



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

CAMPUS D'ALCOI

TREBALL FI DE GRAU

**Disseny, muntatge i posada a punt
d'un sistema de control per
ordinador de baix cost, basat en
Arduino, de la temperatura de
l'aigua en un tanc d'escalfament**

Alumne: **Alexis López Borrell**

Tutors: Salvador C. Cardona Navarrete
Adolfo Hilario Caballero

GRAU EN ENGINYERIA QUÍMICA

Convocatòria de defensa: **novembre de 2019**

Resum

Aquest projecte es centrarà en el control de processos. En el treball a realitzar es dissenyarà, es realitzarà el muntatge i es posarà a punt el sistema de control per ordinador d'un tanc d'escalfament d'aigua. Aquest tanc inclourà la instrumentació i actuadors compatibles amb les targetes d'Arduino per a implementar un sistema de control de baix cost que permetrà assajar diferents tècniques de control a la planta on es durà a terme tot el treball.

Per a dur a terme aquest projecte, les tasques a realitzar consten de la construcció del tanc sobreeixidor emprant impressió 3D, després es durà de fer l'instal·lació hidràulica del muntatge del tanc, on es el sistema d'escalfament es durà a terme amb una resistència elèctrica. A banda del muntatge de la instal·lació, caldrà calibrar i caracteritzar la instrumentació que s'ha d'emprar, així com el muntatge elèctric i la monitorització del sistema.

Per a la comunicació entre l'ordinador i el món real, es farà servir les targetes d'Arduino amb la toolbox corresponent de Matlab/ Simulink per tal d'implementar el llaç de control sobre el sistema en el que es treballarà. A banda de la implementació del llaç de control, les targetes actuaren com a lectura i adquisició de dades experimentals.

Per al disseny del sistema de control serà necessari el modelat matemàtic de tot el procés i instrumentació involucrada en el sistema. Tots aquests paràmetres s'implementaran en Matlab/Simulink, que serà el programa que s'encarregarà de portar a terme el control del sistema. Per al correcte funcionament del llaç de control, es faran els assajos necessaris de llaç obert. Posteriorment, per a la validació de la tècnica de control per realimentació s'implementarà el llaç en Matlab/Simulink i la toolbox d'Arduino fent assajos de llaç tancat a la planta.

Resumen

Este proyecto se centrará en el control de procesos. En el trabajo a realizar se diseñará, se realizará el montaje y se pondrá a punto el sistema de control por ordenador de un tanque de calentamiento de agua. Este tanque incluirá la instrumentación y actuadores compatibles con las tarjetas de Arduino para implementar un sistema de control de bajo coste que permitirá ensayar diferentes técnicas de control a la planta donde se llevará a cabo todo el trabajo.

Para llevar a cabo este proyecto, las tareas a realizar constan de la construcción del tanque rebosadero empleando impresión 3D, después se deberá de hacer la instala-

ción hidráulica del montaje del tanque, donde el sistema de calentamiento se llevará a cabo con una resistencia eléctrica. Además del montaje de la instalación, habrá que calibrar y caracterizar la instrumentación que se tiene que emplear, así como el montaje eléctrico y la monitorització del sistema.

Para la comunicación entre el ordenador y el mundo real, se usará las tarjetas de Arduino con la toolbox correspondiente de Matlab/ Simulink para implementar el lazo de control sobre el sistema en el que se trabajará. Además de la implementación del lazo de control, las tarjetas actuaron como lectura y adquisición de datos experimentales.

Para llevar a cabo el diseño del sistema de control será necesario el modelado matemático de todo el proceso e instrumentación involucrada en el sistema. Todos estos parámetros se implementarán en Matlab/Simulink, que será el programa que se encargará de llevar a cabo el control del sistema. Para el correcto funcionamiento del lazo de control, se harán los ensayos necesarios de lazo abierto. Posteriormente, para la validación de la técnica de control por realimentación se implementará el lazo en Matlab/Simulink y la toolbox de Arduino haciendo ensayos de lazo cerrado a la planta.

Abstract

This project will focus on process control. In the work to be done, it will be designed, the assembly will be carried out and the computer control system of a water heating tank will be developed. This tank will include the instrumentation and actuators compatible with the Arduino cards to implement a low cost control system that will allow testing different control techniques to the plant where all the work will be carried out.

To carry out this project, the tasks to be carried out consist of the construction of the overflow tank using 3D printing, then the hydraulic installation of the tank assembly must be done, where the heating system will be carried out with an electrical resistance. In addition to the assembly of the installation, it will be necessary to calibrate and characterize the instrumentation that must be used, as well as the electrical assembly and the monitoring of the system.

For communication between the computer and the real world, the Arduino cards with the corresponding Matlab / Simulink toolbox will be used to implement the control loop on the system in which it will work. In addition to the implementation of the control loop, the cards acted as reading and acquisition of experimental data.

To carry out the design of the control system, mathematical modeling of the entire process and instrumentation involved in the system will be necessary. All these parameters will be implemented in Matlab / Simulink, which will be the program that will be in charge of carrying out the system control. For the correct operation of the control loop, the necessary open loop tests will be carried out. Subsequently, for the validation of the feedback control technique, the loop in Matlab / Simulink and the Arduino toolbox will be implemented by making closed loop tests to the plant.

Índex

1	Introducció	1
1.1	El Control de processos en el dia a dia	1
1.2	Instrumentació	1
1.3	Control de Processos	4
1.4	Arduino	7
1.5	Matlab Simulink	8
1.6	Generació Espontània GESCOP-EPESA	9
2	Objectius	11
3	Construcció i muntatge de la planta	12
3.1	Peça del sobreexidor	12
3.2	Tanc aïllat	12
3.3	Resistència elèctrica i relé d'estat sòlid	19
3.4	Sensors de temperatura	20
3.5	Cabalímetre i bomba hidràulica	21
3.6	Targeta d'Arduino	23
3.7	Muntatge de la planta	23
4	Caracterització de sensors, actuadors i altres elements	26
4.1	Sensors de Temperatura: Termistor NTC10K-Waterproof	26
4.2	Sensors de Cabal: Cabalímetre YF-S401	35
4.3	Bombes hidràuliques: Bomba DC30A-1230	41
4.4	Resistència elèctrica de 2500W	43
5	Modelat Matemàtic	47
5.1	Model matemàtic del tanc escalfador sense tindre en compte pèrdues ni la dinàmica de la resistència	47
5.1.1	Densitat (ρ) i calor específic (C_P) constants	47

5.1.2	Densitat (ρ) variable i calor específic (C_P) constant	49
5.1.3	Densitat (ρ) constant i calor específic (C_P) variable	50
5.1.4	Densitat (ρ) variable i calor específic (C_P) variable	50
5.2	Model matemàtic del tanc escalfador sense tindre en compte la dinàmica de la resistència	55
5.3	Model matemàtic del tanc escalfador per determinar UA	56
5.4	Model matemàtic del tanc escalfador	57
6	Caracterització de la Planta	59
6.1	Determinació del coeficient de pèrdues global UA	59
6.2	Assajos a la planta	62
6.2.1	Determinació del temps base de la resistència elèctrica	63
6.2.2	Assajos amb cabal constant i potència variable	64
7	Disseny del sistema de control	69
7.1	Identificació de la planta per a la sintonització del controlador	69
7.2	Sintonització del controlador	74
7.3	Control per realimentació de la planta	74
8	Pressupost de la planta	83
9	Conclusions	84
10	Treballs futurs	85

Índex de figures

1	Vista general d'un sistema de control. Font: [8]	4
2	Vista més específica d'un llaç de control. Font: [9]	5
3	Primera peça impresa en 3D. Feta amb material d'àcid polilàctic (PLA)	13
4	Segona peça impresa en 3D. Feta amb material d'àcid polilàctic(PLA)	13
5	Segellat del depòsit amb silicona	14
6	Prova amb l'espuma de poliuretà	15
7	Depòsit principal	15
8	Forats produïts per la resistència elèctrica	16
9	Tubs per evitar la deformació del depòsit interior	17
10	Tubs per evitar la deformació del depòsit interior	18
11	Reactius de Polioli i Isocianat per a fer l'espuma de poliuretà	18
12	Resistència elèctrica de 2500 W	19
13	Relé d'estat sòlid	20
14	Sensor de temperatura Termistor NTC10K	20
15	Muntatge elèctric del sensor de temperatura. Material: Targeta d'Arduino, termistor NTC10K, resistència de 10.000 Ω i cables jumper M/M. Font:[15]	21
16	Cabalímetre YF-S401	21
17	Bomba hidràulica DC30A-1230	22
18	Muntatge elèctric de la bomba DC30A-1230	22
19	Targeta de Arduino Mega 2560 R3	23
20	Muntatge de la planta de treball	25
21	Simulink per a la lectura de temperatura del termistor NTC10K	26
22	Simulink per al càlcul de la temperatura del termistor NTC10K	27
23	Muntatge experimental per al calibrat del sensor de temperatura	29
24	Simulink per a guardar dades de calibratge en un arxiu ".mat"	29
25	Ajust del paràmetre β del fabricant amb l'expressió (7)	30
26	Ajust dels paràmetres A B i C de l'expressió (8)	30

27	Ajust dels paràmetres A B i C de l'expressió (9)	31
28	Comparació dels diferents ajustos. Steinhart-Hart 2G correspon a l'expressió (8) i Steinhart-Hart 3G correspon a l'expressió (9)	32
29	Representació de les dades experimentals del calibratge	33
30	Zones d'estabilitat per al calibratge	34
31	Calibratge del nou paràmetre d'ajust	34
32	Comparació dels valors calibrats dels sensors de temperatura amb l'expressió (7)	35
33	Característiques bloc Trigger	36
34	Comptador Trigger	36
35	Bloc Tachometer Arduino	37
36	Calibratge del sensor YF-S401 a partir de la bomba de laboratori FH100Dx	38
37	Mesura de les RPM per al posterior calibratge	39
38	Interior del subsistema del cabalímetre	39
39	Ajust del paràmetre del sensor YF-S401	40
40	Simulink per a la lectura del cabal amb el cabalímetre YF-S401	42
41	Caracterització de la bomba hidràulica	42
42	Senyal contínua PWM	43
43	Bloc Pulse Generator de Simulink	44
44	Bloc Repeating Sequence de Simulink	45
45	Comparador lògic per a la senyal PWM de la resistència	45
46	Diagrama del procés a estudiar	47
47	Diagrama d'energia del procés a estudiar	48
48	Simulació dels models matemàtics	52
49	Models matemàtics variant el temps base de la resistència amb un ample de pols del 50%	54
50	Models matemàtics variant l'ample de pols de la resistència amb un temps base de 10 s	54
51	Diagrama del procés considerant pèrdues a l'ambient	55

52	Simulació dels models matemàtics simple i de pèrdues de calor amb un valor de $UA = 0.48 \text{ W/K}$	56
53	Diagrama del procés considerant com a volum de control la resistència	57
54	Comparació del model simple amb el model tenint en compte la dinàmica de la resistència, emprant els valors de la Taula 8 i Taula 10.	58
55	Pèrdues de calor del depòsit	59
56	Assajos per a determinar el coeficient global de pèrdues	61
57	Representació gràfica del coeficient global de pèrdues mig als assajos .	61
58	Simulink per als assajos de llaç obert	62
59	Subsistema del Simulink per als assajos de llaç obert que conté l'expressió (40) del model matemàtic més rigorós	63
60	Comparació dels assajos de la resistència fets en l'anterior depòsit. (Condicions d'operació: Cabal de 0.8046 L/min, Potència tèrmica del 50 %, Temp. Entrada $\simeq 25.5^\circ\text{C}$)	64
61	Representació gràfica dels assajos de llaç obert a diferents potències (Condicions d'operació: Cabal 1.01 L/min, Temp. Entrada $\simeq 23.3^\circ\text{C}$, Temp. Ambient $\simeq 23^\circ\text{C}$)	65
62	Ajust del model matemàtic (40) considerant la dinàmica de la resistència elèctrica individual (Condicions d'operació: Cabal 1.01 L/min, Temp. Entrada $\simeq 23.3^\circ\text{C}$, Temp. Ambient $\simeq 23^\circ\text{C}$)	67
63	Ajust del model matemàtic (40) considerant la dinàmica de la resistència elèctrica mitjana (Condicions d'operació: Cabal 1.01 L/min, Temp. Entrada $\simeq 23.3^\circ\text{C}$, Temp. Ambient $\simeq 23^\circ\text{C}$)	67
64	Comparació dels diferents models matemàtics a l'assaig del 50% de potència. (Condicions d'operació: Cabal 1.01 L/min, Temp. Entrada $\simeq 23.10^\circ\text{C}$, Temp. Ambient $\simeq 23.50^\circ\text{C}$)	68
65	Validació del model matemàtic amb una potència del 50%. (Condicions d'operació: Cabal 1.01 L/min, Temp. Entrada $\simeq 23.10^\circ\text{C}$, Temp. Ambient $\simeq 23.50^\circ\text{C}$)	68
66	Identificació de la funció de transferència de la planta a una potència del 5%	70
67	Identificació de la funció de transferència de la planta a una potència del 10%	70

68	Identificació de la funció de transferència de la planta a una potència del 20%	71
69	Identificació de la funció de transferència de la planta a una potència del 25%	71
70	Identificació de la funció de transferència de la planta a una potència del 50%	72
71	Identificació de la funció de transferència de la planta a una potència del 75%	72
72	Identificació de la funció de transferència de la planta a una potència del 100%	73
73	Llaç tancat de control implementat en Simulink per produir canvis en el punt de consigna. Els subsistemes dels sensors de temperatura es poden veure a la Figura 21	75
74	Comparació del punt de consigna dels diferents controladors sintonitzats.(Condicions d'operació: Cabal 1.01 L/min, Temp.Entrada \simeq 23.50 °C, Temp.Ambient \simeq 21.60 °C)	76
75	Comparació de l'acció de control dels diferents controladors sintonitzats. (Condicions d'operació: Cabal 1.01 L/min, Temp.Entrada \simeq 23.50 °C, Temp.Ambient \simeq 21.60 °C)	77
76	Comparació del punt de consigna de treball continu front discret.(Condicions d'operació: Cabal 1.01 L/min, Temp.Entrada \simeq 23.50 °C, Temp.Ambient \simeq 21.60 °C)	79
77	Comparació de l'acció de control del treball continu front discret. Representació de l'acció de control. (Condicions d'operació: Cabal 1.01 L/min, Temp.Entrada \simeq 23.50 °C, Temp.Ambient \simeq 21.60 °C)	80
78	Millora del controlador <i>ITAE</i> .(Condicions d'operació: Cabal 1.01 L/min, Temp.Entrada \simeq 19.31 °C, Temp.Ambient \simeq 21.15 °C)	81
79	Comparació de les accions de control <i>ITAE</i> . (Condicions d'operació: Cabal 1.01 L/min, Temp.Entrada \simeq 19.31 °C, Temp.Ambient \simeq 21.15 °C)	82

Índex de taules

1	Mesures del volum del nou depòsit	24
2	Paràmetres de l'expressió de Steinhart-Hart	31
3	Paràmetre obtingut del cabalímetre YF-S401	38
4	Paràmetre d'ajust de la bomba DC30A-1230	41
5	Lectures de la intensitat consumida per la resistència	46
6	Models matemàtics obtinguts	51
7	Paràmetres per al càlcul de la densitat i el calor específic. Font: [18],[19].	51
8	Valors de les variables per a la simulació dels models matemàtics . . .	52
9	Valors de UA per als assajos	60
10	Ajust dels paràmetres de la resistència	66
11	Valors dels paràmetres d'identificació de sistemes	73
12	Paràmetres de la sintonització del controlador PI	74
13	Pressupost de la planta i equips	83

1 Introducció

1.1 El Control de processos en el dia a dia

El control de processos sorgeix de la necessitat d'automatitzar un procés on es desitja treballar amb la fi de disminuir els seus costos, eliminar activitats repetitives o perilloses per als operaris en planta. Tot aquest fi apareix amb l'automàtica, on la CEA ho defineix com una disciplina que vol eliminar la mà humana per dispositius artificials [1].

En un procés industrial, se li dona nom a les operacions o accions que ocorren en un treball continu, discontinu o semicontinu amb la finalitat de convertir una matèria primera en un producte final. En el cas d'un procés químic s'obtidria productes químics a partir de canvis físics o químics [2].

El procés més simple que es podria observar en una indústria química seria per exemple un reactor químic, columnes de destil·lació o altres equips que contribueixen al procés productiu.

El control de processos no té perquè estar format per unes persones tècniques especialitzades en un camp. L'estudi del control de processos requereix un coneixement multidisciplinari que farà més efectiu i rigorós el procés en el que es desitja treballar.

El control de processos en la indústria busca la connexió de tots els elements simples per a aconseguir un resultat en la planta de treball de manera eficient.

Es tracta d'un tema d'actualitat i en constant evolució. Per mantindre's informat i amb els estudis més rellevants, es pot consultar la IFAC (International Federation of Automatic Control). Han organitzat l'automàtica en 9 comitès, experts en cada una d'aquestes àrees, des de sistemes i senyals, modelats matemàtics, fins economia i sistemes socials [4].

1.2 Instrumentació

El control de processos no pot ser efectiu sense l'ús de la instrumentació necessària. En aquesta instrumentació podem trobar una gran varietat d'equips disponibles en el mercat i amb preus molt diferents. També en funció de la qualitat que es desitja i per al procés que tinga utilitat. Aquesta decisió serà responsabilitat de la persona encarregada en el procés i l'exigència del procés. Un exemple d'açò seria l'ús d'un sensor de temperatura per a l'escalfament d'aigua on el sensor ha costat 2 €. Per a escalfar aigua aquest sensor pot ser correcte utilitzar-lo però, per a un procés

biològic on es treballa amb enzims sensibles a la temperatura aquest sensor pot ser que no siga el més indicat ja que podria fallar i eliminar tots els enzims.

Es pot definir un instrument de mesura com aquell dispositiu que és capaç de detectar un canvi en un procés. Aquests canvis que detecta, poden ser deguts a canvis físics o de qualsevol altre tipus. Dit açò, un instrument ens proporciona la variació d'una variable en un procés, que podrem tractar de dues maneres: [5].

- La primera d'elles, ens indica el canvi de la variable afectada amb un indicador directe, per exemple el canvi de la temperatura amb un termòmetre.
- La segona, degut a que l'instrument necessita una manipulació de la senyal per poder entendre la seua variació, es pot registrar amb un ordinador o qualsevol aparell i veure les seues variacions amb gràfics o mesuradors en una pantalla.

En els elements bàsics d'un instrument de mesura, es poden diferenciar 2 parts clarament per tal d'apreciar la mesura, que serien el sensor i el dispositiu on es veu el canvi de la variable però hi ha un tercer element per a aquells on els canvis en la variable són molt menuts. Per a aquest cas, el sensor sol portar inclòs un amplificador per tal d'apreciar els canvis en el procés.

A continuació, els instruments de mesura es poden classificar de moltes maneres però, els dos grans grups per referència són:

- Instruments pneumàtics. Aquests instruments funcionen amb aire i no tenen un consum elèctric. L'avantatge que presenta front altres instruments seria la possibilitat d'instal·lar-lo en algun lloc on l'electricitat siga un problema. Com a contrapunt, són instruments molt sensibles a pertorbacions, variacions de temperatura, requerixen més manteniment i no poden enviar una senyal a grans distàncies.
- Instruments elèctrics i electrònics. Aquests instruments es poden classificar en 2 grans categories.
 - Analògics. Aquests instruments emeten una única senyal de la variable mesurada en una intensitat de 4 a 20 mA o en unitats de tensió. Solen tindre una bona exactitud en la mesura i el manteniment d'aquests equips és mínim. Entre aquests instruments es poden trobar amperímetres, freqüencímetres i equips de sincronització, entre altres.
 - Digitals. Aquests instruments poden ser connectats a una única comunicació per tal d'enviar les dades a l'equip receptor. Poden transmetre

múltiples variables però a curtes distàncies. També cal dir, que la transmissió de dades es veu afectada pel tipus de material que envie aquesta informació, podent ser diferents entre un cable de coure o de ferro.

Per últim, s'ha de tindre en compte alguns conceptes generals sobre els instruments de mesura que afectaran a la decisió de l'instrument de mesura que millor s'adapte al procés en el que es treballa. Entre aquests conceptes generals es poden destacar:[6]

- Rang de mesura o range. Indica la regió on l'instrument de mesura pot treballar. Fora d'aquests límits, l'equip pot no funcionar correctament o trencar-se. Indica el mínim valor on pot treballar i el màxim, sent possiblement en aquests extrems un error de lectura prou gran en comparació amb la resta de la regió de treball.
- Interval de mesura o span. Es calculat com el valor màxim menys el valor mínim de mesura.
- Temps de resposta. Ens indica el temps que tardarà un sensor en respondre front a un canvi de la variable mesurada. Aquest valor ha de tindre's en compte a l'hora d'implementar un llaç de control, ja que el temps de resposta del llaç front a canvis en el sistema serà una combinació dels temps de resposta de tot el sistema.
- Precisió i exactitud. Hi ha que diferenciar els dos termes, ja que la precisió indica el grau de reproductibilitat d'una variable mesurada en les mateixes condicions de mesura i l'exactitud indica la proximitat a un valor de lectura que es considere correcte.
- Valor de referència. En la majoria d'equips de mesura s'indica un valor obtingut en unes condicions determinades pel fabricant i serveix per a situar-se o entendre l'instrument amb el qual es treballa. Serveix, a més, per a saber l'error en el qual està mesurant la variable.
- Error. És la diferència entre la mesura de la variable que està realitzant i el valor que hauria d'estar mesurant. Aquest error pot ser tant negatiu com positiu i pot estar expressat de diferents maneres. Per exemple, en unitats del sistema internacional o com un % de l'interval de mesura.

Cal dir que hi ha molts més detalls que es poden tindre en compte dels instruments de mesura que faciliten el seu enteniment i aporten una gran quantitat d'informació, per exemple la variació de la mesura afectada per la temperatura ambient o com ha de ser instal·lat l'equip per a una correcta mesura. Tota aquesta informació sol estar detallada en les 'Datasheet' o fulles tècniques de cada instrument que deuen de ser proporcionades pel fabricant.

1.3 Control de Processos

Les operacions que estan lligades a processos sempre han existit en la naturalesa però ha sigut necessari modificar l'entorn per a viure millor, i açò es pot veure amb l'ús del foc.

Dit aquest exemple, on el control de processos sempre ha existit, podríem definir aquest terme com el conjunt d'activitats que es necessiten per a transformar una matèria primera, que pot canviar d'estat físic o no, en un producte final. Per a aquesta finalitat, es pretén realitzar el procés de manera automàtica per a controlar les variables del sistema i evitar emprar la intervenció de la mà humana amb l'objectiu o finalitat de fer el procés més segur i econòmic.[7]

Si s'analitza el control de processos des d'un punt de vista molt ampli, sols hi ha 3 factors que defineixen un sistema de control. Aquests són la o les variables manipulades, que són aquelles que interessen modificar amb un actuador per tal de manipular el sistema, un exemple d'actuadors poden ser una vàlvula o una bomba accionada per un motor de velocitat variable per a modificar un cabal.

Les pertorbacions són factors externs que no es poden controlar però que afecten al sistema i per tant, s'han de preveure per a que el sistema actue i no es desestabilitze. Alguns d'aquests factors poden ser la temperatura ambient o una variació en la matèria primera entre altres.

Per últim, les variables controlades són aquelles que es volen que es mantinguen en un punt desitjat, siga per exemple la temperatura, el nivell d'un tanc o la pressió. Una primera idea d'aquest concepte es pot veure a la [Figura 1](#).

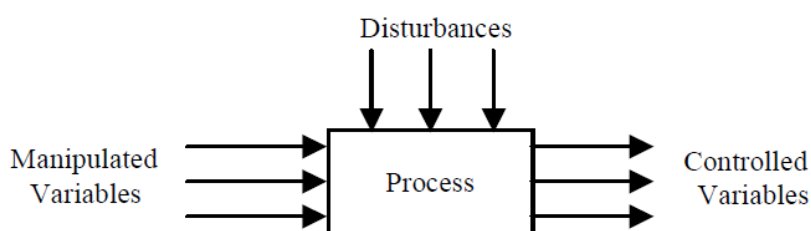


Figura 1: Vista general d'un sistema de control. Font: [8]

Per a poder aplegar a un sistema de control s'ha d'aprofundir en el procés en el que es treballa i conèixer bé el sistema que es té entre mans. Cal conèixer si hi ha retard de transport, un retard de matèria, si hi ha temps morts en el sistema...

Conegut tot el procés es pot passar a identificar la planta en assajos de llaç obert.

Aquests assajos tracten de produir una variació en el sistema, que ens permet registrar les dades que ens interessin i d'aquesta manera fer una primera aproximació del controlador que vaja a emprar-se. Posteriorment es passa a tancar el llaç de control i controlar la planta.

En el llaç de control cal definir el "Set Point" o punt de consigna. Aquest és el valor on es pretén que estiga operant la planta i que el controlador dissenyat deurà d'actuar sobre les variables manipulades per a aconseguir aquesta tasca. Per a poder aconseguir el valor de la variable de referència i actuar sobre ella s'ha de emprar equips i sensors aptes per a aquesta tasca i a més s'han d'entendre amb el controlador, ja que poden haver senyals analògiques i digitals.

Per a que el controlador actue, ha de comparar la variable de referència amb la variable controlada, per a aquesta tasca hi ha una senyal d'error que el controlador ha de disminuir fins que siga 0 o molt prop a ell. D'aquesta manera s'afirma que la variable de referència i la variable controlada són iguals i per tant el controlador ha portat la planta al punt de funcionament desitjat. En el transcurs del temps en la planta es poden produir i es produiran pertorbacions. Aquestes pertorbacions faran canviar la variable controlada, augmentant l'error i per tant el controlador deurà de tornar la planta al seu punt de funcionament. Una vegada definits aquests conceptes, es pot millorar la vista d'un control de processos que es pot veure a la [Figura 2](#).

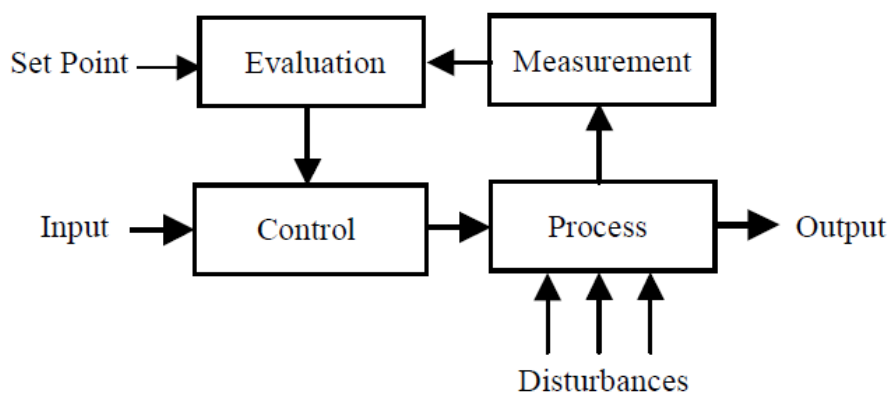


Figura 2: Vista més específica d'un llaç de control. Font: [9]

En aquest moment, on es coneix la planta i com opera, quina és la seua dinàmica i les variables que afecten al sistema, s'ha de triar un controlador. Aquest controlador es nombra com a *PID*, o les seues variants, on sols actua *P* o l'acció de *PI*. A continuació es descriu cadascun dels controladors.[10]

- Acció proporcional (P). Aquesta acció s'ajusta a la variable manipulada i augmenta o disminueix a mesura que varia l'error, depenent del signe. L'expressió que definix l'acció proporcional es pot veure a (1). On K_c és el guany del controlador i multiplicant-la per l'error s'obtidria l'acció proporcional. El valor de I_p és el valor de bias. Aquest és el valor emès pel controlador quan l'error és nul.
- Acció integral (I). Ja que l'acció proporcional no elimina els efectes de les pertorbacions, aquesta nova acció el que fa és canviar les variables manipulades per a anar reduint contínuament l'error i obtindre d'aquesta manera una diferència entre el punt de consigna i la variable controlada molt menut. L'expressió que definix l'acció integral es pot veure a (2) on el nou paràmetre T_i és el temps integral i està correlacionat amb el guany K_c i manipula les variables linealment.
- Acció derivativa (D). L'acció derivativa d'un controlador es dona quan hi ha una variació absoluta en l'error. La funció d'aquesta acció és mantindre l'error al mínim, de manera que el reduísca a mesura que es produísca i evite que s'incremente. L'expressió de l'acció derivativa es pot veure a (3), on el paràmetre T_d és el temps derivatiu.

$$MV_p(t) = K_c \cdot E(t) + I_p \quad (1)$$

$$MV_i(t) = \frac{K_c}{T_i} \cdot \int_0^t E(t') dt' + I_i \quad (2)$$

$$MV_d(t) = K_c \cdot T_d \cdot \frac{dE(t)}{dt} + I_d \quad (3)$$

A continuació hi ha que triar el controlador que millor s'adapte al procés de treball, ja que hi ha processos que amb un controlador P poden funcionar correctament i altres que requereixen més exigència i per tant implementar un PID . Per altra part, es presenta soroll en els equips i sensors emprats, pel que és recomanable utilitzar un controlador PI , ja que l'acció derivativa amb canvis bruscos en un xicotet espai de temps faria la derivada en el punt enorme i no podria mantindre un offset de valor 0 o es pot implementar un filtre en la mesura però s'ha de tindre en compte que afecta a la dinàmica de la planta.

Per últim s'ha de sintonitzar el controlador per a determinar els paràmetres de K_c , T_i i T_d . Per a aquest treball existeix una gran quantitat d'informació per a determinar els paràmetres dels controladors i millorar la resposta d'aquests.

Entre els mètodes de sintonització més emprats al llarg del temps, podem veure els següents: [11]

- Ziegler-Nichols, mètode de període últim. En aquest assaig es pretén determinar el període últim i el guany últim. Es pot tractar d'un mètode experimental o teòric on s'anul·la les accions integrals i derivatives del controlador i tan sols es manté l'acció proporcional. S'augmenta el guany del controlador K_c fins mantindre una oscil·lació constant respecte el punt de consigna però sense desestabilitzar la planta. D'aquesta manera es determina el guany últim S_u , on un valor superior desestabilitza la planta i un valor menor controla la planta. A partir d'aquest valor s'obté el període últim P_u . Una vegada determinats aquests dos valors es poden obtenir els paràmetres dels controladors P , PI i PID .
- Ziegler-Nichols, mètode de la corba de reacció. Aquest mètode tracta d'aplicar una entrada en escaló a la variable manipulada, obrint el llaç de control i registrant les dades per a tractar-les després. L'assaig acaba quan el procés alcança l'estat estacionari. D'aquesta manera s'obté la corba de reacció i es poden determinar els paràmetres L_r i R_r dibuixant una tangent a la corba en el punt màxim. Després d'això i amb unes equacions obtingudes per Ziegler i Nichols s'obtenen els paràmetres del controlador.
- Cohen-Coon. Per a aquest mètode s'obté experimentalment la resposta de la planta de treball en aplicar una entrada en escaló. D'aquesta manera es pot aproximar la resposta a una funció de transferència de primer ordre de manera similar al mètode de Ziegler-Nichols però canviant els paràmetres d'ajust per al controlador.
- López i col·laboradors. És el primer mètode que ajusta el controlador a partir de criteris integrals. El seu mètode es basa en caracteritzar la resposta del sistema i reduir l'error. Els criteris que van utilitzar van ser nomenats com ISE , IAE , $ITAE$. Es basen en la integral de l'error quadràtic, la integral de l'error absolut i la integral de l'error absolut pel temps respectivament.

1.4 Arduino

Arduino és un hardware d'ús lliure, que combinat amb les seues targetes programables és accessible per a tot el món. Des de gent sense cap coneixement de programació fins persones especialitzades que vulguen millorar i especialitzar-se en aquest món de la programació, matemàtiques, educació, enginyeria i una gran llista que es pot continuar.

Aquest hardware proporcionat per la companyia que ha desenvolupat el seu ambient de programació ho ofereix de manera gratuïta i tan sols fa falta per a començar amb aquesta tasca una targeta d'Arduino. Aquestes targetes són subministrades per molts comerciants, des de targetes d'Arduino nano, on és una targeta amb poques entrades i eixides per a programar però que per a tasques simples, com una lectura i transmissió de dades es pot emprar fins targetes més grans com la targeta d'Arduino mega 2560 amb una quantitat molt més gran de connexions i major capacitat de memòria i càlcul que l'anterior targeta nombrada.[12]

La quantitat d'informació creada per la comunitat i aprenentatge de manera online o a través de llibres és molt gran i açò es transmet a tots els nivells, des de l'ús a l'escola primària fins la universitat, per exemple el control d'un procés químic. Molts equips i instruments, de xicotet com gran tamany, s'han fet per a utilitzar-los amb aquestes targetes, on la mateixa targeta actua com a font d'alimentació en molts casos. Combinant els coneixements que una persona aprèn al llarg del temps i la seua formació, creant projectes xicotets i treballant en un objectiu de futur, pot aconseguir un gran treball a baix cost, que és un dels avantatges que presenten tots aquests equips.

En definitiva és un hardware que es pot emprar de la manera més eficient per a la fi que una persona desitge, formant-se amb llibres i de manera online, ja que a diari hi ha cursos sobre l'ús d'aquestes targetes, de manera econòmica i amb un resultat del treball molt acceptable.

1.5 Matlab Simulink

Matlab és una ferramenta de càlcul i programació molt coneguda en el món de la ciència i la tecnologia, amb una capacitat i potència de càlcul enorme que en bones mans pot fer treballs increïbles.

Matlab és un software que requereix una llicència per a poder treballar amb ell, aquest programa posseeix el que es denomina *Toolbox* o diferents blocs dins del mateix programa, que es poden descarregar a través de la seua plataforma de treball. Aquests blocs dins del programa serveixen des d'anàlisis de dades, finances i gestió de perills fins modelats, robòtica, visió artificial i sistemes de control entre molts altres. Aquests blocs de programació contenen especificacions pròpies típiques del món en el que es relaciona que passen proves rigoroses i es proven moltes voltes per a que el seu software siga el més potent i actualitzat del mercat.[13]

Dins de Matlab, tenim el programa o l'entorn de Simulink i en el que es desenvolupa gran part d'aquest treball. Aquest programa es basa en la simulació i disseny de models. S'empra conjuntament amb Matlab per a poder tractar una gran quantitat

de dades i simulacions de models de manera simultània o individual que ajuden a contrastar la gran quantitat d'informació que es té entre mans.[14]

En el món relacionat amb Arduino, s'ha d'activar la *Toolbox* al suport de la pàgina web de *Support package for Arduino* que permet la comunicació de les targetes d'Arduino amb Matlab/Simulink. Dins d'aquesta llibreria es troben blocs comuns com lectura i transmissió de senyals digitals o analògiques, fins altres blocs que són de sensors típics que s'empren com sensors d'ultrasons o velocitats de motors.

Dins d'aquesta llibreria es pot treballar en mode extern, on la programació que es fa sobre Simulink s'instal·la sobre la targeta d'Arduino i funciona sense necessitat del programa, pel que pot ser transportada en una font d'alimentació externa o per altra part es pot activar la funció de *SimulinkIO*. Aquesta opció interactua amb la targeta com a entrada i eixida de dades de manera continua. D'aquesta manera, es pot executar una ordre en Simulink i que la targeta transmeti la informació al procés de treball. Apart de transmetre ordres i actuar sobre el sistema la targeta pot tindre els sensors i equips connectats simultàniament registrant totes les dades de manera continua i tractar tota aquesta informació en Matlab amb els arxius de dades aconseguits.

D'aquesta manera s'aconsegueix un procés de manera econòmica, combinat amb un software potent de càlcul, modelat i simulació per a treballs comuns o més especialitzats.

1.6 Generació Espontània GESCOP-EP SA

Els grups de generació espontània estan formats per moltes persones i en agrupacions molt diverses. Aquests grups dins de la universitat tenen una llibertat i autonomia per a poder desenvolupar les seues idees i projectes enfocats d'alguna manera en la que posen en pràctica els seus coneixements i formar-se en altres que no són propis del seu àmbit d'estudi.

Dins de la UPV, hi ha diferents grups englobats en diferents categories, com per exemple científics, competició de motor, culturals, tecnològics i disseny i art. Aquests grups dins del seu objectiu és obtindre un reconeixement públic que també done una visibilitat a la universitat i fomenti el avanç i continuïtat d'aquests grups.

El grup de Generació Espontània de Control de Processos en l'Escola Politècnica Superior d'Alcoi (GESCOP-EP SA) es dedica, com el seu nom indica, a l'àrea de control de processos i automàtica. A aquestes tasques s'intenta estudiar i posar en pràctica l'aprenentatge de sistemes industrials des del punt de vista del control i automatització dels processos en planta. Per a aquesta feina s'intenta abordar el

treball de manera econòmica amb equips de baix cost i el tractament i programació d'un software potent com és Matlab/Simulink, amb l'ajuda de les targetes d'Arduino comunicant el món real amb el virtual a través de la interfície de Simulink IO.

Aquest grup de generació espontània compta amb 13 alumnes, on 10 d'ells són del grau en Enginyeria Química, 1 alumna del màster en Processament i Caracterització de Materials, 1 alumna del grau en Enginyeria Mecànica i 1 alumne en el grau d'Enginyeria Informàtica. A banda, 3 professors, 1 al Departament d'Enginyeria Química i Nuclear (DIQN) i 2 al Departament d'Enginyeria de Sistemes i Automàtica (DISA)

2 Objectius

L'objectiu principal del treball és el disseny, muntatge i posada a punt d'un sistema de control per ordinador de baix cost, basat en Arduino, de la temperatura de l'aigua en un tanc d'escalfament. Per a complir aquest fet, el treball deu d'aconseguir els següents objectius parcials:

- Construcció de la planta. S'haurà de construir una planta pilot on es puguin realitzar diferents assajos i provar diferents tècniques de control que s'empren en la indústria.
- Programació dels arxius a utilitzar. Caldrà construir i programar tots els arxius de Simulink i Matlab que facen possible el desenvolupament dels equips, la planta i els diferents assajos.
- Calibratge i caracterització d'equips. Per a dur a terme el treball a realitzar s'ha de posar a punt els equips i sensors que vagin a emprar-se per a un correcte funcionament del procés.
- Modelat del sistema. Per a preveure el comportament del tanc escalfador es realitzarà un modelat matemàtic que pugui representar la realitat del procés en tot moment.
- Caracterització de la planta de treball. En aquesta tasca es realitzaran els assajos i mesures corresponents que oferisquen la màxima informació del tanc escalfador, com per exemple el volum o assajos de llaç obert que permeten caracteritzar la planta.
- Sintonització del controlador. Per a tindre una idea dels paràmetres del controlador es provarà a sintonitzar el controlador per diferents mètodes estudiats que permeten aproximar al millor controlador possible per a la planta.
- Validació del sistema de control. Després de la sintonització del controlador caldrà posar-lo a prova en la planta de treball i observar si el desenvolupament ha sigut correcte, podent millorar-lo posteriorment.

Portant a terme totes aquestes tasques es podrà complir l'objectiu principal del treball d'una manera eficient i que posteriorment es podrà seguir millorant el treball donant peu a millores del sistema. A part de l'objectiu principal del treball, s'aconsegueixen altres a mesura que es realitza aquest. Entre aquests objectius podem destacar l'adquisició de competències per a tirar avant el treball de fi de grau i obtenir el títol.

3 Construcció i muntatge de la planta

L'objectiu que es persegueix consta de la construcció d'una planta pilot en la qual estudiar el procés de calfament d'aigua i poder aplicar diferents tècniques de control.

Per a aquest objectiu es pretén construir un depòsit aïllat tèrmicament. Aquest depòsit haurà de mantindre el volum constant per a simplificar el model que es pretén aconseguir.

El depòsit constarà de tres parts, caldrà dissenyar una peça en impressores 3D per a fer que el volum siga constant, el recipient interior per a contindre els elements del tanc i un depòsit exterior que mantindrà l'aïllant del tanc.

D'altra banda faran falta més elements per a portar tot el procés a cap, entre aquests farà falta una resistència elèctrica com a sistema de calefacció, un relé d'estat sòlid, una bomba hidràulica per a impulsar el fluid de treball, un cabalímetre per a mesurar el cabal que circula en la instal·lació, sensors de temperatura, un agitador magnètic i una targeta d'Arduino. A part d'aquests materials principals faran falta elements de conducció, muntatge elèctric i suports amb pinces metàl·liques.

3.1 Peça del sobreeixidor

La peça del sobreeixidor s'ha fet amb impressores 3D i està dissenyada amb el programa Solid-Works. La primera peça impresa es veu a la [Figura 3](#).

A l'hora de tindre la primera peça feta, es va observar que no servia per a la tasca que s'estava dissenyant, ja que el nivell d'aigua no es mantindria constant a aquesta peça i per tant no serveix per al disseny de tanc sobreeixidor. Es va realitzar una segona peça que es pot veure a la [Figura 4](#).

Aquesta nova peça sí que manté el nivell d'aigua interior constant i pot estudiar el sistema correctament.

3.2 Tanc aïllat

El depòsit principal està construït amb dos recipients de plàstic, un que serà el que contindrà l'aigua, així com la resistència elèctrica, el sensor de temperatura i les conduccions hidràuliques. L'altre recipient serà exterior al principal i servirà per a crear una separació entre el depòsit principal i l'exterior on s'introduirà una espuma de poliuretà per a aconseguir aïllar el depòsit i reduir les pèrdues de calor a



Figura 3: Primera peça impresa en 3D. Feta amb material d'àcid polilàctic (PLA)



Figura 4: Segona peça impresa en 3D. Feta amb material d'àcid polilàctic(PLA)

l'ambient.

Per a construir el depòsit aïllat tèrmicament es van assemblar els depòsits amb el sobreexidor amb silicona calenta per al depòsit interior i l'espuma de poliuretà subjecta el depòsit exterior. Es pot veure a la [Figura 5](#).

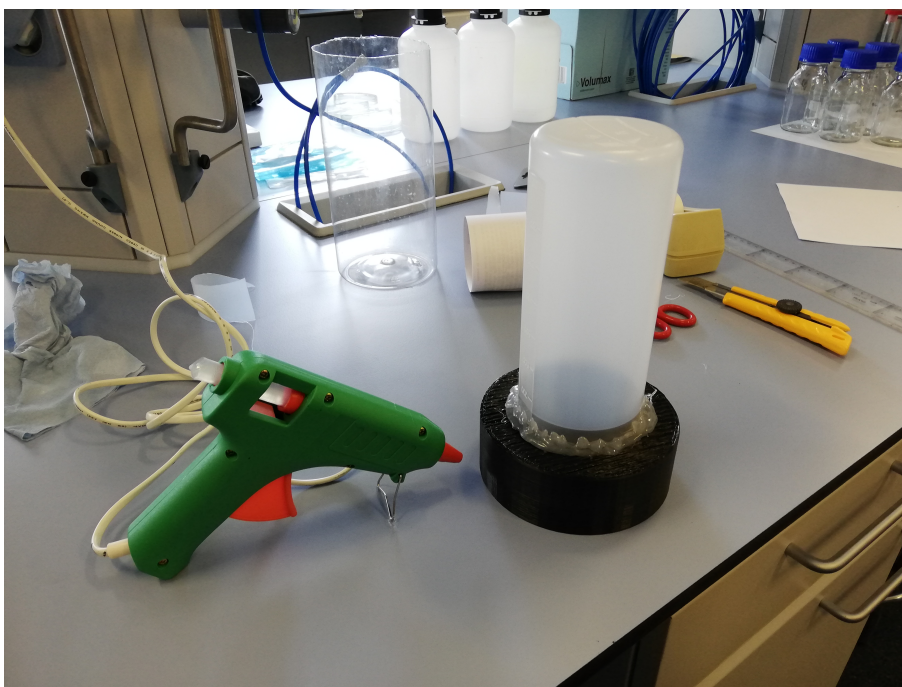


Figura 5: Segellat del depòsit amb silicona

Una vegada feta aquesta prova, es va omplir el depòsit d'aigua per veure si tenia fuges i així va ser, pel que es va optar per segellar el depòsit d'una altra manera. Es va emprar una cola epoxi universal.

Una vegada vist que el depòsit amb el nou pegament no deixava eixir l'aigua, es va fer una prova amb l'espuma de poliuretà per veure com reaccionava i el temps que tardava en estar sec. La prova es pot veure a la [Figura 6](#).

Una vegada vist el seu funcionament, es va realitzar amb el depòsit principal i es va deixar assecar. Per a poder introduir l'espuma de poliuretà primer es va fixar el depòsit exterior amb uns topalls de goma per a centrar els depòsits interior i exterior. Una vegada centrats es va perforar el depòsit pels laterals amb l'ajuda d'un soldador fins que la cànula de l'espuma s'introduïra bé. S'han fet suficients forats al llarg del tanc per a introduir espuma en tots els buits i reduir d'aquesta manera les cambres d'aire. El resultat del depòsit principal es pot veure a la [Figura 7](#).



Figura 6: Prova amb l'espuma de poliuretà



Figura 7: Depòsit principal

Treballant en el Simulink on estava aplicat el llaç de control per realimentació, al bloc del *PID* es va pressionar sobre el botó "Autotune *PID*", passats uns segons aquest botó va posar en marxa el Simulink i per tant va fer funcionar la resistència elèctrica, aquesta estava en contacte a l'aire ja que el depòsit estava buit. La temperatura que va aconseguir la resistència en contacte amb l'aire va fondre les parets del depòsit interior provocant-li 4 forats a les seues parets i tornant d'aquesta manera el tanc sobreexidor impossible d'operar amb ell, pel que es va tindre que fabricar un nou depòsit però, aquesta vegada millorant un poc el nou model amb les errates que es van apreciar a l'anterior depòsit. Els forats produïts per la resistència es poden veure a la [Figura 8](#)



Figura 8: Forats produïts per la resistència elèctrica

Entre aquestes errades, l'unió de la peça 3D amb el depòsit interior es va realitzar amb una resina epoxi universal, amb la que pel pas del temps es va separar de l'unió de les dues peces provocant d'aquesta manera una xicoteta fuga d'aigua a l'espuma de poliuretà. Una vegada vista aquesta errata, es va buscar informació de com unir perfectament les noves peces i en aquest cas es va emprar una imprimació amb el *Loctite 770*. Aquest *Loctite* crea una capa d'imprimació al depòsit interior que posteriorment s'uneix a la peça 3D amb un adhesiu universal el *Loctite 406*. Es va veure que al aplicar l'imprimació i a l'altra peça l'adhesiu, a l'hora d'unir les peces havia de ser molt precís ja que l'assecat del adhesiu era pràcticament instantani i no donava marge de maniobra per a poder rectificar.

Una altra errata a l'anterior depòsit va ser el no deixar espai suficient a la base del

depòsit per a poder aïllar-lo correctament, pel que es va reduir el volum del diposit interior a 0.75 L aproximadament per a poder tindre una capa d'aïllant a la base del depòsit exterior.

Un altre problema va ser a l'hora de aplicar l'espuma de poliuretà, ja que va deformar el depòsit interior. Per a evitar aquest fet es va introduir al depòsit un tub de cartó rígid amb un diàmetre un poc més xicotet que el depòsit interior. La resta de diàmetre es va ocupar tallant rectangles de una caixa de cartó i aplicant-los al exterior del tub de cartó per a ocupar el màxim volum i evitar que es deforme interiorment, fent possible extraure-ho tot amb unes pinces després d'aplicar l'espuma de poliuretà, es pot veure a la [Figura 9](#) i a la [Figura 10](#). Els components que s'han utilitzat per a fer l'espuma de poliuretà són l'isocianat H-30 i el polioliol D/350. Es poden veure a la [Figura 11](#).

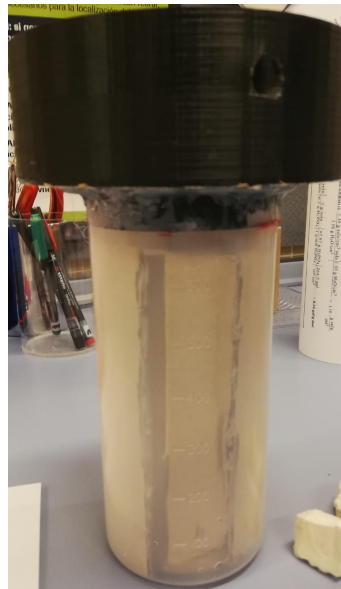


Figura 9: Tubs per evitar la deformació del depòsit interior

L'últim problema que es va apreciar, lligat a l'anterior explicat, va ser les grans bombolles formades al aplicar l'espuma de poliuretà directament al depòsit, que feien que el depòsit no estiguera correctament aïllat. Aquesta vegada es va investigar un poc i es va fabricar l'espuma de poliuretà amb una mescla bicomponent, el polioliol D/350 i l'isocianat H-30. Per que es produísca correctament la reacció el fabricant indica que la mescla ha de ser de 50% en pes. Aquesta mescla produeix l'espuma de poliuretà però en una expansió més lenta i amb una grandària de bombolla molt més menut que l'anterior aplicat. D'aquesta manera s'aconsegueix un millor aïllament. Per a no malgastar reactius es va calcular el volum necessari que feia falta per a l'espuma de poliuretà, ocupant un volum aproximat de 0.835 L. Posteriorment es va fer una prova en una proveta per veure el volum d'expansió de l'espuma al reaccionar



Figura 10: Tubs per evitar la deformació del depòsit interior



Figura 11: Reactius de Polioli i Isocianat per a fer l'espuma de poliuretà

els components i es va veure que la relació de volums era de 100/12.5, unes 8 vegades l'expansió del volum inicial, pel que la massa total s'obté a partir de dividir el volum total entre la relació d'expansió calculada, d'aquesta manera se sabrà el volum de components que s'ha d'utilitzar. Després, es divideix el volum entre les densitats mitjanes dels components, sent la densitat del isocianat de 1.32 g/mL i la densitat del polioli de 0.89 g/mL. Donant com a resultat una massa de 55.45 g.

Per a aplicar aquesta espuma, es va foradar la base del dipòsit exterior amb un soldador fent 4 forats per a repartir la mescla en tot el dipòsit. Com la reacció tardava uns 20 s en començar a expandir, es va aplicar l'espuma en 3 tandes, pesant una quantitat de 20 g cada vegada i repartint la mescla en els 4 forats.

3.3 Resistència elèctrica i relé d'estat sòlid

La resistència elèctrica serà el sistema per a calfar el procés, amb una potència de 2500 W, es pot veure a la [Figura 12](#).



Figura 12: Resistència elèctrica de 2500 W

Necessitarà un relé d'estat sòlid per a deixar lliure el pas de corrent, en aquest cas el model utilitzat és "Solid State Relay-40 A (3-32 V DC Input)", es pot veure a la [Figura 13](#).

Per al control d'aquesta resistència i variar la quantitat de potència que subministra al sistema, es coneix que la resistència necessita una alimentació major a 5 V, que és el voltatge màxim que subministra Arduino. Per tal de poder encendre i apagar la resistència des de Simulink a través de la targeta d'Arduino, actuarà com a intermediari el relé d'estat sòlid. Aquest serà l'encarregat d'enviar a la resistència quan ha d'estar encesa i quan apagada obrint el pas de corrent de la xarxa elèctrica.



Figura 13: Relé d'estat sòlid

3.4 Sensors de temperatura

El sensor de temperatura anirà connectat directament a la placa de Arduino i requerirà un resistència de 10.000Ω . Es pot veure el termistor a la [Figura 14](#).

Aquest sensor és un filament, normalment d'acer recobert d'un material polimèric per a protegir-lo, on té al seu cap un material semiconductor que varia la seua resistència en funció de la temperatura. Amb el coeficient negatiu de temperatura indica que a mesura que augmenta la temperatura on es trobe aquest sensor, el seu valor de resistència disminuirà. El rang de mesura del termistor comprèn de $[-50, 150]^{\circ}\text{C}$.



Figura 14: Sensor de temperatura Termistor NTC10K

La seua identificació ve en el seu nom, on NTC10K significa coeficient negatiu de temperatura amb un valor de resistència de $10 \text{ k}\Omega$. Aquest valor de resistència es dona normalment pel fabricant del sensor i sol estar marcada a una temperatura de referència, en aquest cas 25°C .

El muntatge elèctric d'aquest sensor es pot veure a la [Figura 15](#).

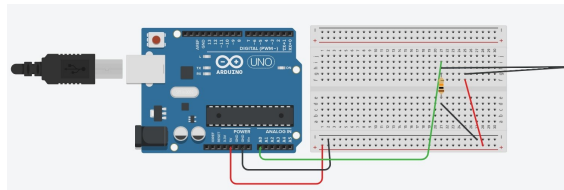


Figura 15: Muntatge elèctric del sensor de temperatura. Material: Targeta d'Arduino, termistor NTC10K, resistència de 10.000Ω i cables jumper M/M. Font:[15]

3.5 Cabalímetre i bomba hidràulica

El cabalímetre anirà connectat directament a la placa d'Arduino. Aquest sensor de cabal està format d'una sèrie d'àleps que giren a mesura que circula l'aigua pel sistema i aquests giren més o menys ràpid en funció del cabal. Exterior a ell, té 3 cables per tal de connectar aquest sensor a la placa d'Arduino. Un roig, sent aquest el d'alimentació, que es connectarà a l'alimentació de 5 V. El cable de color negre anirà connectat a terra (GND) i per últim, el cable de color groc és el que envia la senyal PWM a Arduino i per la que es podrà llegir el cabal en Simulink. El rang de mesura d'aquest cabalímetre es de $[0.3, 6]$ L/min. El cabalímetre es pot veure a la [Figura 16](#).



Figura 16: Cabalímetre YF-S401

Per a la connexió de la bomba hidràulica, farà falta una font d'alimentació externa de 12 V i un transistor TIP-141 per a fer-la funcionar correctament. Aquest model de bomba és submergible, amb una alimentació de 12 V, una corrent de 0.35 A i un cabal màxim que pot subministrar de 240 L/h, la bomba es pot veure a la [Figura 17](#). Veient que l'alimentació es superior que la que pot subministrar la placa d'Arduino, es requerirà un subministrament mitjançant una font d'alimentació externa. El muntatge elèctric es pot veure a la [Figura 18](#).



Figura 17: Bomba hidràulica DC30A-1230

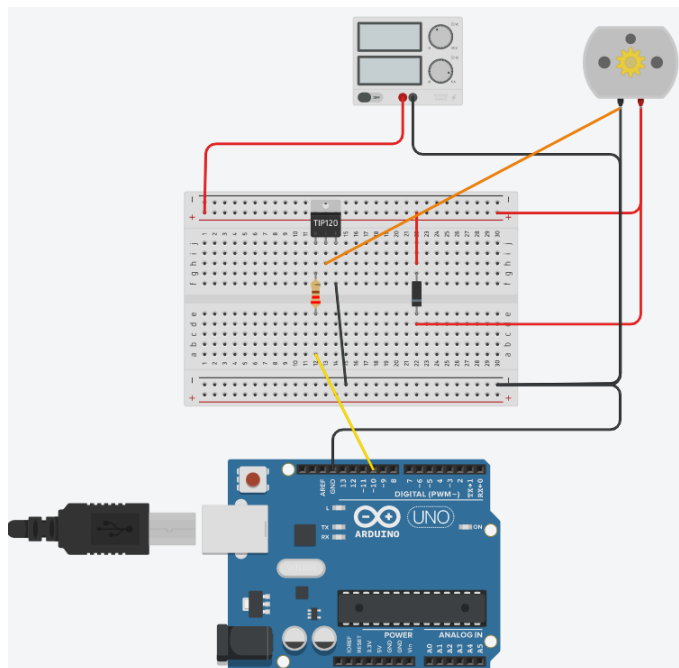


Figura 18: Muntatge elèctric de la bomba DC30A-1230

3.6 Targeta d'Arduino

En aquest projecte s'ha treballat amb la targeta de Arduino Mega 2560 R3. El seu nom és pel fet que està fabricada amb un microcontrolador Atmega 2560, es pot veure la targeta a la [Figura 19](#). Aquesta targeta és la que més connexions té de tot el mercat pel que es pot utilitzar per a projectes que requerisquen múltiples connexions.

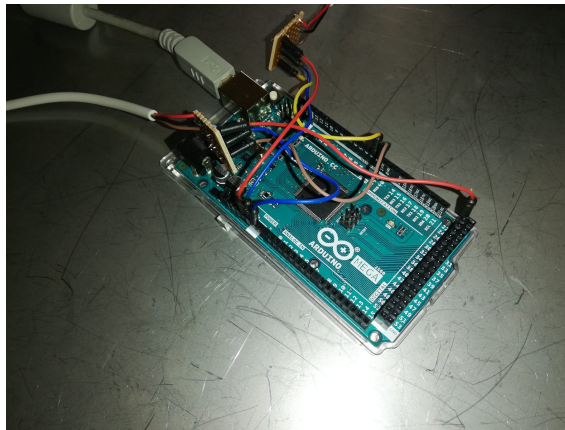


Figura 19: Targeta de Arduino Mega 2560 R3

En aquest treball s'han emprat la connexió per a 3 lectures de sensors de temperatura als pins "Analog in", i 3 connexions a els pins "PWM" per a la senyals del cabalímetre, de la bomba i de la resistència elèctrica.

Les característiques de la targeta, com el mapa de totes les connexions es poden veure en els detalls de la targeta proporcionada pel fabricant [16].

3.7 Muntatge de la planta

Una vegada obtingut el depòsit principal, es va muntar la planta per complet. La planta es divideix en el tanc d'alimentació, on se subministra aigua contínuament i que contindrà la bomba hidràulica DC30A-1230 i un sensor de temperatura perquè pugui operar. El tanc sobreeixidor i un recipient exterior que emmagatzemarà l'aigua que isca del depòsit.

El tanc de calfament contindrà en el seu interior una resistència elèctrica, un altre sensor de temperatura NTC10K, un imant d'agitació, tubs de conducció i en la base del depòsit un agitador magnètic.

Entre la conducció del tanc d'alimentació i el depòsit principal hi ha connectat un sensor de cabal, el model YF-S401. Aquest últim sensor, així com la conducció i el sensor de temperatura es subjecten amb pinces metàl·liques a uns suports.

Una vegada tota la nova instal·lació està fixa, amb el sensor de temperatura, la resistència elèctrica i la conducció d'alimentació es va mesurar el volum real del depòsit. Per a aquesta tasca es va fer circular aigua per l'instal·lació fins que aplegara a l'estat estacionari i es talla el cabal. Una vegada fet açò, amb ajuda d'una xeringa es succiona la capa d'aigua superior amb atenció de no deixar caure res d'aigua. Una vegada fet açò s'introdueix un tub de goma fins al fons del depòsit i amb ajuda de la xeringa es fa buit i es buida tota l'aigua en una proveta per poder mesurar el volum del depòsit.

Realitzant aquest assaig 4 vegades i la mitjana dels valors obtinguts, es va obtenir un volum resultant de 0.875L. Aquest volum és el que s'utilitzarà per a assajos posteriors. Es pot veure a la [Taula 1](#)

Mesures	Volum (mL)
1	874
2	878
3	872
4	876
Mitjana	875

Taula 1: Mesures del volum del nou depòsit

El muntatge complet de la planta acaba amb la instal·lació elèctrica dels equips i la seua connexió a la targeta d'Arduino mega 2560. Per a aquesta instal·lació es requereix un pack de cables jumper M-M per a actuar com a connexions entre els equips i la placa protoboard. El resultat es pot veure a la [Figura 20](#).



Figura 20: Muntatge de la planta de treball

4 Caracterització de sensors, actuadors i altres elements

En aquest apartat s'abordarà la caracterització dels equips que s'utilitzaran en la planta de treball. Es descriuran els diferents sensors de temperatura emprats, així com el seu funcionament bàsic, el seu calibrat i posterior caracterització per tal de veure la seua dinàmica i quin s'ajusta millor al nostre treball.

4.1 Sensors de Temperatura: Termistor NTC10K-Waterproof

Per a poder obtindre valors de temperatura amb ell s'ha utilitzat un arxiu de Simulink (*Mesures_Resistencia.slx*), aquest arxiu conté les equacions necessàries per a transformar la tensió que mesura Arduino en temperatura. Es pot veure el diagrama a la [Figura 21](#), que amb l'ajuda d'Arduino i la comunicació de Simulink IO per tal de connectar el món virtual amb el món real es passarà a calibrar el sensor per tal de llegir la temperatura correctament. Els subsistemes de càlcul es poden veure a la [Figura 22](#) i té un temps de mostreig de 0.1 s per a fer els càlculs Simulink.

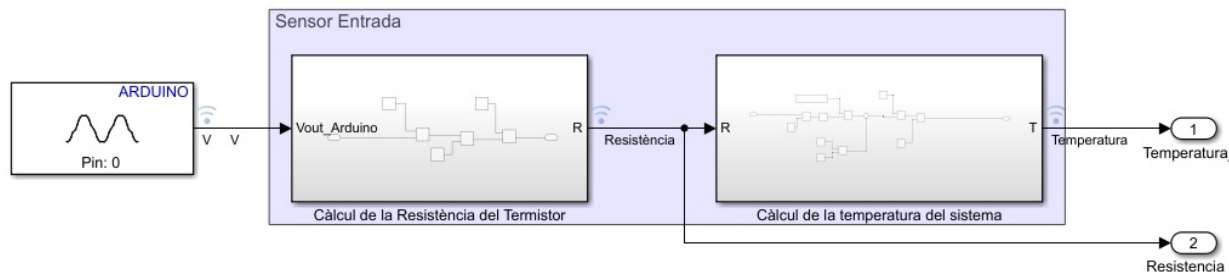


Figura 21: Simulink per a la lectura de temperatura del termistor NTC10K

Per a mesurar valors de temperatura s'ha emprat l'expressió del divisor de tensions (4).

$$V_{out} = V_{in} \cdot \frac{R_0}{R_0 + R} \quad (4)$$

Amb aquesta expressió s'obté el valor de la resistència (R) del sensor que posteriorment es farà utilitzar per obtindre el valor de temperatura. El valor de V_{out} és el que mesurarà Arduino en el pin de la targeta al que estiga connectat. El valor de V_{in} adquireix un valor constant de 1023, ja que és una senyal fixa d'Arduino i adquireix

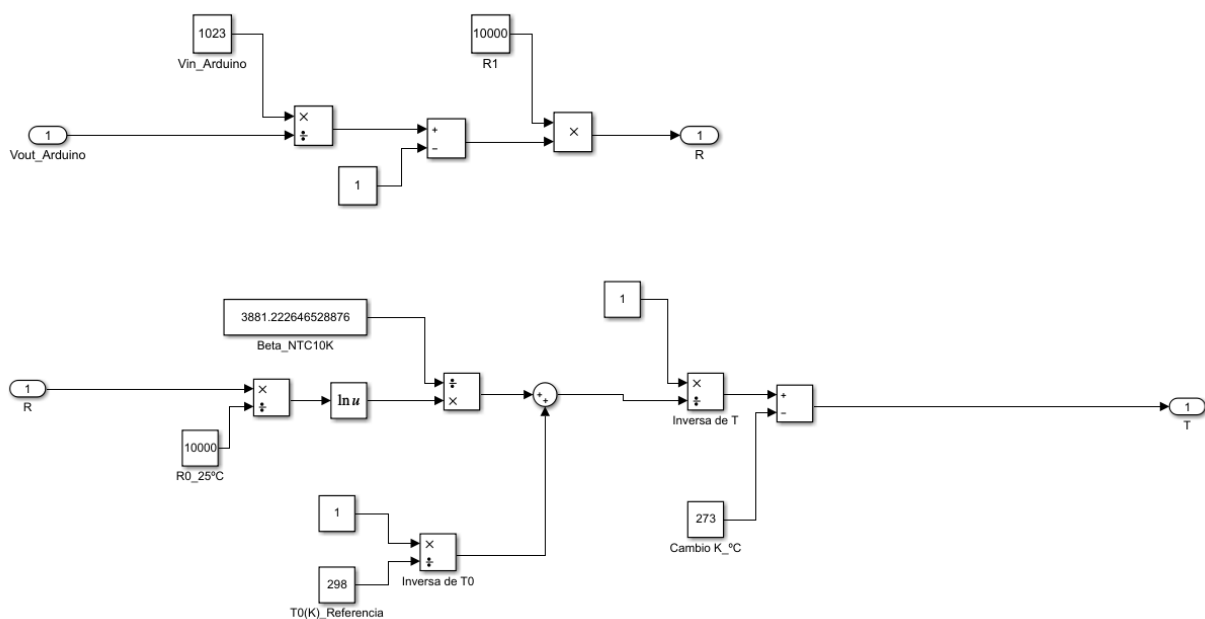


Figura 22: Simulink per al càlcul de la temperatura del termistor NTC10K

aquest valor. Per últim, R_0 és el valor de resistència de referència i adquireix un valor de 10.000Ω donada pel fabricant.

L'expressió per obtenir la resistència, que serà necessària per a poder calibrar posteriorment el sensor de temperatura, serà (5)

$$R = R_0 \cdot \left(\frac{V_{in}}{V_{out}} - 1 \right) \quad (5)$$

En aquest cas, s'obté el valor de resistència a partir de la tensió mesurada per Arduino que ofereix el sensor de temperatura i es pot transformar a partir de unes equacions a valors de temperatura. Les expressions que s'estudiaran per a obtenir valors de temperatura seran l'emprada pel fabricant (6) i les expressions de Steinhart-Hart [17], (8),(9).

$$R = R_0 \cdot \exp \left(\beta \cdot \left[\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right] \right) \quad (6)$$

Que s'arregla l'equació fins obtenir l'expressió que s'emprarà per al càlcul de la temperatura amb el paràmetre β del fabricant (7).

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} + \ln\left(\frac{R}{R_0}\right) \cdot \frac{1}{\beta} \quad (7)$$

L'expressió de Steinhart-Hart es pot veure que té variants, en aquest cas el factor exponencial que acompanya al logaritme del paràmetre C , on A , B i C son paràmetres a determinar per a treballar amb termistors. Es compararan dos d'elles per tal de veure el millor resultat per al sensor de temperatura (8),(9).

$$T = \frac{1}{A + B \cdot \log(R) + C \cdot \log(R)^2} \quad (8)$$

$$T = \frac{1}{A + B \cdot \log(R) + C \cdot \log(R)^3} \quad (9)$$

Amb aquestes 3 expressions, es podrà calcular la temperatura a través del termistor que s'ha emprat i comparar-les entre elles per veure quina s'aproxima més a una mesura correcta de la temperatura.

Per a veure quina és aquesta lectura correcta, s'ha calibrat el termistor a partir d'un assaig en un bany termostàtic. A aquest assaig s'augmenta la temperatura del bany cada 0.5 °C i es deixa que agafe aquesta temperatura a tot el bany. Aquest assaig es pot veure a la [Figura 23](#). L'arxiu de Simulink (*Mesures_Resistencia.slx*) emprat es pot veure a la [Figura 24](#) on el subsistema de dins es veu a la [Figura 21](#), es registren els valors de resistència del termistor a la temperatura del bany i per a poder-se calibrar respecte un equip fiable, es va prendre com a referència la sonda Testo 922. Amb aquests dos valors registrats, el de resistència del termistor i la temperatura de la sonda Testo 922, s'empra un arxiu de Matlab (*Parametre_Beta.m*) per tal de calibrar el sensor de temperatura que s'utilitzarà en la planta. A aquest arxiu de Matlab s'identifiquen els paràmetres corresponents a cada equació per tal d'implementar-los en Simulink i poder llegir una temperatura pròxima a la sonda respecte la que s'ha calibrat.

El primer ajust es pot veure a la [Figura 25](#), on el valor del paràmetre β obtingut ha sigut de 3916.98 ± 8.20 K. El valor proporcionat per aquest fabricant és de 3950 K, prou paregut al obtingut.

A continuació, es presenten les dues figures obtingudes ajustant els paràmetres de les expressions (8) i (9). Primerament l'ajust de l'expressió (8), on es pot apreciar a la [Figura 26](#). L'ajust mitjançant l'expressió (9) es pot veure a la [Figura 27](#). Concloent amb això l'ajust de les expressions per al termistor

Els paràmetres obtinguts es poden veure a la [Taula 2](#).

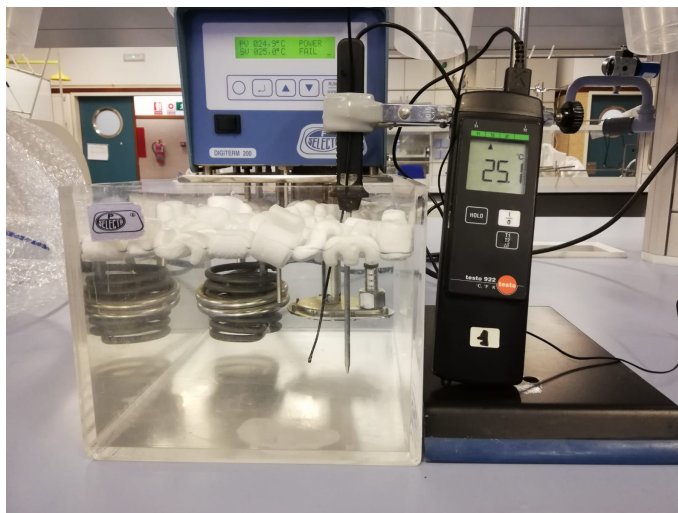


Figura 23: Muntatge experimental per al calibrat del sensor de temperatura

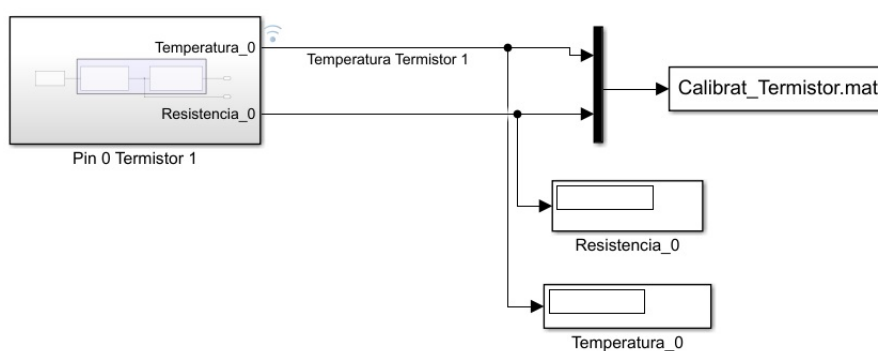


Figura 24: Simulink per a guardar dades de calibratge en un arxiu ".mat"

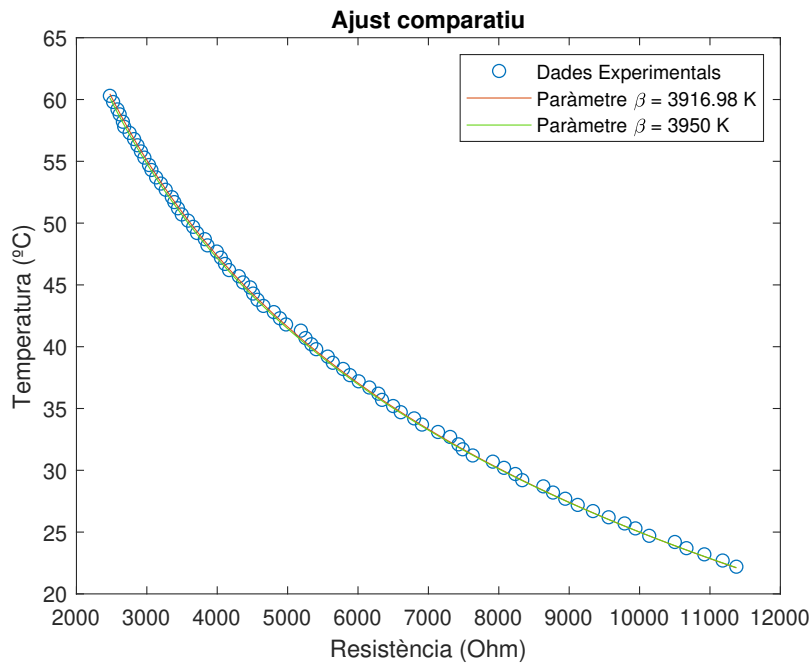


Figura 25: Ajust del paràmetre β del fabricant amb l'expressió (7)

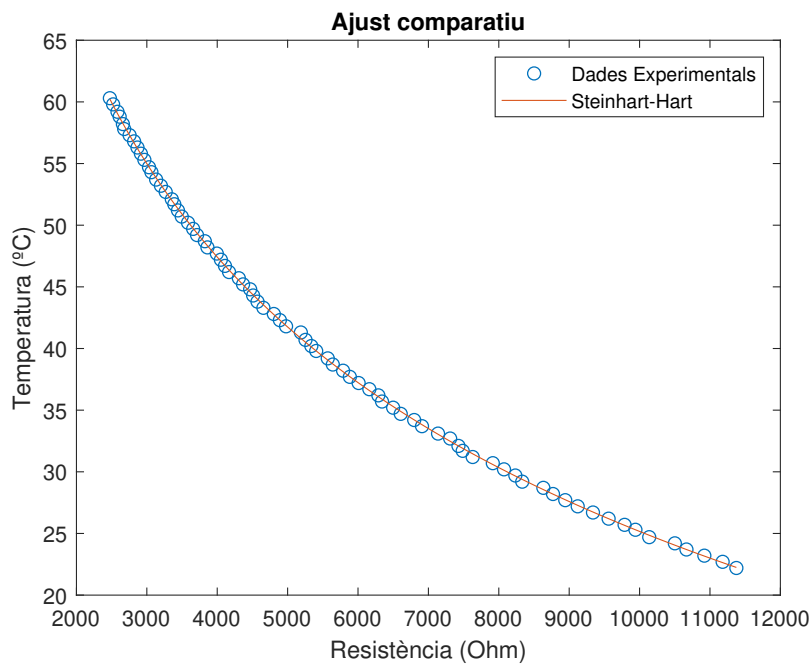


Figura 26: Ajust dels paràmetres A B i C de l'expressió (8)

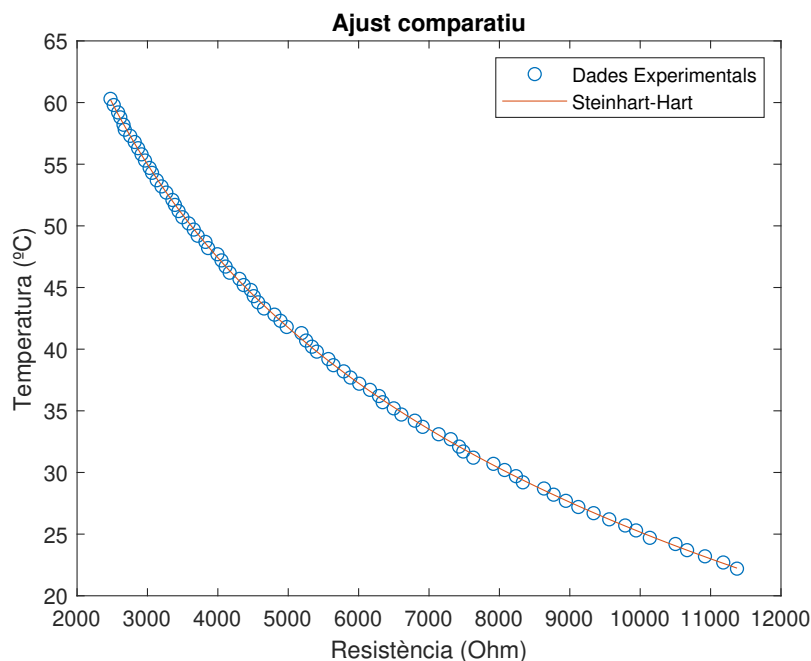


Figura 27: Ajust dels paràmetres A B i C de l'expressió (9)

Paràmetres	Valor Expressió (8)	Valor Expressió (9)
A	$1.25\text{E-}03 \pm 1.26\text{E-}04$	$1.18\text{E-}03 \pm 8.39\text{E-}05$
B	$4.60\text{E-}04 \pm 6.80\text{E-}05$	$5.21\text{E-}04 \pm 3.40\text{E-}05$
C	$1.65\text{E-}05 \pm 9.16\text{E-}06$	$1.48\text{E-}06 \pm 8.22\text{E-}07$

Taula 2: Paràmetres de l'expressió de Steinhart-Hart

El resultat de les tres expressions emprades es pot veure a la [Figura 28](#) i es pot veure que totes mesuren prou semblant, aleshores per simplicitat de càlcul s'ha utilitzat l'expressió (7) per als sensors de temperatura.

Una vegada fet aquest calibratge d'un termistor, es va observar que per a la planta farien falta 2 sensors de temperatura per a alimentar al model amb dades reals del procés de treball. Un per a la temperatura de l'aigua d'entrada i l'altre per a la temperatura d'eixida del sistema.

En vista que feia falta un altre calibratge, ja que en principi els sensors no tenen perquè mesurar exactament igual, es va millorar el mètode de calibratge prenent dades en temps real i emmagatzemant-les en un arxiu de dades que posteriorment es tractaran amb Matlab (*Parametre_Beta_continu.m*) per a determinar els paràmetres

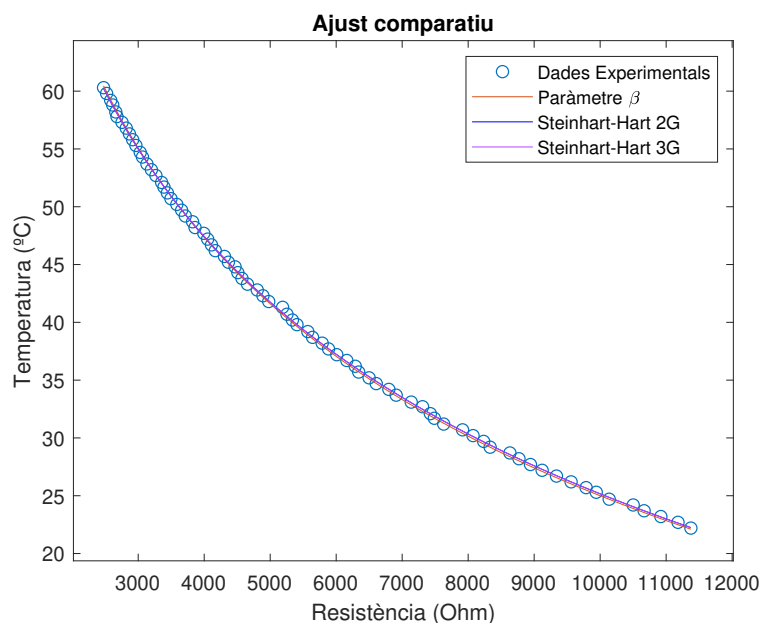


Figura 28: Comparació dels diferents ajustos. Steinhart-Hart 2G correspon a l'expressió (8) i Steinhart-Hart 3G correspon a l'expressió (9)

de les expressions corresponents, aquest assaig es fa en un bany termostàtic amb un increment de temperatura d'1 °C fins que la mida s'estabilitze i s'augmente la temperatura fins al màxim permès pel bany, sent aquesta temperatura de 60 °C. Açò es degut a que la mesura dels termistors no proporciona una lectura constant. Degut al soroll dels equips, els seus valors oscil·len i per a millorar el calibratge es farà una mitjana dels valors quan la mida de la temperatura siga estable. La lectura en Simulink i la captació de dades es pot veure a la [Figura 24](#).

Posteriorment es representen amb Matlab (*Plantilla_Carregar_Dades.m*) i es tracta el vector arxiu per al calibratge dels termistors. En aquest cas els dos termistors tenien la mateixa mesura, per tant el calibratge serà idèntic per als dos. Es pot veure la representació de les dades en Matlab a la [Figura 29](#).

Una vegada vist la representació de les dades, s'extraurà les corresponents a les zones planes d'estabilitat i es realitzarà la mitjana dels seus valors per tindre un calibratge més precís. Es pot veure a la [Figura 30](#). Sembla que els cercles rojos estiguen en posició vertical però a l'haver soroll en els sensors i la presa de dades ha requerit molt de temps l'escala de la figura es veu reduïda i per tant dona la sensació d'aqueixa posició vertical.

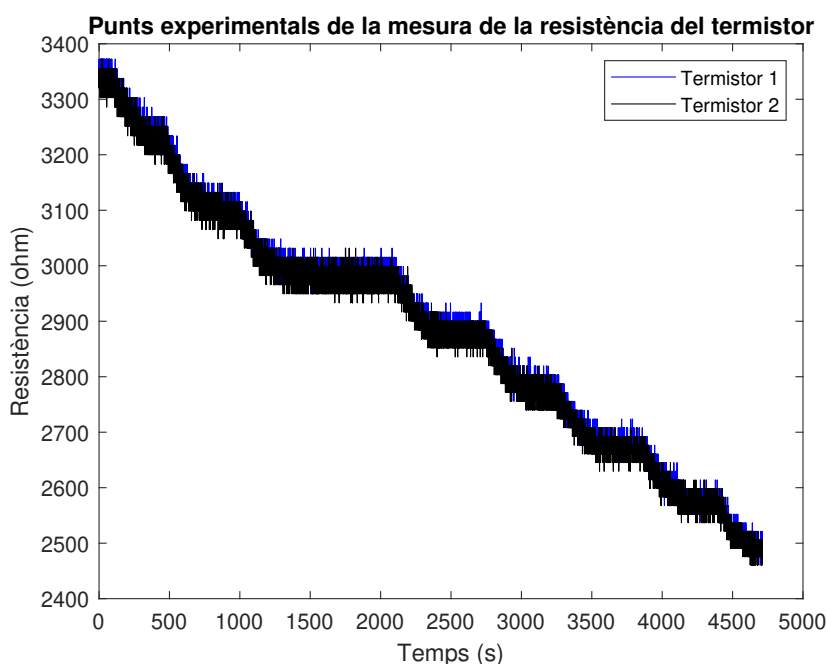


Figura 29: Representació de les dades experimentals del calibratge

El calibratge del sensor s'ha realitzat de la mateixa manera que la vegada anterior, però millorant-ho amb el mètode que s'acaba d'explicar.

Aquesta vegada, els resultats del calibratge es poden veure a la [Figura 31](#) i adquireix un valor de 3881.22 ± 14.41 K. Falten alguns punts en la mesura del calibratge, això és pel fet que durant l'assaig un dels cables dels termistors es va soltar de la connexió a la placa protoboard i durant aquest període de temps no realitzava una mida correcta.

Es pot veure una gràfica comparativa amb els 3 valors del paràmetre d'ajust β per a observar la seua diferència respecte el valor del fabricant i els dos mètodes de calibratge emprats anteriorment. Es poden veure tots els valors d'ajust comparant-los a la [Figura 32](#).

Com es pot apreciar a la [Figura 32](#), els valors són semblants i presenten diferències a valors de temperatura alts, on el que millor s'aproxima a la mesura correcta es l'última tècnica de calibratge en lectura continua de dades, però el valor subministrat pel fabricant proporciona una mesura pròxima a la sonda Testo 922 i per tant es podria emprar el seu valor sense cometre un error molt gran de mida.

En conclusió, per a tots els assajos s'emprarà l'expressió (7), amb un valor de β de 3881.22 K.

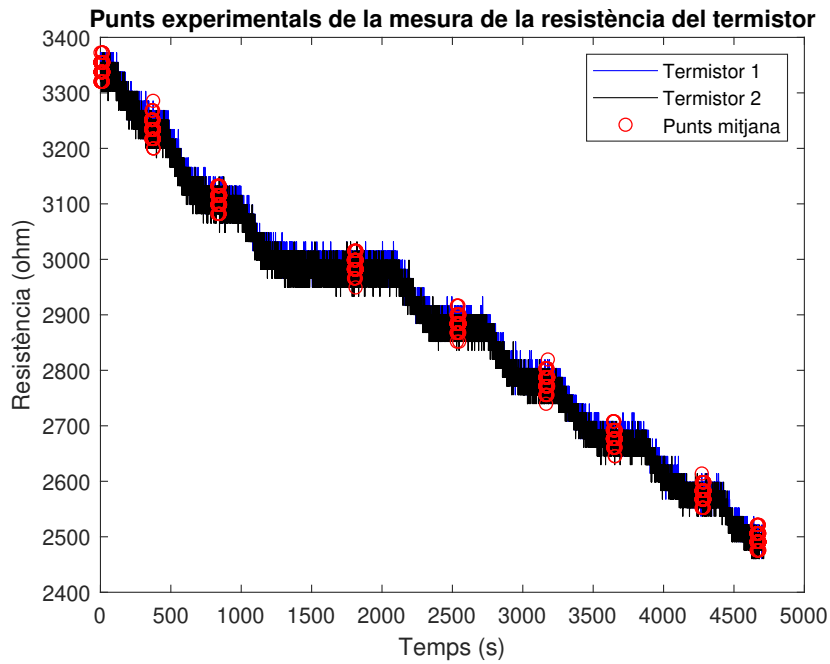


Figura 30: Zones d'estabilitat per al calibratge

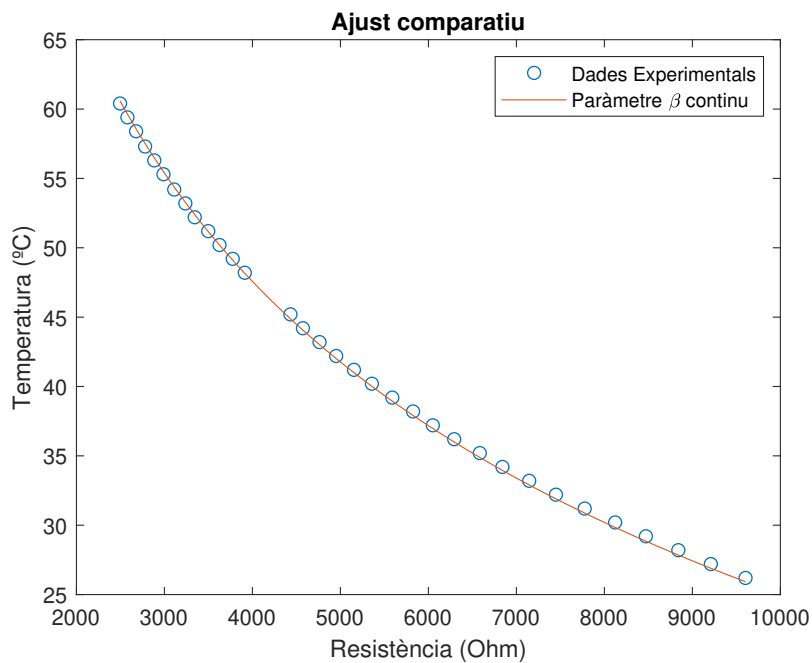


Figura 31: Calibratge del nou paràmetre d'ajust

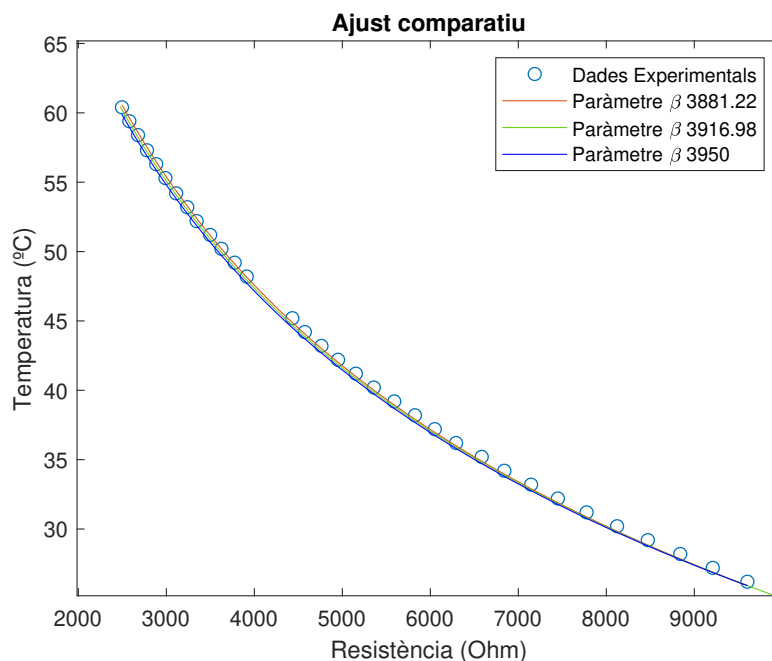


Figura 32: Comparació dels valors calibrats dels sensors de temperatura amb l'expressió (7)

4.2 Sensors de Cabal: Cabalímetre YF-S401

Aquest cabalímetre mesura a través de l'efecte Hall. Quan els àleps giren un d'aquests posseeix un imant per tal d'interrompre el camp magnètic generat i degut a esta interrupció, l'imant exterior als àleps emet una xicoteta corrent a través del cable groc que Simulink registra com una senyal. Aquesta senyal registrada, es rebuda com una senyal PWM que modificant-la es pot obtindre la mesura del cabal circulant per l'instal·lació amb l'expressió corresponent a aquests cabalímetres (10).

$$F(Hz) = k * Q \quad (10)$$

Aquest paràmetre k és una constant pròpia de cada cabalímetre subministrada pel fabricant en la seua fulla tècnica. Per a aquest cabalímetre, el model YF-S401, el fabricant ens proporciona una constant $k = 98$ però, més endavant serà calibrat per tal de mesurar el cabal correctament ja que pot variar en aquests instruments.

Per a la mida del cabal en Simulink s'han emprat 2 tipus diferents d'arxius per tal de veure quin s'aproxima més a una mesura correcta del cabal. Treballant amb un període de mostreig de 1 s.

- Ús del bloc Trigger:

Aquest bloc implementat en Simulink executa l'ordre quan rep una senyal PWM del cabalímetre. Es pot veure les seues característiques a la [Figura 33](#). Com es pot veure aquest bloc activa el subsistema al que està associat quan detecta un increment en la senyal, en el cas d'aquests cabalímetres quan es produeix l'interrupció de l'efecte Hall. El subsistema creat es pot veure a la [Figura 34](#), amb aquest bloc hi ha un comptador, on la funció d'aquest subsistema de Simulink és comptar el número de voltes i obtindre les revolucions per minut (RPM), que posteriorment es transformaran a freqüència i a cabal.

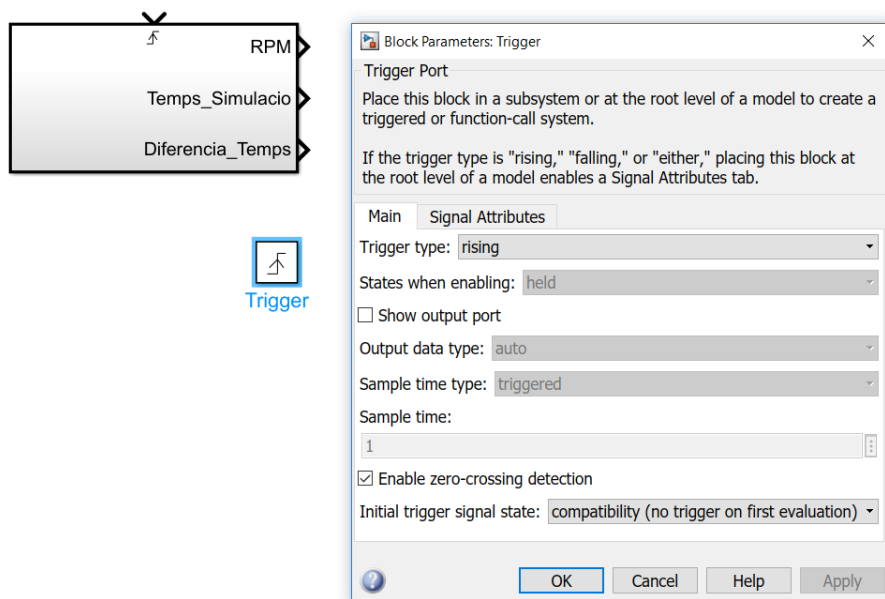


Figura 33: Característiques bloc Trigger

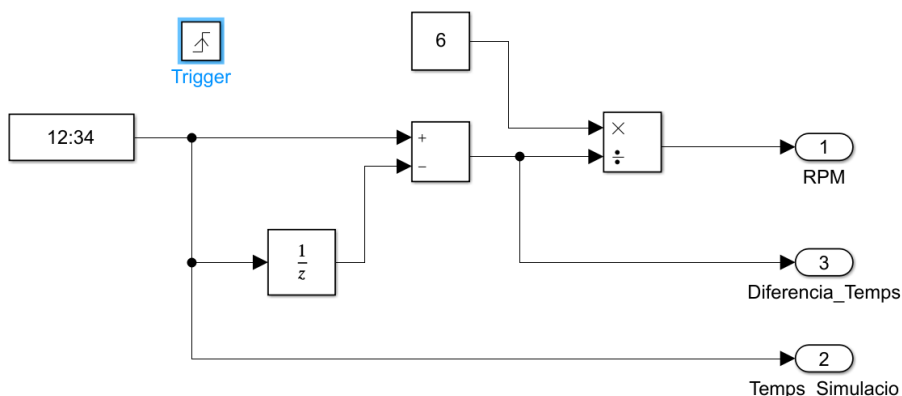


Figura 34: Comptador Trigger

- Ús del bloc Tachometer:

Aquest bloc pertany a la toolbox d'Arduino i ens proporciona la velocitat del cabalímetre en RPM, a partir d'aquesta mesura s'obté la freqüència i per últim el cabal. Aquest bloc funciona amb els pins específics d'Arduino que detecten interrupcions. L'interrupció en aquest cas és provocada per l'efecte Hall i per tant el bloc que s'ha emprat proporciona la mesura. El bloc també necessita un temps de mostreig, que ha de ser suficient per a mesurar en temps real i obtenir una mesura contínua del cabal. Es pot veure les seues especificacions a la [Figura 35](#)

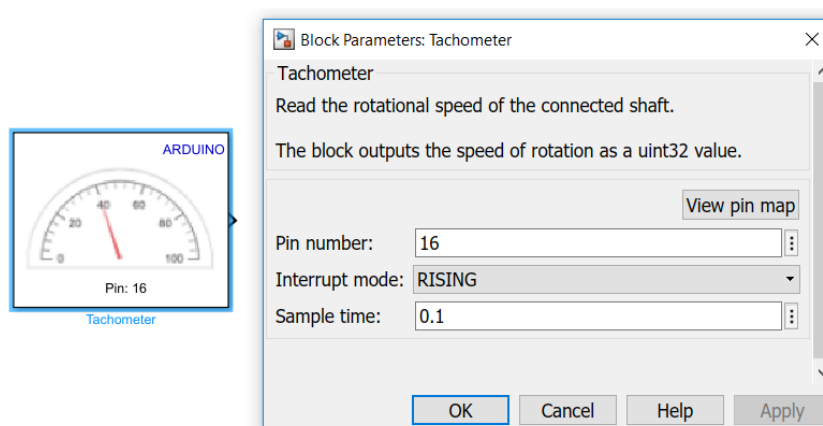


Figura 35: Bloc Tachometer Arduino

D'aquestes dues possibilitats de mesura s'ha escollit la segona opció ja que proporciona una mesura de manera contínua i detecta xicotetes interrupcions, no com el bloc Trigger i per tant perd algunes dades en la simulació.

Hi ha que tindre en compte que el temps de mostreig del bloc Tachometer es comprèn des de 1 s, ja que és un temps molt gran per a la mida de manera contínua i seria el valor màxim admissible per a treballar en el sistema, fins un valor de 0.001 s. En el moment es disminueix un ordre de magnitud, per exemple 0.0001 s, el bloc no és capaç de mesurar correctament i augmenta en un ordre de magnitud el cabal mesurat, per tant l'interval de mostreig del bloc estarà comprès en $[0.001, 1]$ s.

Per al calibratge del cabalímetre, s'ha emprat una bomba peristàtica que subministra un cabal constant al assaig. En aquest assaig es registren de manera contínua els valors de RPM que dona el bloc emprat en cada simulació. Aquest assaig es farà a diferents cabals subministrats per la bomba peristàtica i posteriorment s'ajustarà el paràmetre k de l'expressió (10) per tal de mesurar el cabal correctament en el sistema d'escalfament. El muntatge del calibratge al laboratori es pot veure a [Figura 36](#).

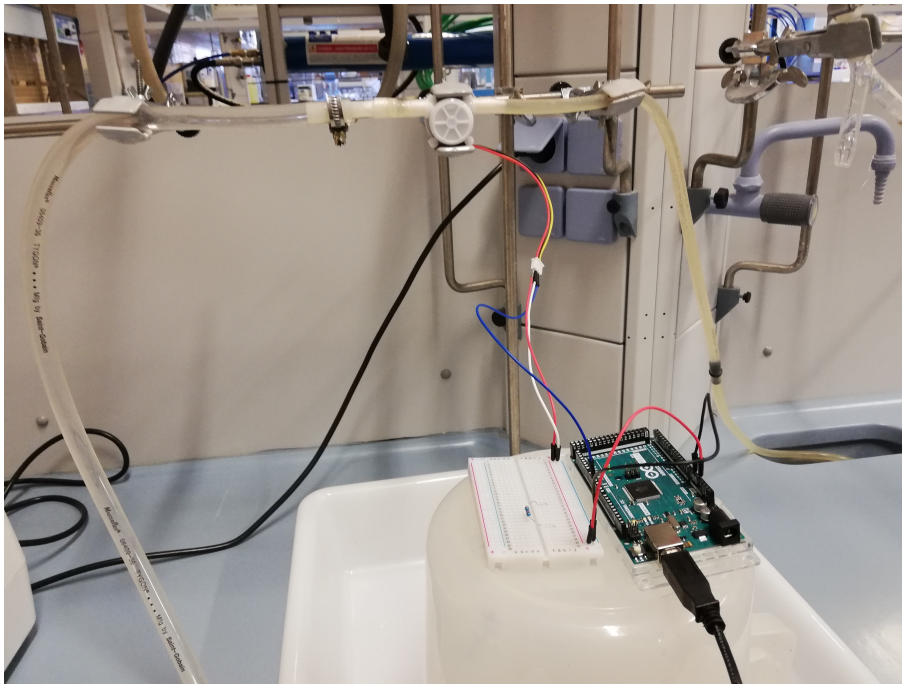


Figura 36: Calibratge del sensor YF-S401 a partir de la bomba de laboratori FH100Dx

On per a prendre les dades de RPM, s'ha emprat un arxiu (*Mesura_YF_S401.slx*) de Simulink, que es pot veure a la [Figura 37](#). On el subsistema es pot veure a la [Figura 38](#).

Una vegada obtingudes les dades per al rang de mesura del cabalímetre, s'ha emprat Matlab (*YF_S401.m*) per a ajustar el valor de l'expressió (10). L'ajust del calibratge es pot veure a la [Figura 39](#).

El paràmetre que s'ha obtingut ha variat un poc respecte al proporcionat pel fabricant. Es pot veure a la [Taula 3](#).

Paràmetre del fabricant	Paràmetre ajustat
98	85.09 ± 1.01

Taula 3: Paràmetre obtingut del cabalímetre YF-S401

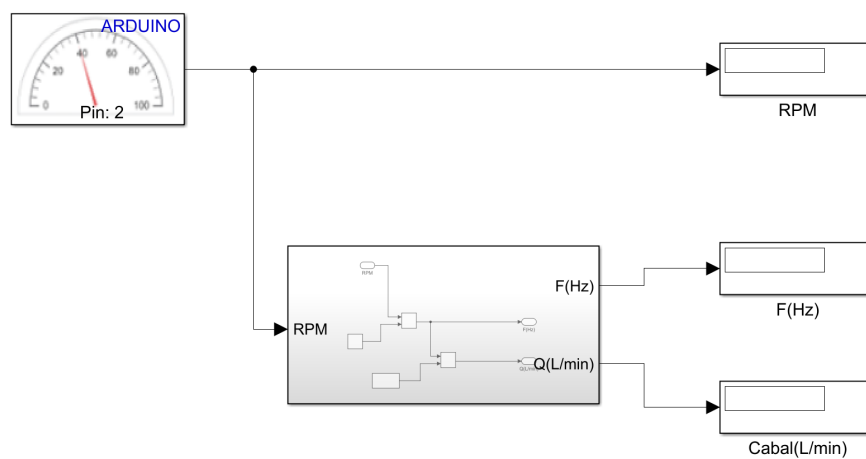


Figura 37: Mesura de les RPM per al posterior calibratge

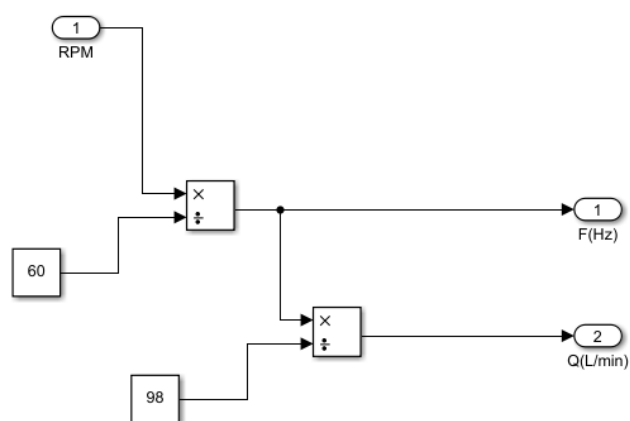


Figura 38: Interior del subsistema del cabalímetre

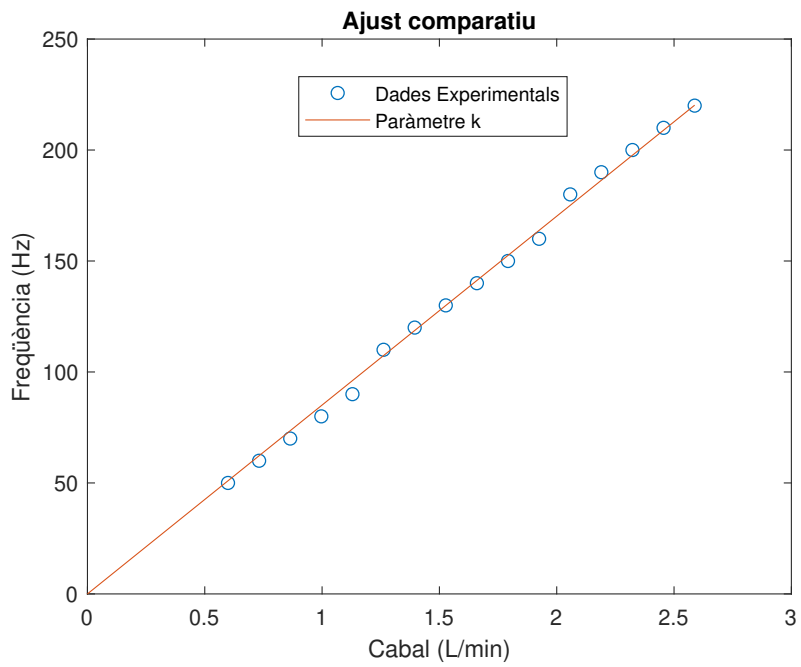


Figura 39: Ajust del paràmetre del sensor YF-S401

4.3 Bombes hidràuliques: Bomba DC30A-1230

Per a la caracterització de la bomba s'ha emprat el cabalímetre ja nombrat anteriorment, el model YF-S401. Per a la seua caracterització era necessari determinar la posició fixa de la bomba, així com les conduccions per tal de mesurar correctament el cabal que es farà circular per l'instal·lació. El muntatge es pot veure a la [Figura 20](#).

Una vegada determinada la posició de la bomba, es va emprar el cabalímetre per a caracteritzar la bomba enviant una senyal PWM entre 0 i 255. Per a fer aquesta tasca, es va variar la senyal PWM en valors de 25 fins un valor de 250, aquestes ordres es poden veure en el fitxer (*Mesures_Cabal_Bomba.slx*) de [Figura 40](#). Es pot veure la seua caracterització (*DC30A.1230.m*) en la [Figura 41](#).

En vista de l'ajust dels punts experimentals, els últims valors de senyal PWM presenten una diferència de cabal poc apreciable i per tant no augmenta el cabal en aquests valors, pel que l'expressió que s'ha decidit per a la seua caracterització ha sigut (11).

$$Q = A \cdot (1 - \exp(-B \cdot PWM)) \quad (11)$$

I els paràmetres obtinguts de l'ajust han sigut A i B , que s'empraran amb l'expressió (11) per tal de mesurar el cabal constantment que circula pel sistema.

A	B
1.10 ± 0.02	0.050 ± 0.005

Taula 4: Paràmetre d'ajust de la bomba DC30A-1230

Al fabricar el nou depòsit sobreeixidor una modificació que s'ha fet ha sigut el de reduir el volum del depòsit per a poder aïllar-lo millor, pel que l'entrada d'aigua al tanc varia la seua altura i per tant variarà el cabal d'eixida. Vist en molts assajos, el control del cabal és un problema molt greu, ja que provoca pertorbacions en el sistema si no es té molt en compte la variació del nivell d'aigua en el tanc d'alimentació. Per tant per a treballar en una zona còmoda i evitar al major número de problemes de la bomba, es calcularà el cabal a una senyal PWM fixa, en aquest cas s'ha decidit una senyal PWM de 125 i es calcularà el cabal per a aquesta senyal PWM, donant com a resultat un cabal de 1.01 L/min.

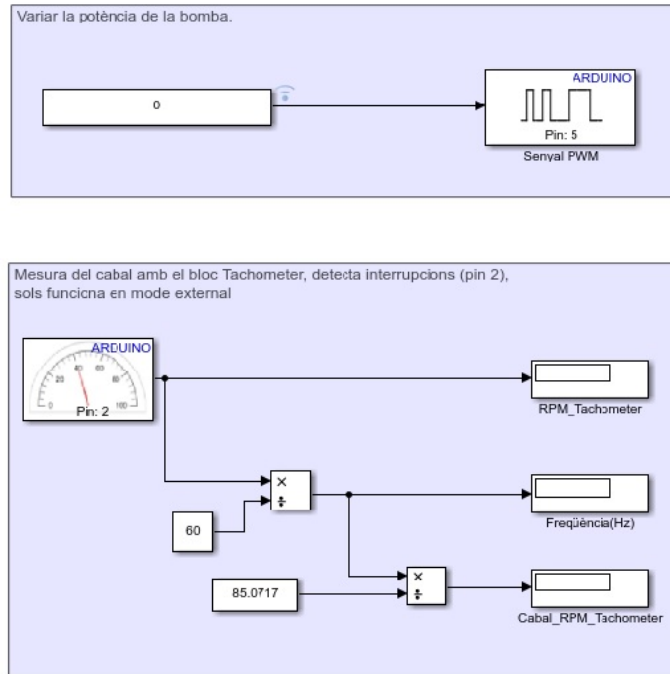


Figura 40: Simulink per a la lectura del cabal amb el cabalímetre YF-S401

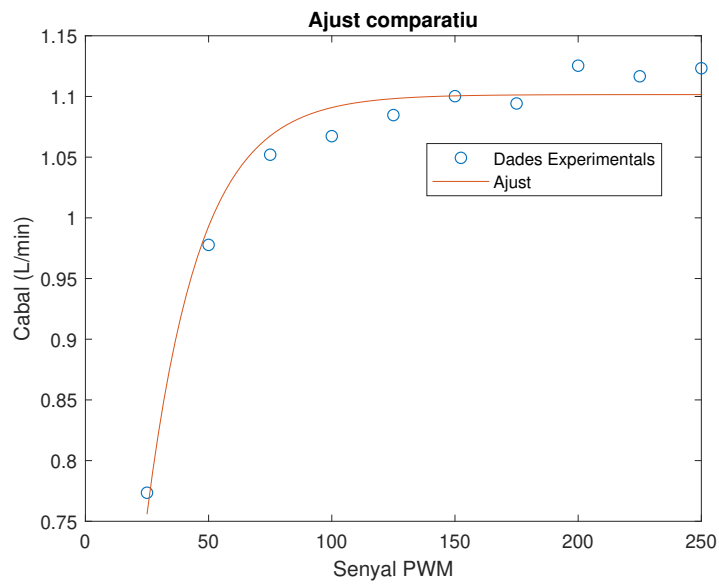


Figura 41: Caracterització de la bomba hidràulica

4.4 Resistència elèctrica de 2500W

La senyal necessària per a encendre la resistència i apagar-la és una senyal PWM o "pulse-width modulation" (modulació per amplada de polsos), rebent una senyal compresa de 0 a 255. Per a dur a terme aquesta senyal, s'han emprat 3 tipus de senyals emeses a través de Simulink i Arduino.

- Senyal continua PWM:

A la toolbox de Simulink, hi ha un bloc específic per a enviar senyals PWM a un pin d'Arduino que es desitge, com es pot veure a la [Figura 42](#). Amb aquest bloc es subministra una senyal contínua entre 0 i 255 corresponent cadascun d'aquests valors a una potència de la resistència elèctrica. El inconvenient que s'ha observat ha sigut d'un subministre continu a la resistència i per tant la resistència està tot el temps de simulació encesa i no es sap amb exactitud la potència subministrada.

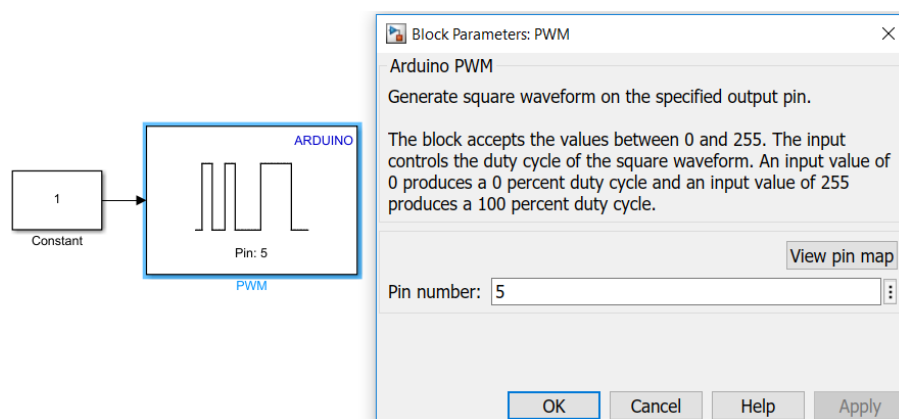


Figura 42: Senyal contínua PWM

- Senyal PWM construïda:

Per a evitar l'inconvenient anterior, s'ha decidit construir una senyal PWM pròpia on es controle el temps que esta encesa així com l'ample de pols per a la potència que subministra la resistència.

En aquest cas s'ha fabricat una senyal amb el bloc de Simulink de la toolbox d'Arduino "Digital Output". Aquest bloc envia una senyal lògica digital al pin de la placa d'Arduino que estem tractant. Aquesta és diferent a la senyal PWM que comprenia valors entre 0 i 255, en aquest cas admetrà valors de 0 o 1, sent 0 apagat i 1 encès. Coneixent aquest funcionament, s'ha tractat de manipular aquesta senyal de dues maneres diferents.

- Ús del bloc Pulse Generator: Aquest bloc de Simulink ens permet enviar un pols de manera contínua al bloc d'Arduino i establint els paràmetres d'amplitud del pols, que aquest serà de valor 1, el període, temps en el que es repetirà un pols respecte el següent i per últim el percentatge en el que el pols estarà en el valor màxim, en aquest cas el temps que estarà encesa. Es pot veure el bloc a la [Figura 43](#). Amb aquestes tres ordres, podrem modular la senyal que aplegarà al relé d'estat sòlid i per tant manipular la potència de la resistència.

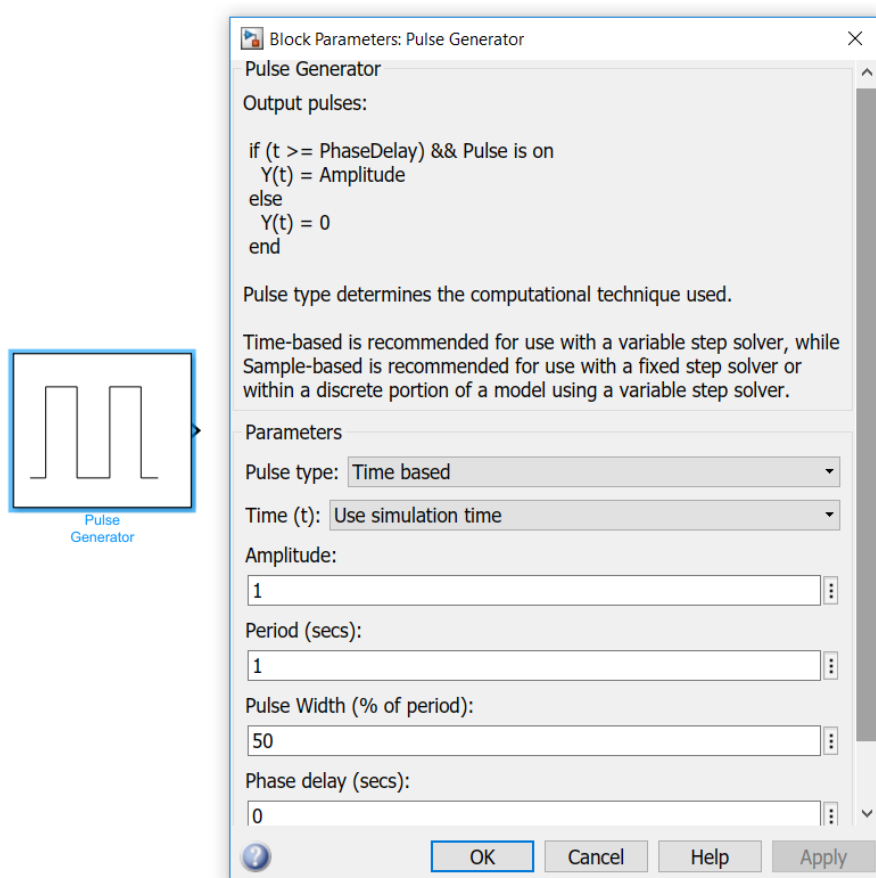


Figura 43: Bloc Pulse Generator de Simulink

- Senyal lògica modular: En aquest cas s'ha fet ús del bloc Repeating sequence, aquest bloc permet crear una senyal repetitiva entre 2 valors específics i en un interval de temps determinat, com es pot veure a la [Figura 44](#). Junt a aquest bloc, es crea un comparador lògic amb una constant i un bloc comparatiu per tal de que l'eixida del bloc lògic envie un valor de 0 o 1 quan compleix l'especificador creat o no, en aquest cas s'ha emprat un comparador \leq . Aquest comparador es pot veure a la [Figura 45](#).

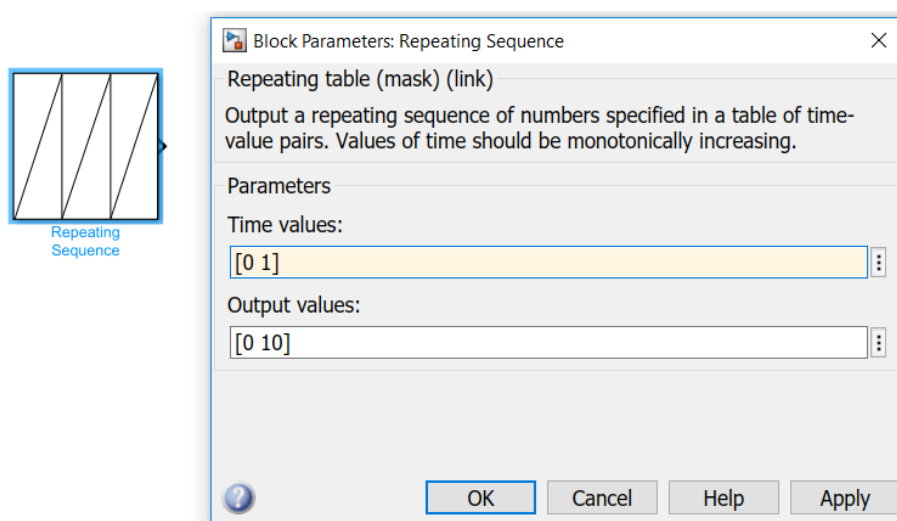


Figura 44: Bloc Repeating Sequence de Simulink

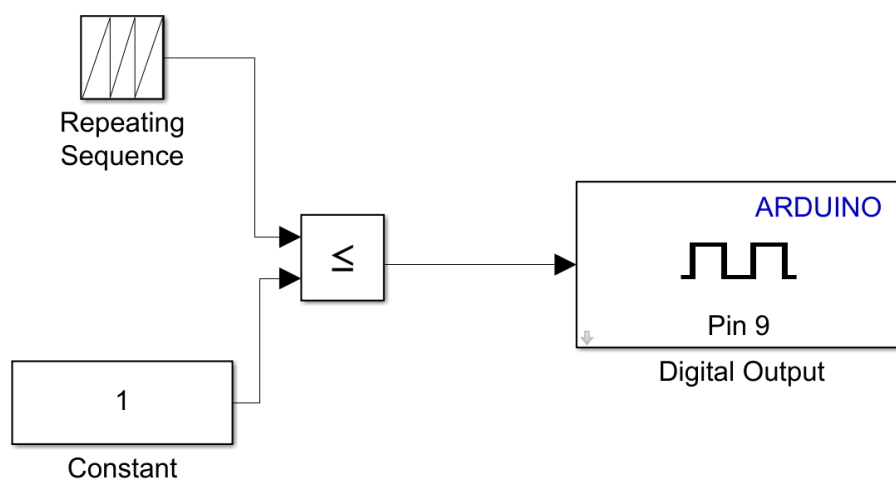


Figura 45: Comparador lògic per a la senyal PWM de la resistència

D'aquestes 3 senyals modulars emprades, s'ha observat que les que permeten un millor control de la resistència han sigut les dos últimes nombrades, encara que entre elles hi ha una major facilitat en la del comparador lògic, ja que no es necessita editar internament el bloc i té les mateixes propietats per a modular la senyal que el bloc de Pulse generator, per tant l'opció per a treballar sobre la resistència serà l'última opció definida i sobre la qual treballarà el sistema.

A continuació es comprovarà si la resistència elèctrica ofereix els 2500 W que indica el fabricant, per a comprovar açò es va submergir la resistència en un got de precipitats amb aigua per a poder encendre la resistència. Una vegada submergida, es va deixar

encesa a la seua capacitat màxima sense modular la senyal, per tal de veure la potencia màxima oferida i a partir de la que es tindrà en compte per a calcular la resta dels seus valors.

Una vegada encesa la resistència es va mesurar amb una pinça amperimètrica la intensitat que circul·lava pel circuit fent 3 mides i obtenint la mitjana d'aquests valors. Una vegada obtinguda la mitjana es va emprar l'expressió (12) amb un valor de $V = 230\text{ V}$ i d'aquesta manera es va apreciar que la resistència ofereix una potencia màxima de 2350 W . Després de diverses lectures, es va apreciar un xicotet increment de la intensitat consumida per la resistència. Açò es degut a que els metalls incrementen la seua conductivitat en funció de la temperatura i per tant apareix un xicotet increment de tensió a l'instal·lació però menyspreable.

$$P = V \cdot I \tag{12}$$

Mesures	Intensitat (A)
1	10.22
2	10.21
3	10.22
Mitjana	10.22

Taula 5: Lectures de la intensitat consumida per la resistència

Es pot detectar un xicotet error en la senyal d'Arduino emesa al relé d'estat sòlid. Aquest error és degut al desfase entre la xarxa i el relé. En un cas ideal, quan s'envia l'ordre d'activació des d'Arduino al relé, aquest està sincronitzat amb la xarxa i per tant en qualsevol moment la resistència queda encesa.

En el cas real, en el moment s'envia l'ordre des d'Arduino per a encendre la resistència, aquesta senyal pot o no coincidir amb la freqüència de la xarxa. Açò es degut a que el relé sols emet l'ordre en els passos per zero de l'ona senoidal de la xarxa. En el cas més desfavorable, després del pas per zero de l'ona senoidal, hi ha que esperar un màxim de 10 ms , ja que un període de la xarxa són 20 ms i té 2 passos per zero. Aquest error es pot considerar menyspreable ja que es treballa amb un període per a la resistència prou gran i representaria un temps màxim d'espera de centèsimes de segon.

5 Modelat Matemàtic

En aquest apartat del treball, es pretén obtindre el modelat del sistema del tanc d'escalfament, atenent des d'un model més simple, on es considerarà la densitat i el calor específic constant fins un model més complicat, on les variables dependran de la temperatura. Posteriorment, s'implementaran aquests models en Simulink per tal de veure la seua evolució temporal i amb Matlab es representarà les comparacions de tots els models. A continuació, es detallarà cada un dels modelats.

5.1 Model matemàtic del tanc escalfador sense tindre en compte pèrdues ni la dinàmica de la resistència

5.1.1 Densitat (ρ) i calor específic (C_P) constants

Primer hi ha que veure el balanç de matèria, on quedaria com l'expressió (13), el diagrama del procés es pot veure en la Figura 46. On les variables de Q_e correspon al cabal d'entrada, Q_s al cabal d'eixida, T_e a la temperatura d'entrada, V al volum del volum de control i ρ a la densitat.

$$\rho(T_e) \cdot Q_e - \rho(T_s) \cdot Q_s = \frac{d(\rho \cdot V)}{dt} \quad (13)$$

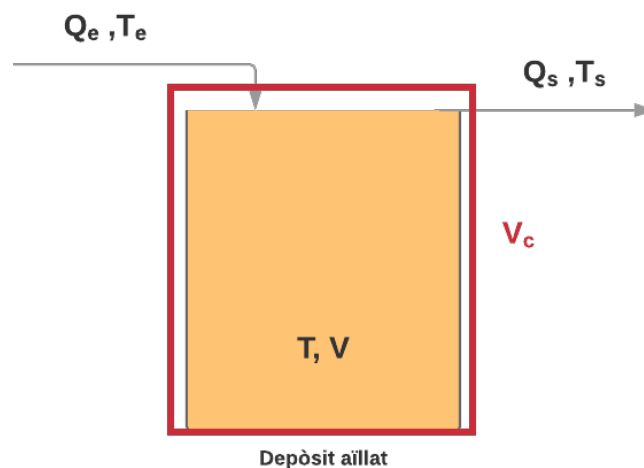


Figura 46: Diagrama del procés a estudiar

Es coneix que el sistema és un tanc per sobreexidor, pel que el volum es considera constant i l'expressió (13) es pot transformar a l'expressió (14)

$$\rho(T_e) \cdot Q_e - \rho(T_s) \cdot Q_s = V \cdot \frac{d\rho}{dt} \quad (14)$$

Com la densitat es considera de valor constant, el balanç de matèria queda com l'expressió (15)

$$Q_e = Q_s \quad (15)$$

A continuació, s'analitza el balanç d'energia del sistema, que permetrà veure l'evolució de la planta i veure si el model matemàtic s'assembla a la realitat, el diagrama es pot veure a la Figura 47. Es veu a les expressions (16),(17),(18) el desenvolupament per a arribar a l'expressió (19) que serà l'emprada per a la simulació en Matlab/Simulink. On les variables de \dot{m}_e correspon al flux màssic d'entrada, \dot{m}_s al flux màssic d'eixida, h_e a l'entalpia d'entrada, h_s a l'entalpia d'eixida i q potència tèrmica aportada al sistema. A l'expressió (17) les variables de h° correspon a l'entalpia de referència, T° a la temperatura de referència, \bar{C}_P al calor específic mitjà, U_{VC} es la energia interna, u_{VC} es la energia interna específica i h_{VC} l'entalpia específica.

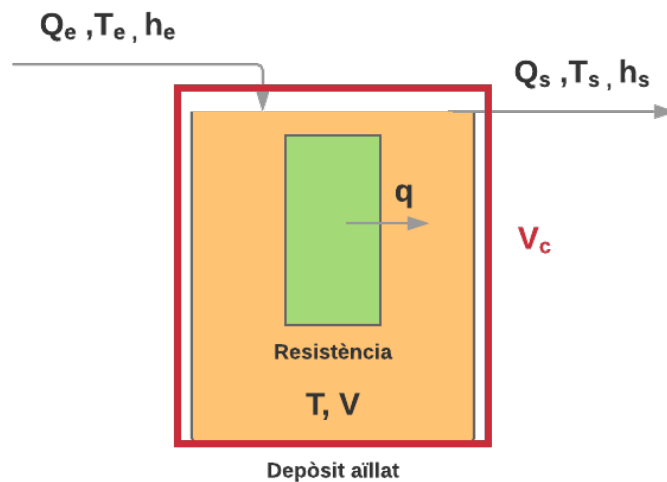


Figura 47: Diagrama d'energia del procés a estudiar

$$\dot{m}_e \cdot h_e - \dot{m}_s \cdot h_s + q = \frac{dU_{VC}}{dt} \quad (16)$$

$$\rho(T_e) \cdot Q_e \cdot [h^\circ + \bar{C}_P \cdot (T_e - T^\circ)] - \rho(T_s) \cdot Q_s \cdot [h^\circ + \bar{C}_P \cdot (T_s - T^\circ)] + q = \frac{d(u_{VC} \cdot V \cdot \rho)}{dt} \quad (17)$$

$$\rho(T_e) \cdot Q_e \cdot \bar{C}_P \cdot (T_e - T) + q = V \cdot \rho(T_e) \cdot \frac{dh_{VC}}{dt} \quad (18)$$

$$\rho(T_e) \cdot Q_e \cdot \bar{C}_P \cdot (T_e - T) + q = V \cdot \rho(T_e) \cdot \bar{C}_P \cdot \frac{dT}{dt} \quad (19)$$

5.1.2 Densitat (ρ) variable i calor específic (C_P) constant

De manera semblant a la demostració anterior, primerament es plantejarà el balanç de matèria i després el balanç d'energia, tenint en compte que en aquest cas la densitat serà variable i el calor específic constant. El balanç de matèria es desenvolupa a l'expressió (20).

$$\rho(T_e) \cdot Q_e - \rho(T) \cdot Q_s = V \cdot \frac{d\rho}{dt} \quad (20)$$

En aquest cas, l'expressió (20) no es pot simplificar més i per tant afectarà en el balanç d'energia, on es demostren totes les equacions per tal d'aplegar a l'expressió final que permetrà realitzar la simulació.

El desenvolupament del balanç d'energia es veu a l'expressió (21), partint de l'expressió general (16).

$$\rho(T_e) \cdot Q_e \cdot [h^\circ + \bar{C}_P \cdot (T_e - T^\circ)] - \rho(T) \cdot Q_s \cdot [h^\circ + \bar{C}_P \cdot (T - T^\circ)] + q = \frac{d(u_{VC} \cdot V \cdot \rho)}{dt} \quad (21)$$

Desenvolupant l'expressió (21) i tenint en compte el balanç de matèria, el balanç d'energia queda com:

$$\begin{aligned} \rho(T_e) \cdot Q_e \cdot [h^\circ + \bar{C}_P \cdot (T_e - T^\circ)] - \rho(T) \cdot Q_s \cdot [h^\circ + \bar{C}_P \cdot (T - T^\circ)] + q = \\ V \cdot \rho(T) \cdot \bar{C}_P \cdot \frac{dT}{dt} + V \cdot [h^\circ + \bar{C}_P \cdot (T - T^\circ)] \cdot \frac{d\rho}{dt} \end{aligned} \quad (22)$$

Arreglant l'expressió (22) i tenint en compte l'expressió (20) s'obté l'expressió (23), que es la que permetrà obtenir la simulació del sistema.

$$\rho(T_e) \cdot Q_e \cdot \bar{C}_P \cdot (T_e - T) + q = V \cdot \rho(T) \cdot \bar{C}_P \cdot \frac{dT}{dt} \quad (23)$$

5.1.3 Densitat (ρ) constant i calor específic (C_P) variable

En aquest cas, es veurà com canvia l'expressió del balanç d'energia quan la densitat és constant i el calor específic variable. Es fixarà en el balanç d'energia, ja que el balanç de matèria és idèntic al de l'expressió (13)

El balanç d'energia que es planteja ara es veu a l'expressió (24)

$$\rho(T_e) \cdot Q_e \cdot [h^\circ + \bar{C}_P \cdot (T_e - T^\circ)] - \rho(T_e) \cdot Q_e \cdot [h^\circ + \bar{C}_P \cdot (T - T^\circ)] + q = V \cdot \rho(T_e) \cdot C_P(T) \cdot \frac{dT}{dt} \quad (24)$$

Arreglant aquesta expressió (24), s'aplega a l'expressió (25) que permetrà obtindre la simulació d'aquest model matemàtic.

$$\rho(T_e) \cdot Q_e \cdot \bar{C}_P \cdot (T_e - T) + q = V \cdot \rho(T_e) \cdot C_P(T) \cdot \frac{dT}{dt} \quad (25)$$

5.1.4 Densitat (ρ) variable i calor específic (C_P) variable

Per últim, en aquest modelat del sistema, s'obté l'expressió del balanç d'energia tenint en compte que la densitat i el calor específic seran variables en el sistema.

El balanç de matèria és idèntic al de l'expressió (20), per tant es centrarà en el balanç d'energia. L'equació que definix aquest model es veu a l'expressió (26).

$$\rho(T_e) \cdot Q_e \cdot [h^\circ + \bar{C}_P \cdot (T_e - T^\circ)] - \rho(T) \cdot Q_s \cdot [h^\circ + \bar{C}_P \cdot (T - T^\circ)] + q = V \cdot \rho(T) \cdot C_P(T) \cdot \frac{dT}{dt} + V \cdot [h^\circ + \bar{C}_P \cdot (T - T^\circ)] \cdot \frac{d\rho}{dt} \quad (26)$$

Arreglant aquesta expressió (26), s'obté l'expressió final del modelat més rigorós, per tal de veure quin s'assembla més a la realitat. L'expressió final és (27).

$$\rho(T_e) \cdot Q_e \cdot \bar{C}_P \cdot (T_e - T) + q = V \cdot \rho(T) \cdot C_P(T) \cdot \frac{dT}{dt} \quad (27)$$

Per tal de veure les diferències entre els modelats, es presenta totes les equacions en la [Taula 6](#).

Model	Variables	Consideració	Equacions
Model 1	ρ i C_P	cte i cte	$\rho(T_e) \cdot Q_e \cdot \bar{C}_P \cdot (T_e - T) + q = V \cdot \rho(T_e) \cdot \bar{C}_P \cdot \frac{dT}{dt}$
Model 2	ρ i C_P	var i cte	$\rho(T_e) \cdot Q_e \cdot \bar{C}_P \cdot (T_e - T) + q = V \cdot \rho(T) \cdot \bar{C}_P \cdot \frac{dT}{dt}$
Model 3	ρ i C_P	cte i var	$\rho(T_e) \cdot Q_e \cdot C_P \cdot (T_e - T) + q = V \cdot \rho(T_e) \cdot C_P(T) \cdot \frac{dT}{dt}$
Model 4	ρ i C_P	var i var	$\rho(T_e) \cdot Q_e \cdot \bar{C}_P \cdot (T_e - T) + q = V \cdot \rho(T) \cdot C_P(T) \cdot \frac{dT}{dt}$

Taula 6: Models matemàtics obtinguts

Per a estimar la densitat [18] s'ha emprat l'expressió (28) on la temperatura està expressada en °C i la densitat s'obté en kg/m³ i per a estimar el calor específic [19] s'ha emprat l'expressió (29) on la temperatura està expressada en K i el calor específic s'obté en J/(mol K), els valors de les constants es poden veure a la Taula 7. En el cas de ser el calor específic mitjà s'ha emprat l'expressió (30) en el rang de 25 a 60 °C.

$$\rho(T) = \frac{A + B \cdot T + C \cdot T^2 + D \cdot T^3 + E \cdot T^4 + F \cdot T^5}{1 + G \cdot T} \quad (28)$$

$$C_P(T) = A + B \cdot T + C \cdot T^2 + D \cdot T^3 \quad (29)$$

$$\bar{C}_P = \frac{\int_{T^0}^T C_P(T) dT}{T - T^0} \quad (30)$$

Expressió	$\rho(T)$	$C_P(T)$
A	999.83952	92.053
B	16.945176	-3.9953 E-02
C	-7.9870401 E-03	-2.1103 E-04
D	-46.170461 E-06	5.3469 E-07
E	105.56302 E-09	–
F	-280.54253 E-12	–
G	16.897850 E-03	–

Taula 7: Paràmetres per al càlcul de la densitat i el calor específic. Font: [18],[19].

A continuació, es veurà les simulacions (*Comparacio_Models.m*) en Matlab / Simulink per tal d'apreciar l'evolució temporal del sistema (*Model.1.slx*, *Model.2.slx*, *Model.3.slx*, *Model.4.slx*). Es poden veure les simulacions en la Figura 48. En aquesta simulació del sistema, s'ha tingut en compte els valors de les variables que es mostren a la Taula 8.

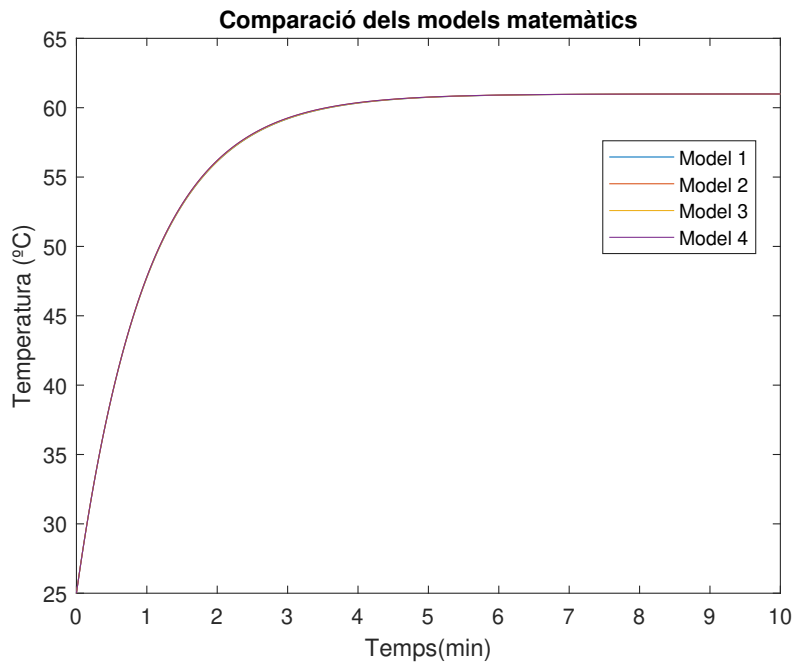


Figura 48: Simulació dels models matemàtics

Variables	Valor
Q_e (L/min)	1
q (W)	2500
T_e (°C)	25
V (L)	1
Ample de pols (%)	100
Temps base (s)	1

Taula 8: Valors de les variables per a la simulació dels models matemàtics

Com es pot veure, no s'aprecia diferència a simple vista a la [Figura 48](#), ja que tots apleguen a l'estat estacionari de manera semblant i sols es pot apreciar diferència si s'amplia molt el gràfic. En vista d'aquest resultat obtingut, tendria igual el model que vaja a emprar-se en el sistema i es podria admetre el model més simple per als diferents assajos, pel que el model que s'utilitzarà serà el model 1, on es considera densitat i calor específic constant.

Per a veure l'efecte del temps base de la resistència es pot veure a la [Figura 49](#) amb un ample de pols del 50% indicant d'aquesta manera que la meitat del temps estarà encesa i l'altra apagada amb l'arxiu de Simulink (*Simulacio_Temps_Base.m*). Amb aquesta representació podem veure que el temps per a un correcte desenvolupament del sistema és a temps baixos. encara que tots aconseguen l'estat estacionari.

Finalment es compara l'evolució del sistema variant l'ample de pols i considerant un temps base constant(*Simulacio_Ample_de_Pols.m*), en aquest cas de 10 s. El resultat es pot veure a la [Figura 50](#). Com es pot veure, l'efecte de l'ample de pols, afecta a la potència tèrmica aplicada en el sistema variant l'estat estacionari i si es considera un temps base per a la resistència, la mitjana del seu valor és el mateix que l'estat estacionari si la potència subministrada fora constant.

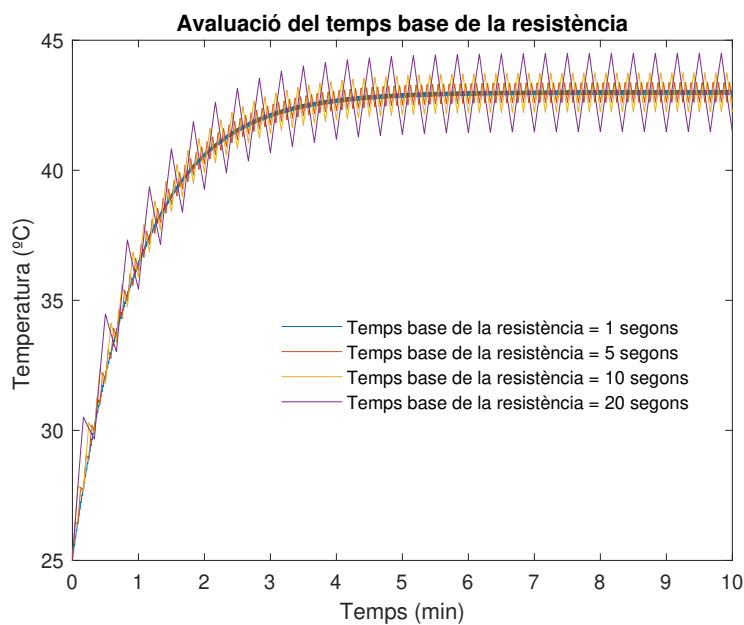


Figura 49: Models matemàtics variant el temps base de la resistència amb un ample de pols del 50%

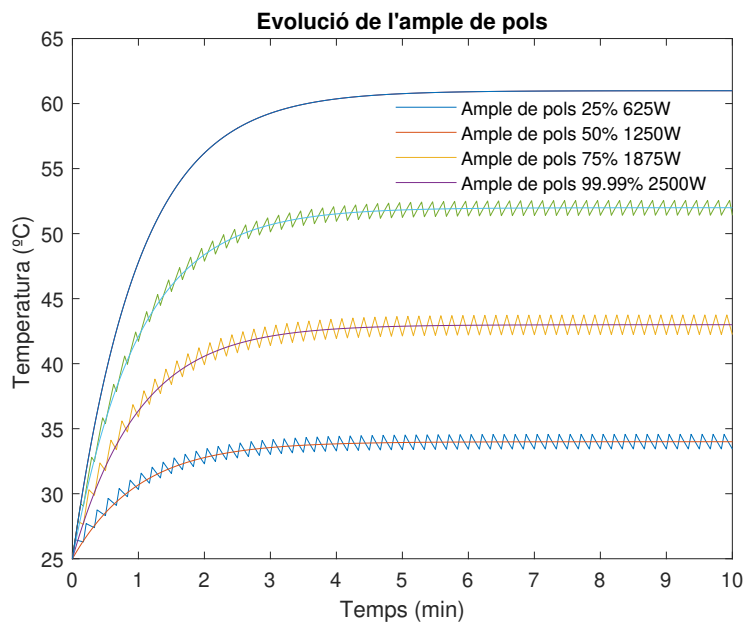


Figura 50: Models matemàtics variant l'ample de pols de la resistència amb un temps base de 10s

5.2 Model matemàtic del tanc escalfador sense tindre en compte la dinàmica de la resistència

En aquest cas es considerarà que el depòsit perdrà calor per les parets, per la qual cosa la nova expressió per a determinar el model matemàtic serà (31), on el diagrama es pot veure a la Figura 51. Afegint a l'expressió (19) el terme de pèrdues de calor q' . On la variable de UA és el coeficient global de pèrdues del depòsit i T_{amb} és el terme de la temperatura ambient, que tindrà un valor de 20°C per a les simulacions.

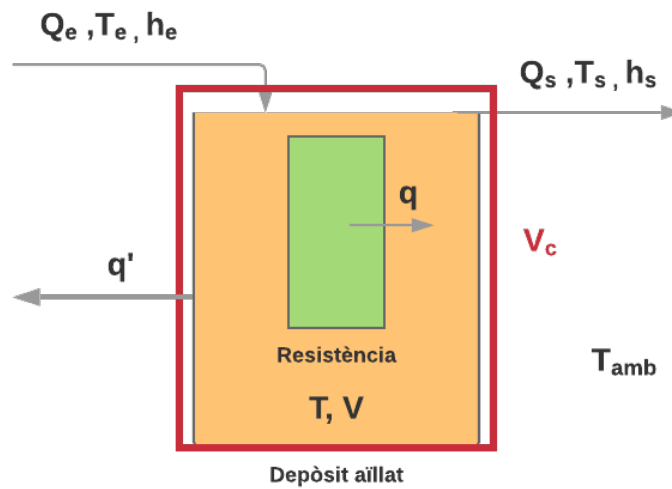


Figura 51: Diagrama del procés considerant pèrdues a l'ambient

$$\begin{aligned} \rho(T_e) \cdot Q_e \cdot \bar{C}_P \cdot (T_e - T) + q - q' &= V \cdot \rho(T_e) \cdot \bar{C}_P \cdot \frac{dT}{dt} \\ q' &= UA \cdot (T - T_{amb}) \end{aligned} \quad (31)$$

Per a realitzar la simulació (*Comparacio_Models_Perdues.m*) i poder comparar el model simple (*Model_1_SensePerdues.slx*) amb el model de pèrdues de calor (*Model_1_Perdues.slx*) a l'ambient s'han emprat els valors de simulació de la Taula 8. La simulació es pot veure a la Figura 52, on la diferència en l'estat estacionari és de 0.24°C .

D'aquesta manera s'aconsegueix millorar el model matemàtic quedant la nova expressió com la que es veu a la (32).

$$\rho(T_e) \cdot Q_e \cdot \bar{C}_P \cdot (T_e - T) + q - UA \cdot (T - T_{amb}) = V \cdot \rho(T_e) \cdot \bar{C}_P \cdot \frac{dT}{dt} \quad (32)$$

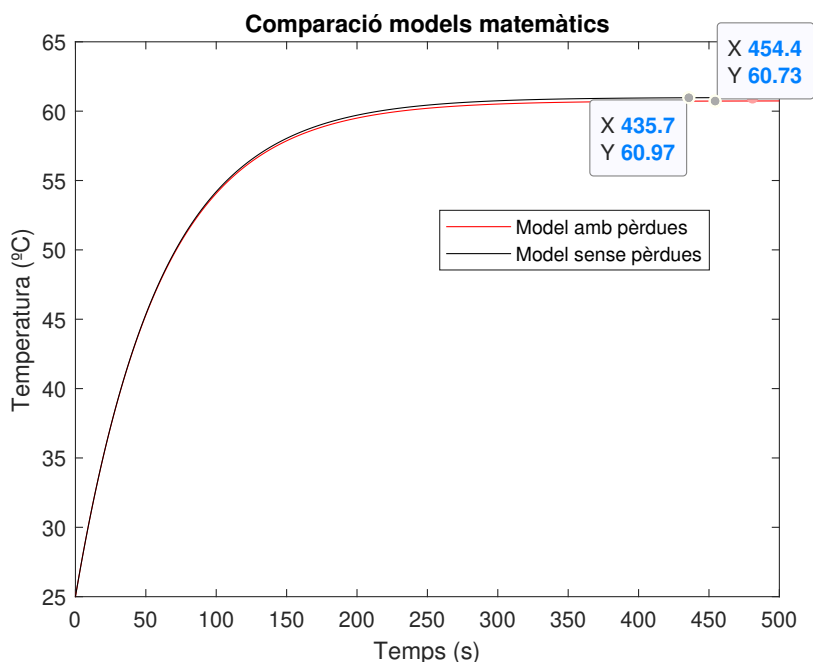


Figura 52: Simulació dels models matemàtics simple i de pèrdues de calor amb un valor de $UA = 0.48 \text{ W/K}$

5.3 Model matemàtic del tanc escalfador per determinar UA

L'expressió, tenint en compte que el sistema intercanvia calor sols amb les parets del depòsit és (33). Partint de l'expressió general (31) ja que en realitzar l'assaig de manera experimental no hi ha entrada ni eixida de matèria, per la qual cosa només queda el terme de pèrdues de calor per les parets, en aquest cas l'aigua està calenta i es vol observar l'evolució de la temperatura de l'aigua quan s'apaga la resistència i deixa d'entrar i eixir aigua.

$$(-UA) \cdot (T - T_{amb}) = \rho(T_e) \cdot \bar{C}_P \cdot V \cdot \frac{dT}{dt}; T(0) = T_0 \quad (33)$$

Si es resol aquesta expressió (*Dsolve_UA.m*), s'obté l'equació que es gastarà per a ajustar el paràmetre UA i que posteriorment s'implementarà en el modelat del sistema. L'expressió que s'obté és (34).

$$T = T_{amb} + \exp\left(\frac{-(UA \cdot t)}{\bar{C}_P \cdot V \cdot \rho(T_e)}\right) \cdot (T_0 - T_{amb}) \quad (34)$$

Aquesta nova expressió és la que es gastarà per a determinar experimentalment el valor d' UA .

5.4 Model matemàtic del tanc escalfador

En aquest cas s'estudiarà el comportament dinàmic de la resistència, ja que no hi ha una transferència de calor immediata des de la resistència al fluid de treball. Per a això s'abordarà el modelat matemàtic prenent com a volum de control la resistència elèctrica, el diagrama es pot veure a la [Figura 53](#).

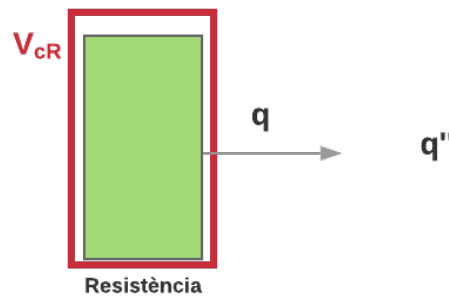


Figura 53: Diagrama del procés considerant com a volum de control la resistència

L'expressió que s'ha d'estudiar es semblant a la nombrada anteriorment a l'equació (32), però aquesta vegada canvia la calor aportada, on q'' ha de ser l'intercanvi de calor a la resistència elèctrica i es relaciona en l'expressió (35), on l'equació que serà la que subministre calor al procés serà l'expressió (36).

$$q'' = q - q' = \frac{dU_{VCR}}{dt} \quad (35)$$

$$q' = h_R \cdot A_R \cdot (T_R - T) \quad (36)$$

Desenvolupant l'expressió (35), s'obté la nova equació (37), que permetrà determinar els paràmetres d'ajust. On m_R es la massa de la resistència, C_{PR} es el calor específic de la resistència, h_R es el coeficient de pel·lícula, A_R es l'àrea de la resistència i U_{VCR} l'energia interna de la resistència. Quedant finalment l'expressió per a resoldre (39). Tenint en compte el balanç d'energia del fluid del dipòsit per a la nova expressió de la dinàmica de la resistència, i que es pot veure a l'expressió (40).

$$q - h_R \cdot A_R \cdot (T_R - T) = m_R \cdot C_{PR} \cdot \frac{dT_R}{dt} \quad (37)$$

$$\begin{aligned} a &= m_R \cdot C_{PR} \\ b &= h_R \cdot A_R \end{aligned} \quad (38)$$

$$\frac{q}{a} - \frac{b}{a} \cdot (T_R - T) = \frac{dT_R}{dt} \quad (39)$$

$$\rho(T_e) \cdot Q_e \cdot \bar{C}_P \cdot (T_e - T) + h_R \cdot A_R \cdot (T_R - T) - UA \cdot (T - T_{amb}) = V \cdot \rho(T_e) \cdot \bar{C}_P \cdot \frac{dT}{dt} \quad (40)$$

En definitiva, és el millor model matemàtic que explica el comportament de la planta i que pot predir qualsevol variació o activitat en ella. Es pot veure una simulació comparant els models matemàtics a la [Figura 54](#). Com es pot veure, està present la dinàmica de la resistència però no afecta al seu valor estacionari.

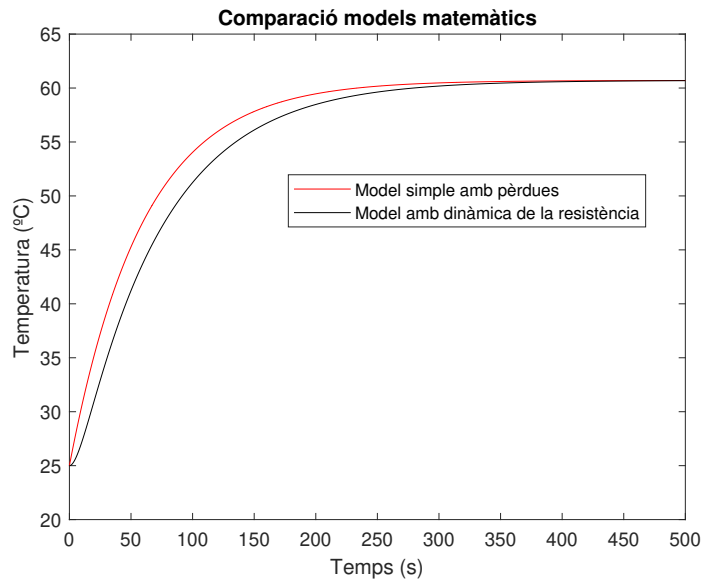


Figura 54: Comparació del model simple amb el model tenint en compte la dinàmica de la resistència, emprant els valors de la [Taula 8](#) i [Taula 10](#).

6 Caracterització de la Planta

6.1 Determinació del coeficient de pèrdues global UA

En aquest apartat es tracta de comprovar si el depòsit construït és totalment adiabàtic o pel contrari, intercanvia calor amb l'ambient i en aquest últim cas s'haurà de determinar el coeficient de pèrdues global UA per a incorporar-ho al model matemàtic.

Per a comprovar aquest fet, el assaig es va realitzar calfant un volum d'aigua de 0.8 L fins uns 75°C en un got de precipitats amb la resistència elèctrica de 2350 W. Una vegada s'aplega a aquesta temperatura, s'aboca l'aigua al depòsit que s'ha construït i posteriorment es tapa la part superior junt al sensor de temperatura, prenent d'aquesta manera les dades en temps real i deixant l'assaig en agitació i un temps suficientment llarg per a què s'aprecie correctament si hi ha pèrdues en el sistema o és completament adiabàtic. Es va comparar amb el mateix depòsit però sense aïllar, en les mateixes condicions d'operació, per veure si l'espuma de poliuretà ha afectat al depòsit millorant l'aïllament de l'ambient. La velocitat de la pèrdua de temperatura es pot veure a la [Figura 55](#).

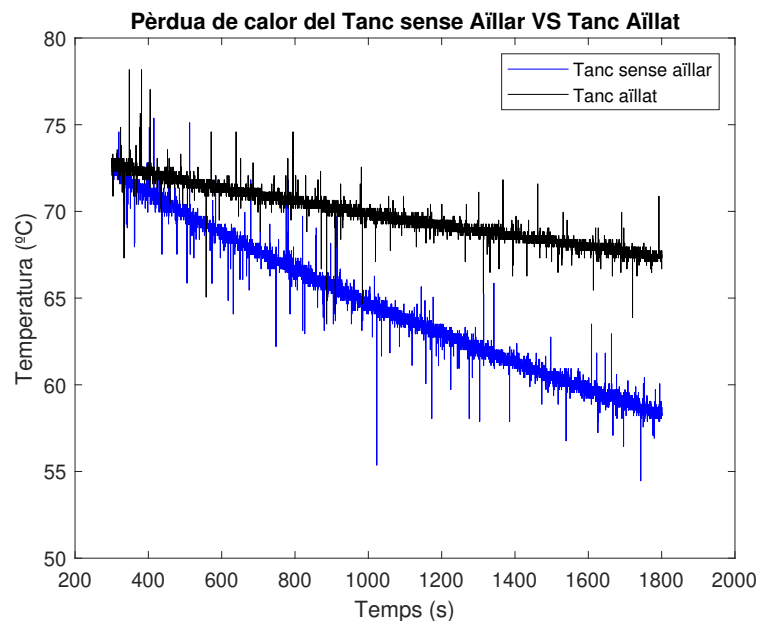


Figura 55: Pèrdues de calor del depòsit

En la figura es pot apreciar que el depòsit perd temperatura al llarg del temps. Veient aquest assaig, hi ha que determinar el coeficient global de pèrdues del sistema.

Per a la temperatura ambient es va registrar la temperatura amb el sensor de treball i es va guardar les dades per a tractar-les amb Matlab i obtindre un valor mitjà de la temperatura del laboratori.

Per al coeficient global de pèrdues (UA) s'ha optat per deixar en funcionament la planta calfant a una determinada temperatura. Passat un temps i la mida és estable, es talla el cabal d'aigua i l'escalfament de la potència elèctrica en el Simulink (*Llaz_Realimentacio_mesura-UA.slx*). D'aquesta manera s'assegura que sols es perd calor per les parets del depòsit i no hi ha una disminució de la temperatura degut a que els elements del depòsit agafen calor degut a aquest canvi tèrmic.

Per a obtindre un millor valor de coeficient de pèrdues del depòsit s'han realitzat diferents assajos a diferents temperatures per veure l'efecte sobre el depòsit. Aquests assajos es poden veure a la [Figura 56](#).

Els valors de UA calculats (*Ajust-UA-NouDeposit.m*) es poden veure a la [Taula 9](#):

Paràmetre d'ajust UA	Valor W/K
UA 60 °C	$0.54 \pm 2.7E-04$
UA 45 °C	$0.42 \pm 1.9E-04$
UA 30 °C	$0.48 \pm 5.1E-04$
UA mitjà	$0.48 \pm 3.2E-04$

Taula 9: Valors de UA per als assajos

Una vegada vist la taula comparativa de valors per als diferents assajos i obtingut un valor mitjà, es va representar les dades experimentals amb el valor mitjà per veure la diferència que presentava. El resultat es pot veure a la [Figura 57](#). Es pot veure que presenta xicotetes diferències i és el valor que s'emprarà per a els assajos de llaç obert.

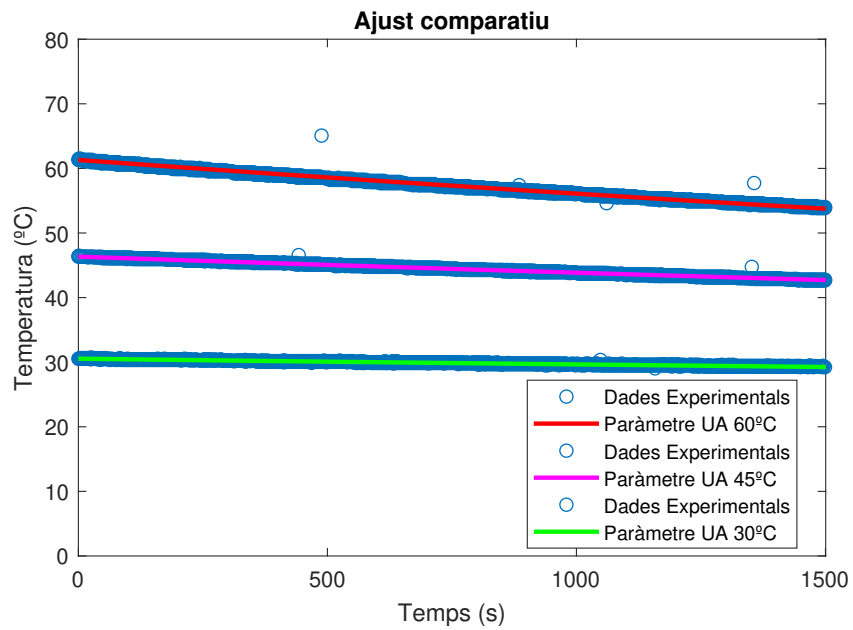


Figura 56: Assajos per a determinar el coeficient global de pèrdues

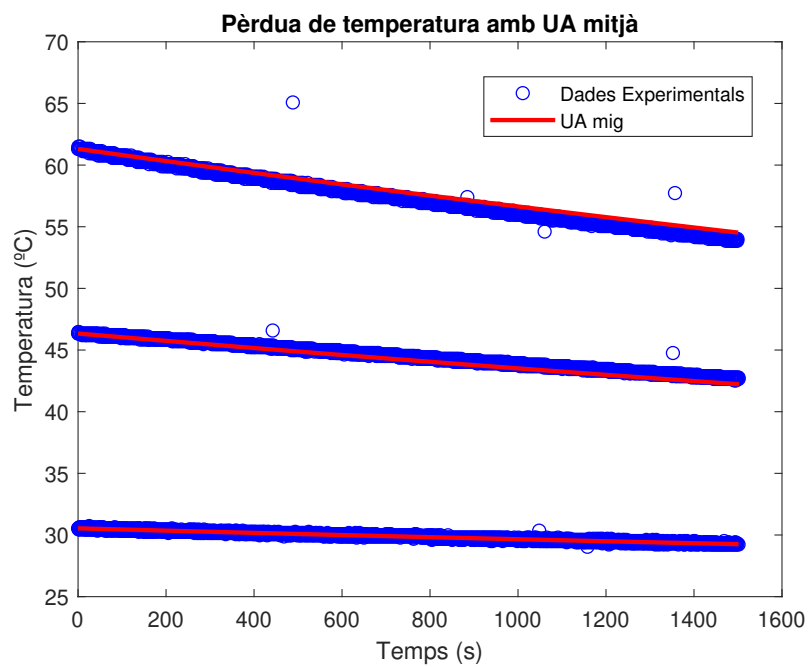


Figura 57: Representació gràfica del coeficient global de pèrdues mig als assajos

6.2 Assajos a la planta

Per als assajos es pot veure el muntatge final de la planta en la [Figura 20](#) i sobre la que es faran tots els assajos de la planta. El arxiu de Simulink que s'ha emprat (*Llaz_obert_dinamica_resistencia.slx*) registra les dades en temps real per a poder tractar-les posteriorment en Matlab, el arxiu utilitzat és (*Ajust_TR_nou_deposit.m*). A banda, es pot manipular la potència que oferix la resistència elèctrica i el cabal de la bomba. Veient en tot moment els canvis en una gràfica que està connectada als sensors de temperatura i al model matemàtic per veure els canvis que es produïsquen. L'arxiu de Simulink emprat es pot veure a la [Figura 58](#). Els subsistemes dels sensors de temperatura es poden veure a la [Figura 21](#), l'altre subsistema conté l'expressió del model matemàtic (40), es pot veure el subsistema a la [Figura 59](#).

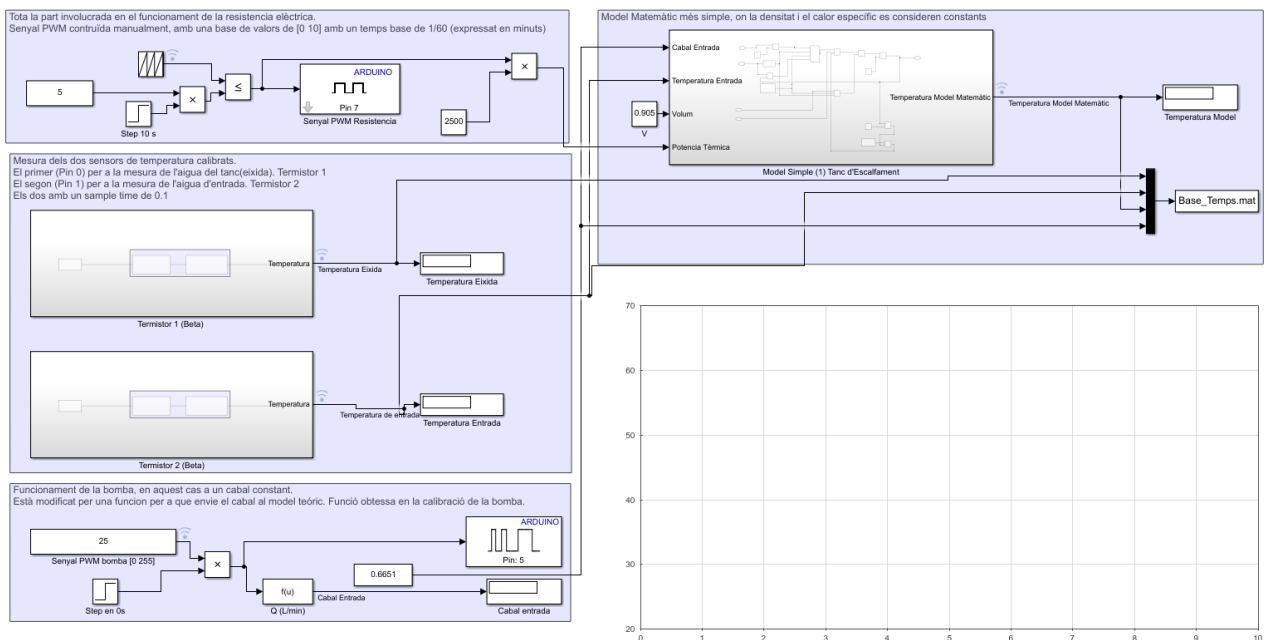


Figura 58: Simulink per als assajos de llaç obert

A aquests assajos es pretén veure quin és el temps base per a la resistència elèctrica que millor s'adapte al sistema, així com els canvis que es pugen produir variant el cabal i la potència que ofereix la resistència elèctrica.

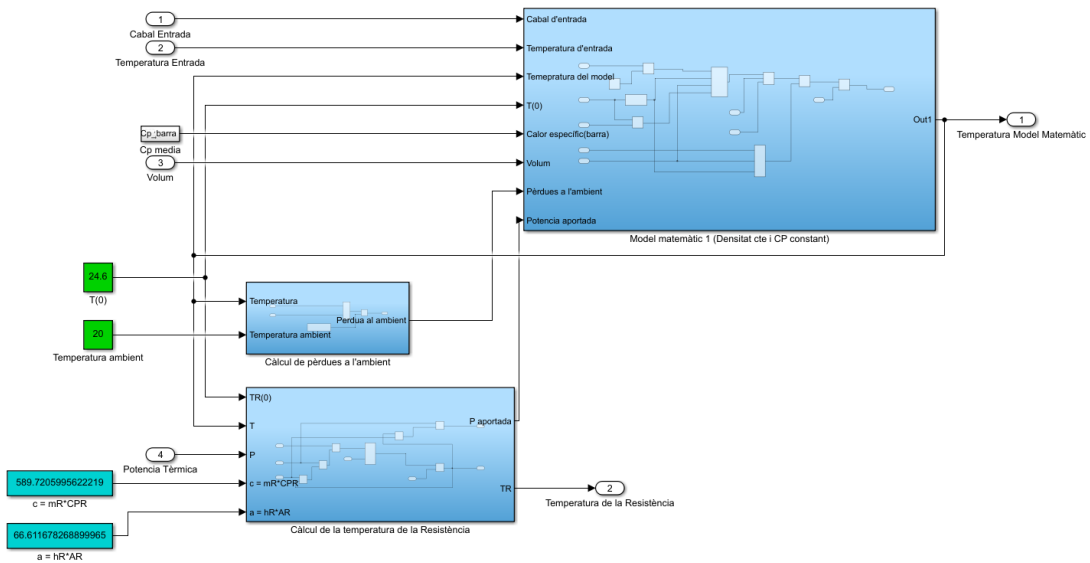


Figura 59: Subsistema del Simulink per als assajos de llaç obert que conté l'expressió (40) del model matemàtic més rigorós

6.2.1 Determinació del temps base de la resistència elèctrica

El temps base de la resistència serà fonamental determinar-ho per a que l'evolució del sistema s'assembla al model matemàtic i no presenti grans diferències. Per a aquesta tasca es faran 2 assajos on es modifiqui el temps base de la resistència, modificant els paràmetres de temps que es mostren a la Figura 44. Es presentaran 2 gràfiques on s'apreciï el comportament de la dinàmica de la resistència i a partir d'elles es triarà un temps base adequat per a que l'evolució del sistema tinga un desenrotllament continu.

Al primer assaig es té en compte un temps base de la resistència de 1 s, on el resultat es compara també amb la superposició de una corba amb un temps base de 30 s. El resultat es pot veure a la Figura 60 on podem veure que a un temps base alt la resposta de la temperatura oscil·la respecte l'estat estacionari i a temps base més baixos de 1 s no és necessari afinar tan el temps base, pel que el temps òptim per a treballar serà de 1 s.

En aquest assaig es pot veure que l'evolució de la corba del sistema i les interferències que s'aprecien són causades pel soroll del sensor de temperatura. També es pot apreciar un xicotet retard a l'inici de la simulació, degut a que la resistència elèctrica presenta una dinàmica en la transferència de calor al fluid. En el cas d'un temps base de 30 s s'aprecia el comportament dinàmic de la resistència que amb una potència

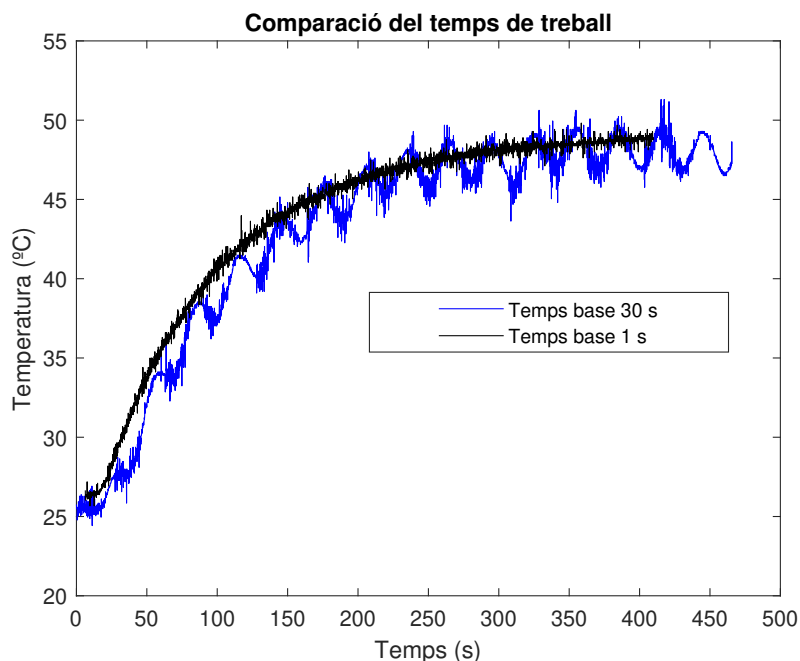


Figura 60: Comparació dels assajos de la resistència fets en l'anterior depòsit. (Condicions d'operació: Cabal de 0.8046 L/min, Potència tèrmica del 50 %, Temp. Entrada $\simeq 25.5^{\circ}\text{C}$)

del 50% està 15s encesa i la resta apagada, observant també el retard a l'inici de l'assaig.

6.2.2 Assajos amb cabal constant i potència variable

L'efecte del cabal és una gran problema a l'instal·lació hidràulica del procés. Es va optar per deixar el cabal constant a una única senyal PWM i determinar el cabal exacte per a aquesta senyal. En aquest cas es va optar per una senyal PWM de 125 determinant el cabal a partir del cabalímetre que ja s'ha descrit anteriorment i s'ha obtingut un cabal de 1.01 L/min que es farà emprar per als assajos del depòsit.

En els primers assajos de llaç obert, a la [Figura 60](#) s'aprecia el comportament dinàmic de la resistència elèctrica al iniciar l'assaig. S'han realitzat 4 assajos de llaç obert augmentant la potència tèrmica, des de una potència del 25% fins una potència del 100%. Aquests assajos es poden veure a la [Figura 61](#).

En tots els assajos de potència s'aprecia el comportament dinàmic a l'inici de l'assaig, per tal d'obtenir aquest comportament s'han determinat els paràmetres de les

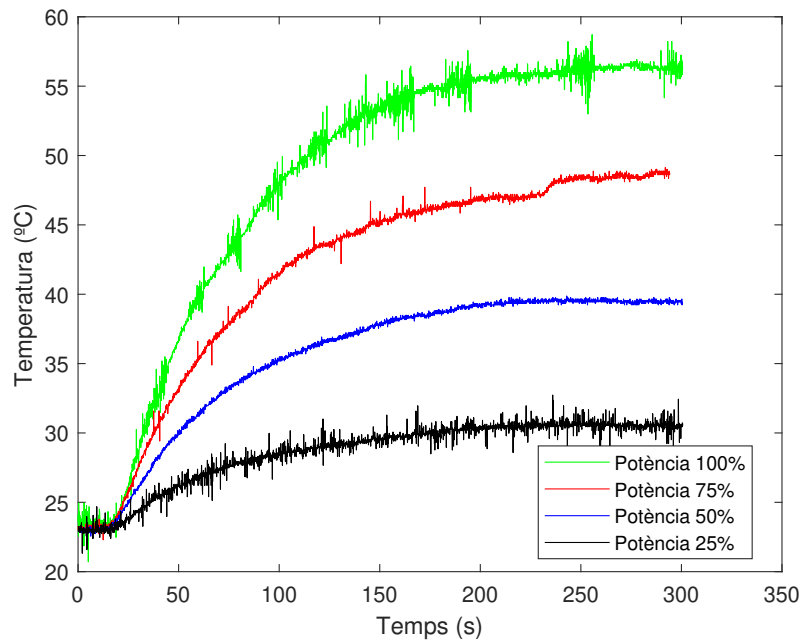


Figura 61: Representació gràfica dels assajos de llaç obert a diferents potències (Condicions d'operació: Cabal 1.01 L/min, Temp.Entrada $\simeq 23.3$ °C, Temp.Ambient $\simeq 23$ °C)

expressions conjuntes (39),(40) a partir dels assajos de la Figura 61.

Els valors d'ajust ($Ajust_TR_nou_deposit.m$) que s'han obtingut es veuen en la Taula 10.

En la Figura 62 es pot apreciar la superposició del model matemàtic amb els assajos reals, cada gràfic amb el seu valor d'ajust. En la Figura 63 es pot veure l'ajust del model però aquesta vegada amb el valor mitjà. En aquesta última no s'aprecia molt la diferència pel que per veure totes les comparacions possibles, es representarà en una única gràfica tots els models matemàtics per veure les diferències i l'evolució del model matemàtic millorat.

Tot això es pot veure en la Figura 64. En aquesta gràfica es pretén comparar tots els models matemàtics obtinguts durant el treball i comparar si el seu resultat és capaç de predir la realitat, des del model més simple amb densitat i calor específica constant fins al model amb pèrdues de calor i el comportament dinàmic de la resistència. Com es pot veure, la temperatura de la resistència és calculada per Matlab per a poder ajustar els paràmetres. Per a un millor ajust caldria poder prendre dades reals de

Assaig de potència	a	b
25%	97.39 ± 14.09	829.55 ± 60.71
50%	41.82 ± 2.36	405.19 ± 16.17
75%	53.57 ± 2.71	582.01 ± 18.89
100%	73.67 ± 8.02	542.13 ± 34.11
Valor mitjà	66.61 ± 6.80	589.72 ± 32.47

Taula 10: Ajust dels paràmetres de la resistència

la temperatura de la resistència.

Per a la validació del model matemàtic amb tots els paràmetres determinats, s'ha realitzat un assaig considerant un temps base de la resistència de 30 s. El resultat es pot veure a la [Figura 65](#). El model matemàtic no acaba de seguir fidelment al sistema però pot predir correctament el seu funcionament (*Assajos_model_VS_realitat.slx*). És possible que la fallada siga pel fet que el cabal no està ben controlat.

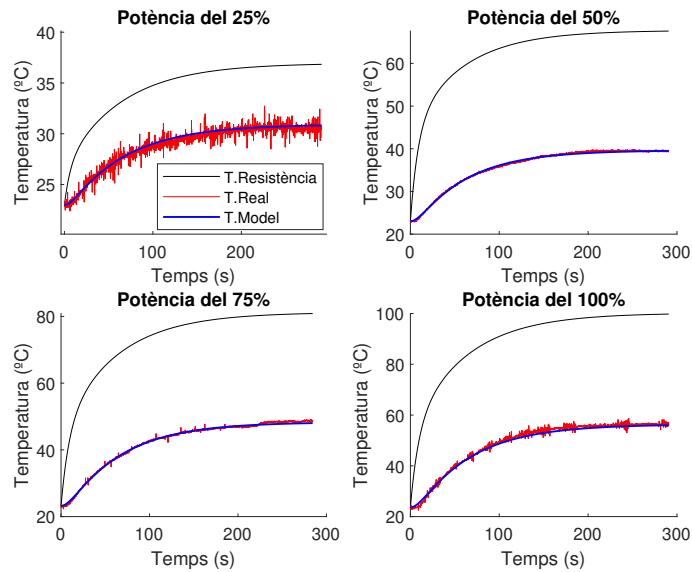


Figura 62: Ajust del model matemàtic (40) considerant la dinàmica de la resistència elèctrica individual (Condicions d'operació: Cabal 1.01 L/min, Temp.Entrada $\simeq 23.3$ °C, Temp.Ambient $\simeq 23$ °C)

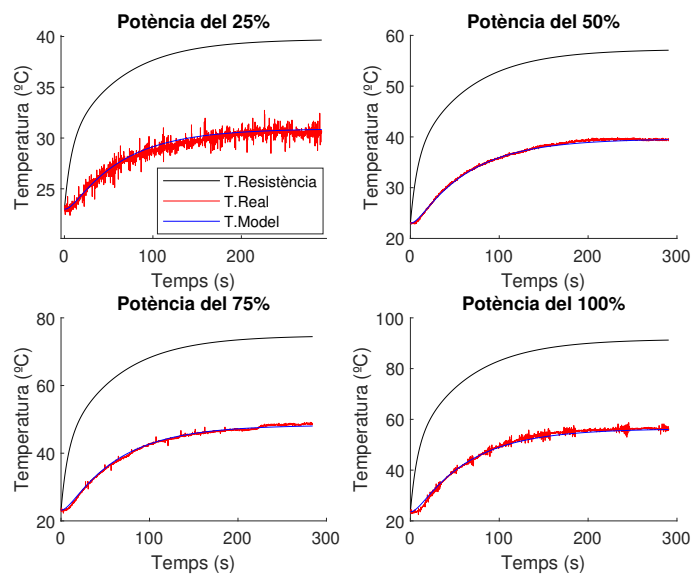


Figura 63: Ajust del model matemàtic (40) considerant la dinàmica de la resistència elèctrica mitjana (Condicions d'operació: Cabal 1.01 L/min, Temp.Entrada $\simeq 23.3$ °C, Temp.Ambient $\simeq 23$ °C)

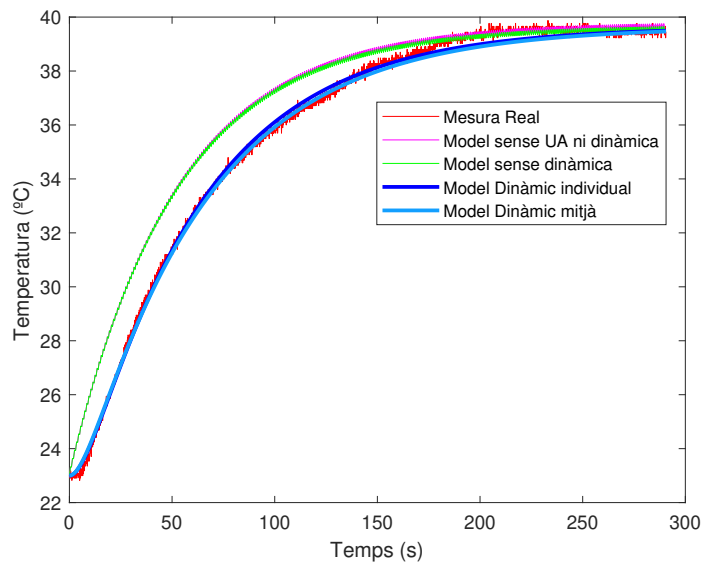


Figura 64: Comparació dels diferents models matemàtics a l'assaig del 50% de potència. (Condicions d'operació: Cabal 1.01 L/min, Temp.Entrada \simeq 23.10 °C, Temp.Ambient \simeq 23.50 °C)

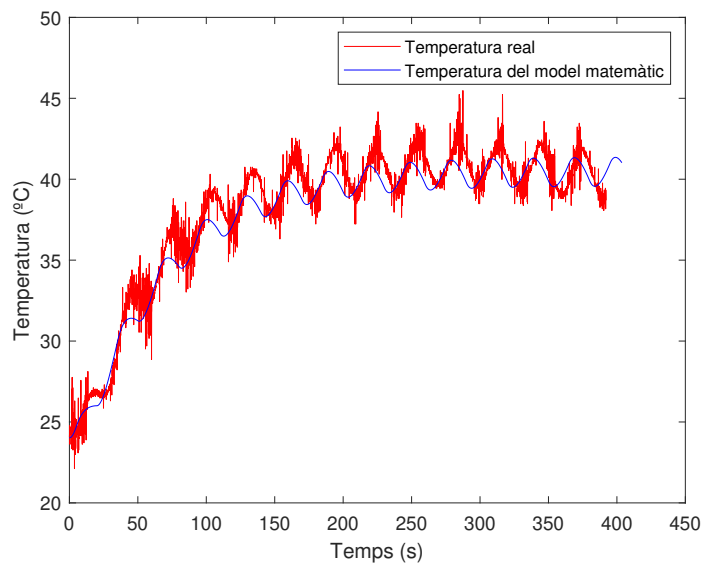


Figura 65: Validació del model matemàtic amb una potència del 50%. (Condicions d'operació: Cabal 1.01 L/min, Temp.Entrada \simeq 23.10 °C, Temp.Ambient \simeq 23.50 °C)

7 Disseny del sistema de control

7.1 Identificació de la planta per a la sintonització del controlador

Per a la sintonització del controlador s'ha passat a identificar la planta de treball amb l'ajuda dels gràfics presentats al punt anterior i Matlab, a més s'ha realitzat assajos de potència del 5, 10 i 20% per obtenir alguns paràmetres en aquestes condicions de treball (*Identificacio_NouDeposit.m*).

Les figures que s'han obtingut són semblants però variant l'estat estacionari en funció de la potència aplicada, pel que es passa a presentar les figures de la identificació de sistemes. En la primera [Figura 66](#) es veu una quantitat de soroll molt gran i per això la identificació no pot reproduir el 100% de l'assaig però s'aprecia el comportament de la planta i es veu que el model s'ajusta a la realitat. Per altra part, un assaig que no té tant de soroll i per tant una bona identificació es l'assaig corresponent a una potència tèrmica del 50%. La identificació es pot veure a la [Figura 70](#). La resta de figures es poden veure a les següents pàgines.

Aquesta identificació permet obtenir la funció de transferència de la planta que explica el comportament d'aquesta en el temps. L'ajust que s'ha realitzat correspon a una funció de transferència primer ordre amb temps mort (41).

En vista de la quantitat de soroll que hi ha provocat pels equips s'obindrà un controlador *PI*, ja que l'acció derivativa faria impossible el control de la planta, encara que es pot solucionar aplicant un filtre en la mesura. A banda, per a la dinàmica lenta del sistema un controlador *PI* es suficient per a controlar la planta.

$$G(s) = \frac{K_p}{1 + \tau_p \cdot s} \cdot \exp(-t_d \cdot s) \quad (41)$$

Es va obtenir els paràmetres de l'expressió (41) per a cadascun dels assajos de llaç obert, es presenten en la [Taula 11](#).

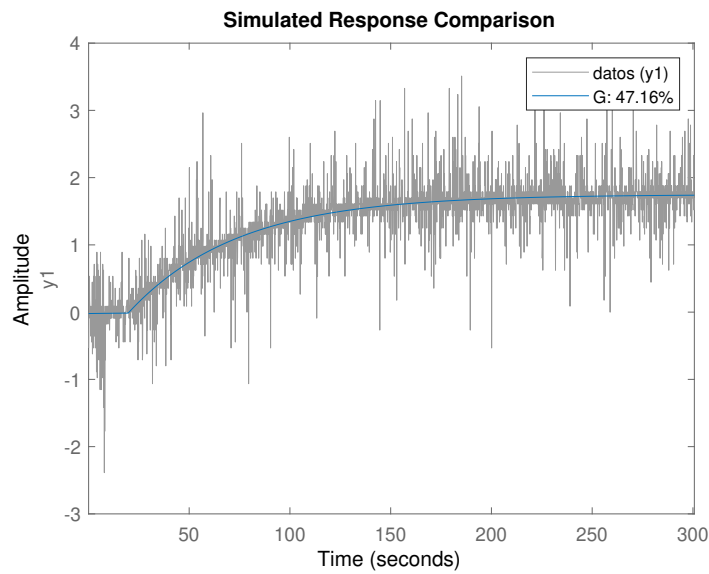


Figura 66: Identificació de la funció de transferència de la planta a una potència del 5%

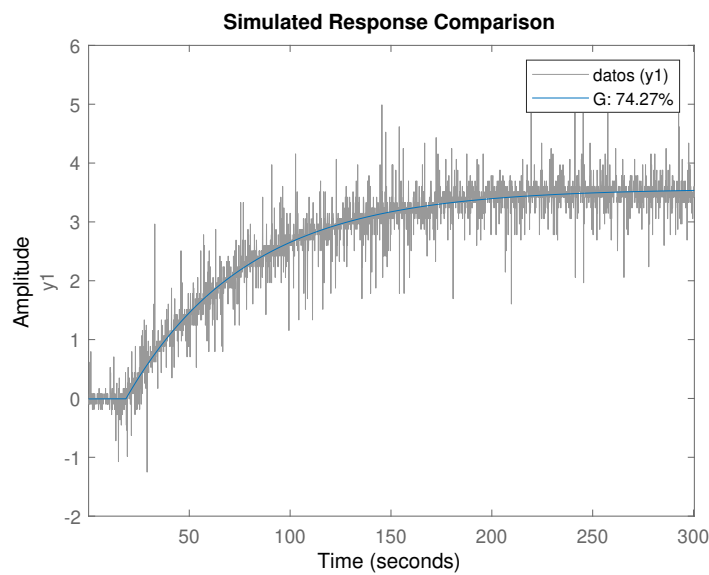


Figura 67: Identificació de la funció de transferència de la planta a una potència del 10%

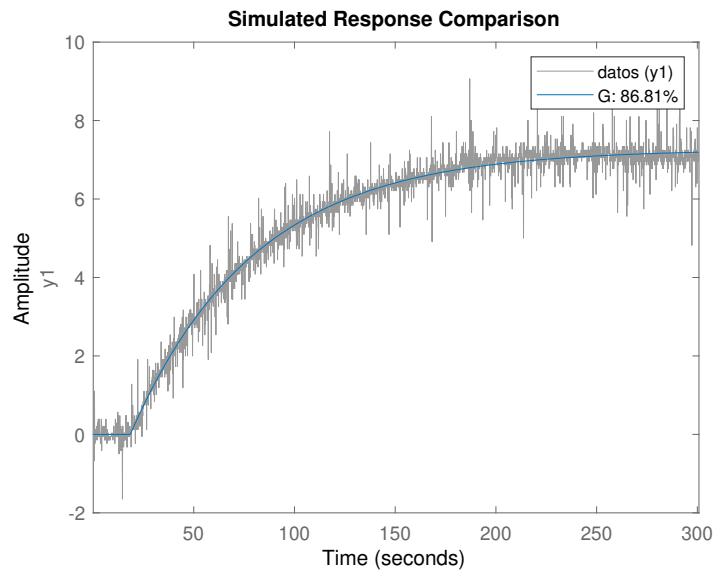


Figura 68: Identificació de la funció de transferència de la planta a una potència del 20%

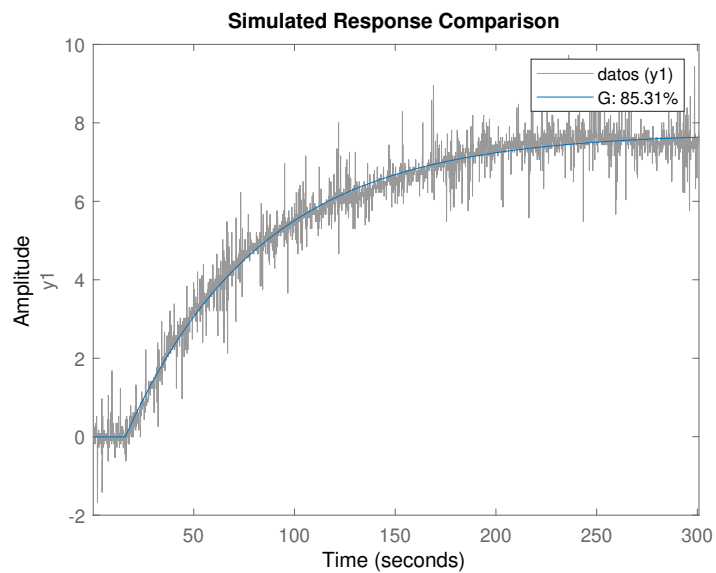


Figura 69: Identificació de la funció de transferència de la planta a una potència del 25%

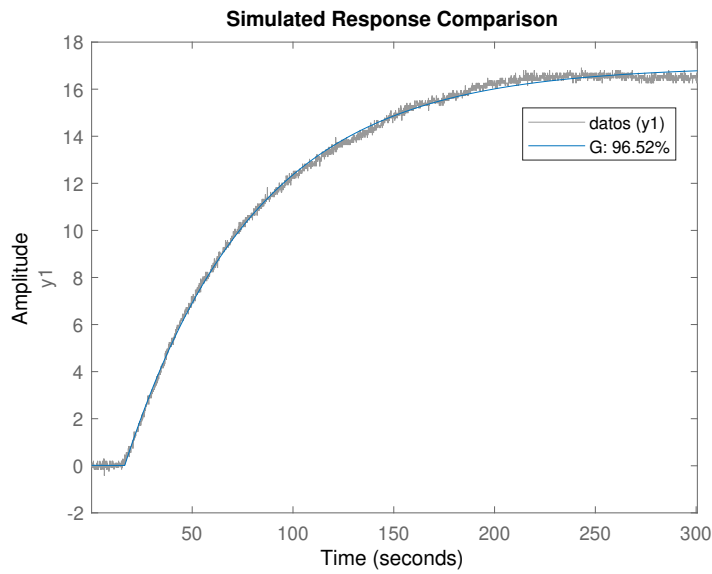


Figura 70: Identificació de la funció de transferència de la planta a una potència del 50%

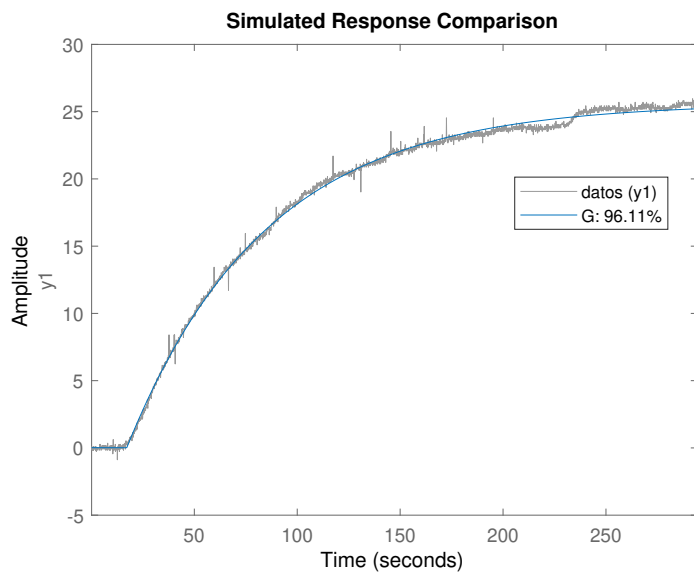


Figura 71: Identificació de la funció de transferència de la planta a una potència del 75%

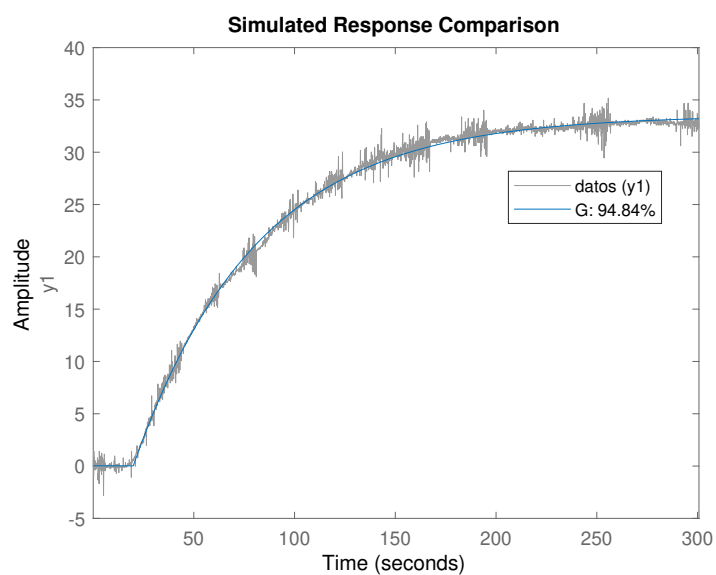


Figura 72: Identificació de la funció de transferència de la planta a una potència del 100%

Assaig de potència	K_p	τ_p	t_d	Ajust %
5%	0.37	54.26	8.01	47.16
10%	0.36	59.75	8.49	74.27
20%	0.36	61.53	8.39	86.81
25%	0.31	67.74	5.88	85.31
50%	0.34	64.15	6.43	96.52
75%	0.34	67.42	7.07	96.11
100%	0.31	49.76	9.54	94.84
Mitjana	0.34	62.07	7.69	—

Taula 11: Valors dels paràmetres d'identificació de sistemes

7.2 Sintonització del controlador

Amb els paràmetres de l'expressió de la funció de transferència de primer ordre amb temps mort es passa a sintonitzar el controlador per tres mètodes coneguts amb Matlab (*Sintonitzacio_Contraldor_NouDeposit_PI.m*), el primer el mètode de Ziegler-Nichols de llaç obert, després pel mètode de Cohen-Coon i per últim López i col·laboradors, en les seues 3 mesures de ISE, IAE i ITAE. Els diferents valors es poden veure a la [Taula 12](#).

Mètode de sintonització	K_c	τ_i
ZN-LA	21.26	25.60
CC	21.51	20.35
ISE	28.30	26.96
IAE	22.58	23.32
ITAE	19.34	22.26

Taula 12: Paràmetres de la sintonització del controlador PI

A l'hora de ficar aquestes dades en el controlador PI programat en Simulink, hi ha que transformar els paràmetres del controlador de K_c i τ_i al valor demanat de P i I , sent un xicotet càlcul on $K_c = P$ i $I = \frac{1}{\tau_i}$.

7.3 Control per realimentació de la planta

La tècnica de control que va a emprar-se en la planta és el control per realimentació. Per a triar el millor controlador sintonitzat es durà a terme un assaig en llaç tancat on s'estabilitzarà la temperatura d'entrada per a que tots els assajos siguin reproduïbles en Simulink (*Control_Realimentacio.slx*), en aquest cas s'estabilitzarà la planta a 25 °C. Es canviarà el punt de consigna cada 10 °C, produint una pujada de temperatura en el sistema i una vegada aplegat a l'últim escaló es gelarà en el mateix assaig per veure com respon el sistema de control tant en pujades com baixades del punt de consigna. L'arxiu de Simulink es pot veure a la [Figura 73](#).

Tota aquesta descripció es pot veure a la [Figura 74](#) on s'ha eliminat el controlador sintonitzat per IAE , ja que en la primera baixada del punt de consigna la bomba hidràulica de l'instal·lació va fallar i subministrava un cabal menor al que estava fixat en l'assaig, fent aquest assaig no comparable amb la resta. El controlador ha treballat de manera continua al llarg de l'assaig. L'acció de control a l'eixida del controlador PI es pot veure a la [Figura 75](#). Com es pot veure l'acció de control en el controlador dissenyat per $ITAE$ presenta una molta millor resposta que la resta de controladors.

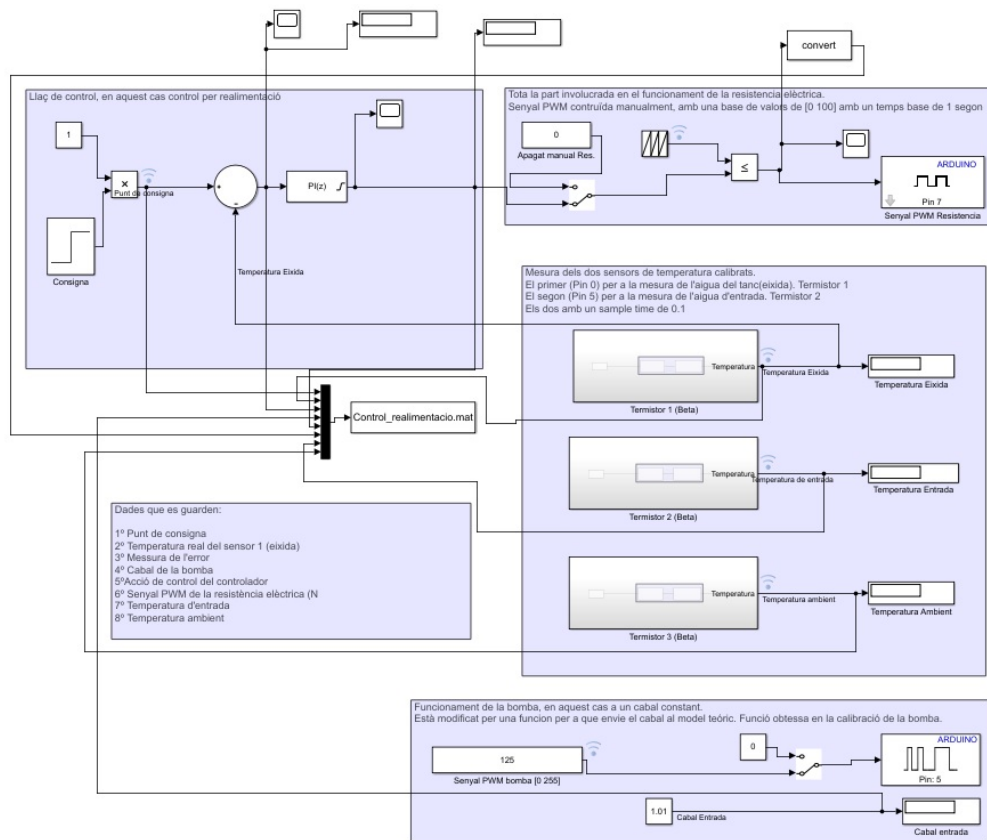


Figura 73: Llaç tancat de control implementat en Simulink per produir canvis en el punt de consigna. Els subsistemes dels sensors de temperatura es poden veure a la Figura 21

A la vista dels resultats de la sintonització (*Comparacio_Controladors.m*), el millor controlador és el sintonitzat per López i col·laboradors el mètode de *ITAE*, ja que com s'aprecia a la Figura 74 presenta un menor pic de ultrapassament que la resta, tant en pujades com baixades de la consigna, i tarda menys en establitzar la temperatura. Tractant-se d'una dinàmica lenta al sistema, ja que cada escaló aplicat tarda sobre 5 min en establitzar la temperatura, interessa que la mesura s'estabilitze prompte i no presente un gran pic d'ultrapassament. Aquest pic d'ultrapassament pot ser degut a que el controlador estiga saturat i per tant, l'acció integral acumula un error molt gran en la lectura i fins que no compense aquest error, la potència oferida a la resistència és molt alta, provocant aquest pic.

Per a poder comparar resultats, s'ha fet un experiment on es compararan les respostes del controlador *ITAE* avaluant-lo de manera contínua i treballant de manera discreta amb una presa de mostres cada 0.1 s. El resultat canviant el punt de consig-

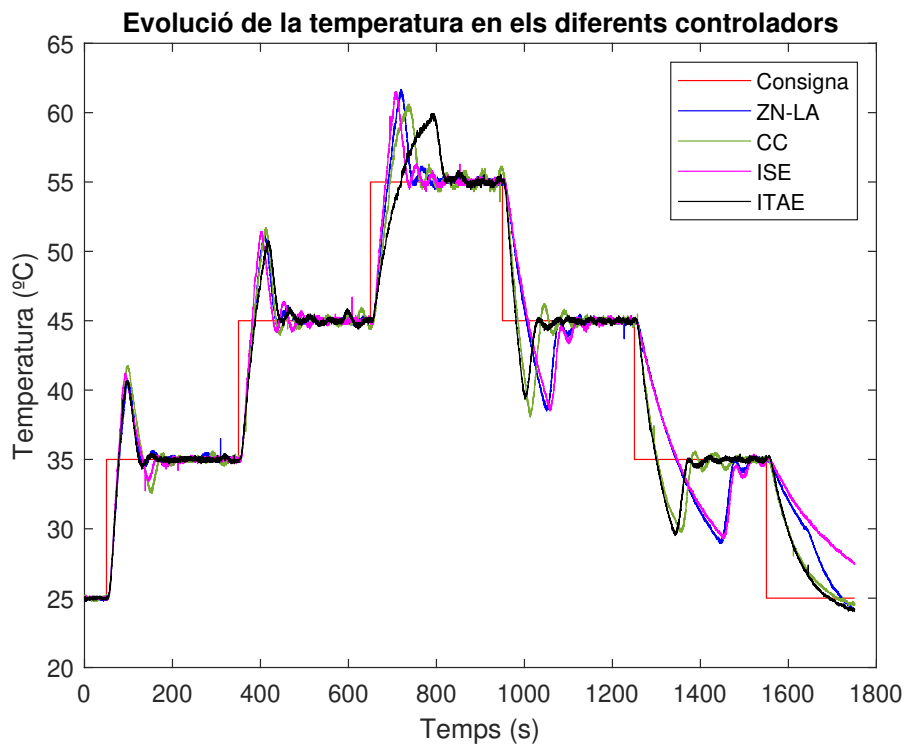


Figura 74: Comparació del punt de consigna dels diferents controladors sintonitzats. (Condicions d'operació: Cabal 1.01 L/min, Temp. Entrada $\approx 23.50^{\circ}\text{C}$, Temp. Ambient $\approx 21.60^{\circ}\text{C}$)

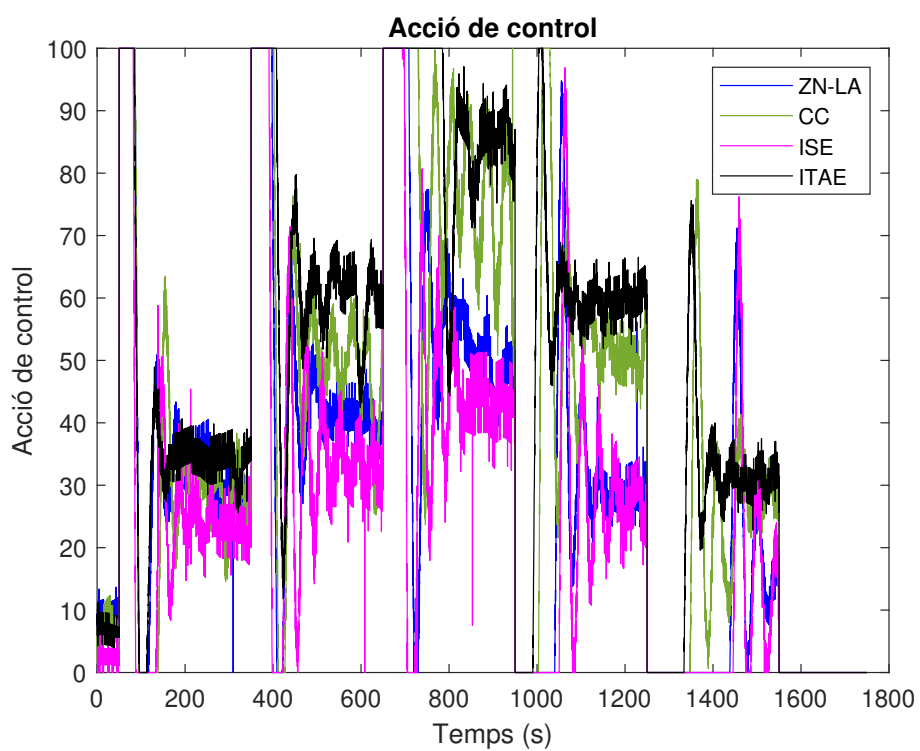


Figura 75: Comparació de l'acció de control dels diferents controladors sintonitzats. (Condicions d'operació: Cabal 1.01 L/min, Temp.Entrada $\simeq 23.50^{\circ}\text{C}$, Temp.Ambient $\simeq 21.60^{\circ}\text{C}$)

na es pot veure a la [Figura 76](#), on presenta una millor resposta el controlador avaluat de manera contínua. L'acció de control es pot veure a la [Figura 77](#), presenta una menor acció de control el *ITAE* discret que el continu però la resposta del sistema és millor treballant de manera contínua.

Per a millorar aquest controlador es faran 3 assajos més al sistema, el primer aplicant el algoritme *anti wind – up*, després aplicant un filtre en la mesura, que deixi passar les freqüències baixes, degut al soroll que s'aprecia en els sensors i per últim combinant l'algoritme i el filtre. Una vegada realitzats els assajos es compararan els resultats per veure si s'ha millorat la resposta del sistema.

El resultat dels assajos representat en Matlab (*Millora_controladors.m*) es pot veure a la [Figura 78](#), on la diferència entre aplicar filtre de la mesura al sistema no millora la resposta del control, però suavitza la lectura i evita pics grans de soroll. Per altra part, l'efecte d'aplicar l'algoritme *anti wind – up* veu com al deixar d'acumular error en l'acció integral i apropar-se al punt de consigna comença a modular la senyal i el pic d'ultrapassament és molt menor, millorant la resposta del controlador i estabilitzant la temperatura en un temps molt més curt. Per últim, l'efecte d'aplicar el filtre sobre l'algoritme no millora molt més la resposta però suavitza la lectura en la planta i l'efecte de la dinàmica és menyspreable en una procés amb una dinàmica lenta.

A l'hora de triar la millora del controlador *ITAE*, es pot optar per l'algoritme *anti wind – up* o el filtre de la mesura més l'algoritme, ja que les diferències que s'aprecien a la [Figura 78](#) són degudes a variacions en la bomba hidràulica a l'assaig de control, pel que és una pertorbació constant en el sistema. L'acció de control es un indicatiu que el controlador *ITAE* aplicant l'algoritme *anti wind – up* i el filtre de la mesura és el millor per a la planta, açò es pot veure a la [Figura 79](#).

En conclusió, el millor controlador que actuaria sobre la planta seria el controlador sintonitzat pel mètode de *ITAE* aplicant un algoritme *anti wind – up* per a evitar la saturació de l'acció integral i si es vol un filtre en la mesura.

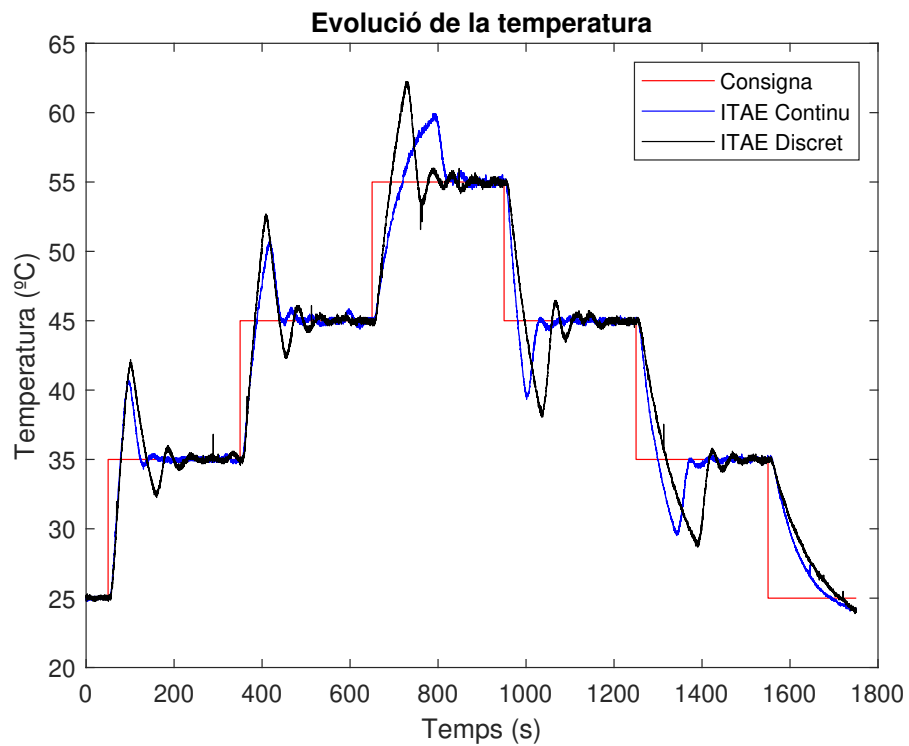


Figura 76: Comparació del punt de consigna de treball continu front discret. (Condicions d'operació: Cabal 1.01 L/min, Temp. Entrada $\approx 23.50^\circ\text{C}$, Temp. Ambient $\approx 21.60^\circ\text{C}$)

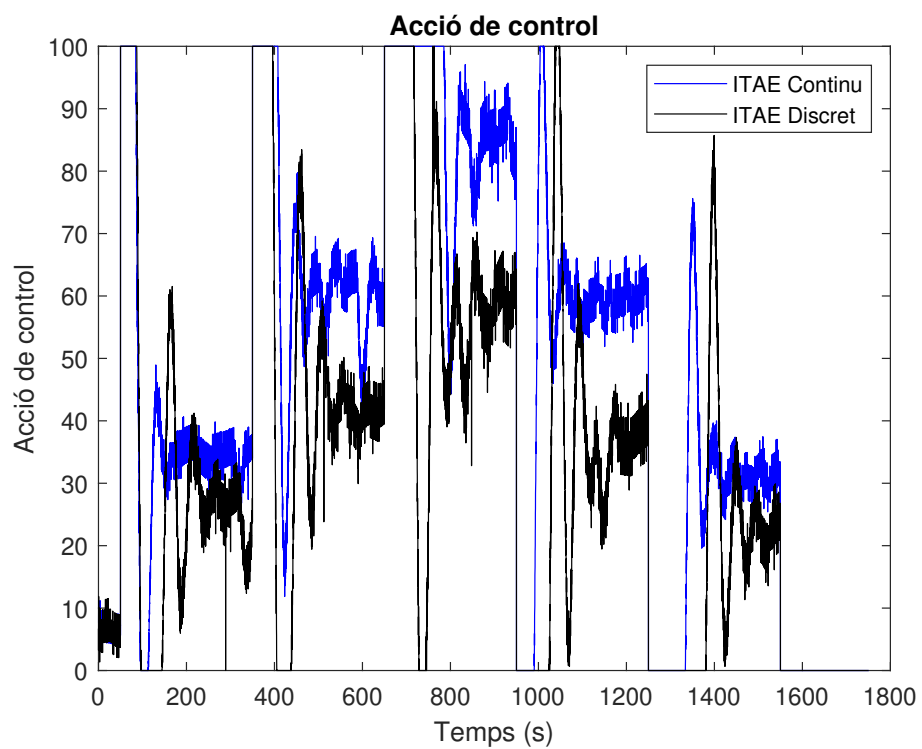


Figura 77: Comparació de l'acció de control del treball continu front discret. Representació de l'acció de control. (Condicions d'operació: Cabal 1.01 L/min, Temp.Entrada $\approx 23.50^{\circ}\text{C}$, Temp.Ambient $\approx 21.60^{\circ}\text{C}$)

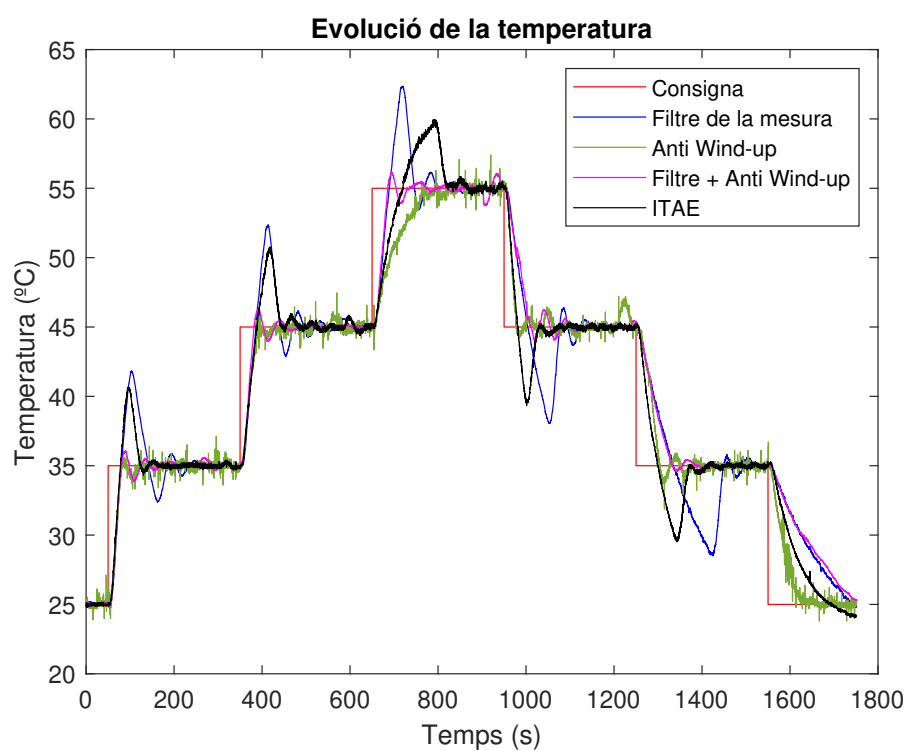


Figura 78: Millora del controlador *ITAE*. (Condicions d'operació: Cabal 1.01 L/min, Temp. Entrada $\simeq 19.31$ °C, Temp. Ambient $\simeq 21.15$ °C)

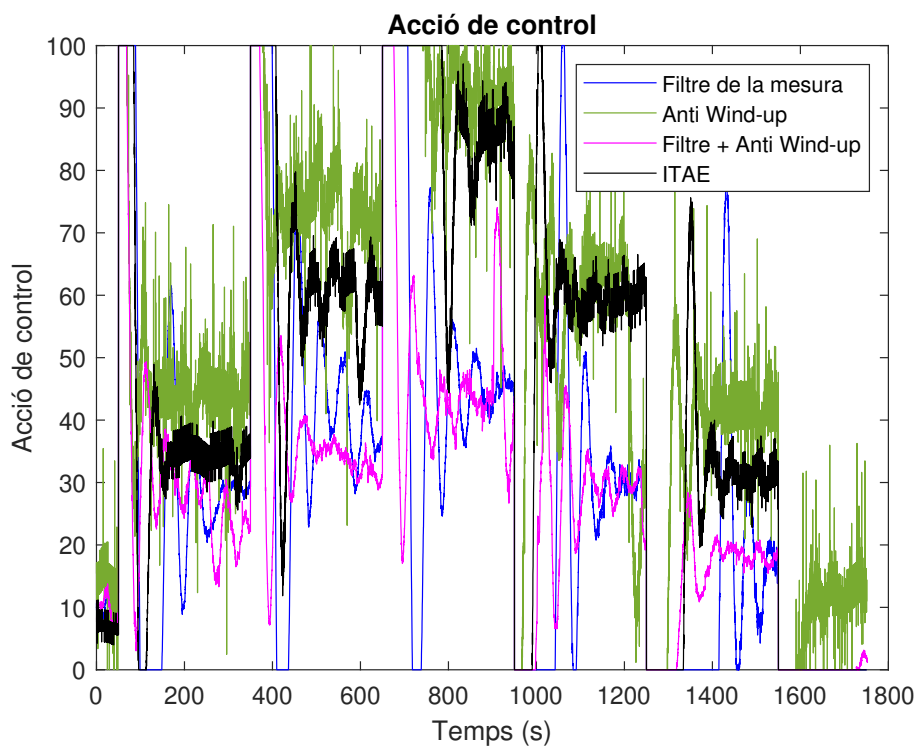


Figura 79: Comparació de les accions de control *ITAE*. (Condicions d'operació: Cabal 1.01 L/min, Temp.Entrada \simeq 19.31 °C, Temp.Ambient \simeq 21.15 °C)

8 Pressupost de la planta

El pressupost emprat es pot veure a la [Taula 13](#).

Descripció	Quantitat	Preu unitari (€)	Preu total (€)
Arduino Mega 2560 R3	1	33.58	33.58
Resistència elèctrica 2500 W	1	16.94	16.94
Bomba 12 V 4 L/min	1	10.29	10.29
Cabàlmetre YF-S401	1	18.15	18.15
Sensor Termistor NTC 10K Waterproof	3	3.04	9.12
Solid State Relay-40A (3-32 V DC Input)	1	9.12	9.12
Cable USB 2.0 terminals A i B 1.8 m	1	2.41	2.41
Breadboard-Full-Size (Bare)	1	6.59	6.59
Cable Jumper 60 peces M-M Pack	1	3.10	3.10
Díode rectificador	1	0.08	0.08
Transistor TIP141	1	0.58	0.58
Resistència 10 000 Ω	3	0.04	0.12
Font d'alimentació 12 V-6 A	1	9.99	9.99
Soports metàl·lics	3	12	36
Pinces metàl·liques	3	8	24
Agitador magnètic	1	30	30
Tubs de conducció	–	–	0.40
Depòsit xicotet	2	1	2
Depòsit de plàstic	3	3	9
Espuma de poliuretà	1	4.99	4.99
Preu total del projecte			226.46

Taula 13: Pressupost de la planta i equips

El pressupost té un preu raonable per als equips que s'han emprat i amb la fi que ha sigut dissenyat. No està inclòs el preu d'un ordinador, ja que normalment els alumnes ja tenen un i la llicència de Matlab tampoc.

9 Conclusions

Del treball realitzat es pot concloure:

- La planta de treball ha pogut construir-se des de zero. Amb l'ús d'impressores 3D s'ha obtingut la peça del sobreeixidor i el dipòsit aïllat a partir de l'espuma de poliuretà per a reduir les pèrdues de calor a l'ambient.
- S'ha pogut entendre, fer funcionar, calibrar i caracteritzar els equips de treball que posteriorment s'han emprat al llarg del treball.
- Ha sigut possible operar en la planta realitzant tots els experiments que es requerien i amb l'ús d'equips de baix cost.
- S'ha obtingut el model matemàtic de la planta més rigorós possible amb l'evolució etapa a etapa per a adaptar-ho a la realitat del procés.
- La caracterització de la planta ha fet possible determinar tots els paràmetres que influeixen en ella i d'aquesta manera conèixer-la molt de prop.
- Els assajos de llaç obert han permès identificar la funció de transferència de la planta de primer ordre amb temps mort.
- Amb la identificació de la planta s'ha pogut sintonitzar el controlador per diferents mètodes, comparant-los entre ells i triant el millor per a treballar en la planta.
- El controlador *ITAE*, treballant en continu, ha resultat ser el millor controlador per a la planta i sobre el que s'ha millorat aplicant el filtre en la mesura i l'algoritme *Anti wind – up* per a millorar la resposta del controlador.

El treball ha sigut presentat a 2 congressos, que es detallen a continuació:

- VII Congreso I+D+i Campus de Alcoy "Creando Sinergias". Amb títol del treball "Diseño, montaje y puesta a punto de sistemas de control de bajo coste". On es va rebre el premi a millor treball de fi de grau.
- V Congreso de Innovación Docente en Ingeniería Química. Amb títol del treball "Experiencias en el uso de Arduino y equipamiento de bajo coste para el aprendizaje de control de procesos". Aquest congrés se celebrarà del 22 al 24 de gener de 2020 a Santiago de Compostel·la.

10 Treballs futurs

Durant la realització del treball s'ha observat que es poden millorar molts aspectes d'aquest. Es detallen en una llista a continuació:

- Controlar tan bé com siga possible el cabal oferit per les bombes i poder regular-lo per a treballar a diferents cabals.
- Controlar el nivell del depòsit d'alimentació per a evitar en la mesura que siga possible que varie la columna d'aigua que hi ha sobre la bomba i afecte el cabal.
- Aconseguir una lectura correcta del cabalímetre funcionant a través de la comunicació de Simulink IO, ja que només funciona en manera externa.
- Millorar la peça del sobreexidor, perquè pugua sostindre tots els elements interiors al depòsit, com per exemple la resistència, el sensor i la conducció d'alimentació i millorar la metodologia per a fabricar el depòsit aïllat.
- Fabricar un agitador magnètic, ja que el que s'ha estat gastant durant els assajos ha sigut un proporcionat pel laboratori del departament d'Enginyeria Química i Nuclear.
- Utilitzar diferents sensors de temperatura i poder caracteritzar-los correctament, tant per a conèixer la seua dinàmica com veure com ofereix millors prestacions.
- Aconseguir una bona metodologia per a obtindre la dinàmica dels sensors, ja que una dinàmica lenta afectaria el procés si no es té en compte.
- Per a millorar el model matemàtic caldria prendre dades experimentals de la temperatura en la superfície de la resistència elèctrica.
- A causa de l'accident ocorregut durant el treball, caldria incloure elements de seguretat per a evitar aquests accidents.
- Intentar utilitzar un programari d'ús lliure en comptes de la llicència de Matlab, com per exemple de Xcos.

Referències

- [1] La automática y sus aplicaciones – Ceautomática. (2019). Retrieved from <https://www.ceautomatica.es/la-automatica-y-sus-aplicaciones/>
- [2] Coulson, J., Richardson, J., & Coulson, J. (2009). Coulson & Richardson's chemical engineering (4th ed., pp. 1-16). Amsterdam: Butterworth-Heinemann.
- [3] Dónde se utiliza la Automática – Ceautomática. (2019). Retrieved from <https://www.ceautomatica.es/la-automatica-y-sus-aplicaciones/donde-se-utiliza-la-automatica/>
- [4] Areas — IFAC · International Federation of Automatic Control. (2019). Retrieved from <https://www.ifac-control.org/about/areas>
- [5] ARTICLES, T., PRODUCTS, N., ELECTRONICS, G., PROJECTS, C., MICRO, E., & Lectures, V. et al. (2019). Industrial Instrumentation and Control: An Introduction to the Basic Principles. Retrieved from <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/instrumentation-and-control-an-introduction-to-the-basic-principles/>
- [6] Pablo Turmero, M. (2019). Terminología de instrumentación - Monografias.com. Retrieved from <https://www.monografias.com/trabajos104/terminologia-instrumentacion/terminologia-instrumentacion.shtml>
- [7] Hughes, T. (2007). Measurement and control basics (3rd ed., pp. 1-9). Research Triangle Park, NC: ISA.
- [8] Hughes, T. (2007). Measurement and control basics (3rd ed., pp. 2). Research Triangle Park, NC: ISA.
- [9] Hughes, T. (2007). Measurement and control basics (3rd ed., pp. 4). Research Triangle Park, NC: ISA.
- [10] Marlin, T. (2000). Process control (2nd ed., pp. 245-250). Boston: McGraw-Hill.
- [11] Hughes, T. (2007). Measurement and control basics (3rd ed., pp. 53-64). Research Triangle Park, NC: ISA.
- [12] Arduino - Education. (2019). Retrieved 23 October 2019, from <https://www.arduino.cc/en/Main/Education>
- [13] MathWorks - Solutions. (2019). Retrieved 23 October 2019, from https://es.mathworks.com/solutions.html?s_tid=gn_sol

- [14] Simulink - Simulación y diseño basado en modelos. (2019). Retrieved 23 October 2019, from https://es.mathworks.com/products/simulink.html?s_tid=srchtitle
- [15] Termistor NTC con Arduino como sensor de temperatura - Geek Factory. (2019). Retrieved 4 November 2019, from <https://www.geekfactory.mx/tutoriales/tutoriales-arduino/termistor-ntc-con-arduino-como-sensor-de-temperatura/>
- [16] Arduino Mega 2560. (2019). Retrieved from <https://www.bigtronica.com/centro/sistemas-arduino/tarjetas-arduino/11-arduino-mega-2560-5053212000110.html>
- [17] Steinhart, J., & Hart, S. (1968). Calibration curves for thermistors. *Deep Sea Research And Oceanographic Abstracts*, 15(4), 497-503. doi: 10.1016/0011-7471(68)90057-0
- [18] Jones, F., & Harris, G. (1992). ITS-90 density of water formulation for volumetric standards calibration. *Journal Of Research Of The National Institute Of Standards And Technology*, 97(3), 335. doi: 10.6028/jres.097.013
- [19] Yaws, C. (2001). *Chemical properties handbook* (p. 79). New York: McGraw-Hill.