinomi característic que conté els pols que es desitgen tenir.

El software de Matlab ja inclou una funció que realitza internament aquest càlcul, per la qual cosa ens facilitarà el seu càlcul sempre i quan li aportem les dades necessàries.

Aquestes dades són la matriu A, B i els pols desitjats.

Els valors de A i B ja es coneixen, i pel que fa als pols:

- Es sap que en un sistema expressat en espai d'estat, els pols de la funció són els valors propis de la matriu d'estat A per tant una realimentació sobre els estats amb una matriu K, és equivalent a realitzar una modificació de la matriu d'estat del sistema
- Els pols que s'escolliran seran els de la taula ITEA, que s'adjunta a l'Annex III, segons el número de pols que requereix el sistema. S'escull aquesta taula ja que el pols seran ajustats manualment per tal d'apropar-se lo màxim possible a la solució més idònia.
- En la taula ITEA s'observa com aconseguir variar la velocitat dels pols del sistema. Com que aquest sistema és un sistema amb un temps d'estabilització molt llarg cal escollir uns pols més lents per la qual cosa s'imposa una velocitat w_0 de $\frac{1}{300}$ rad/s. Aquest valor de temps ha estat un valor aproximat a les τ del sistema on el nivell es troba al 63% respecte el valor d'estabilització. Aquesta localització dels pols es pot obtenir substituint $\frac{s}{w_0}$ per 's' en tots els casos.
- El sistema és estable si tots el pols de la funció de transferència tenen part real negativa o equivalent i es troben al semiplà esquerre del pla complexa de s mentre que en el pla z es troben en el semiplà positiu i com es pot observar a continuació com més a la dreta d'aquest semiplà s més lents seran el pols. I en el pla z seran més lents com més a la bora del cercle unitari.

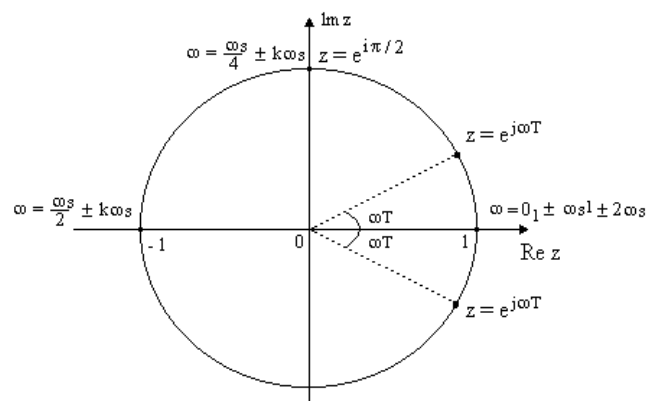


Figura 6.14. Pla z.

Font: Universidad del País Vasco. *Procesamiento de senyales (tema 4)*.

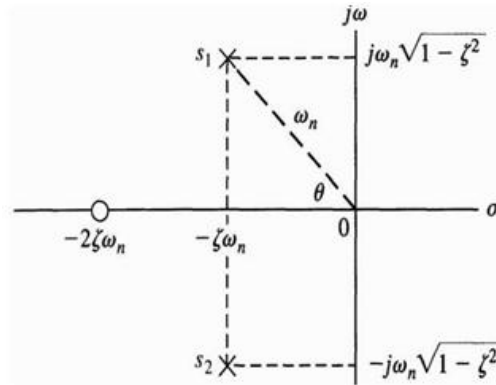


Figura 6.15. Pla s.

Font: Universidad del País Vasco. *Procesamiento de senyales (tema 4)*.

Un cop escollits el pols es comprova si el sistema conté error estàtic per si s'escau afegir un integrador.

A l'Annex III es calculen les K respectives pels pols escollits i es verifica si el senyal conté aquest tipus de pertorbació. Al fer la primera prova ens adonem que el sistema presenta un cert error estàtic o estacionari ja que el sistema no segueix amb exactitud l'entrada donada (no acaba d'arribar a la consigna desitjada) i això és causat pel tipus de funció de transferència en llaç obert del sistema com s'explica al mateix Annex.

Es determina que el sistema és de tipus 0 i per tant conté un error, si la consigna és amb esglaió unitari, que cal rectificar a tipus 1 mitjançant un integrador.

Per tant a més del retorn d'estat simple, cal una acció integral que permet limitar l'efecte de la influència de les pertorbacions en les sortides del sistema. Aleshores es pot incloure en el llaç de retorn d'estat un corrector integral que corregeixi l'error estàtic.

Afegir un integrador també vol dir recalculer els paràmetres del sistema ampliant-lo fins a $n+1$ per fer servir l'equació d'Ackerman de manera que el càlcul quedaria de la següent manera:

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{\bar{x}} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} [0] & C \\ [0] & A \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ \bar{x} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ B \end{pmatrix} u \quad (6.17)$$

$$y = [0 \quad C] \begin{pmatrix} x \\ \bar{x} \end{pmatrix} + Du \quad (6.18)$$

Aleshores:

$$[K_I \bar{K}] = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1][B_{amp} \ A_{amp} B_{amp} \ \dots \ A_{amp}^{n-1} B_{amp}]^{-1} \alpha c(A_{amp}) \quad (6.19)$$

A continuació introduïm els nous valors a Matlab i es procedeix a realitzar el càlcul de l'acció de control tenint present que al treballar amb PC la simulació haurà de ser discreta:

1. <i>Matrius</i>
$A=[(-1/384.88) \ (0.4811/384.88);0 \ (-1/365.6)]$ $B=[0;(1/365.6)]$ $C=[1 \ 0]$ $D=0$
2. <i>S'agrupen les matrius A,B,C i D en funció de les dues sortides</i>
$sys=ss(A,B,eye(2),[0;0])$
3. <i>Es transformen les matrius de continues a discretes amb un temps de mostreig d'1 seg.</i>
$sysd=c2d(sys,1)$
4. <i>S'amplien les matrius a fer servir en la funció d'Acker en n+1</i>
$Aa=[1 \ C;[0;0] \ sysd.A]$ $Ba=[0;sysd.B]$
5. <i>S'introdueixen els pols escollits, s'alenteixen i es discretitzen</i>
$z1=\exp(1*((1/300)*(-0.7081)))$ $z2=\exp(1*[(1/300)*(-0.5210+j*1.068)])$ $z3=\exp(1*[(1/300)*(-0.5210-j*1.068)])$
6. <i>S'utilitza la funció interna de Matlab per calcular l'acció de control</i>
$k=acker(Aa,Ba,[z1;z2;z3])$ $k1=k(1)$ $k2=k(2)$ $k3=k(3)$

Els valors de l'acció de control resultants són:

$$\mathbf{k1} = \mathbf{0.0108}$$

$$\mathbf{k2} = \mathbf{4.5318}$$

$$\mathbf{k3} = \mathbf{0.1854}$$

El valor de k1 pertany a l'acció de control de l'integrador, k2 al dipòsit 2 i k3 al dipòsit 1.

El temps de mostreig ha estat d'1 segon ja que es comprova que amb un temps més gran els sensors triguen massa temps en tornar a fer una lectura i això provoca que en aquest interval el dipòsit s'ompli massa fins a la lectura del següent valor, provocant variacions molt brusques. Per a dipòsits més grans o bombes amb menys cabal si que es podria introduir un temps de mostreig més elevat.

La realimentació d'un controlador per retorn d'estat es construeix de la següent manera:

$$\Sigma: \begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u \\ y = \mathbf{C}\mathbf{x} \end{cases} \xrightarrow{u = \mathbf{N}r - \mathbf{K}\mathbf{x}} \Sigma_f: \begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = (\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K})\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{N}r \\ y = \mathbf{C}\mathbf{x} \end{cases}$$

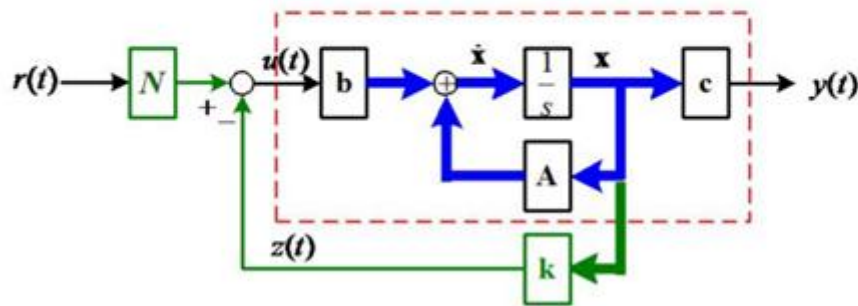


Figura 6.16. Realimentació del retorn d'estat.

Font: A.D. Lewis (2003). *A Mathematical Approach to Classical Control*

On N és un guany de precompensació per aconseguir el seguiment, K és l'acció de control i A, B i C són les matrius trobades.

En el present treball el retorn d'estat, afegint una entrada amb integrador, amb el model i les conversions prèviament dissenyades és:

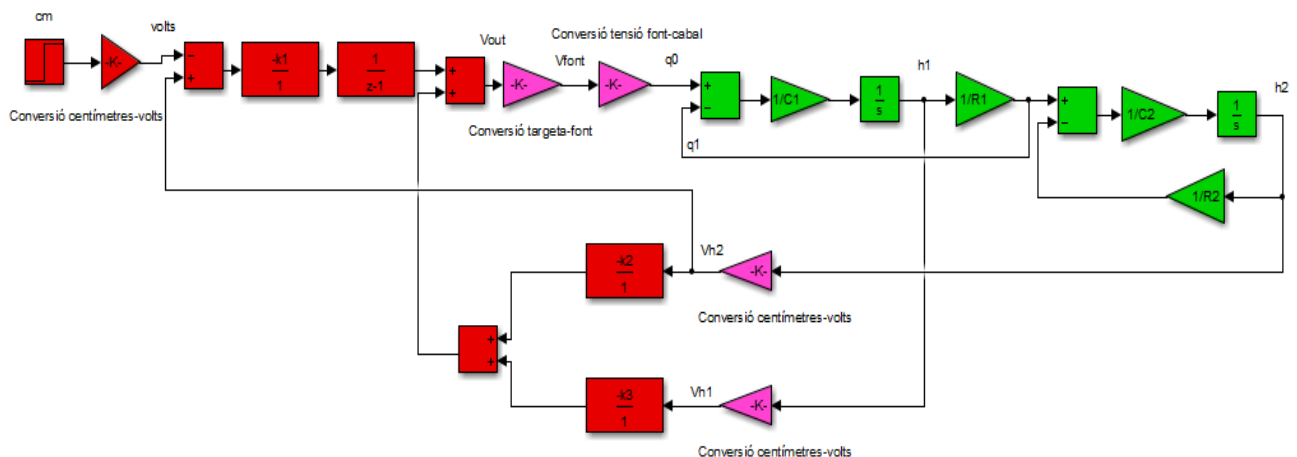


Figura 6.17. Retorn d'estat incorporat al model.

En la representació del model controlat per retorn d'estat es marca en vermell la secció de l'acció de control que treballa amb blocs discrets, motiu pel qual l'integrador varia de $1/s$ a $1/(z-1)$. En verd es representa la planta física (equacions) del sistema teòric, per això s'executa en continu. I per últim en magenta es representen els guanys i conversions dels experiments.

En aquest cas per demostrar el funcionament del control, aquest es durà a terme sobre el dipòsit 2 ja que per aconseguir la seva estabilització caldrà un cert control del primer dipòsit però si es volgués controlar el dipòsit 1 seria lleugerament més fàcil ja que és atacada directament per l'entrada de líquid de la bomba.

Una vegada calculada l'acció de control es pot dur a terme la primera simulació. Però abans es tenen en compte una sèrie d'aspectes que s'han considerat durant el projecte abans de realitzar el control.

6.5. Aspectes que s'han considerat per un correcte control.

Seguidament s'expliquen les consideracions que s'han tingut presents durant la realització dels apartats anterior.

Com més precisió a la hora de construir la maqueta i realitzar els determinats experiments més precisió s'aconsegueix en el control.

Les consideracions han estat les següents:

- **La resistència de les electrovàlvules.** Haurien de ser les mateixes, d'aquesta manera assegurariem que el mateix líquid que entra és el mateix que surt i que el dos dipòsits s'estabilitzaran al mateix punt. És a dir, per aconseguir-ho s'ha ajustat el màxim per aconseguir que la sortida d'ambdues electrovàlvules fossin les mateixes, per tant que el valor dels dos cabals de sortida del dipòsit 1 i 2 siguin el mateix.
- **Cabal en funció del voltatge.** Coneixent el cabal que proporciona a la sortida cada dipòsit en funció dels volts entregats podem saber el rang exacte sobre el qual cal treballar per dur a terme el control, tenint present que la targeta d'adquisició només es capaç de proporcionar una sortida de 0 a 10 V i que la bomba només comença a expulsar aigua moderadament a través dels 8 V aproximadament degut a l'alçada a la que es troba el dipòsit 1.
- **Linealitat.** Un altre aspecte a considerar és que els models matemàtics d'un sistema de fluids estan basats en equacions no-lineals mentre que a través de les rectes de regressió dels experiments es linealitzarà el model teòric. És per aquest motiu que els experiments s'han realitzat a l'entorn d'un punt de treball on inicialitzar el control real ja que, pels dos dipòsits, com a punt inicial/origen no podem fer servir la base o els 0 cm degut a l'absència de valors negatius i que la bomba treballant a aquests nivells no proporcionaria cabal.
Aleshores, en el sistema real, al ser no-lineal caldrà treballar a través d'increments per augmentar o disminuir l'altura des de un punt de funcionament mentre que en el model teòric no caldrà fer servir el punt de treball. Conseqüentment la consigna o altura que li donem a la entrada serà exactament el valor de la sortida en el qual s'estabilitzarà.
- **Pèrdues de líquid.** Mecànicament també hi poden haver determinades situacions que poden afectar negativament al control del model real. Abans de realitzar qualsevol tipus de prova o experiment s'ha verificat que cap de les electrovàlvules, dipòsit, rosques o qualsevol part de la maqueta tingui pèrdues de líquid ja que d'aquesta manera no podríem obtenir les dades necessàries i correctes per realitzar les simulacions, per això cal un exhaustiu segellat de tot tipus de junta que pugui perdre.

- **La disposició dels dipòsits.** tant en altura com en separació horitzontal, també podria afectar al control degut que el flux de l'aigua i el cabal podria variar. Per tant, s'han disposat les prestatgeries de la manera més adequada per evitar per exemple que la sortida de líquid d'un dipòsit vagi directament a l'orifici de sortida de l'altre ja que degut a la pressió que exerciria, el segon dipòsit perdria velocitat en termes de cabal.

Un altre cas podria ser que al precipitar-se el líquid del primer dipòsit al segon amb un cert angle a favor del gir en el qual es buida el líquid d'aquest últim (segons l'hemisferi en que ens trobem) podria provocar l'efecte anomenat *Coriolis*. Aquest efecte es basa en l'existència d'una acceleració relativa del líquid perpendicular al eix de rotació, com que es crea una acceleració respecte el observador és com si existís una força inercial. Això provocaria un remolí més accelerat que faria buidar el segon dipòsit a una velocitat lleugerament més gran però que afectaria a la hora d'intentar igualar els dos cabals.

Segons la precisió amb la qual s'han realitzat les tasques anteriors s'obtindrà un control real més o menys exacte.

A continuació es construeixen els models teòrics i es simulen per conèixer el senyal desitjat respecte el control del dipòsit 2.

6.6. Simulació del model lineal.

El sistema de dipòsits real es basa en un sistema dinàmic no-lineal que es pot representar per un conjunt d'equacions diferencials on f i h són funcions que representen la dinàmica del sistema i la sortida d'aquest en termes de la variable d'estat x i l'entrada u .

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= f(x(t), u(t)) \quad , \quad x(t_0) = x_0 \\ y(t) &= h(x(t))\end{aligned}\tag{6.20}$$

On f una funció vectorial de $n \times 1$ elements, expressats en termes d'un vector d'estat. El número d'estats n correspon a l'ordre del sistema.

La simulació ha de respondre a una consigna d'entrada en esglaió (nivell desitjat). La resposta ens porta a la consigna desitjada però el comportament del sistema conté moltes oscil·lacions, això podria ser degut a l'efecte integrador.

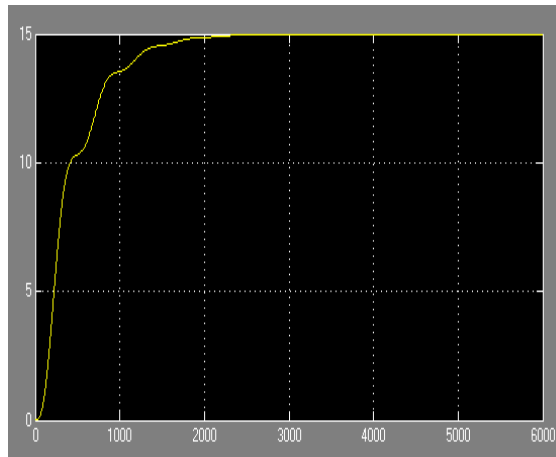


Figura 6.19. Resposta del control lineal amb un esglaió de 15 cm (dip2).

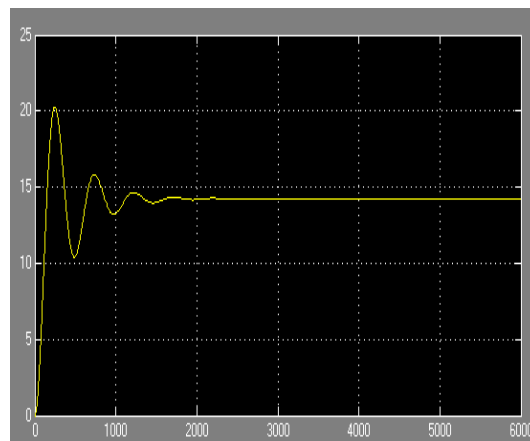


Figura 6.20. Resposta del control lineal amb un esglaió de 15 cm (dip1).

Es pot apreciar a la Figura 6.20 que les oscil·lacions succeeixen sobretot en el primer dipòsit del qual depèn, en bastant grau, el control del segon dipòsit que és el qual es vol controlar.

La solució a aquest problema es troba en un concepte bàsic de control sobre l'efecte derivatiu i l'efecte integrador:

- L'acció de control treballa amb les derivades de les variables del sistema i que té com a funció mantenir l'error al mínim corregint-lo proporcionalment a la mateixa velocitat que es produeix i així evitar que l'error s'incrementi.
- Si el valor del temps d'integració és molt gran pot haver inestabilitat en el procés i si és molt petit la variable podria oscil·lar massa amb relació a la consigna.

En aquest cas:

- Les oscil·lacions es produeixen més greument al dipòsit 1 al qual pertany la K3
- La K3 té un valor de 0,18 i provoca oscil·lacions al ser molt petit.

Es dedueix que per intentar corregir aquest efecte cal augmentar el valor derivatiu K3 d'aquest dipòsit i així eliminar les pertorbacions o oscil·lacions.

A través d'experimentació es va augmentat el seu valor fins arribar al valor més òptim que permet un senyal transitori i una estabilització del dipòsit 2 correctes.

$$K3 = 1.2$$

Valor que es fa servir, a partir d'ara en totes les simulacions.

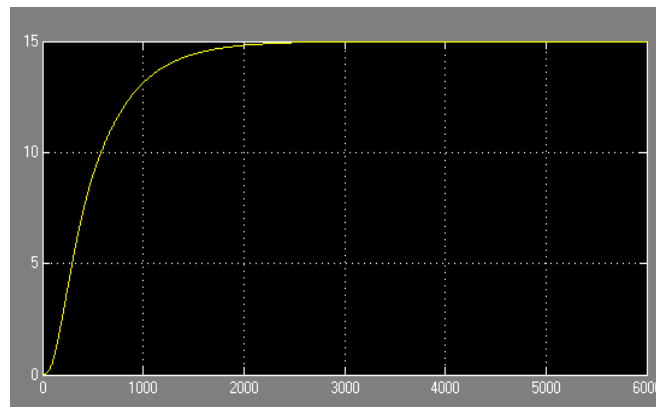


Figura 6.21. Resposta del control lineal amb un esglaó de 15 cm i $K = 1,2$ (dip2).

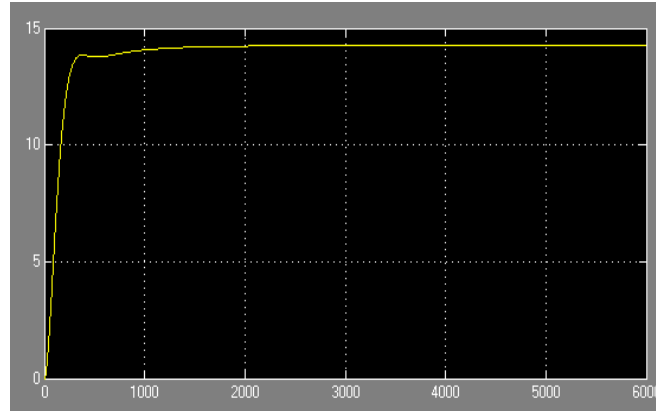


Figura 6.22. Resposta del control lineal amb un esglaió de 15 cm i $K = 1,2$ (dip1).

El sistema ja no respon amb tantes oscil·lacions i aconsegueix un temps d'estabilització similar. Com s'aprecia el segon dipòsit que és el que es vol controlar arriba als 15 cm de consigna però no el primer degut a la diferència entre les resistències que ofereixen cada electrovàlvula.

El temps d'estabilització són:

- $T_{ss_{dip1}} = 1500$ segons
- $T_{ss_{dip2}} = 2100$ segons

Basant-nos en l'experiència d'experiments similars aquest valors són molt coherents degut que s'ha de treballar amb uns pols més lents. També és evident que el primer dipòsit s'estabilitzi abans ja que aquest rep el líquid de la bomba directament i a través d'aquest s'omple el segon dipòsit, així cal un control previ del primer, ja que en el moment que comenci a estabilitzar-se el primer dipòsit s'aconseguirà la estabilització del segon.

Per poder aproximar, els resultats de la simulació, amb més exactitud al comportament del sistema real cal dissenyar un sistema que treballi de manera no-lineal fent servir els punts de treball òptims.

6.7. Simulació del model no-lineal.

Seguidament s'intenta aproximar de manera més exacte al comportament dinàmic/físic del sistema real. Per fer-ho s'introduiran les gràfiques obtingudes als experiments amb els

diferents resultats de les funcions en funció de les variables trobades i es treballarà amb variacions per representar les derivades parcials de la dinàmica d'aquesta funció en cada punt. Es consulta la bibliografia [2] i [9] per saber com treball un model no-lineal i conèixer el seu comportament.

El primer pas per imitar el comportament real és tenir present que s'ha de treballar al voltant d'un punt de treball sobre el qual s'han trobat els pendents dels experiments. La bomba es podria veure afectada al inicialitzar a nivells baixos provocant una insuficiència en el cabal produït, ja que al treballar amb variacions (increments o decrements) si es partís de la base del dipòsit no es disposaria de valors negatius per treballar i el control el faria treballar a un voltatge massa petit i difícil d'interpretar.

Aquest punt ens permet satisfer les nostres necessitats sempre i quan es treballi amb variacions respecte el seu entorn on es considera lineal el sistema ja que és la part que forma una recta, més allà d'aquests valors es podrien presentar anomalies pel que fa al transitori abans d'estabilitzar.

Com que es controla el segon dipòsit el punt de treball s'ha escollit en la gràfica de l'altura en funció del cabal del dip2. El valor de cabal escollit ha estat als $196 \text{ cm}^3/\text{s}$ que pertany a uns $10,91V_{\text{font}}$ (sortida font regulable) i $6,88V_{\text{out}}$ (sortida de la targeta).

Els valors a tenir presents per cada dipòsit són:

DIP1

- Altura: 11,32cm
- V_{h1} : 1,822V

DIP2

- Altura: 14,64cm
- V_{h2} : 2,371V

Es canvien els guany del model lineal per nous blocs formats per taules que contenen els valors de l'eix y i l'eix x de les gràfiques obtingudes en els experiments i s'afegeix un

sumador amb el punt de treball abans de la sortida de tensió de la targeta i els valors de tensió a restar a la sortida per així obtenir la variació i treballar per increments i decrements. Al introduir les gràfiques i no només el valor del pendent de la recta de regressió obtindrem un model no-lineal similar al real.

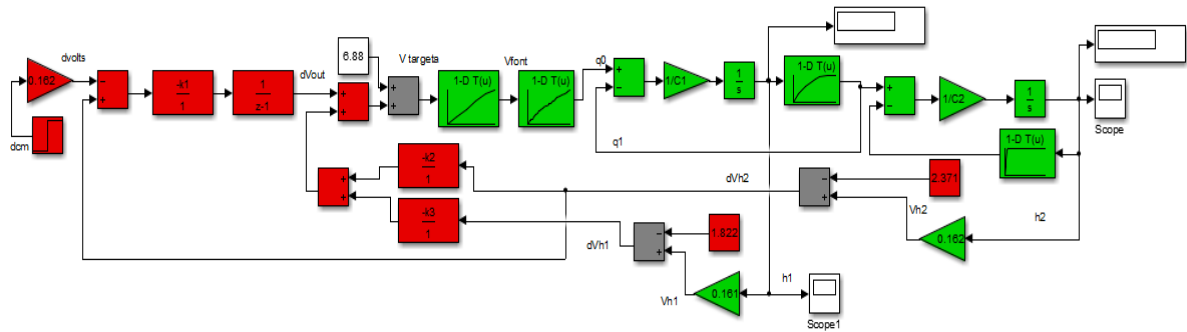


Figura 6.23. Controlador per retorn d'estat del sistema no-lineal.

Es separa en vermell la part que treballa per variacions o derivades i en verd el sistema no-lineal.

6.7.1. Simulació sense limitador.

A continuació del disseny del controlador del model no-lineal es fan les simulacions respectives i es conclou que:

- ✓ Entrant una consigna de 0 el sistema es manté en el punt de treball com succeiria en el sistema real.
- ✓ El valor final d'estabilització és correcte.
- ✗ No realitza una resposta transitòria correcte.
- ✗ El senyal de control sobrepassa els límits de tensió.

S'observa el senyal obtingut:

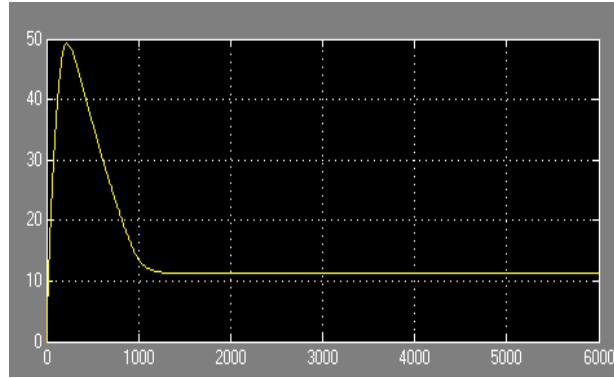


Figura 6.24. Resposta del model no-lineal amb consigna 0 i sense limitador (dip 1)

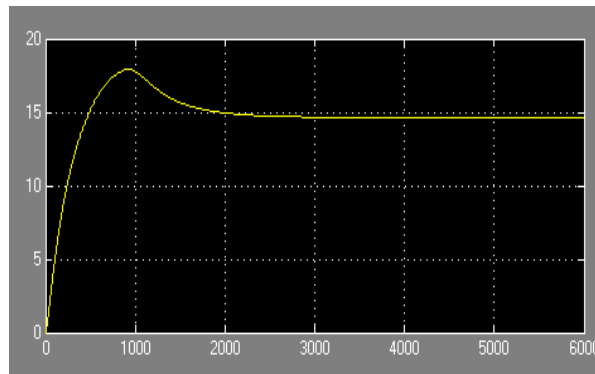


Figura 6.25. Resposta del model no-lineal amb consigna 0 i sense limitador (dip 2)

Abans d'arribar al nivell d'estabilització s'observa una anomalia. Ambdós dipòsits sofreixen un sobreimpuls de nivell que podria afectar negativament al sistema real provocant un vessament de líquid, sobretot en el dipòsit 1 degut que sobrepassa gairebé els 30 cm d'altura del dipòsit.

Observant cadascun dels senyals de la simulació s'arriba a la conclusió de quin és l'error comès.

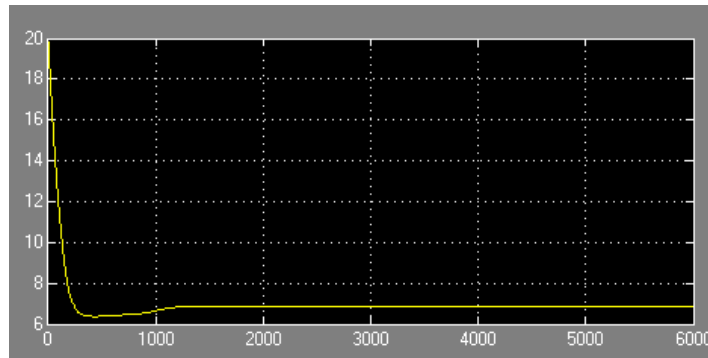


Figura 6.26. Senyal de control no-lineal sense limitació de tensió.

El senyal de control a la sortida de la targeta es comporta coherentment ja que conforme baixi el voltatge d'alimentació de la bomba més ens estarem acostant al nivell d'estabilització però els valors de sortida de la targeta estan compresos en la realitat entre 5 i 10V i el sistema és incapaç de saber-ho excepte si se li afegeix un saturador.

6.7.2. Simulació amb compensació ANTI-WINDUP

Un dels problemes que acostuma a succeir a la pràctica és l'existència de limitacions en els actuadors per màxims o mínims rangs d'actuació o màxims rangs de velocitat d'actuació. Per tant si no es té en compte el control real pot sofrir una degradació respecte el senyal esperat si arriba al seus límits. Per a la seva construcció i conèixer el seu funcionament es consulta la webgrafia [10].

- *Problema.*

Aquest efecte sorgeix ja que en qualsevol sistema de control amb un ampli rang de condicions d'operació, pot succeir que la variable de control arribi a límits prefixats de l'actuador. Quan això passa, la realimentació es manté en el seu límit independentment de la sortida del procés. Amb un controlador amb acció integral l'error continuarà integrant-se, augmentant el seu valor. Per tant l'estat de l'integrador pot assolir valors excessius que deteriorenen la resposta transitòria produint sobrevalors. L'efecte s'anomena *integrator wind-up*. El sistema triga molt de temps en reaccionar front una pertorbació o canvi de referència després de produir-se la funció del actuador.

- *Solució.*

Per solucionar-ho els estats del controlador han de ser conduïts per la verdadera entrada (limitada) del sistema i han de tenir una resposta acotada per tal que la sortida del controlador no arribi als límits de l'actuador. Cal incloure un saturador corresponent a la limitació real de l'actuador, d'aquesta manera si el senyal de control satura l'actuador els estats del controlador seran conscients degut que són conduïts per l'entrada efectiva.

La construcció del sistema anti-windup és la següent:

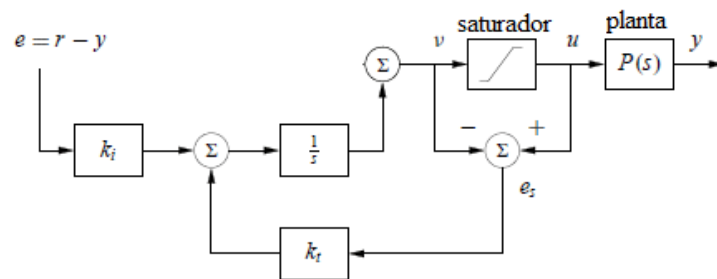


Figura 6.27. Saturador anti-windup.

On:

K_i = guany integrador

K_f = constant de temps que determina la rapidesa amb que e_s es satura

e = error

v = entrada saturador

u = entrada planta

y = sortida planta

Afegint el compensador anti-wind-up el diagrama de blocs queda de la següent manera:

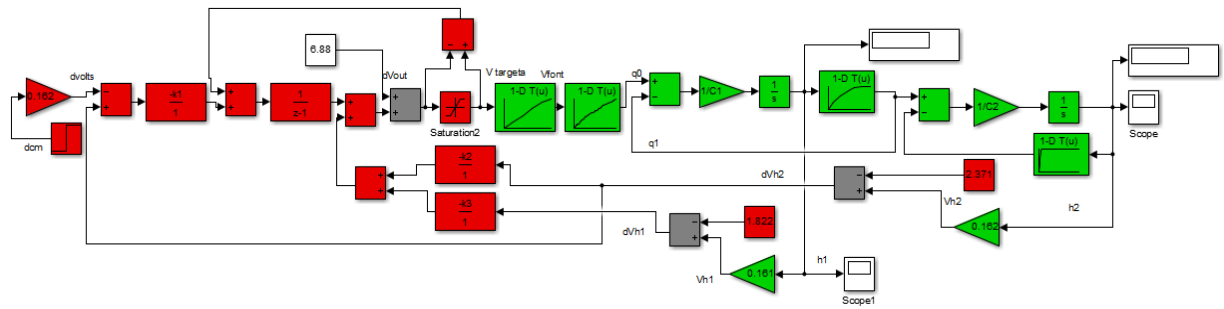


Figura 6.28. Controlador no-lineal de retorn d'estat + saturador anti-windup.

El saturador de l'anti-windup està comprès entre 5 i 10V per imitar la sortida de la targeta.

A continuació s'introdueix una consigna d'increment al voltant del punt de treball de 3 cm per veure com respon el sistema amb l'anti-windup. I per reproduir amb major exactitud el sistema real se li introdueixen als integradors de la planta les condicions inicials del punt de treball.

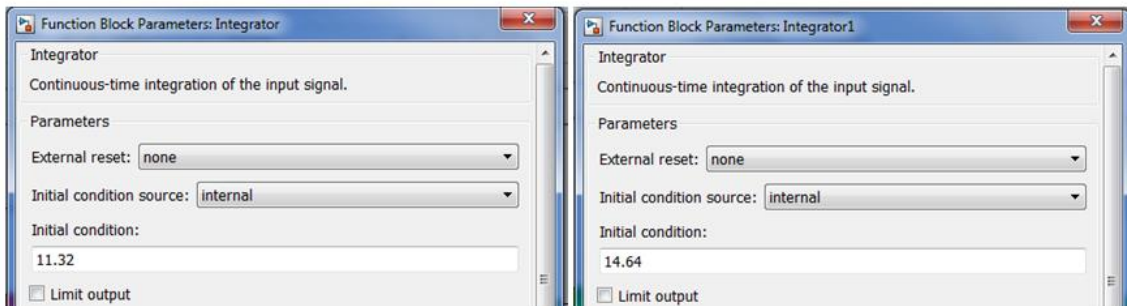


Figura 6.29. Condicions inicial del sistema.

I el resultat és:

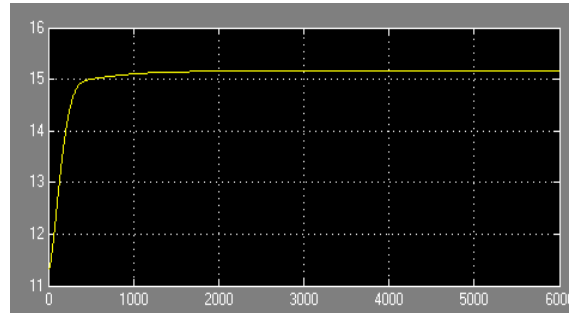


Figura 6.30. Comportament del nivell del model no-lineal amb 3cm de consigna (dip1).

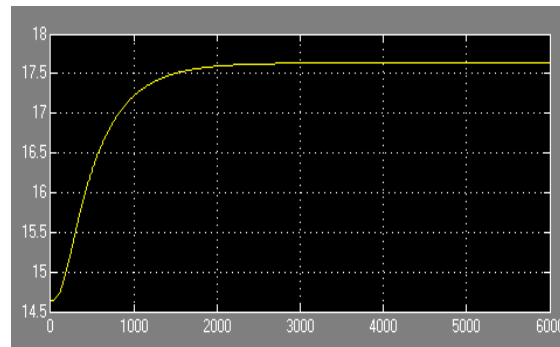


Figura 6.31. Comportament del nivell del controlador no-lineal amb 3cm de consigna (dip2).

Es comprova també el increment en la tensió de sortida ($dVh1$ i $dVh2$), en funció de l'exactitud de programació de cada sensor respecte el punt de treball:

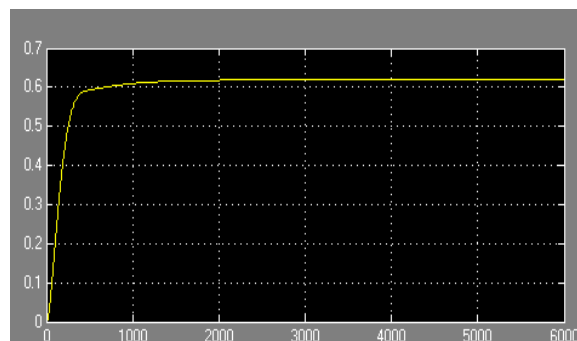


Figura 6.32. Comportament $dVh1$ del model no-lineal amb 3cm de consigna (dip1).

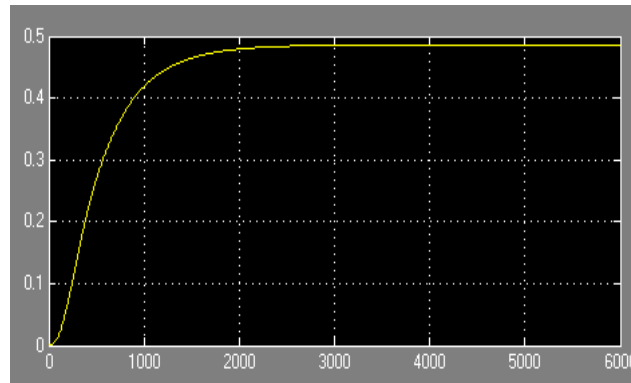


Figura 6.33. Comportament dVh2 del model no-lineal amb 3cm de consigna(dip2).

Es conclou que:

- El sistema respon correctament incrementant el dipòsit 2 uns 3cm respecte els seus respectius punts de treballa i uns 4cm el dipòsit 1 per tal de controlar el segon.
- Ja no es generen les pertorbacions que provocaven un sobrepassament dels nivells.
- Inicialitzant el sistema des de la base es produeix una degradació del senyal en el dipòsit 1 abans d'estabilitzar. Però des de el punt de treball aquest desapareix a causa que els càlculs del sistema s'han calculat tenint present aquest punt de treball.
- Els increments de tensió a la sortida dels sensors coincideixen amb els experiments d'equivalència entre V_{out} -Nivell de la figura 5.8 i 5.9.
- Els temps d'estabilització són:

$$T_{ss_{dip1}} = 1500 \text{ segons.}$$

$$T_{ss_{dip2}} = 2100 \text{ segons.}$$

Aquest valors són aproximats ja que no es tenen presents variacions de poques dècimes. Per tant es pot afirmar que s'aproximen bastant als nivells d'estabilització del model lineal.

Tot i això els increments o decrements que s'estableixen com a consigna no haurien de sobrepassar els 5 cm ja que, encara que s'estabilitzi en el nivell que volem, es generen pertorbacions en el senyal transitori.

Segons aquest última simulació es pot preveure com serà el comportament del sistema real ja que la simulació s'ha obtingut a través de les gràfiques obtingudes pel propi prototip. Tot i això sempre es generen petites pertorbacions en el sistema real que provocaran petites desviacions en el comportament.

A l'Annex IV es comprova el funcionament del Anti-windup

6.8. Disseny del control del sistema real.

En aquest apartat es realitzen les modificacions convenientes en el model per realitzar les simulacions en el sistema real i s'explica com realitzar un bon condicionament del senyal per poder fer un comparativa amb les simulacions i extreure'n les conclusions.

6.8.1. Explicació del model i paràmetres del sistema real.

Pel disseny del model s'han tingut presents els diferents paràmetres a analitzar:

- Nivell (h_1 i h_2) en centímetres.
- Increment del nivell (dh_1 i dh_2).
- Increment del voltatge de sortida dels sensors (dVh_1 i dVh_2)
- Volum d'ambdós dipòsits durant tot el procés (incorporant un display per conèixer el volum final ja que no es disposa de cap element extern que informi d'aquest).

I pel que fa a la utilització dels blocs de guanys i equivalències en termes de variacions:

- Els guanys calculats per la simulació han estat extrets, excepte els de conversió de tensió de sortida dels sensors a nivell en centímetres.
- El guany de la font regulable front la sortida de la targeta s'ajustarà manualment a través de la pròpia font regulable, sabent que en el punt de treball la tensió de la bomba és de 10,91V, només caldrà fer una prova amb un *step* de 0 i ajustar la font a aquesta tensió a través del regulador.
- Respecte el factor de conversió de la variació de tensió a cabal en aquest cas no té sentit ja que el que li introduïm a la font per regular la bomba és un paràmetre de tensió no de cabal.

Conseqüentment el control del sistema real es dissenya de la següent manera:

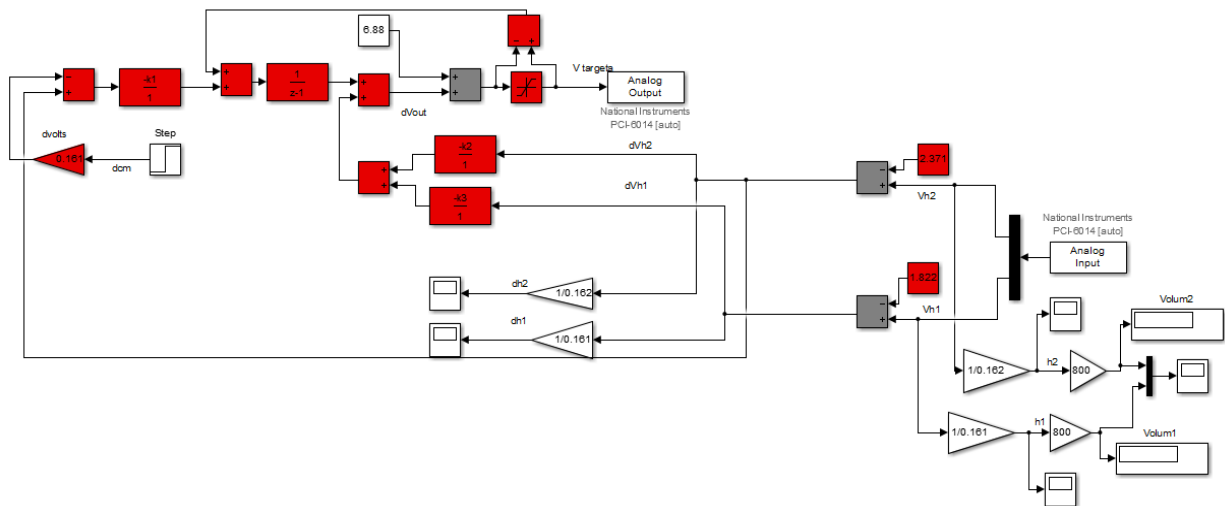


Figura 6.34. Disseny del controlador per retorn d'estat del sistema real.

Al utilitzar la targeta d'adquisició disponible en el laboratori de control s'aprofiten els blocs de lectura d'entrada i el de sortida de la targeta, aquests es configuren de la següent manera:

- Temps de mostreig d'1 segon.
- La sortida de la targeta es configura a la sortida 2 amb rang de -10 a 10V encara que amb el saturador el interval serà de 5 a 10V ja que no es treballarà amb valors per sota de 5V a causa que la bomba no produiria el suficient cabal.
- Pel que fa a les entrades dels sensors, a la entrada 2 es connecta el sensor del dipòsit 2 i al 3 el del dipòsit 1. El rang de lectura és de -5 a 5V tot i que el sensors només enviaran a la targeta tensions de 0 a 5V.

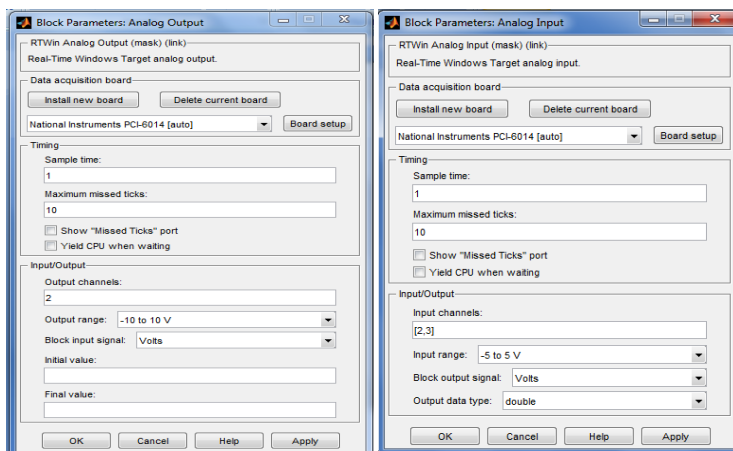


Figura 6.35. Configuració d'entrades i sortides de la targeta d'adquisició.

En acabat es realitza es posa el sistema en prova per examinar l'obtenció de la senyal i poder cercar qualsevol problema abans de realitzar qualsevol prova definitiva ja que cada prova requereix gairebé 1 hora per aconseguir l'estabilització.

Amb aquesta prova es pot concloure que:

- Els senyals contenen massa soroll per poder realitzar el control donat a errors de precisió dels sensors, detectant altures excessives o insuficients (generant pics gairebé de 30cm). Aleshores el sistema podria mal interpretar aquests senyals, captant que el nivell es troba en una altura incorrecte, i fent actuar la bomba amb una tensió incorrecte.
- També ha permès demostrar que quan el control proporciona 5V a la font (degut al saturador), aquesta no aporta suficient tensió per fer que la bomba pugui enviar el líquid al primer dipòsit degut segurament a la altura a la que es troba. Per tant, es regula la bomba fins al valor mínim capaç de fer arribar líquid al dipòsit 1. Un cop comprovat es troba que el valor mínim a introduir a la saturació és de 5,2V.

En el proper apartat s'estudiarà el disseny d'un filtre per evitar les pertorbacions.

6.8.2. Filtre passa-baixos per eliminar el soroll.

Per tal d'evitar el soroll cal filtrar a la sortida de tensió dels sensors, les freqüències altes i deixar passar només les baixes, d'aquesta manera la sortida serà interpretada correctament per l'acció de control i a conseqüència la font obtindrà els valors de tensió reals que ha d'entregar a la bomba.

El filtre que es fa servir treballa exactament igual que un filtre passa-baixos electrònic, conseqüentment es troba la funció de transferència mitjançant el circuit compost per una resistència i un condensador.

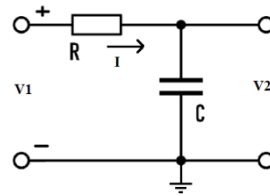


Figura 6.36. Filtre RC.

A través del circuit es dissenya el diagrama de blocs corresponent per a continuació trobar la funció de transferència:

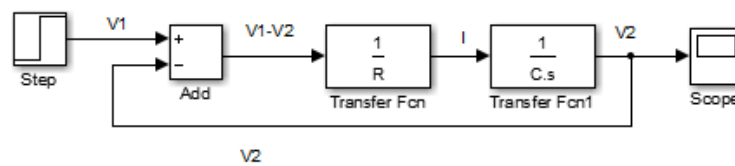


Figura 6.37. Diagrama de blocs de la funció de transferència d'un filtre RC.

$$\frac{V2}{V1} = \frac{\frac{1}{RCs}}{1 + \frac{1}{RCs}} = \frac{1}{RCs + 1} = \frac{1}{RAs + 1} \quad (6.21)$$

En aquest cas RC coincideix amb la τ i com que se sap que la τ del sistema en qüestió és la resistència per l'àrea del dipòsit es substitueix directament sobre aquest valor.

La τ_1 és de 365,5 i la τ_2 de 384,88, per tant s'escull una τ general per tal de construir un filtre i després ajustar-lo a través de Matlab. Aquest valor serà de 400.

A continuació cal escollir una freqüència de tall per el filtre, com que es coneix que la freqüència del sistema és:

$$w = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{400} = 0,0025 \text{ rad/s} \quad (6.22)$$

Es decideix fer un filtre que no talli aquesta freqüència i capaç d'eliminar les freqüències més altes (soroll), per tant s'escull una w_{tall} de 0,003 rad/s.

Per tal de treballar amb la funció en discret s'aprofita la taula de conversió a través de la transformada z que apareix a la bibliografia [2] i que diu:

$$\frac{a}{s(s+a)} \rightarrow \frac{(1-e^{-aT})z}{(z-1)(z-e^{-aT})} \quad (6.23)$$

$$\frac{1}{s} \rightarrow \frac{z}{z-1} \quad (6.24)$$

Per tant:

$$\frac{a}{(s+a)} \rightarrow \frac{(1-e^{-aT})}{(z-e^{-aT})} \quad (6.25)$$

Per tant si es divideix la funció de transferència en continua entre RA:

$$\frac{1}{RA s + 1} \rightarrow \frac{\frac{1}{RA}}{\frac{RA s}{RA} + \frac{1}{RA}} = \frac{0,003}{s + 0,003} \quad (6.26)$$

I a continuació s'aplica la transformada z:

$$\frac{0,003}{s + 0,003} \rightarrow \frac{1 - e^{-0,003*1}}{z - e^{-0,003*1}} = \frac{\mathbf{1 - 0,99}}{\mathbf{z - 0,99}} \quad (6.27)$$

Un cop trobada la funció de transferència del filtre amb el valor que rondarà es realitza una comprovació mitjançant Matlab ja que serà molt més eficient i ràpid que a través de l'experimentació de diversos models reals amb diferents valors del filtre. Aleshores es realitzarà només una prova sense filtre del sistema real i es guardaran els valors d'aquesta prova en un *Workspace* per a continuació provar diferents filtres de manera externa. Aquest test de validació del filtratge s'adjunta a l'Annex IV.

Després de realitzar aquestes proves es verifica que els filtres per cada sensor són:

- Filtre dipòsit 1

$$\frac{1 - 0,92}{z - 0,92} \quad (6.28)$$

- Filtre dipòsit 2

$$\frac{1 - 0,98}{z - 0,98} \quad (6.29)$$

Definitivament ja es disposen de tots els elements que permeten el correcte funcionament del sistema i permet l'execució del control real del prototip per abordar els resultats reals i comparar-los amb les simulacions.

Per obtenir el resultat del control del sistema real s'ha implementat un control amb una consigna d'entrada de 4 cm amb un temps de funcionament de 4000 segons per així poder apreciar amb més detall la fase transitòria i l'estabilització del sistema i a continuació fer una comparativa amb les simulacions realitzades.

Abans de començar a controlar la bomba primària s'omplen el dos dipòsits al punt de treball. I a continuació es posa en marxa el sistema.

Els comportaments són:

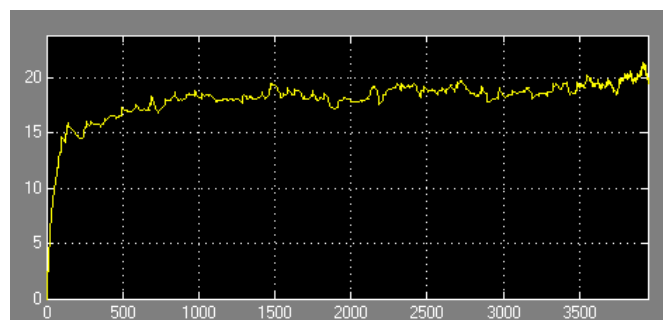


Figura 7.2. Comportament del nivell del sistema real amb 4 cm de consigna (dip2).

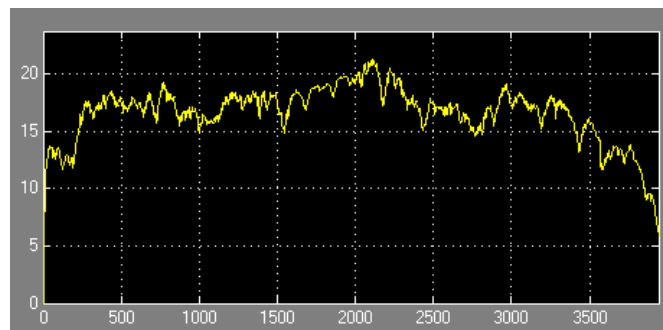


Figura 7.3. Comportament del nivell del sistema real amb 4 cm de consigna (dip1).

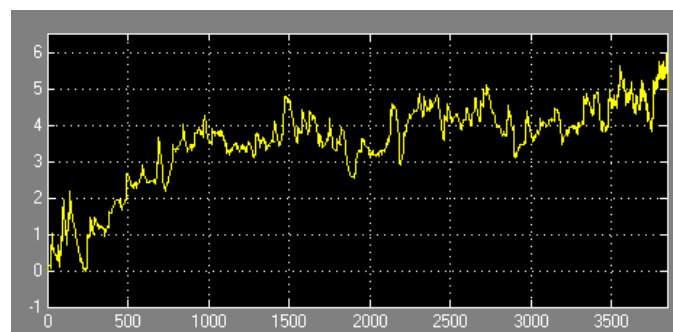


Figura 7.4. Comportament dh2 del sistema real amb 4 cm de consigna (dip2).

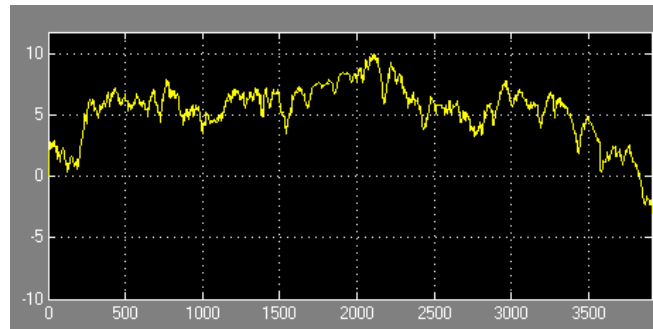


Figura 7.5. Comportament dh1 del sistema real amb 4 cm de consigna (dip1).

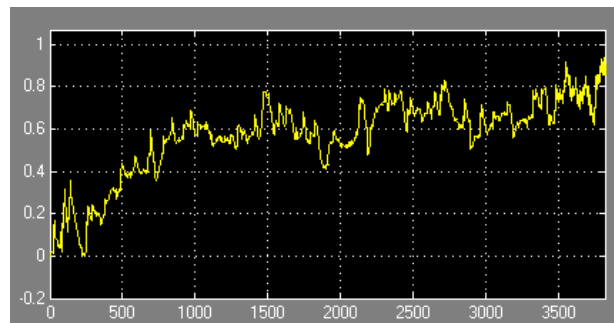


Figura 7.6. Comportament dVh2 del sistema real amb 4 cm de consigna (dip2).

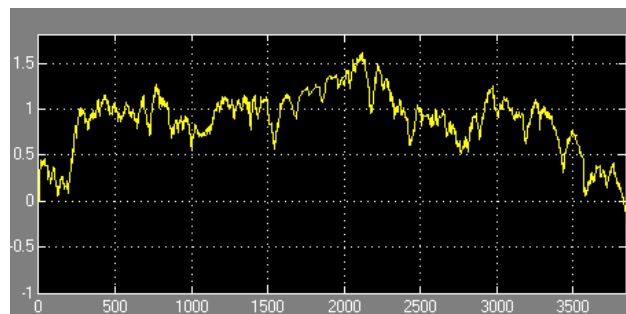


Figura 7.7. Comportament dVh1 del sistema real amb 4 cm de consigna (dip1).

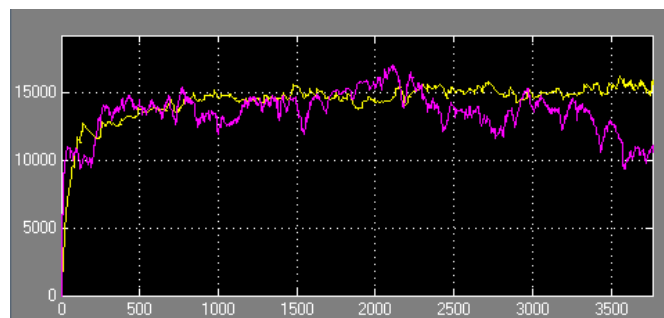


Figura 7.8. Volums del dipòsit 1 i 2 amb 4 cm de consigna.

A continuació s'introdueixen els senyals de la simulació de control no-lineal i el comportament del sistema real amb una entrada esglaió de 4 cm:

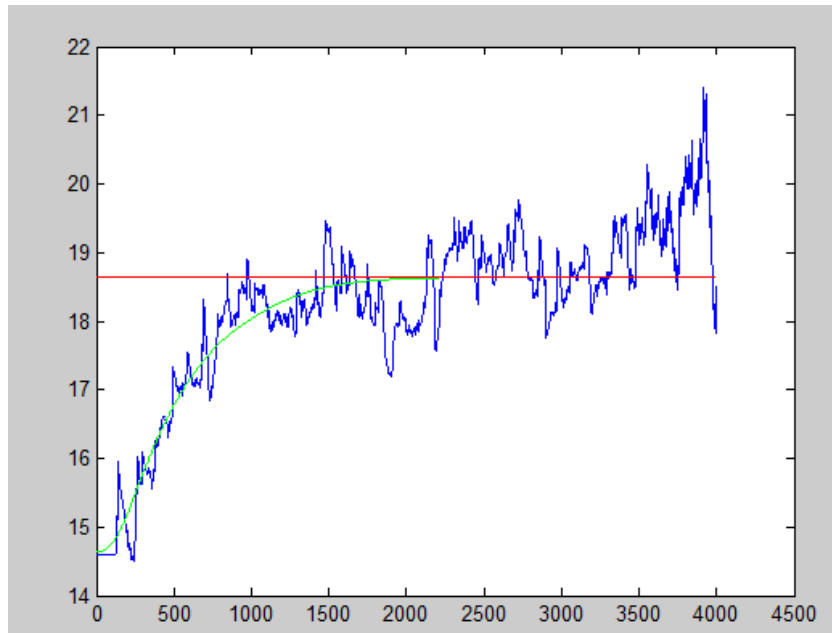


Figura 7.9. Comparativa entre el comportament real i la simulació del control no lineal

- senyal sistema real
- senyal simulació model no-lineal
- nivell equivalent a consigna d'entrada de 4 cm

El sistema real es comporta de la manera esperada tot i que degut al soroll, tot i estar la senyal filtrada, no s'arriba a apreciar amb exactitud la similitud amb les simulacions. Però si ens fixem, a partir dels 1000 segons en ambdós casos comença a atenuar-se el transitori per inicialitzar la fase d'estabilització. Passats els 2100 segons el sistema roman al voltant del nivell desitjat a uns 18,60 cm tot i presentar certes anomalies al final del comportament real. De totes maneres si el sistema hagués tingut més temps de funcionament tornaria a oscil·lar entre el valor desitjat.

Com a resultats finals, es valida que:

- El nivell s'incrementa aproximadament els 4 cm entrats a la consigna com s'observa a la figura 7.4. Assolint un nivell total del dipòsit 2 d'uns 19 cm des del punt de treball.
- El increment del voltatge de sortida dels sensors en funció de la lectura del nivell concorda si es fan servir les equacions obtingudes a les figures 5.8 i 5.9.
- A través de l'opció de *display* es poden comprovar els volums del dipòsit 1 en magenta i el 2 en groc.

El volum del dip2 es manté a uns 15000 cm^3 . Valor correcte ja que si el nivell està al voltant dels 19 cm, el producte d'aquest nivell per l'àrea de la base que són 800 cm^2 dona un resultat de 15200 cm^3 .

- A continuació es valida el valor de τ per el sistema:

$$\Delta Nivell_{63\%} = 0,63 * 4 = 2,52 \text{ cm}$$

Si al punt de treball inicial de 14,6 cm li sumem els 2,52 cm obtenim que el temps (τ) on el sistema té un 63% del valor estacionari o final és:

$$\tau = t_{nivell63\%} = 400 \text{ segons}$$

Aquest valor coincideix amb les τ calculades en la funció de transferència.

- Per últim els temps d'estabilització són aproximats:

$$T_{ss_{dip1}} = 1500 \text{ segons.}$$

$$T_{ss_{dip2}} = 2100 \text{ segons.}$$

Aquest valors són aproximacions ja el comportament real del dipòsit 1 no té per que estabilitzar-se mentre s'aconsegueixi controlar el dipòsit 2. I per altra banda el soroll no permet apreciar correctament els valors de nivell o de temps, però el que si es pot verificar visualment en el sistema real és que el sistema s'estabilitza al voltant del nivell i temps esperats.

- El comportament de les simulacions s'ajusta de manera basant precisa als resultats obtinguts en el control del sistema real i s'aconsegueix portar el sistema a la consigna desitjada.

Es pot verificar aleshores que tots els experiments i paràmetres calculats són correctes i que la construcció de la maqueta permet un correcte funcionament per poder realitzar estudis i proves de control i instrumentació de dos dipòsits desacoblats amb el tipus de controlador desitjat i coneixent els valors vàlids aproximats i la metodologia per poder

realitzar-ho. Tot això garantint l'automatització d'ompliment i buidatge del dipòsit 0 en funció uns nivells de seguretat.

8. Desviacions.

Durant l'execució del projecte es detecten certes desviacions que modifiquen tant la planificació com alguns objectius definits en l'estudi de l'avantprojecte. Aquestes desviacions són les següents:

- Desviacions del projecte.

1. Material i disposició dels dipòsits.

Al inici del projecte es decideix treballar amb dipòsits de vidre preparats per treballar amb aigua pel simple fet que dissenyar uns dipòsits de metacrilat suposava una gran inversió de temps amb carència d'importància si es compara amb la resta de tasques a realitzar, donat que caldria assemblar les diferents parts dels dipòsits i segellar-les correctament per evitar pèrdues i tot i això no evitaríem el desgast i corrosió notable del material en comparació al vidre.

A l'avantprojecte s'arriba a la conclusió que la disposició dels dipòsits seria vertical entre ells, però es realitzen dues proves per comprovar les alçades i dimensions d'aquest i s'observa que per realitzar l'estudi dels dipòsits acoblats hi hauria d'haver un al costat de l'altre i aleshores caldria afegir un altre dipòsit. Per tant, finalment es decideix realitzar l'estudi només del model desacoblat per així tampoc haver de perforar el vidre.

Si es volgués realitzar també acoblat caldria afegir una prestatgeria al costat del dip2 i acoblar-li un altre dipòsit amb una electrovàlvula, però les dimensions de les prestatgeries farien bastant inaccessible la seva manipulació.

2. Element controlador.

El control d'estabilització no es realitza internament en el microcontrolador sinó que es realitza amb PC pels motius que s'esmenten a l'apartat 3.

3. Sensor del dip0.

Es substitueix el sensor de conductància del dip0 per un d'ultrasò com s'esmenta a l'apartat 3.

4. Tipus de controlador.

A l'estudi de l'avantprojecte s'esmenta la realització d'un controlador PID però finalment es realitza un controlador per retorn d'estat pels motius explicats a l'apartat 6.3. El tipus de controlador només garanteix que tots els paràmetres i guanys calculats al projecte han estat correctes per a ser utilitzats en un pròxim estudi didàctic amb un controlador qualsevol, és a dir per permetre validar el seu ús funcional en l'àmbit docent.

- Desviacions en la planificació.

1. Manca de material.

Mentre es realitzava la construcció de la maqueta han anat sorgint imprevistos amb el tema del material, sobretot pel que fa a materials de menor importància com seria: cable, cargols, rosques (mascles i femelles), termoretràctil, abraçadores, canals, mànegues i regletes. La majoria d'aquests elements s'han pogut aprofitar de l'anterior prototip però tot i això en determinades situacions s'ha requerit més material del que es disposava. També es van haver de canviar les dues bombes de l'anterior maqueta al no funcionar cap de les dues.

Per altre banda, la falta de previsió en la necessitat d'algunes eines a la hora de realitzar determinades tasques de la maqueta, de les quals tampoc es disposava al taller de mecànica, ha fet que el temps acordat no es pogués assolir. Ja que donat les dimensions de la maqueta es feia impossible poder treballar fora del laboratori de control. També es va veure que les electrovàlvules pesaven més del compte per estar subjectes només per la base del dipòsit i es van haver de tallar unes fustes i envernissar-les, procés que implica 3 dies per tres capes de vernís i impossibilita la utilització de la maqueta.

Un altre aspecte que ha afectat al temps de construcció ha estat tot aquell material que s'havia de demanar via Internet com els connectors, els sensors i la font d'alimentació de 24Vcc pel fet que alguns d'aquests materials han trigat més de dues setmanes en arribar.

2. Pèrdues de líquid en el sistema.

Quan s'engega la bomba per primera vegada per fer circular el líquid i comprovar el control del dip0 comencen a aparèixer diferents pèrdues en algunes rosques i fuites de les tres electrovàlvules. Això ha implicat segellar totes les rosques amb tefló i algunes d'elles, incloent l'electrovàlvula de 24Vca, s'han hagut de segellar amb una cola especial per la qual cosa també es va haver d'esperar un dies en tornar a utilitzar el sistema per tal d'aconseguir el segellat idoni i de mentre s'intentava tapar totes les fuites.

3. Electrovàlvula corroïda

Com s'explica en l'apartat a l'Annex II sobre la primera prova, una de les electrovàlvules de 24Vcc no tancava bé i es va haver de perdre dos dies sense fer servir la maqueta ja que es va extreure l'electrovàlvula per intentar solucionar el problema a través de diferents proves i ajustos.

4. Disposició dels dipòsits.

Tal i com s'esmenta en les desviacions del projecte, el haver de canviar la disposició del dip2 va suposar tornar haver de realitzar tots el experiments duplicant la feina i el temps empleat.

5. Proves del sistema real.

Les simulacions es van realitzar en el temps previst però en el control del sistema real com s'explica durant el projecte ha sofert diferents processos per tal de poder ajustar el sistema per tal de aconseguir un control el màxim efectiu possible, comportant més hores de les que es van preveure en l'avantprojecte.

Així doncs, degut a l'endarreriment provocat per les desviacions comentades i pel fet que el laboratori de control no està operatiu el mes de gener el projecte ha hagut de sofrir un cert retràs que s'explicarà a l'apartat de planificació.

9. Planificació.

Durant la realització del projecte apareixen certes desviacions o desajustos no contemplats durant la planificació original de l'avantprojecte. Es presenten les hores implicades per les desviacions i la planificació final realitzada.

Per motius laborals es disposa de menys dies per la elaboració del projecte i degut a la disposició del laboratori de control del Tecnocampus. Les hores de treball, els dies disponibles, es mantenen de 3 hores diàries.

Pels mateixos motius no es pot complir amb la data d'inici mencionada a l'avantprojecte (29/07/15), sense comptar el dies d'espera del material, i per tant també varia la suposada data de finalització (07/01/16).

A nivell de definició de tasques el projecte ha sofert una reformulació respecte el model esmentat a l'avantprojecte però conserva la relació de precedència entre elles. La planificació s'ha dividit de la següent manera:

- Adquisició de materials.
- Construcció mecànica.
 - Disposició dels dipòsits.
 - Incorporació d'electrovàlvules i les bombes.
 - Canalitzacions.
- Programació del mòdul Arduino.
 - Estudi especificacions del circuit de lectura de dades i arquitectura d'entrades i sortides del microcontrolador.
 - Realització del disseny i càlculs necessaris per afrontar la programació.
 - Programació de la lectura de nivell.
 - Programació del control de l'EV0 i BS.
- Disseny i instal·lació de l'electrònica associada
 - Estudi i preparació del sistema d'alimentació de EV0 i BS
 - Disseny i elaboració de l'estudi del circuit de filtratge per la sortida PWM dels sensors.
 - Connexió dels elements que formen part del sistema electrònic.
- Redacció de la documentació i descripció tècnica.

- Modelització i simulació.
 - Descripció de la funció de transferència del sistema de dipòsits
 - Experiments per l'obtenció dels guanys.
 - Anàlisi de les equacions d'estat.
 - Controlador lineal per retorn d'estat.
 - Controlador no-lineal per retorn d'estat.
 - Execució del control pel sistema real.
- Interpretació resultats.
- Plànols i esquemes electrònics.
- Edició i redacció final de tots els documents del projecte.
- Preparació de la presentació

Cal tenir present que s'han afegit tasques noves que no es van preveure a la planificació de l'avantprojecte o s'han desglossat alguns punts en diversos apartats, sobretot els motius principals són que el procés de conceptualització dels conceptes bàsics a la hora de parametritzar el sistema i el seu posterior control no va ser correctament dimensionat a l'avantprojecte i no es va comptar amb la majoria de problemes que podrien sorgir al realitzar la part mecànica i de control.

Pel que fa a la durada de les tasques planificades a l'avantprojecte que coincideixen amb el projecte de detall hi ha hagut modificacions pels motius esmentats a l'apartat de desviacions:

1. Manca de material.

Aquest bloc tenia una duració de 7 dies d'espera i obtenció de material. Es realitzen durant el procés de tot el projecte a mesura que sorgeix la manca de material i finalment suposa uns 25 dies degut al servei per correu.
2. Pèrdues de líquid en el sistema.

Aquesta part entra dins de l'apartat de canalitzacions que era de 15 hores i ha passat a 19 hores.
3. Electrovàlvula corroïda.

La duració del muntatge de les electrovàlvules era inicialment de 15 hores però s'han requerit 19 hores
4. Disposició dels dipòsits.

La disposició dels dipòsits entrava dins del bloc de construcció i disseny dels dipòsits en la qual es van preveure unes 25 h . Aquest canvi ha provocat un temps de 26 hores total però també ha afectat a la hora de realitzar el experiments duplicant les hores de treball en termes d'experimentació a 8 hores més.

5. Proves del sistema real.

Es planificaven unes 50 hores sense tenir en compte el temps de duració dels experiments ni el temps de duració de les simulacions i imprevistos i s'acaben realitzant 70 hores de treball en aquest aspecte incloent les 8 hores de més degut al canvi de disposició de dipòsits.

En definitiva, el desenvolupament del projecte té una durada total de 514 hores respecte les 485 inicialment planificades. Encara que això suposa una desviació del 5,9% respecte les hores planificades, la data d'inici acaba sent el 16/08/15 i la data de finalització s'allarga fins el 24/04/2016 principalment pels motius indicats al inici: horari laboral, disposició laboratori, endarreriment del inici del projecte i desviacions del projecte.

A continuació, es mostra la taula amb les activitats o tasques a fer en el projecte de detall indicant la relació de precedència entre elles i la durada de cadascuna de les activitats.

	Codi	Nom de la tasca	Tasca predecessora	Durada (hores)	Durada total (hores)
	1	Adquisició de materials	-	25 dies	26 dies
Construcció mecànica	2	Disposició dels dipòsits	1	26	64
	3	Incorporació d'electrovàlvules i bombes	2	19	
	4	Canalitzacions	3	19	
	5	Estudi especificacions del circuit de lectura de dades i arquitectura d'entrades i sortides del microcontrolador	4	10	
Programació del mòdul Arduino	6	Realització del disseny i càlculs necessaris per afrontar la programació	5	5	70
	7	Programació de la lectura de nivell	6	25	
	8	Programació del control de l'EVO i BS	7	30	
	9	Estudi i preparació del sistema d'alimentació de EVO i BS	8	20	
Disseny i instal·lació electrònica associada	10	Disseny i elaboració de l'estudi del circuit de filtratge per la sortida PWM dels sensors	9	15	75
	11	Connexionat dels elements del sistema electrònic	10	40	
	12	Redacció de la documentació i descripció tècnica (1)	11	20	
Modelització i simulació	13	Descripció de la funció de transferència dels sistema de dipòsits	12	5	95
	14	Experiments per l'obtenció dels guanys	13	30	
	15	Anàlisi de les equacions d'estat	14	5	
	16	Controlador lineal per retorn d'estat	15	5	
	17	Controlador no-lineal per retorn	16	15	
	18	Execució del control pel sistema real	17	35	
	19	Interpretació dels resultats	18	50	50
	20	Plànols i esquemes electrònics	19	30	140
	21	Edició i redacció final de tots el documents del projecte	19	80	
	22	Preparació defensa projecte	21	30	

Taula 9.1. Durada de les tasques del projecte.

10. Impacte Mediambiental.

Per a la realització de la viabilitat mediambiental s'ha realitzat una metodologia de llistes de control, Annex V, basada en la Directiva 97/11/CEE per l'avaluació de les repercussions de determinats projectes públics i privats sobre el medi ambient, aplicada a les diferents fases del projecte.

Un cop realitzada l'avaluació d'impacte mediambiental es conclou que el projecte pot presentar riscos mediambientals en els següents punts i l'acció que caldria realitzar per reduir aquest impacte:

- Consum d'aigua.

En aquest projecte el líquid que es fa servir és aigua. Es determina a través de l'experimentació que com a màxim per aconseguir establir el sistema s'omplen els dipòsits 1 i 2 uns 30 cm més un 30% d'error màxim segons la consigna d'entrada introduïda i tenint present el petit volum de variació del dipòsit 0 degut que aquest es manté pràcticament constant i al acabar la sessió aquest es queda omplert fins el nivell o la electrovàlvula 0 roman tancada.

En una sessió de poc més de 2 hores es poden realitzar dos proves d'estabilització, això suposaria duplicar el consum, per tant seria com omplir un total de 4 dipòsits a 39 cm, un total de 156 cm, aleshores el volum consumit seria:

$$Volum = 156cm \times Àrea_{BASE} = 156cm \times 800cm^2 = 124800cm^3$$

Això exigeix un volum de 124,8 Litres com a màxim en una sessió. Aquest és un consum que no s'acostuma a sobrepassar, normalment aquest acostuma a ser més baix ja que s'està calculant el cas més desfavorable. Per a la segona prova d'estabilització s'ha considerat, en el càlcul, que el dip1 i 2 es tornen a buidar però habitualment es deixen omplerts fins al punt de treball i per tant, el volum d'aigua per aquesta segona prova es redueix.

La solució seria connectar amb el dipòsit 0 un dipòsit auxiliar amb el volum calculat, amb una bomba i una electrovàlvula controlades automàticament, i fer que la bomba secundària del dipòsit 0 enviés el líquid al dipòsit auxiliar permetent la reutilització del líquid.

En el cas d'aquest projecte, al ser un prototip s'havien de realitzar sessions d'experimentació de més de dos hores per la qual cosa el consum ha estat superior i aleshores s'hagués alentit l'estudi incorporant un dipòsit auxiliar més. Conseqüentment el líquid abocat al desaigua serà conduit a una planta de tractament d'aigua i després serà redirigida a aigües continentals o marines.

Tant el sistemes col·lectors per la recollida i conducció d'aigües residuals com el tractament als quals s'ha de sotmetre l'aigua abans de ser abocada han de complir amb els diferents punts que s'estableixen en la Directiva 91/271/CEE.

seguint un grau de rigorositat segons l'emplaçament on desemboca el líquid i sempre i quan les aigües residuals compleixin un requisits (Annexos I i II de la Directiva).

- Tractament de materials malmesos

A l'hora d'utilitzar el sistema de dipòsits cal tenir en compte que no es produirà cap tipus de contaminació degut a combustibles fòssils o agents químics, també tenir present que la quantitat de material que s'utilitzarà serà molt baixa i per tant, degut a les seves característiques podem afirmar que les conseqüències mediambientals que pot gener seran pràcticament nul·les.

Tot i que les conseqüències són insignificants, cal tenir present que els components utilitzats hauran de ser prèviament fabricats i transportats, s'haurà de fer una explotació del sòl per obtenir les matèries primeres i es produiran gasos contaminants com per exemple CO₂. Aleshores quan haguem de substituir algun dels components o quan haguem de desfer-nos d'aquells que han resultat malmesos s'estaran generant processos de contaminació.

A part de la fabricació i el transport, els aparells electrònics contenen un alt grau d'elements tòxics, i això representa riscos per l'ambient i per la salut pública, ja que solen estar fets amb materials com plom, arsènic, mercuri, coure, etc. Provocant contaminació en subsòl, emissions en l'atmosfera i desequilibri dels ecosistemes si no es procedeix al tractament corresponent.

Per tant, els materials malmesos caldrà dur-los a una deixalleria per procedir a realitzar els processos més adients tot i que amb el pas del temps i l'acció d'efectes climàtics acabaran contaminant el seu entorn. Aquell material que pugui ser reutilitzat, s'aprofitarà per la realització d'altres projectes.

Per tan per dur una prevenció de la generació residus d'aparells elèctrics i electrònics i aconseguir una reutilització, reciclatge o una valorització d'aquest residus per tal de reduir la seva eliminació i contribuir al ús eficaç dels recursos i a la recuperació de matèries primes cal acollir-se a la Directiva 2012/19/UE.

Aquests aparells seran recollits de forma separada per garantir el correcte tractament i els distribuïdors d'aquests siguin responsables de garantir que tals residus poden ser retornats de forma gratuïta un per un. Els Estats membres facilitaran la disponibilitat i accessibilitat de les instal·lacions de recollida segons la densitat de la població (Article 5).

També es garanteix que la recollida i transport dels aparells recollits de manera separada s'efectuï de forma que puguin donar-se les condicions òptimes de preparació per la seva reutilització, reciclatge i confinament de les substàncies perilloses (Article 6).

Segons l'Annex I (fins 2018) de la Directiva els aparells utilitzat en aquest projecte entraran dins de les categories de *Instrumentació de Control*, *Aparells electrònics de consum* i *Equips d'informàtica i telecomunicacions*.

A més aquest seran sotmesos a una valorització en funció del pes per cada categoria (com s'explica a l'Article 11) expressats en percentatges per tal que els residus tinguin una finalitat al substituir a altres materials que d'altre manera no s'haguessin utilitzat per complir una altre funció.

Aquests valors es troben al Annex V (part 2) de la Directiva i en el cas que pertoca pel que fa a equips informàtics i aparells electrònics de consum es valoritzen un 80% i es preparen per la utilització i es reciclen un 70% i pels

aparells d'instrumentació de control es valoritzen un 75% i es preparen per la reutilització i es reciclen un 55% .

En l'Annex VI (punt 1) de la Directiva podem trobar els requisits pel trasllat d'aquest materials i en el VII podem trobar els components, substàncies o mescles que s'han d'extreure en les recollides separades.

Es determina aproximadament que els materials fets servir en el projecte tindran una vida útil de 5 anys, després cal portar-lo a una zona de recollida.

Els materials electrònics a reutilitzar o reciclar seran els esmentats a l'apartat de materials.

11. Conclusions

Durant la fase inicial del projecte, que consistia en la elaboració de l'avantprojecte, s'aprecien molts problemes degut a la falta d'informació i a una mala comprensió del contingut requerit. Finalment, s'aconsegueixen acomplir tots els objectius inicials, menys l'objectiu d'aconseguir també un sistema de dipòsits acoblats, i s'aprofundeix considerablement en cada un dels objectius i s'afegeixen de nous amb els quals no es comptaven.

La planificació ha estat dels capítols que més variacions ha sofert respecte el pla inicial. Les hores dedicades al projecte de detall no han coincidit en absolut amb les previstes a l'avantprojecte i les tasques comparteixen certa similitud però moltes d'elles s'han hagut de desglossar en diferents apartats amb els quals no es comptaven i que han suposat més hores de treball que altres apartats en els que es preveien més hores, tot i això les precedències entre tasques s'han mantingut iguals complint amb l'ordre previst però no amb el dia de finalització.

Tot i l'augment d'hores de treball, en el pressupost s'ha produït una reducció del 26,35% respecte el previst a l'avantprojecte. El motiu d'aquesta desviació és la redefinició i reducció del preu en l'elaboració del projecte i la reducció del preu aconseguida a la hora d'obtenir el material per aconseguir l'objectiu de reduir costos.

L'objectiu primordial de dissenyar i construir un prototip automatitzat amb el qual poder realitzar estudis didàctics de control i instrumentació a través de Matlab-Simulink s'ha pogut assolir comprovant, amb un possible control pel sistema, la seva validesa per el seu futur ús.

Com a possible millora detectada, s'identifica la possible incorporació d'un altre dipòsit auxiliar amb la capacitat adequada per tal de realitzar proves reutilitzant el líquid i així disminuir el consum. Pel que fa a l'electrònica associada es podrien haver afegit més sistemes de seguretat per evitar qualsevol tipus de vessament o indicadors d'informació per observar valors de cabal, volum i voltatge. També es podria haver substituït la placa perforada per una PCB (placa de circuit imprès), tot i que només inclou dos circuits formats per transistors i relés, els filtres i l'alarma. Però al ser un prototip s'ha decidit

atorgar major importància al fet de poder realitzar proves de control de forma totalment automàtica.

Una altre millora que ha estat impossible degut a la falta de temps i que personalment m'hagués agradat perfeccionar ha estat l'estat del senyal resultat del control real a causa del soroll que es genera en els sensors per la seva precisió. Tot i incorporar un filtre, aquesta no s'ha pogut afinar més, però s'espera una millora en aquests termes en un futur.

Per altra banda, cal comentar que el projecte s'ha pogut centrar més en la part de control que en el disseny del propi prototip, quan aquesta última part hauria d'haver tingut més pes. Però a nivell personal valoro molt positivament els conceptes adquirits en aquest aspecte, pel fet d'haver tingut la possibilitat de poder estudiar i aprofundir en una de les temàtiques més interessants personalment (control de sistemes) i a nivell real, i ser capaç de dissenyar un prototip i un controlador vàlid a través dels consells basats en l'experiència del tutor, el qual ha pogut transmetre molts conceptes nous i encara no assimilats. Això ha incrementat l'interès en l'estudi de projecte.

Tot i donar-li més pes, la importància d'haver dissenyat aquest control resideix en que amb els resultats obtinguts es permet l'estudi didàctic des de diferents punts de vista:

- Serveixen de guia i verificació per saber els valors que rondaran els resultats dels experiments i aplicar un control amb els valors mesurats per l'estudiant sabent si van ben encaminats. També es podran aprofitar els resultats de control per aproximar un nou resultat desitjat a través de comportament del sistema estudiat en el present projecte.
- Permeten una guia per saber quina és la metodologia a implementar tant en els experiments com en el control.
- Es podran aplicar directament els valors obtinguts per així poder implementar diversos tipus de controladors de forma més ràpida i entendre com funciona un sistema de dos dipòsits desacoblats.

Com a reflexió final s'ha pogut comprovar que a nivell real, el disseny d'un sistema i posterior control és més complex del que sembla i caldria realitzar un estudi més exhaustiu en aquest àmbit, a nivell universitari dedicant més hores i invertint més recursos en projectes similars de recerca i desenvolupament ja que, aquestes eines de simulació i

control estan en costant desenvolupament i existeixen molts procediments i mètodes per realitzar-les encara desconeguts com a estudiant i al final aquests estudis són els que marquen l'avenç tecnològic d'una societat.

12. Referències

- [1] DORF, R.(2005). *Sistemas de control Moderno*. Madrid: Prentice Hall.
- [2] OGATA, K. (2010). *Íngenieria de control moderna*. Madrid: Pearson Educación.
- [3] Pràctiques *Servosistemes i Servotènica (1994-95)*.
- [4] ARDUINO (2015). Disponible a <https://www.arduino.cc/#>
- [5] GERMAN VILLABA I MIGUEL A. ZAMORA (2008). *Transistores de union bipolar (BJT), Tema 3, Universitat de Murcia* [versió electrònica]. Disponible a <http://ocw.um.es/ingenierias/tecnologia-y-sistemas-electronicos/material-de-clase-1/tema-3.-transistores-de-union-bipolar-bjt.pdf>
- [6] PROMETEC (2014). *Buzzers o zumbadores* [online]. Disponibles a <http://www.prometec.net/buzzers/>
- [7] PÉREZ S. (2011). *Control de tanques acoplados* [online]. Disponible a <http://academica-e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/4176/577597.pdf?sequence=1>
- [8] LÓPEZ, J. F. “Control multivariable de nivel de un sistema de tanques”. Laboratorio de Instrumentación y Control de Procesos. Dpto. de Ingeniería y Ciencias Químicas. Universitat Iberoamericana, Mèxic.
- [9] PÉREZ M. I LAUBWALD E. (2009). *División de Electrónica y Computación, CUCEI, Universitat de Guadalajara* [versió electrònica]. Disponible a <http://www.control-systems-principles.co.uk/whitepapers/spanishwp/03CoupledTanksSP.pdf>
- [10] MATHWORKS (2016). *Anti-Windup Control Using PID Controller*. Disponible a <http://es.mathworks.com/help/simulink/examples/anti-windup-control-using-a-pid-controller.html>