

## Resum

L'increment del preu dels recursos de la llar tals com el gas, l'electricitat i l'aigua ha estat una constant en els últims anys. L'estalvi de l'electricitat ha estat un ampli tema d'estudi i, per aquest motiu, ja existeixen en el mercat un conjunt d'elements que el fan possible a un preu assequible. També en els últims anys, la construcció d'habitatges amb aïllaments que disposen de rendiments tèrmics elevats ha sigut una preocupació per a arquitectes i enginyers. No obstant l'afany per estalviar aigua no ha estat, ni de bon tros, a l'altura de l'interès de l'estalvi dels altres dos bens domèstics.

L'Agència Catalana de l'Aigua vol incrementar un 5,2% el cànon de l'aigua el 2013 i pretén incrementar-lo fins a un 25% en quatre anys. També a nivell nacional es prediu que el preu de l'aigua augmenti fins a un 50%. Els compromisos assolits amb la UE en matèria de tractament d'aigües residuals, obligaran al govern espanyol a dur a terme obres per valor de 10.000 milions d'euros en els pròxims set anys per poder complir la Directiva Marc de l'Aigua. Aquesta inversió es veurà retribuïda a la factura dels usuaris.

La factura de l'aigua, per tant, suposarà un percentatge important en els costos domèstics i a diferència d'ara, pot ser que l'estalvi de l'aigua es converteixi en una qüestió a tenir en compte. És per aquest motiu que el següent treball pretén dissenyar un aparell que permeti obtenir un estalvi en la factura de l'aigua, i permeti monitoritzar una sèrie de variables per poder analitzar més endavant altres estratègies d'estalvi.

El projecte consta de tres parts. La primera part consisteix en el disseny d'un sistema de valvuleria i canonades que permeti realitzar un control sobre la temperatura de l'aigua i sobre el cabal que hi circula. La segona part consisteix en el disseny i implementació del control en un microcontrolador per a fer possible la gestió automàtica de l'aigua i la monitorització d'una sèrie de variables que puguin ser d'interès. La tercera part consisteix en el disseny i implementació d'una PCB que proporciona alimentació al sistema i que s'encarrega d'acondiconar els senyals d'entrada i sortida entre el microcontrolador i els aparells exteriors.



# Sumari

<b>RESUM</b>	<b>1</b>
<b>SUMARI</b>	<b>3</b>
<b>ÍNDIX DE FIGURES</b>	<b>7</b>
<b>1. GLOSSARI</b>	<b>9</b>
<b>2. PREFACI</b>	<b>13</b>
2.1. Origen del projecte.....	13
2.2. Motivació.....	13
<b>3. INTRODUCCIÓ</b>	<b>15</b>
3.1. Objectius del projecte.....	15
3.1.1. Coneixements a assolir.....	15
3.1.2. Objectius a assolir.....	15
<b>4. DISSENY I MODELITZACIÓ DEL SISTEMA</b>	<b>17</b>
4.1. Determinació de les vàlvules.....	17
4.1.1. Fonaments teòrics.....	17
4.2. Modelització en Matlab.....	23
4.2.1. Temperatura d'equilibri.....	23
4.2.2. Resposta temporal de la temperatura.....	23
4.2.3. Cabal.....	24
4.2.4. Carrera de les vàlvules.....	26
<b>5. COMPONENTS PER AL CONTROL</b>	<b>29</b>
5.1. Sensor de temperatura.....	29
5.2. Cabalímetre.....	30
5.3. Vàlvula proporcional.....	30
5.4. Vàlvula mescladora.....	31
<b>6. DISSENY DE LA PCB</b>	<b>33</b>
6.1. Alimentació.....	33
6.1.1. Alimentació digital.....	33
6.1.2. Alimentació analògica.....	34

6.1.3.	Alimentació de les vàlvules.....	35
6.2.	Circuit per a la mesura del cabal .....	35
6.3.	Circuit per la mesura de temperatura .....	36
6.4.	Convertidors Analògic-Digital .....	37
6.4.1.	Acondicionament del ADC0.....	38
6.4.2.	Acondicionament del ADC1 .....	39
6.5.	Convertidor Digital-Analògic .....	41
6.5.1.	Acondicionament dels DACs .....	41
6.5.2.	Referència de tensió.....	42
<b>7.</b>	<b>COMPONENTS DEL SISTEMA</b> .....	<b>43</b>
7.1.	Microcontrolador “Concerto” .....	43
7.1.1.	Nucli ARM .....	43
7.1.2.	Nucli C28.....	43
7.2.	PC- <i>embeded</i> .....	44
7.2.1.	Hardware.....	44
7.2.2.	Software .....	46
<b>8.</b>	<b>PROGRAMACIÓ DELS ELEMENTS</b> .....	<b>49</b>
8.1.	Sistema operatiu RTOS-TI .....	49
8.2.	Programació del ARM.....	49
8.2.1.	Servidor Web.....	49
8.2.2.	Servidor TCP-IP i comunicació entre nuclis.....	50
8.3.	Programació del PC- <i>embeded</i> .....	51
8.4.	Programació del C28 .....	51
8.4.1.	Lectures ADC i ECAP.....	51
8.4.2.	Ordres SPI i DAC .....	51
8.4.3.	Control del cabal.....	52
8.4.4.	Control de la temperatura .....	58
<b>9.</b>	<b>MUNTATGE DEL SISTEMA</b> .....	<b>65</b>
9.1.	Disseny del circuit de canonades .....	65
9.2.	Anàlisi i calibratge dels aparells de mesura.....	69
<b>10.</b>	<b>IMPACTE MEDIAMBIENTAL</b> .....	<b>73</b>
<b>11.</b>	<b>ANÀLISI ECONÒMIC</b> .....	<b>75</b>

11.1. Recursos humans .....	75
11.2. Recursos materials .....	76
<b>CONCLUSIONS I LÍNIES FUTURES</b> .....	<b>77</b>
<b>AGRAÏMENTS</b> .....	<b>79</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>81</b>
<b>ANNEX 1</b> .....	<b>83</b>
Càlculs per a la determinació de les $KV_s$ .....	83
<b>ANNEX 2</b> .....	<b>85</b>
<b>ANNEX 3</b> .....	<b>93</b>
Codi font de l'ARM.....	93
Funció principal .....	93
Codi font del C28.....	98
Funció principal .....	98



## Índex de figures

Fig. 4.1. Esquema de la fontaneria.....	17
Fig. 4.2. Esquema de les forces tallants en una canonada.....	19
Fig. 4.3. Esquema de la fontaneria amb caigudes de pressió.....	20
Fig. 4.4. Percentatge de pèrdua d'energia en la vàlvula proporcional .....	21
Fig. 4.5. Cabal total en funció de la carrera de la vàlvula mescladora .....	22
Fig. 4.6. Esquema de simulació de la temperatura.....	24
Fig. 4.7. Esquema de simulació del cabal.....	24
Fig. 4.8. Característica de cabal de la vàlvula mescladora.....	25
Fig. 4.9. Característica de cabal de la vàlvula proporcional.....	25
Fig. 4.10. Simulació del comportament de la vàlvula mescladora.....	26
Fig. 4.11. Simulació del comportament de la vàlvula proporcional.....	27
Fig. 5.1. Termistor per al sensat de la temperatura.....	29
Fig. 5.2. Cabalímetre V10981 d'RS.....	30
Fig. 5.3. Vàlvula proporcional i adaptador de senyal.....	31
Fig. 5.4. Vàlvula mescladora de tres vies i actuator TAC Forta 310.....	31
Fig. 6.1. Alimentació digital.....	34
Fig. 6.2. Alimentació analògica i aïllament dels terres.....	34
Fig. 6.3. Referència de tensió per a la resistència de <i>pull up</i> .....	35
Fig. 6.4. Pont de Wheastone.....	36
Fig. 6.5. Tensió del node positiu del voltímetre en funció de la temperatura del sensor.....	37
Fig. 6.6. Amplificador operacional en topologia de restador inversor.....	38
Fig. 6.7. Circuit d'acondicionament del senyal de posició de la vàlvula mescladora.....	39
Fig. 6.8. Amplificador operacional en topologia de seguidor de tensió.....	40
Fig. 6.9. Circuit d'acondicionament del senyal de la temperatura.....	40
Fig. 6.10. Esquema del DAC extern i etapa d'acondicionament de la sortida.....	42
Fig. 6.11. Referència de tensió per al DAC.....	42
Fig. 7.1. Microcontrolador "Concerto" (Texas Instruments).....	43
Fig. 7.2. Mòdul del Processador SODIMM Module DIMM-AM335x.....	44
Fig. 7.3. Placa Base. DIMM-Base Verno.....	45
Fig. 7.4. Esquema dels components de la màquina virtual.....	46
Fig. 7.5. Esquema dels components del BSP.....	47
Fig. 7.6. Diagrama d'operació per al desenvolupament de programes.....	47
Fig. 8.1. Pàgina web interfície home-màquina.....	50

Fig. 8.2. Diagrama d'operació de comunicacions.....	50
Fig. 8.3. Trama per a la configuració del DAC.....	52
Fig. 8.4. Taula de combinacions per a l'actualització del SPI.....	52
Fig. 8.5. Esquema del control.....	53
Fig. 8.6. Resposta temporal del cabal 1.....	54
Fig. 8.7. Resposta temporal del cabal 2.....	55
Fig. 8.8. Resposta temporal del cabal 3.....	55
Fig. 8.9. Resposta temporal del cabal 4.....	56
Fig. 8.10. Resposta temporal del cabal 5.....	56
Fig. 8.11. Resposta temporal del cabal solució final.....	57
Fig. 8.12. Resposta temporal de la temperatura optimitzada (Nivell 16 i cabal 0,03l/s).....	60
Fig. 8.13. Resposta temporal de la temperatura sense optimitzar (Nivell 16 i cabal 0,03 l/s).....	61
Fig. 8.14. Resposta temporal de la temperatura sense optimitzar (Nivell 12 i cabal 0,05l/s).....	61
Fig. 8.15. Resposta temporal de la temperatura optimitzada (Nivell 12 i cabal 0,05l/s).....	62
Fig. 8.16. Resposta temporal de la temperatura funcionament normal.....	63
Fig. 8.17. Resposta temporal de la temperatura funcionament normal optimitzat.....	63
Fig. 9.1. Detall de la vàlvula mescladora i entrades freda i calenta.....	65
Fig. 9.2. Detall de la sortida de la vàlvula mescladora i tram per al sensor de temperatura.....	66
Fig. 9.3. Detall del cabalímetre amb els trams anterior i posterior.....	67
Fig. 9.4. Detall de la vàlvula proporcional i tram d'elevació d'alçada.....	67
Fig. 9.5. Detall de les vàlvules reductores de pressió.....	68
Fig. 9.6. Sistema de fontaneria complet.....	68
Fig. 9.7. Sistema de fontaneria amb interfície home-màquina.....	69
Fig. 9.8. Recta de regressió per al calibratge del sensor de temperatura.....	70
Fig. 11.1. Taula de costos dels recursos humans d'aprenentatge i investigació.....	75
Fig. 11.2. Taula de costos dels recursos humans per l'elaboració i muntatge.....	76
Fig. 11.3. Taula de costos dels recursos materials per l'elaboració i muntatge.....	76



# 1. Glossari

$\Delta ET_c$  : Pèrdua d'energia en la rama d'aigua calenta.

$\Delta ET_f$  : Pèrdua d'energia en la rama d'aigua freda.

$\Delta ET_s$  : Pèrdua d'energia en la rama de sortida.

$\Delta EV_c$  : Pèrdua d'energia a la vàlvula mescladora deguda al cabal d'aigua calenta.

$\Delta EV_f$  : Pèrdua d'energia a la vàlvula mescladora deguda al cabal d'aigua freda.

$\Delta EV_p$  : Pèrdua d'energia a la vàlvula proporcional.

$\Delta P$  : Pèrdues de pressió.

$\varepsilon$  : Rugositat.

$\rho$  : Densitat.

$\mu$  : Viscositat dinàmica.

$\tau_o$  : Constant de fregament del fluid.

ADC : Convertidor Analògic-Digital (en anglès: *Analog to Digital Converter*).

ARM : Arquitectura de microprocessador basada en RISC

BSP : *Board Support Package*.

$C_p$  : Coeficient de temperatura.

CSV : *Coma Separated Value*.

D : Diàmetre.

DAC : Convertidor Analògic-Digital ( en anglès: *Digital to Analog converter*).

DSP : Processador digital de senyals (en anglès: *Digital signal processor*).

E : Energia.

$E_c$  : Energia a l'inici de la rama calenta.

$E_f$  : Energia a l'inici de la rama freda.

$E_s$  : Energia a la sortida del sistema.

EM : Energia en la vàlvula mescladora.

$EM_c$  : Energia en la vàlvula mescladora calculada per l'aigua calenta.

$EM_f$  : Energia en la vàlvula mescladora calculada per l'aigua freda.

ECAP : *Enhanced Capture Module*.

f : Coeficient de fricció.

g : Gravetat.

IP : *Internet protocol*.

$K_{valv}$  : Constant de pèrdues de càrrega en funció del quadrat cabal.

$K_v$  : Constant de cabal.

PCB : Placa de circuit imprès (en anglès: *Printed Circuit Board*).

$K_{Mc}$  : Constant de pèrdues de càrrega de la vàlvula mescladora en funció del quadrat cabal d'aigua calenta.

$K_{Mf}$  : Constant de pèrdues de càrrega de la vàlvula mescladora en funció del quadrat cabal d'aigua freda.

$K_p$  : Constant de pèrdues de càrrega de la vàlvula proporcional en funció del quadrat cabal.

$KM_{cv}$  : Constant de cabal per al pas d'aigua calenta.

$KM_{fv}$  : Constant de cabal per al pas d'aigua freda.

$KMvs$  : Constant de cabal màxima de la vàlvula mescladora.

$KPvs$  : Constant de cabal màxima de la vàlvula proporcional.

$L$  : Llargada.

m.c.a : Metres columna d'aigua.

NFS : *Network File System*.

$P$  : Pressió.

$P_{atm}$  : Pressió atmosfèrica.

$P_c$  : Pressió aigua calenta.

$P_f$  : Pressió aigua freda.

PBB : Bifenils polibromats.

PBDE : Èters difenil polibromats.

$Q$  : Cabal.

$Q_c$  : Cabal d'aigua calenta.

$Q_f$  : Cabal d'aigua freda.

$Q_t$  : Cabal total.

RAAE : Reciclatge d'Aparells Elèctrics i Electrònics.

$Re$  : Nombre de Reynolds.

RISC: *Reduced instruction set computing*.

RoHS : *Restrictions of Hazardous Substancies*.

RTOS-TI : Sistema operatiu (en anglès: *Real Time Operating Sistem Texas Instruments*).

$S$  : Superfície.

SDK : *Support Development Kit*.

SDRAM : *Single Data Rate Synchronous Dynamic Random Acces Memory*.

SPI : *Serial Periferal Interface*.

$T_c$  : Temperatura aigua calenta.

$T_f$  : Temperatura aigua freda.

$T_m$  : Temperatura de la mescla.

TCP : *Transmission Control Protocol*.

TFT-LCD : *Thin Film Transistor- Liquid Crystal Display.*

TFTP : *Trivial File Transfer Protocol.*

z : Alçada.

$Z_c$  : Alçada inicial aigua calenta.

$Z_f$  : Alçada inicial aigua freda.

$Z_s$  : Alçada de la sortida.



## 2. Prefaci

### 2.1. Origen del projecte

La gestió intel·ligent dels recursos ha pres molta importància en els últims anys. És evident la recerca de l'eficiència duta a terme en gairebé tots els àmbits de la llar: il·luminació de baix consum, automatització de l'encesa i apagada de llums, aïllaments per a la calefacció i refrigeració, etc. Un dels àmbits en el que no s'ha posat especial èmfasis però, és en el de l'estalvi de l'aigua. El producte final d'aquest projecte és una eina útil per a l'estalvi d'aigua i per a la monitorització del consum per a la posterior presa de decisions.

### 2.2. Motivació

Aquest projecte ha estat motivat a partir d'un projecte intern del grup de recerca CITCEA-UPC. La necessitat de que els seus membres aprenguin a utilitzar un microcontrolador de dos nuclis ("Concerto" de *Texas Instruments*) i un *PC-embedded* recentment adquirit, ha propiciat la incorporació d'aquests dos aparells en la realització del projecte.

A nivell personal l'autor del treball tenia motivació per a fer un projecte multidisciplinari i pràctic, en el que pogués adquirir els coneixements necessaris per al disseny, muntatge i programació d'un sistema automàtic en el qual el producte final acabés essent una realitat. També tenia motivació per haver de batallar amb els problemes que apareixen fora de l'àmbit teòric, on els models conceptuals i la realitat no coincideixen al 100%.



## 3. Introducció

### 3.1. Objectius del projecte

L'objectiu del projecte consisteix en el disseny i el muntatge d'un sistema automàtic que controli el flux i la temperatura de l'aigua d'una dutxa convencional. A més a més s'incorporarà un sistema d'adquisició de dades, les quals seran enviades a un *PC-embedded* extern per a la gestió d'historials, i es crearà un servidor web que permeti realitzar les funcions interfície home-màquina necessàries.

#### 3.1.1. Coneixements a assolir

1. Aprenentatge bàsic del disseny de PCBs.
2. Aprenentatge de la programació de microcontroladors. En concret per aquest projecte s'ha utilitzat el microcontrolador "Concerto" de *Texas Instruments* amb el sistema operatiu RTOS-TI.
3. Aprenentatge del disseny d'algorismes de control.
4. Aprenentatge de la disseny i utilització de protocols de comunicació.
5. Aprenentatge bàsic de la programació i gestió del sistema operatiu Linux per a PCs *embedded*.

#### 3.1.2. Objectius a assolir

1. Muntatge de la fontaneria necessària per a una dutxa convencional.
2. Disseny del control de cabal i temperatura.
3. Simulació i programació del control de cabal i temperatura per a la dutxa.
4. Programació de les comunicacions entre el *PC-embedded* i el microcontrolador





## 4. Disseny i modelització del Sistema

El cabal resultant de la dutxa està compost per la mescla d'un cabal d'aigua calenta i un altre d'aigua freda. La suma dels dos cabals és el cabal final, i la temperatura final és funció de la proporció de cabals. Partint de les premisses anteriors s'ha definit el sistema de la següent manera: una vàlvula mescladora que controla la proporció dels dos fluids -calent i fred- i una vàlvula proporcional que controla la quantitat d'aigua total, aïllant així les dues parcel·les (variable a controlar i actuator).

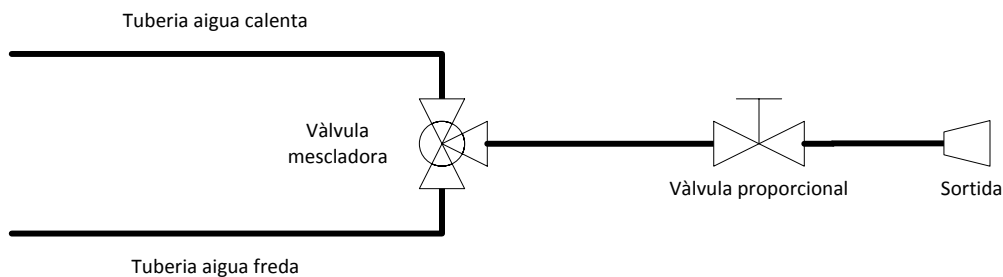


Fig. 4.1. Esquema de la fontaneria

### 4.1. Determinació de les vàlvules

Les normes per a instal·lacions d'aigua sanitària exigeixen uns cabals màxims mínims per a diferents tipus de punts de servei: dutxes, piques i bidets, entre d'altres. Aquest fet limita inferiorment els valors Kv de les nostres vàlvules.

Altrament per dur a terme un bon control sobre el cabal s'ha d'aconseguir que la caiguda de pressió en la vàlvula proporcional suposi un percentatge elevat de la total; aquest fet limita superiorment els valors de Kv de les nostres vàlvules.

#### 4.1.1. Fonaments teòrics

L'equació de Bernoulli ve donada per l'expressió:

$$\frac{v^2 \cdot \rho}{2} + P + \rho \cdot g \cdot z = \text{constant} \quad \text{Eq. 4.1}$$

El balanç energètic per a dues seccions d'un circuit en el que hi ha pèrdues de càrrega ve donat per la expressió:

$$\frac{V_1^2 \cdot \rho}{2} + P_1 + \rho \cdot g \cdot z_1 = \frac{V_2^2 \cdot \rho}{2} + P_2 + \rho \cdot g \cdot z_2 + \Delta P \quad \text{Eq. 4.2}$$

Expressada en mca:

$$\frac{V_1^2}{2 \cdot g} + \frac{P_1}{\rho \cdot g} + z_1 = \frac{V_2^2}{2 \cdot g} + \frac{P_2}{\rho \cdot g} + z_2 + \Delta P \quad \text{Eq. 4.3}$$

Les pèrdues de càrrega són degudes a la circulació del cabal i les podem dividir en pèrdues en les canonades, pèrdues en les singularitats i pèrdues en les vàlvules.

#### 4.1.1.1. Pèrdues en les vàlvules

Les pèrdues en les vàlvules vénen determinades pel factor Kv proporcionat pel fabricant. La normativa indica que Kv és el cabal en (m<sup>3</sup>/h) circulant per la vàlvula quan la caiguda de pressió és de 0.1 MPa. Kvs és el valor màxim d'aquest factor i correspon a la vàlvula totalment oberta.

Sabent que la caiguda de pressió és proporcional al quadrat de la velocitat:

$$\Delta P = K_{\text{valv}} \cdot Q^2 \quad \text{Eq. 4.4}$$

Per tant:

$$0.1 \text{MPa} = K_{\text{valv}} \cdot K_v^2 \quad \text{Eq. 4.5}$$

I aïllant  $K_{\text{valv}}$ :

$$K_{\text{valv}} = \frac{0.1 \text{MPa}}{K_v^2} \quad \text{Eq. 4.6}$$

Passant a unitats de m.c.a i metres cúbics per segon:

$$K_{\text{valv}} = \frac{10 \text{m.c.a}}{K_p^2} \cdot 3600^2 \quad \text{Eq. 4.7}$$

#### 4.1.1.2. Les pèrdues en la canonada

Les pèrdues en la canonada són degudes al fregament del líquid amb les parets de la canonada.

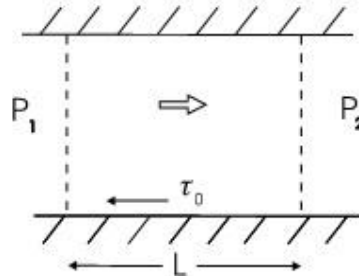


Fig. 4.2. Esquema de les forces tallants en una canonada

$$P_1 - P_2 \cdot S = \tau_0 \cdot P_r \cdot L \quad \text{Eq. 4.8}$$

Si es vol expressar en m.c.a:

$$\Delta P = \frac{P_1 - P_2}{\rho \cdot g} = \frac{\tau_0 \cdot 4 \cdot L}{\rho \cdot g \cdot D} \quad \text{Eq. 4.9}$$

L'esforç tallant  $\tau_0$  depèn del tipus de fluid, laminar o turbulent. El nombre de Reynolds determina el tipus de fluid i ve determinat per:

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} \quad \text{Eq. 4.10}$$

En el cas d'un fluid turbulent l'esforç tallant depèn de la viscositat i ve determinat per:

$$\tau_0 = \frac{f \cdot \rho \cdot V^2}{8} \quad \text{Eq. 4.11}$$

Finalment:

$$\Delta P = \frac{P_1 - P_2}{\rho \cdot g} = \frac{f \cdot V^2 \cdot L}{2 \cdot g \cdot D} = f \cdot \frac{8 \cdot Q^2 \cdot L}{g \cdot \pi^2 \cdot D^5} \quad \text{Eq. 4.12}$$

El coeficient  $f$  depèn de la rugositat i del nombre de Reynolds. Hi ha diferents formes per determinar el coeficient  $f$ .

En els casos en que el Reynolds és molt elevat el coeficient  $f$  es pot calcular a partir de la rugositat i el diàmetre amb la fórmula de Nikuradse per a canonades rugoses.

$$\frac{1}{f} = 2 \log 3.7 \cdot \frac{D}{\epsilon} \quad \text{Eq. 4.13}$$

Utilitzant les dades del sistema:

$$D = 0,0094m \text{ i } \varepsilon = 1,5 \cdot 10^{-6}m$$

$$\text{Resulta: } f = 0.0131$$

#### 4.1.1.3. Anàlisi del sistema a instal·lar

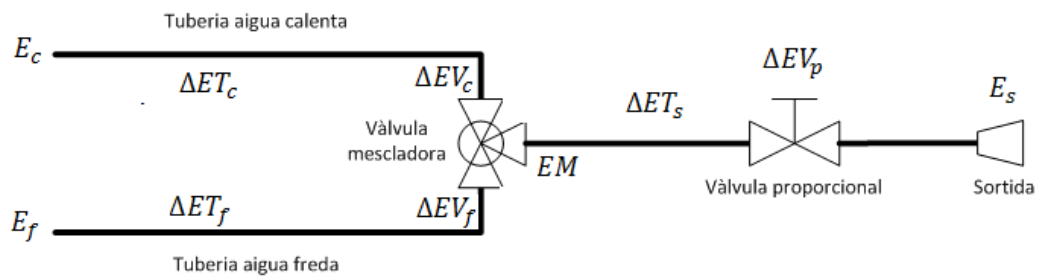


Fig. 4.3. Esquema de la fontaneria amb caigudes de pressió

El balanç d'energies del sistema a instal·lar segueix les equacions següents:

$$EM_c = E_c - \Delta ET_c - \Delta EV_c \quad \text{Eq. 4.14}$$

$$EM_f = E_f - \Delta ET_f - \Delta EV_f \quad \text{Eq. 4.15}$$

$$EM = E_s + \Delta ET_s + \Delta EV_p \quad \text{Eq. 4.16}$$

$$Q_f + Q_c = Q_t \quad \text{Eq. 4.17}$$

Amb el sistema d'equacions anterior es poden aïllar els cabals  $Q_c$ ,  $Q_f$  i  $Q_t$  en funció de  $KP_{vs}$  i  $KM_{vs}$ . ( Càlculs a l'Annex 1 ).

Com a hipòtesi es pren que les pressions i les altures de la rama freda i la rama calenta són les mateixes i per tant es complirà també la igualtat  $E_c = E_f$ .

#### Càlcul de les Kv

Com es pot veure el cabal no és directament proporcional amb el factor Kv. Així doncs, per tenir possibilitats de controlar el cabal amb una vàlvula proporcional, s'ha d'intentar que la caiguda de pressió en aquesta suposi un percentatge elevat quan la vàlvula estigui totalment oberta. S'ha establert un límit del 30%.

De la condició anterior se'n dedueix:

$$\frac{\Delta EV_p}{E_c - E_s} < 0,3 \quad \text{o} \quad \frac{\Delta EV_p}{E_f - E_s} < 0,3 \quad \text{Eq. 4.18}$$

De les simulacions en MATLAB s'ha vist que el percentatge de pèrdua d'energia del sistema en la vàlvula proporcional és mínim quan el cabal està repartit entre les dues branques a parts iguals, d'aquesta manera es pren aquest com a cas més restrictiu.

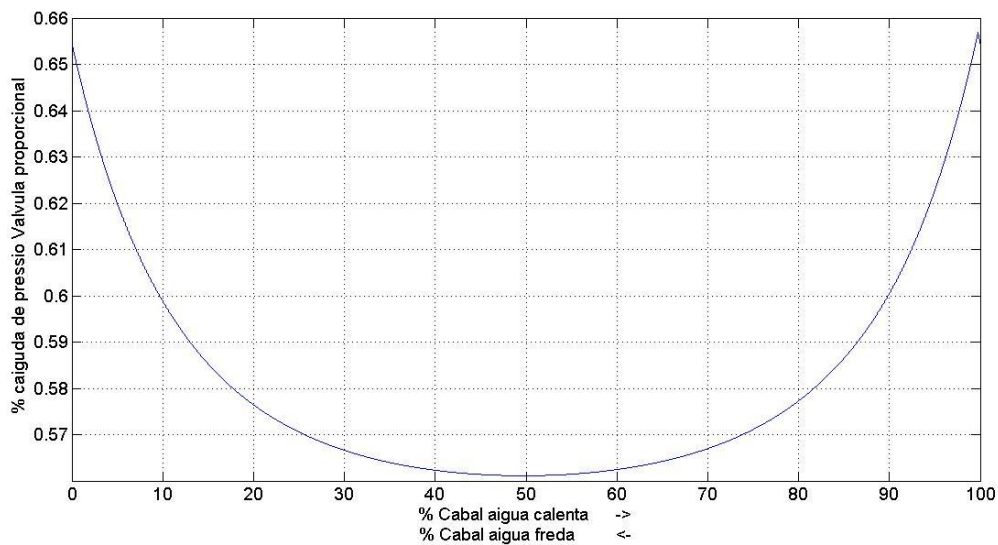


Fig. 4.4. Percentatge de pèrdua d'energia en la vàlvula proporcional

Com que la funció que determina  $Q_t$  depèn de  $KP_{vs}$  i  $KM_{vs}$ , té dos graus de llibertat. Ja que el que es vol és que la pèrdua d'energia sigui principalment en la vàlvula proporcional, s'ha pres com a solució la  $KM_{vs}$  màxima que ofereix el distribuïdor amb un diàmetre de  $\frac{1}{2}$ '. Amb aquest criteri la  $KM_{vs}$  és de  $4m^3/h$ .

Utilitzant les dades del sistema:

$$P_c = 10bar \quad ; \quad L_c = 4m \quad ; \quad D_c = 0,25m$$

$$P_f = 10bar \quad ; \quad L_f = 4m \quad ; \quad D_f = 0,25m$$

$$P_{atm} = 10bar \quad ; \quad L_s = 4m \quad ; \quad D_s = 0,25m$$

I amb les condicions anteriors:

$$KM_{cv} = \frac{KM_{vs}}{2} = 2 \frac{m^3}{h}$$

Es dedueix que:  $KP_{vs} < 2$ .

Altrament, el cabal màxim mínim que dicta la normativa per a una dutxa és 0.2 l/s. Així, utilitzant l'anàlisi de l'Annex 1 i fent passar el cabal repartit per les dues branques -que és el cas més restrictiu- tal i com s'ha determinat a partir de les simulacions en MATLAB (Fig. 4.5) es troba  $KP_{vs} > 0.586$ .

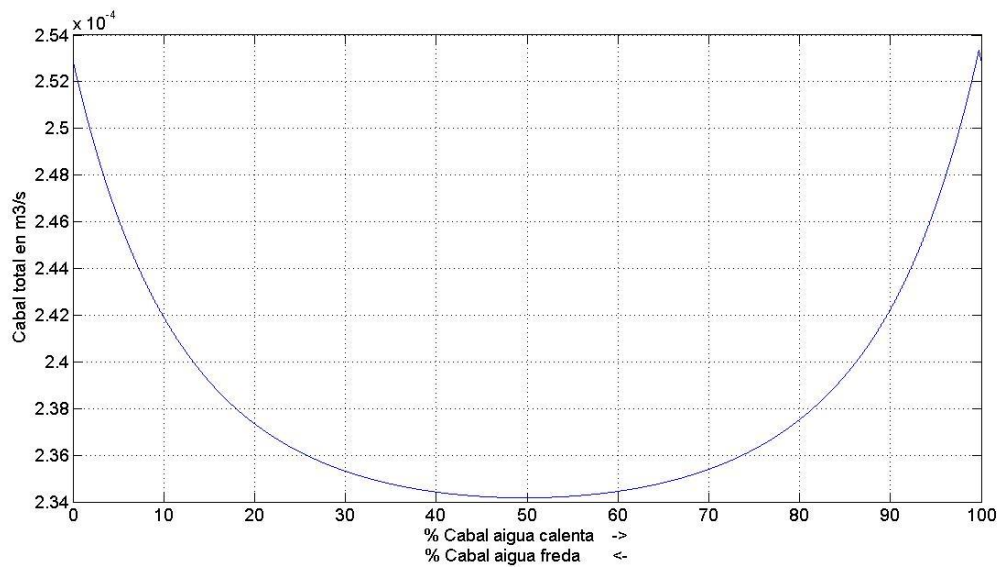


Fig. 4.5. Cabal total en funció de la carrera de la vàlvula mescladora

El fabricant *Bürkert* disposa de la vàlvula 2835. Aquest dispositiu es fabrica amb unes  $K_v$  de 0,45; 0,8 i 1.1 m³/h i rosca de ½ polzada. Per al projecte s'ha escollit la vàlvula amb una  $K_v$  de 0,8m³/h.

## 4.2. Modelització en Matlab

La modelització en Matlab consta de dues parts; la primera part simula el sistema de valvuleria i canonades calculant el cabal i la temperatura resultant en funció de les posicions de les vàlvules. La segona part simula el comportament del microcontrolador que dóna ordres a les vàlvules, i la resposta d'aquestes a les consignes rebudes.

### 4.2.1. Temperatura d'equilibri

L'aigua de la sortida del circuit és el resultat de la mescla de dos fluxos d'aigua, un de calent i un de fred. Per tant la temperatura de l'aigua és funció de les quantitats d'aigua de cada flux i de la temperatura d'aquests.

El coeficient de temperatura quantifica la relació entre l'energia calorífica transferida a un cos i el canvi de temperatura que aquest experimenta. En l'aigua, el seu valor depèn de la temperatura i es calcula amb la següent expressió:

$$C_p = 2820 + 11,82 \cdot T_a - 0,03502 \cdot T_a^2 + 0,0003599 \cdot T_a^3 \quad \text{Eq. 4.19}$$

Fent un balanç d'energia del procés, la calor perduda per l'aigua calenta i l'obtinguda per l'aigua freda han de ser la mateixa:

$$\frac{T_m}{T_f} Q_f \cdot C_p \cdot T_a \cdot \partial T_a + \frac{T_m}{T_c} Q_c \cdot C_p \cdot T_a \cdot \partial T_a = 0 \quad \text{Eq. 4.20}$$

Així podem trobar la  $T_m$  de l'aigua resultant en funció dels cabals fred i calent i les temperatures respectives.

### 4.2.2. Resposta temporal de la temperatura

La resposta transitòria de la temperatura s'ha assimilat a un sistema de grau 1 amb una constant de temps de 0,2s per simular l'efecte de l'intercanvi de calor amb el tub de distribució. Per simular el temps que triga l'aigua en arribar al final del tub s'ha introduït un retràs de 0,5s.

Per al sensor de temperatura, que s'ha instal·lat el més pròxim possible a la sortida de la vàlvula mescladora, s'ha introduït un retràs de 0,1s per simular el temps que tarda en arribar l'aigua a contactar amb ell, i s'ha simulat la seva resposta temporal amb una constant de temps d'1,5s tal i com indica el seu *datasheet*.

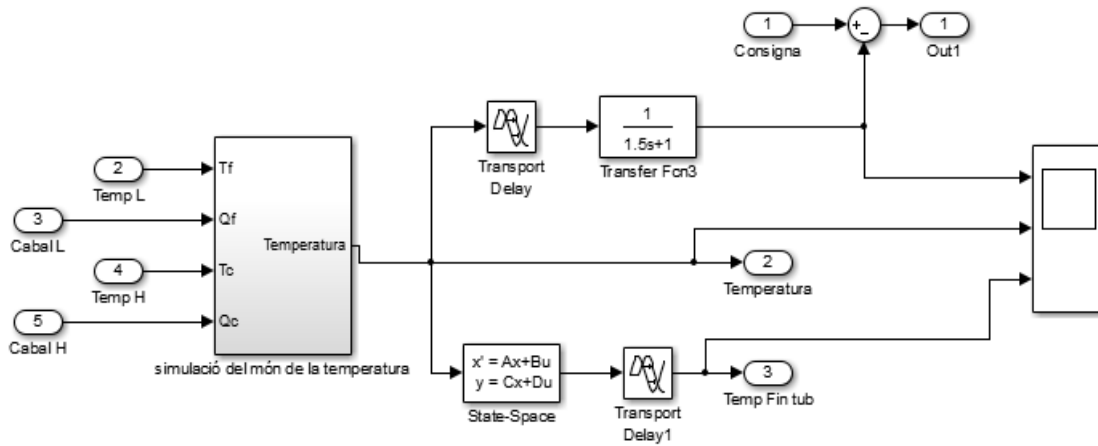


Fig. 4.6. Esquema de simulació de la temperatura

### 4.2.3. Cabal

Com s'ha vist en l'apartat anterior, per a la determinació de la temperatura final es necessita saber els cabals fred i calent i les temperatures d'aquests, les quals són pròpies de la instal·lació.

Aquests dos cabals són funció de la posició de les vàlvules proporcional i mescladora. Amb les equacions de l'Annex 1 i l'equació Eq. 4.7 es pot simular el cabal en funció d'aquestes dues carreres:

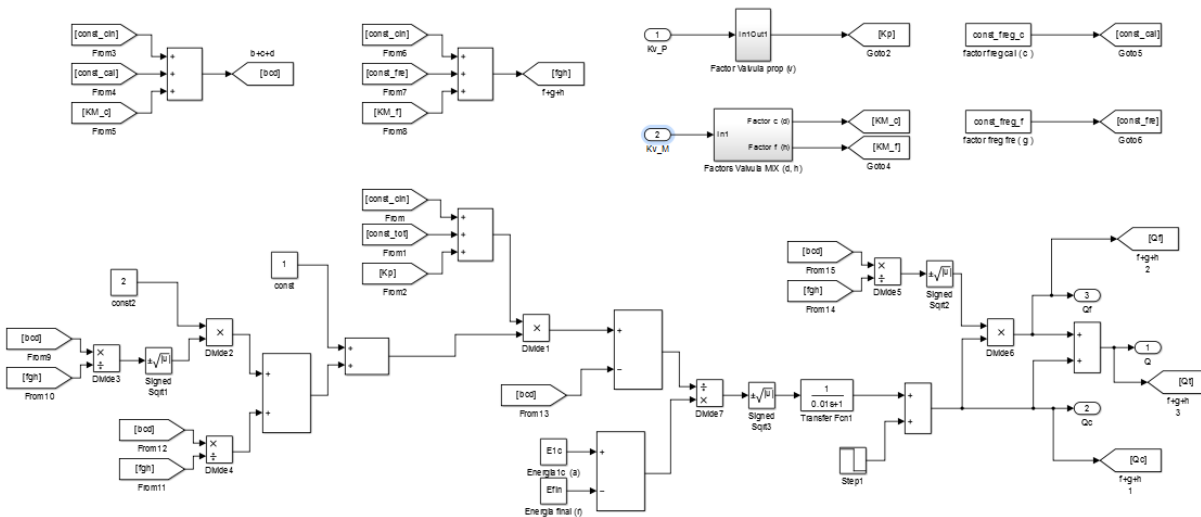


Fig. 4.7. Esquema de simulació del cabal

La constant  $K_v$  ve determinada pel fabricant en funció del senyal d'entrada de la vàlvula.



En la simulació s'ha simplificat la part de la vàlvula de tres vies. La determinació del cabal circulant per a cada una de les branques s'ha fet aproximant un gràfic que facilita el fabricant en el qual s'hi representa la proporció de cabals en funció de la carrera (Fig. 4.8).

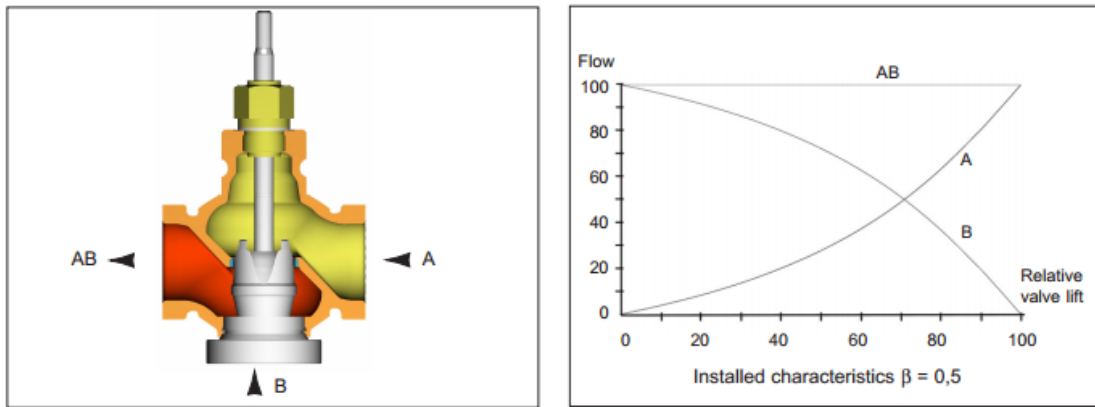


Fig. 4.8. Característica de cabal de la vàlvula mescladora

El factor  $KM_{vc}$  s'ha aproximat per una funció de grau 2 prenent els punts (0,0), (40,20) i (100,100). Amb aquesta aproximació el factor  $KM_{vc}$  queda:

$$KM_{vc} \text{ carrera} = 8,33 \cdot 10^{-3} \cdot \text{carrera}^2 + 0,1667 \cdot \text{carrera} \quad \text{Eq. 4.21}$$

Com està comentat en l' Annex 1 el factor  $KM_{vf}$  és el complementari.

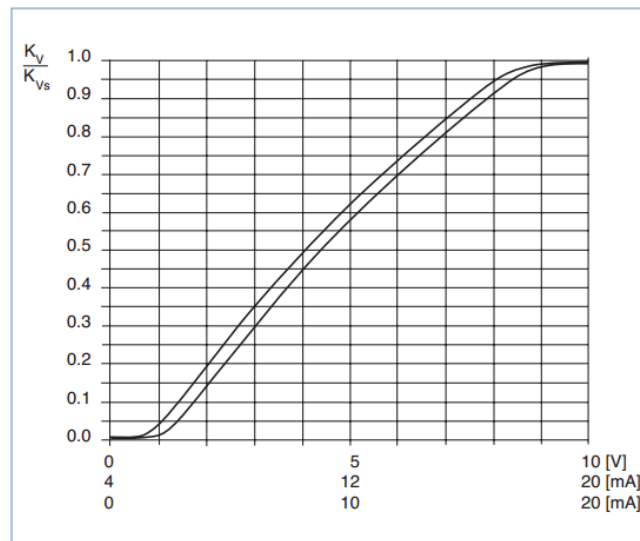


Fig. 4.9. Característica de cabal de la vàlvula proporcional

La característica de cabal de la vàlvula proporcional s'ha simplificat com una característica proporcional. S'ha pres una recta que comença en el (0,0) i acaba en el (10,1), fent una

simplificació de la Fig. 4.9 que és un gràfic que facilita el fabricant de la vàlvula en el seu *datasheet*.

#### 4.2.4. Carrera de les vàlvules

Les vàlvules tenen un comportament bastant diferenciat degut a la tecnologia i topologia de cadascuna.

*Vàlvula mescladora:*

La vàlvula mescladora, a l'estar supeditada a la posició del motor, depèn totalment del moviment d'aquest. El funcionament del motor és molt senzill: en rebre un senyal d'entrada entre 0 a 10V (corresponents a les posicions mínima i màxima) el motor mou la tija de la vàlvula fins a la posició indicada amb una velocitat  $\frac{Pos_{MAX}-Pos_{MIN}}{15s}$ . Per tant la velocitat d'aquesta vàlvula segueix el següent algoritme:

Si (Posició\_actual < Pos\_consigna)

{

$$velocitat = \frac{Pos_{MAX}-Pos_{MIN}}{15s}$$

}

Si (Posició\_actual > Pos\_consigna)

{

$$velocitat = -\frac{Pos_{MAX}-Pos_{MIN}}{15s}$$

}

Si no

{

velocitat = 0

}

Posteriorment per simular el comportament de la posició s'utilitza un integrador.

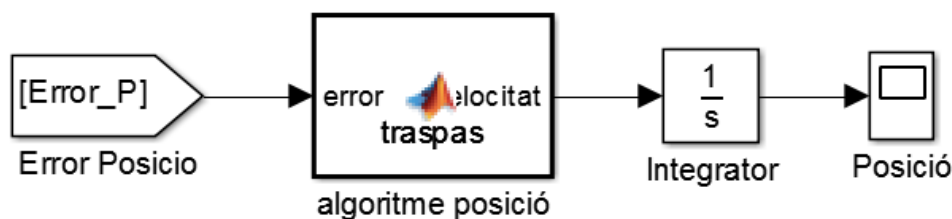


Fig. 4.10. Simulació del comportament de la vàlvula mescladora

### Vàlvula proporcional:

En la vàlvula proporcional, en canvi, la proporció de caiguda de pressió depèn d'un tren de polsos. El temps de cicle d'aquest tren depèn d'una entrada entre 0 i 10V, que pot variar molt en poc temps. Per seguretat però, la vàlvula permet suavitzar la resposta a un graó per evitar canvis bruscos que podrien danyar la vàlvula (p.e. l'efecte cop d'ariet).

El temps de canvi s'ha escollit de 0,3s per a no perdre velocitat de resposta i, per tant, per simular el comportament de la vàlvula, s'ha introduït una funció de transferència de primer ordre amb una constant de temps de 0.075s.

També s'ha incorporat un bloc saturador el qual no deixa que la posició de la vàlvula sobrepassi els límits que disposa.

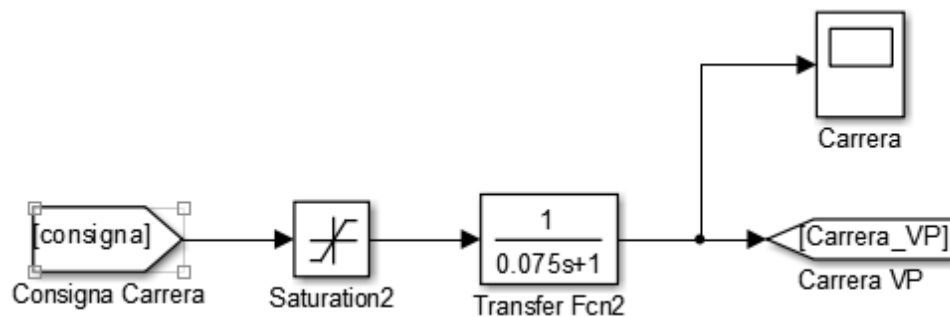


Fig. 4.11. Simulació del comportament de la vàlvula proporcional.



## 5. Components per al control

En aquesta secció s'explica el funcionament dels components per a la realització del sistema de gestió de l'aigua. Aquests components són els sensors i actuadors que fan possible mesurar i modificar les variables a controlar en funció de les seves consignes i el seu valor actual.

### 5.1. Sensor de temperatura

El sensor de temperatura que s'utilitza és el EGX2-250 d'*Schneider Electric*. Aquest és un termistor que varia la seva resistència en funció de la temperatura. El dispositiu té un rang d'operació d'entre  $-40^{\circ}\text{C}$  i  $100^{\circ}\text{C}$  el qual queda dins dels marges lògics d'una dutxa convencional. El motiu més important pel qual s'ha escollit aquest termistor però, és la seva constant de temps (1,5s). La velocitat de mesura de temperatura és crítica degut a la naturalesa de l'aplicació: el fet de que la temperatura final del flux depengui de la mescla d'un fluid fred i d'un de calent, comporta unes variacions molt ràpides de la temperatura. En canvi, en les aplicacions més convencionals el control de la temperatura depèn de l'escalfament del sistema, cosa que fa que llevat que no es disposi d'unes potències d'escalfament molt elevades, l'escalfament sigui suficientment lent perquè un sensor de temperatura no necessiti unes condicions molt estrictes en la velocitat de resposta.

**EGX2**



Fig. 5.1. Termistor per al sensat de la temperatura

## 5.2. Cabalímetre

El cabalímetre utilitzat per a la realització del projecte és el V10981 de ½" d'RS. El principi de funcionament d'aquest està basat en un tub amb una turbina Pelton en el seu interior. Quan un fluid travessa la turbina, aquesta gira a una velocitat que és funció de la velocitat del flux travessant. Acoblada a aquesta turbina hi ha un sensor d'efecte hall que envia un tren d'impulsos amb un període que és funció de la velocitat angular de la turbina a un transistor que opera en col·lector obert. Els límits alt i baix de mesura del dispositiu són de 0.0416 l/s i 0.5 l/s respectivament. Com que el cabal màxim que s'espera assolir està entre 0,2 l/s i 0,25 l/s es treballa en un rang adequat per al control.

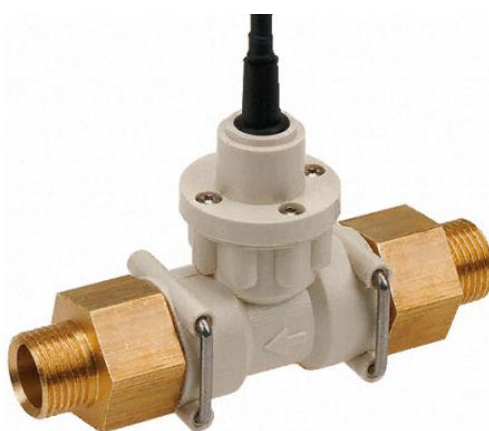


Fig. 5.2. Cabalímetre V10981 d'RS

## 5.3. Vàlvula proporcional

La vàlvula proporcional que s'utilitza per modificar el cabal final del sistema és la *Type 2835* de *Bürkert*. Aquesta vàlvula té un diàmetre de ½" i actua en funció d'un tren de polsos. Segons el *duty cycle* la vàlvula obra o tanca el seu pas, i d'aquesta manera varia la pèrdua de càrrega deguda al fluid circulant pel seu interior, reduint o incrementant així el cabal total del sistema. Aquesta vàlvula va alimentada a 24V DC i consumeix una potència de 16W. Per simplificar la feina del microcontrolador s'ha decidit acoblar-hi un adaptador -el *Type 8605* de *Bürkert*- per poder governar la vàlvula amb un senyal d'entrada entre 0 i 10V. Aquest adaptador rep un senyal analògic i envia a la vàlvula un tren d'impulsos amb un *duty cycle* proporcional a aquest senyal. De l'anàlisi de l'apartat 4.1 se'n deriva que la *Kvs* ha d'estar entre els valors 2 i 0,586 m<sup>3</sup>/h, per tant s'ha escollit la vàlvula amb la *Kvs* de 0,8m<sup>3</sup>/h.



Fig. 5.3. Vàlvula proporcional i adaptador de senyal

## 5.4. Vàlvula mescladora

Per al control de la temperatura es necessita un sistema que mescli el flux d'aigua calenta i el flux d'aigua freda. Per dur a terme aquesta tasca s'utilitza una vàlvula mescladora -la *TAC Venta V341 d'Schneider Electric*- amb un diàmetre de  $\frac{1}{2}$ " i una Kvs de  $4,0 \text{ m}^3/\text{h}$ . Aquesta vàlvula disposa de tres vies i tan bon punt es va tancant A-AB, es va obrint B-AB. La regulació de proporcions es realitza desplaçant verticalment una peça que hi ha en la part superior. Per automatitzar aquesta tasca s'ha d'acoblar a la vàlvula un actuador; en aquest cas s'ha escollit el *TAC Forta 310 d'Schneider Electric*. L'actuador és governat per un senyal analògic de 0 a 10V, i necessita una alimentació de 24V AC amb una potència de 30 VA. Aquest actuador també disposa d'un senyal de sortida per conèixer la posició en temps real que pren valors entre 2 i 10V.



Fig. 5.4. Vàlvula mescladora de tres vies i actuador TAC Forta 310





## 6. Disseny de la PCB

Per la programació del microcontrolador s'utilitza una placa d'avaluació de *Texas Instruments* per al "Concerto"; així doncs s'ha hagut de crear una placa secundària per l'acondicionament dels senyals d'entrada i sortida i per subministrar l'alimentació de la placa principal.

### 6.1. Alimentació

L'alimentació principal de la placa ve donada per una font d'alimentació de 24V, ja que són les fonts més comunes. A partir d'aquesta tensió s'ha d'aconseguir alimentar totes les parts de la placa. A l'hora de dissenyar la placa s'ha diferenciat entre alimentació analògica i alimentació digital. La primera entre -15 i 15V alimenta l'etapa de conversió analògica-digital i un divisor resistiu per a la mesura de temperatura. La segona, la part digital, entre 0 i 5V, i s'utilitza per alimentar tan la placa d'avaluació com els perifèrics que s'utilitzen per donar ordres a les vàlvules.

Per tal d'intentar evitar que el soroll de la part digital afecti a la part analògica, més sensible i amb freqüències de treball molt més reduïdes, el senyal de terra analògic i el senyal de terra digital estan separats en la placa d'avaluació. La unió d'aquests dos nodes es realitza en el microcontrolador, per tant en la placa secundària també es manté aquesta separació. Així es pot diferenciar entre part analògica i part digital.

#### 6.1.1. Alimentació digital

La placa d'avaluació s'alimenta a 5V. Els DACs i les referències de tensió que s'utilitzen en la placa secundària també van alimentats a 5V. D'aquesta manera s'ha decidit utilitzar una font commutada *R-78B5.0-1.0* de RECOM®. Per aquest punt, que és un node de la malla on hi conflueixen diferents dispositius i perifèrics, s'ha decidit utilitzar un pla d'alimentació que està confrontat amb el pla del terra digital, creant així un condensador que serveix de filtre per a possibles sorolls que puguin aparèixer. Com a mesura de seguretat per a sobretensions transitòies s'ha col·locat un díode zener de 5,2V entre la sortida de 5V i el terra digital.

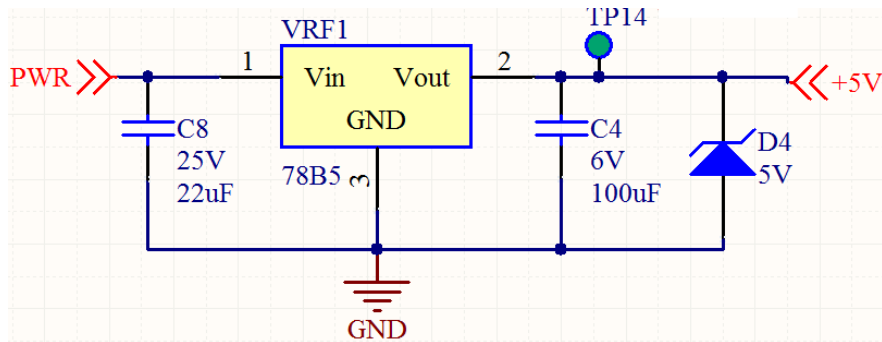


Fig. 6.1. Alimentació digital

### 6.1.2. Alimentació analògica

El microcontrolador no suporta una tensió superior a 3,3V i els límits d'entrada de les consignes de les vàlvules són 0 i 10V, d'aquesta manera es necessita acondicionar els senyals sortints per tal de realitzar un control correcte. Els amplificadors operacionals s'alimenten entre -15 i 15V, així, tant la part d'acondicionament dels ADCs com la dels DACs no perden rang de valors en les proximitats dels límits alt i baix (0 – 10V). El divisor resistiu utilitzat en la mesura de la temperatura pren la seva alimentació entre 0 i 15V. Per poder aconseguir aquesta alimentació s'ha escollit una font commutada amb aïllament galvànic la *TMH 2415D* de Traco Power®.

L'alimentació analògica ha de ser robusta i lliure d'oscil·lacions, per aquest motiu s'ha decidit utilitzar un pla d'alimentació en el node +15V que és confrontat al pla de terra analògic per crear un condensador que filtri els possibles sorolls que puguin aparèixer.

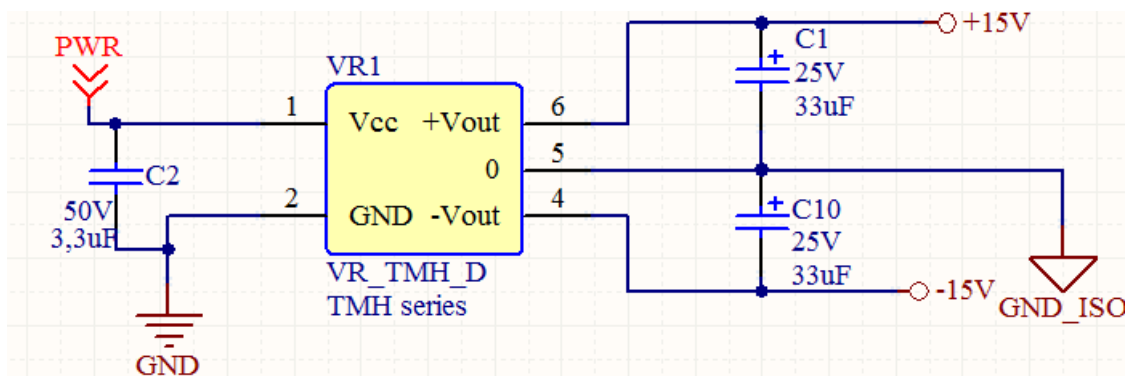


Fig. 6.2. Alimentació analògica i aïllament dels terres

### 6.1.3. Alimentació de les vàlvules

Les vàlvules de control també van alimentades. La potència i la presentació de l'energia elèctrica que demanden és substancialment diferent a la de la placa. Per tant s'ha decidit diferenciar l'alimentació de la placa i la de les vàlvules, i aquestes van alimentades exteriorment.

La vàlvula proporcional té una potència de 16W i necessita una tensió contínua de 24V. Així la font utilitzada per alimentar la placa és adequada per a alimentar també la vàlvula.

La vàlvula mescladora en canvi, necessita una tensió de 24V de corrent alterna a 50Hz i té un consum de 6VA, així doncs s'ha escollit un transformador monofàsic amb una relació de transformació 230V/24V, el *Flachtransformator FL 30/24* de la marca *Block* que va directament connectat a la xarxa elèctrica.

## 6.2. Circuit per a la mesura del cabal

El senyal de sortida del cabalímetre és un tren d'impulsos. Aquest té una sortida en col·lector obert, per tant en la PCB s'ha hagut de col·locar una resistència de *pull up* per poder llegir aquesta mesura amb una de les ECAP de les que disposa el microcontrolador. La referència de tensió que necessita el "Concerto" per poder detectar els impulsos és de 3,3V, és per aquest motiu que s'ha hagut d'incorporar una font de tensió amb entrada 5V i sortida 3,3V i posar una resistència de 10K entre la sortida de la font i l'entrada de l'ECAP.

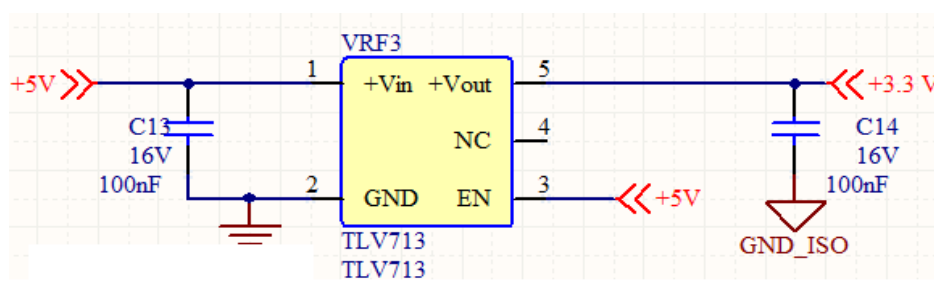


Fig. 6.3. Referència de tensió per a la resistència de *pull up*

### 6.3. Circuit per la mesura de temperatura

L'aparell que es fa servir per mesurar la temperatura és un termistor. Aquest tipus de dispositiu varia la seva resistència en funció de la temperatura, per tant es necessita dissenyar un circuit per poder aprofitar aquesta variació de resistència i convertir-la en una variació de tensió.

Per fer-ho possible, s'ha dissenyat un circuit basat en un pont de Wheastone. Aquesta configuració permet mesurar la variació d'una resistència a partir d'un punt de referència.

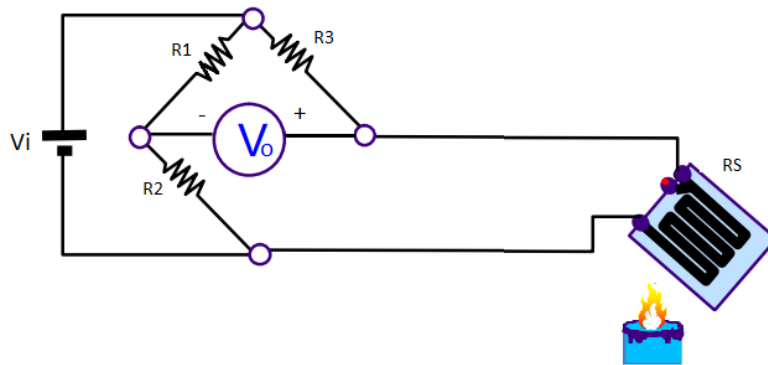


Fig. 6.4. Pont de Wheastone

Com es pot veure a la figura, la tensió que hi ha entre els dos punts del voltímetre és funció de les resistències i segueix la següent equació:

$$V_o = \frac{V_i}{R_3 + R_S} \cdot R_S - \frac{V_i}{R_1 + R_2} \cdot R_1 \quad \text{Eq. 6.1}$$

Com es pot deduir de l'equació anterior la tensió de sortida no és directament proporcional a la resistència  $R_S$ . La temperatura tampoc té una relació proporcional amb la resistència del termistor, així doncs s'ha analitzat quina relació té la tensió de sortida amb la temperatura.

Per dur a terme aquest anàlisi s'ha estudiat quina resistència té el termistor en el tram de temperatures entre 0 a 60 °C, tenint en compte que la dutxa no ha de treballar mai en una temperatura fora d'aquest rang.

De l'anàlisi dut a terme se'n deriva la següent funció, per una aproximació amb un polinomi de tercer grau:

$$R_S T = -0,0118 \cdot T^3 + 2,2668 \cdot T^2 - 162,24 \cdot T + 4667,9 \quad \text{Eq. 6.2}$$

Per decidir quina  $R_3$  s'ha d'escollir s'ha analitzat la funció:

$$V_{out} = \frac{V_i}{R_3 + R_s} \cdot R_s \quad \text{Eq. 6.3}$$

Ja que la segona part de l'expressió Eq. 6.1 és constant, la linealitat no es veu afectada per les resistències  $R_1$  i  $R_2$ . Per aquest motiu aquestes s'han escollit per dur a 0, en referència al terra analògic, la tensió de sortida en el cas límit.

L'anàlisi ha consistit en una batuda de  $R_3$  amb valors de resistències normalitzats i una simulació entre 0 i 60 °C.

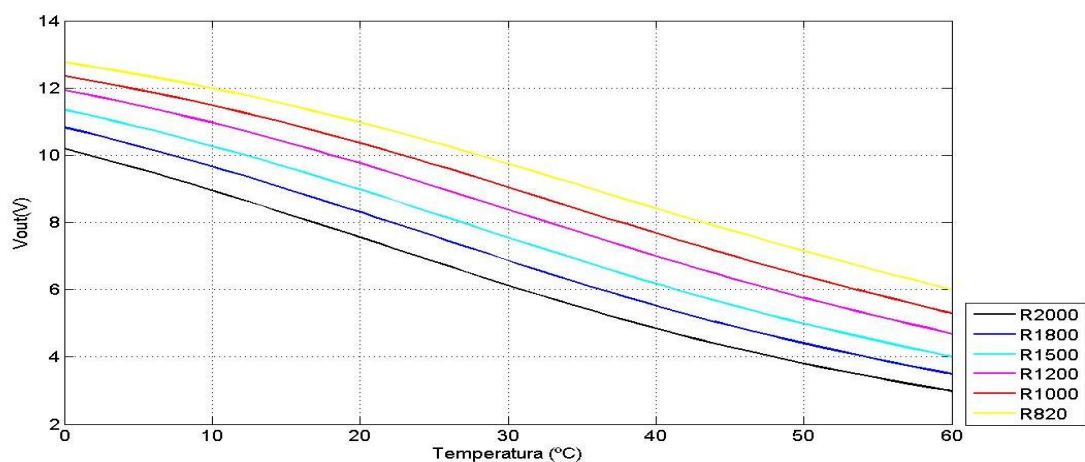


Fig. 6.5. Tensió del node positiu del voltímetre en funció de la temperatura del sensor

Gràficament s'ha decidit que el millor cas per a  $R_3$  és de 1200Ω. El rang de temperatures que s'utilitza per al control està entre els 20 i els 50°C. Com es pot veure a la imatge la corba que té una pendent més constant en aquest tram és la que correspon a la resistència de 1200 Ω. Amb aquesta configuració la tensió en el node positiu de  $V_o$  quan la temperatura és 60°C té un valor de 4,685V, per tant, partint d'aquesta base les resistències  $R_1$  i  $R_2$  s'han escollit de tal manera que la tensió en el node negatiu de  $V_o$  sigui també 4,685V. De les condicions anteriors i de l'equació Eq. 6.1 se'n dedueix que la relació entre  $R_1$  i  $R_2$  ha de ser  $R_1 = 2,202 \cdot R_2$ . Buscant en les resistències normalitzades s'ha escollit  $R_1 = 150K\Omega$  i  $R_2 = 68K\Omega$ .

## 6.4. Convertidors Analògic-Digital

El microprocessador té una sèrie d'entrades analògiques de les quals se n'utilitzen dues. La primera entrada rep el senyal de la posició de la vàlvula mescladora per, posteriorment,

realitzar anàlisi sobre la resposta temporal d'aquesta a les ordres des de la placa de control. La segona entrada es fa servir per llegir la temperatura de l'aigua que és funció de la tensió de sortida del divisor resistiu.

### 6.4.1. Acondicionament del ADC0

El senyal indicador de la posició de la vàlvula mescladora té uns límits superior i inferior de 0 i 10V respectivament. Com que les etapes de conversió analògica-digital del microcontrolador tenen uns rangs de mesura entre 0 i 3,3V, es necessita una etapa d'acondicionament de senyal. Aquesta etapa es realitza amb un amplificador operacional connectat en topologia de restador inversor.

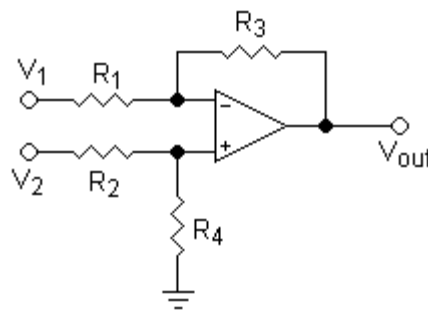


Fig. 6.6. Amplificador operacional en topologia de restador inversor

Aquesta topologia respon a una relació entrades sortides segons l'equació:

$$V_{out} = V_2 \cdot \frac{R_3 + R_1 \cdot R_4}{R_4 + R_2 \cdot R_1} - V_1 \cdot \frac{R_3}{R_1} \quad \text{Eq. 6.4}$$

Si es pren  $R_1 = R_2$  i  $R_3 = R_4$  la tensió de sortida és la diferència de les entrades multiplicada per un factor que depèn de la relació de resistències:

$$V_{out} = V_2 - V_1 \cdot \frac{R_3}{R_1} \quad \text{Eq. 6.5}$$

I si el senyal  $V_1$  es connecta a terra, la sortida  $V_{out}$  és proporcional al senyal  $V_2$ . Llavors si s'escullen les resistències adients es pot acondicionar el senyal per al microcontrolador.

En tant que la relació entre la sortida màxima de la vàlvula i l'entrada màxima del microcontrolador és 10/3.3, les resistències escollides han de mantenir la mateixa relació i s'han escollit:

$$R_1 = R_2 = 10K \text{ i } R_3 = R_4 = 3,3K$$

L'amplificador operacional que s'ha escollit és un LM258DRG3 de *Texas Instruments*. A la sortida del circuit restador s'ha acoblat un filtre RC per filtrar els possibles sorolls que es poguessin induir. També com a mesura de protecció s'han col·locat dos díodes, un entre la sortida i la referència de 3,3V i l'altre entre la sortida i la referència de terra. Aquests díodes serveixen per protegir el microcontrolador contra possibles sobre o subtensions que posarien en risc la integritat d'aquest.

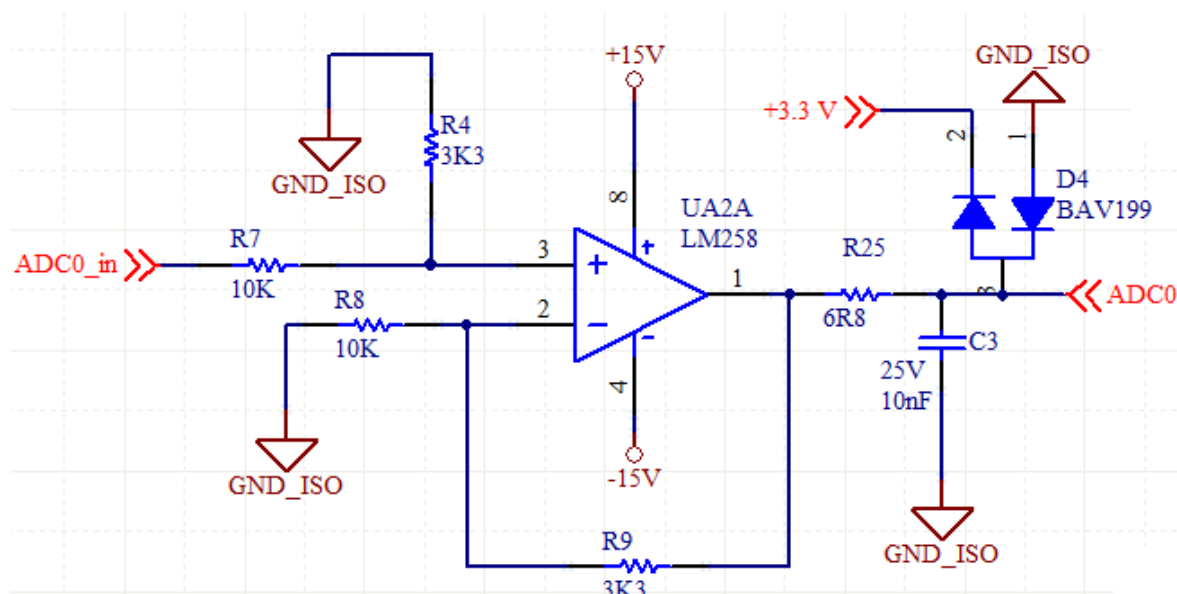


Fig. 6.7. Circuit d'acondicionament del senyal de posició de la vàlvula mescladora

#### 6.4.2. Acondicionament del ADC1

Com que el microcontrolador té els límits abans mencionats, és necessari que la tensió en l'entrada analògica quan la temperatura sigui la màxima no descendeixi per sota dels 0V, i quan la temperatura sigui la mínima no superi els 3,3V.

L'etapa de conversió analògica-digital però, necessita que la tensió estigui referenciada al terra de la placa; així és necessària una etapa d'acondicionament per poder fer la mesura de la temperatura. Aquesta etapa s'implementa amb un amplificador en configuració de restador inversor com en l'apartat anterior (Fig. 6.6).

Si es connectessin els nodes positiu i negatiu corresponents a la sortida del pont de Wheaston (figura Fig. 6.4) a les entrades  $V_2$  i  $V_1$  del restador inversor (Fig. 6.6), la tensió resultant no seguiria l'equació Eq. 6.1 ja que es crearien unes connexions en paral·lel, les quals no s'han tingut en compte; per tant abans del restador inversor es necessita aïllar els dos circuits. Per

dur a terme aquesta tasca s'utilitzen dos amplificadors operacionals en configuració de seguidor de tensió.

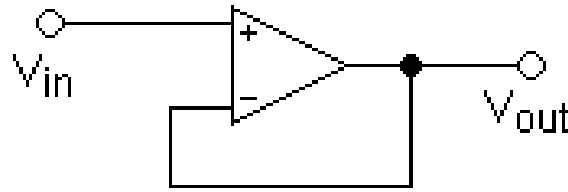


Fig. 6.8. Amplificador operacional en topologia de seguidor de tensió

Amb aquesta topologia la tensió d'entrada i la tensió de sortida són la mateixa, però com que l'entrada és en alta impedància, el problema abans mencionat ja està solucionat. Així les sortides dels ponts de Wheaton es connecten a dos seguidors de tensió, i les sortides d'aquest seguidors a les entrades d'un restador inversor.

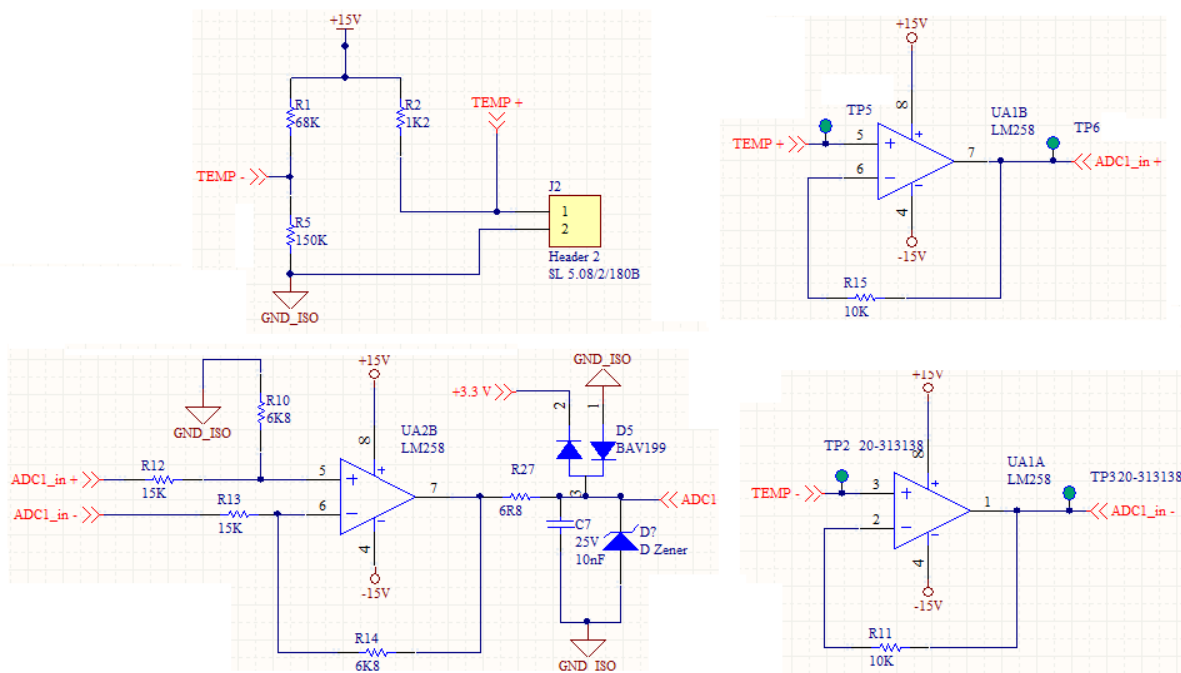


Fig. 6.9. Circuit d'acondicionament del senyal de la temperatura

Com es pot veure a la il·lustració anterior, a la sortida del restador inversor s'hi ha col·locat un filtre RC i les proteccions contra sobre i subtensions, com en l'apartat anterior.

Com que la resistència de sensat en el pont de Wheaton pot ser desconnectada, hi ha el perill de que l'entrada de l'amplificador operacional quedi a l'aire i la sortida del restador inversor



saturi. En aquest cas la sortida de l'amplificador tindria un valor pròxim als 15V molt superior als nivells màxims de tensió per al microcontrolador. Per a protegir-lo d'aquest perill s'ha col·locat un díode Zener de 3,6V en antiparal·lel entre l'entrada ADC del microcontrolador i el terra analògic del sistema.

De l'apartat 6.3 se sap que la tensió de sortida quan la temperatura és de 0°C correspon a 7,247V. Com que es pren 0°C com a límit inferior per a la temperatura, s'ha d'acondicionar el senyal en aquest punt a 3,3V. Si es pren l'equació Eq. 6.5 es dedueix que la relació entre les resistències  $R_3/R_1$  ha de ser 3,3/7,247. Buscant en les resistències normalitzades s'han escollit  $R_1 = 15K\Omega$  i  $R_3 = 68K\Omega$ .

## 6.5. Convertidor Digital-Analògic

El microprocessador no disposa de cap convertidor digital-analògic, és per aquest motiu que s'ha decidit utilitzar un perifèric al qual se l'hi envien ordres mitjançant SPI. Aquest dispositiu és un DAC de 10 bits i dos canals TLV5671AID de *Texas Instruments*. Els senyals de sortida del DAC s'utilitzen per donar ordres a les vàlvules proporcional i mescladora en funció de les consignes de cabal i temperatura i el valor actual d'aquestes variables.

### 6.5.1. Acondicionament dels DACs

El convertidor proporciona una tensió de sortida d'entre 0 i  $2 \cdot V_{ref}$ . La tensió de referència té uns límits màxim i mínim de 0 i  $V_{dd} - 1,5 V$  i com que el DAC està alimentat a 5V s'ha decidit utilitzar una  $V_{ref}$  de 2V.

Les vàlvules proporcional i mescladora reben ordres d'un senyal analògic d'entre 0 i 10V, d'aquesta manera és necessària una etapa d'amplificació del senyal que es duu a terme amb un amplificador operacional en configuració de restador inversor com el de la Fig. 6.6.

La relació entre les tensions d'entrada i sortida segueixen l'equació Eq. 6.4 i si, com en el cas dels ADC es connecta  $V_1$  a terra, es pot escollir les resistències adients per acondicionar el senyal per a les vàlvules.

En tant que la relació entre la sortida màxima del DAC i l'entrada màxima de les vàlvules és 2/10, les resistències escollides han de mantenir la mateixa relació i s'han escollit per a les dues etapes d'acondicionament:

$$:R_1 = R_2 = 2K \quad i \quad R_3 = R_4 = 10K$$

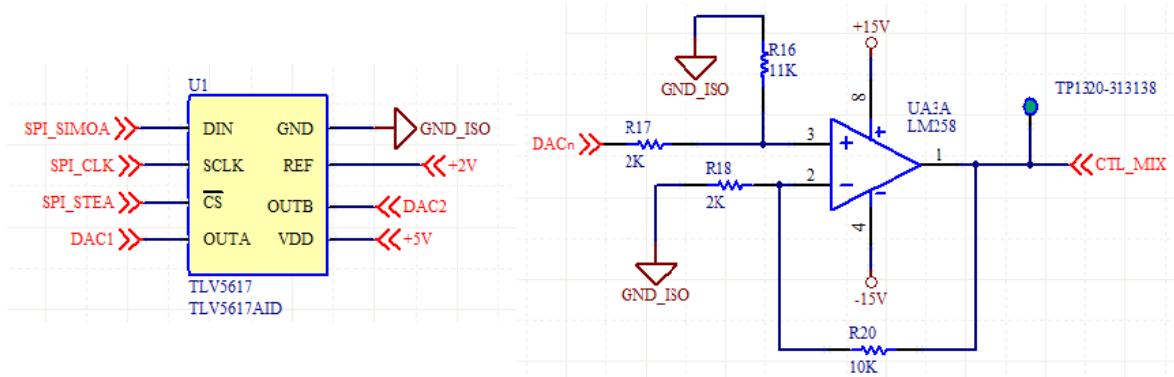


Fig. 6.10. Esquema del DAC extern i etapa d'acondicionament de la sortida

### 6.5.2. Referència de tensió

La tensió de sortida del DAC depèn en gran mesura de la tensió de referència que li sigui proporcionada, per tant si es vol una sortida sense oscil·lacions indesitjades i amb un alt grau de precisió es necessita una referència robusta i estable.

La referència utilitzada per al DAC té una precisió del 0,2%, la REF3020 de *Texas Instruments*, la qual va alimentada a 5V i disposa d'una sortida de 2.048V.

A l'entrada i sortida de la referència s'hi ha col·locat uns condensadors per filtrar els possibles sorolls que poguessin aparèixer.

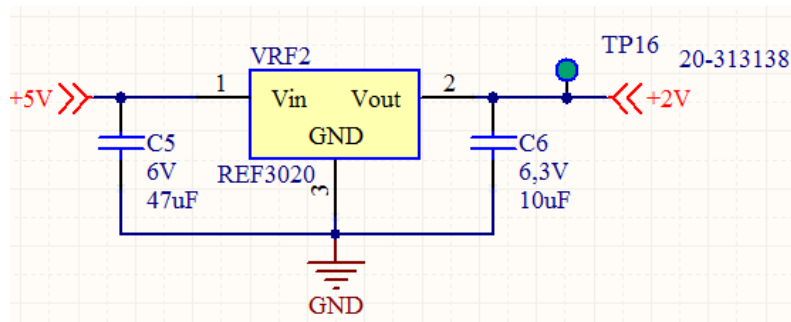


Fig. 6.11. Referència de tensió per al DAC

## 7. Components del sistema

### 7.1. Microcontrolador “Concerto”

El “Concerto” és un microcontrolador de *Texas Instruments* que consta de dos nuclis: l'ARM i el C28. Aquests dos nuclis estan dissenyats per gestionar comunicacions i per gestionar controls en temps real respectivament.

#### 7.1.1. Nucli ARM

El nucli ARM s'encarrega de gestionar les comunicacions entre el microcontrolador i l'exterior. També s'encarrega de donar permisos d'utilització dels pins al nucli C28, i d'intercanviar informació amb aquest ja sigui per transferir-li informació que ve de fora del microcontrolador o per transmetre a l'exterior informació recopilada pel C28.

Les principals funcions de l'ARM són allotjar una pàgina web que actua com a interfície home-màquina i gestionar un servidor TCP-IP per enviar totes les dades d'historials a un PC-*embedded*.

#### 7.1.2. Nucli C28

El nucli C28 s'encarrega de dur a terme el control del sistema, llegeix les dades de cabal i temperatura i calcula mitjançant un algoritme quines ordres ha de donar a les vàlvules. També envia totes les lectures preses a l'ARM perquè aquest pugui transmetre-les al PC-*embedded*.



Fig. 7.1. Microcontrolador “Concerto” (*Texas Instruments*)

## 7.2. PC-embeded

El PC-embeded és un dispositiu basat en el processador "Sitara" de *Texas instruments*. Sobre aquest processador corre un sistema operatiu Linux (Linux Kernel 3.2). L'empresa distribuïdora és "*Emtrion embeded systems*".

### 7.2.1. Hardware

Aquest dispositiu es pot dividir en dues parts ben diferenciades: una és el mòdul del processador, on s'hi troba el processador, i l'altra és la placa base on s'hi troben tots els perifèrics.

#### 7.2.1.1. Mòdul del Processador (SODIMM Module DIMM-AM335x)

Aquest mòdul s'encarrega d'allotjar el processador, una memòria SDRAM, i una memòria Flash, a més a més de diversos controladors per estàndards de comunicacions per a perifèrics. Totes aquestes entrades sortides van dirigides a un entramat de pins en configuració DIMM. Aquesta placa és el cor del sistema *embeded*, però necessita d'una sèrie de perifèrics per poder ser utilitzada, és per aquest motiu que va muntada sobre la placa base.



Fig. 7.2. Mòdul del Processador SODIMM Module DIMM-AM335x

Llistat de components allotjats en el mòdul del processador:

- SDRAM de 512 MB
- Controlador per a la NAND Flash
- NAND Flash de 512 MB
- NOR Flash de 8MB
- Interfície per a l'Ethenet (PHY)
- Controlador per al RS232

- Mòdul de rellotge en temps real
- Gestor de potència

### 7.2.1.2. Placa Base (DIMM-Base Verno)

La placa base conté un conjunt d'elements que s'encarreguen de dur a terme totes les funcions bàsiques que el mòdul del processador li envia a través del DIMM. Bàsicament conté els connectors en format estandarditzat per les comunicacions entre el processador i l'exterior, la presa per l'alimentació i la interfície per la pantalla TFT LCD.



Fig. 7.3. Placa Base. DIMM-Base Verno

Llistat de components allotjats la placa base:

- Connector RJ45 per a 100Base-TX Ethernet
- Connector USB-A
- Connector USB-B
- Port per a micro SD
- Sortida d'àudio jack 3.5 mm
- Dos connectors de bus CAN
- Interfície per la pantalla TFT LCD
- Connector DB9 per a RS232
- Entrada analògica
- Connector per a SPI, I<sup>2</sup>C i entrades digitals
- Connector per a l'alimentació

## 7.2.2. Software

El desenvolupament d'aplicacions per a sistemes *embedded* no és una tasca fàcil, per això Emtrion ofereix amb la venda del producte una màquina virtual basada en la distribució de Linux Ubuntu que conté una sèrie d'eines per facilitar la creació d'aplicacions.

Entre els elements més importants de la màquina virtual s'hi pot trobar la plataforma de desenvolupament Eclipse per a la programació d'aplicacions, un servidor TFTP per a la descàrrega del sistema d'arxius i un servidor NFS que s'utilitza per al desenvolupament d'aplicacions sense transferir-les al dispositiu *embedded*.

La màquina virtual també conté dos paquets per facilitar el desenvolupament d'aplicacions d'una forma més senzilla. Aquests són el *SDK* i el *BSP*.

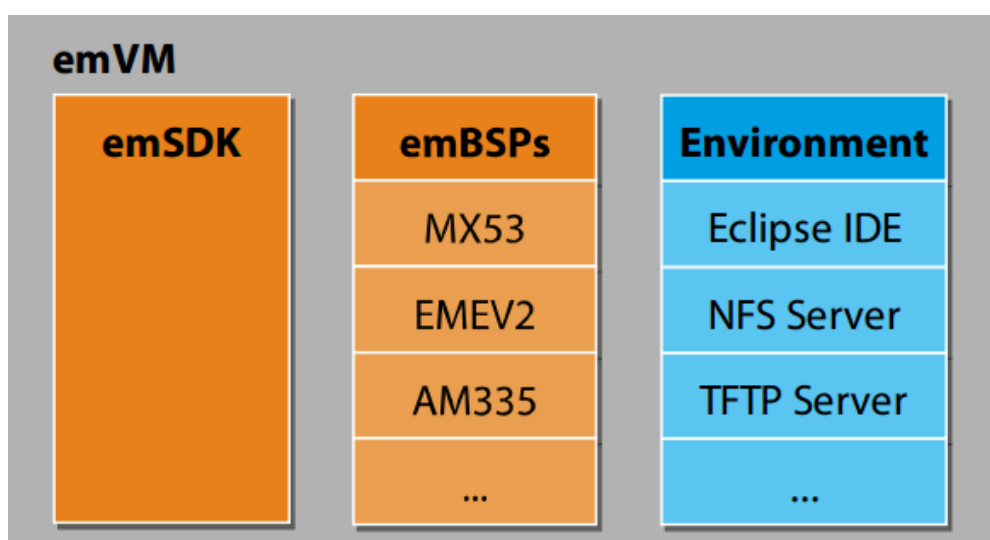


Fig. 7.4. Esquema dels components de la màquina virtual

### 7.2.2.1. Paquet de suport per a la plataforma (BSP)

El Paquet de suport per a la plataforma conté un sistema d'arxius base (*root file system*) típic del sistema operatiu Linux, així com les llibreries per al DIMM-AM335x i una sèrie d'eines per a la compilació creuada.

La compilació creuada es basa en desenvolupar i compilar aplicacions en una plataforma que no és la que finalment les executarà. Aquesta tècnica allibera memòria als sistemes *embedded* ja que no han de contenir les llibreries estàtiques, compiladors, i entorn de programació, i permet que aquests necessitin unes prestacions molt menys exigents.

L'esquema de la figura Fig. 7.5 mostra els principals elements del BSP.

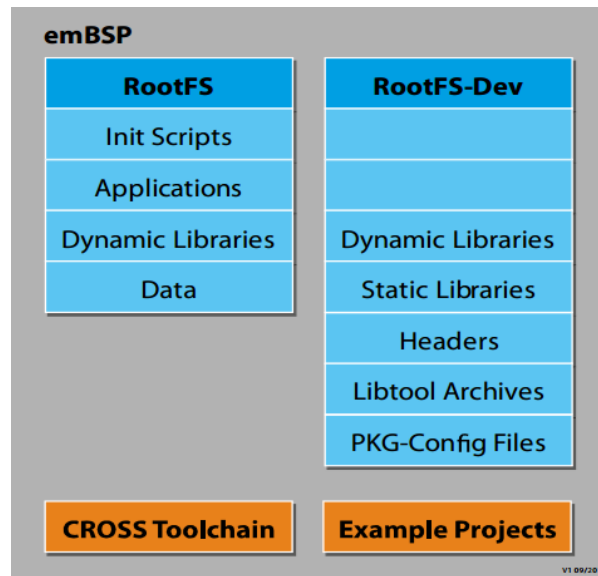


Fig. 7.5. Esquema dels components del BSP

El BSP conté dos sistemes d'arxius, el RootFS i el RootFS-Dev. El primer és el sistema d'arxius que serà descarregat al sistema *embedded*, i conté només els principals elements per a l'execució del sistema operatiu Linux i les aplicacions finals. El segon, el RootFS-Dev, conté les llibreries necessàries per a la compilació de les aplicacions que finalment aniran al RootFS, així com les capçaleres i eines per al desenvolupament de llibreries.

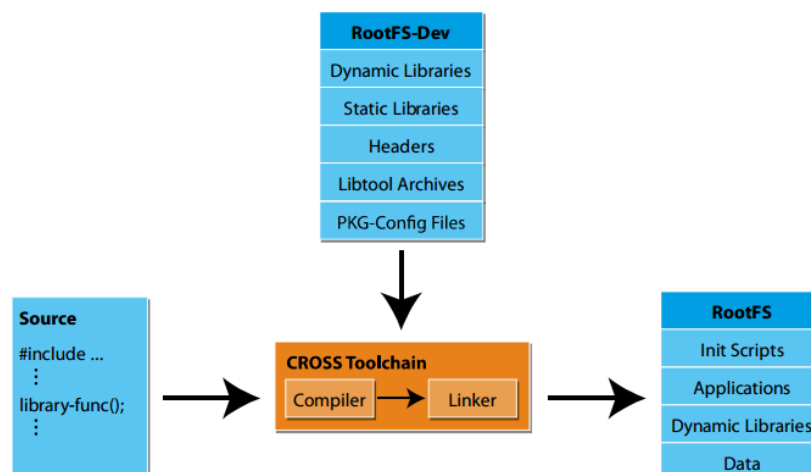


Fig. 7.6. Diagrama d'operació per al desenvolupament de programes

### 7.2.2.2. Equip de desenvolupament de programari (SDK)

L'equip de desenvolupament de programari és un conjunt de scripts i arxius de configuració per poder realitzar algunes tasques necessàries per al desenvolupament d'aplicacions. Entre les tasques més importants hi ha:

- Descomprimir i instal·lar el BSP abans mencionat.
- Activar un entorn específic (BSP) en la màquina virtual.
- Realitzar la compilació creuada i afegir l'executable al RootFS.
- Crear la imatge per descarregar a la plataforma.
- Compartir el *Root file System* a través de la xarxa.



## 8. Programació dels elements

Per al correcte funcionament del sistema de gestió de l'aigua s'han programat els tres elements mencionats anteriorment: ARM, C28 i *PC-embedded*, perquè cada un realitzi les funcions pertinents. En aquest apartat s'explica de manera qualitativa quins han estat els principals problemes a l'hora de realitzar la programació així com les solucions i els programes finals escollits. Per a més detall es pot referir a l'Annex 3 on s'hi troben els codis principals dels programes.

### 8.1. Sistema operatiu RTOS-TI

El sistema operatiu RTOS-TI és un sistema operatiu per aplicacions en temps real que facilita la gestió de moltes funcionalitats del microcontrolador. Es disposa de dues versions depenent de si es programa el nucli ARM o el nucli C28. L'entorn de programació *Code Composer* disposa d'un *plugin* per facilitar la programació. Entre les operacions més importants del SO s'hi troben: la gestió de tasques, la gestió de la comunicació TCP-IP, la gestió del servidor WEB, la gestió de la comunicació entre nuclis i la gestió del sistema d'arrencada. S'utilitza en ambdós nuclis.

### 8.2. Programació del ARM

L'ARM s'encarrega de gestionar les comunicacions del sistema, incorpora un servidor Web, un servidor TCP-IP i gestiona la comunicació entre el C28 i l'exterior.

#### 8.2.1. Servidor Web

Per a la interfície home-màquina s'ha utilitzat una pàgina web. Aquesta pàgina web està allotjada en un servidor que es gestiona des del nucli ARM del microcontrolador.

A la web es poden introduir les consignes de cabal i temperatura que posteriorment són enviades a l'ARM. Per a fer efectiu el canvi de consignes, s'ha introduït un polsador (Sincronitza) que en ser activat fa que l'ARM enviï les variables al segon nucli C28; en rebre aquestes dades el control comença a calcular el senyal de sortida en funció dels nous valors.

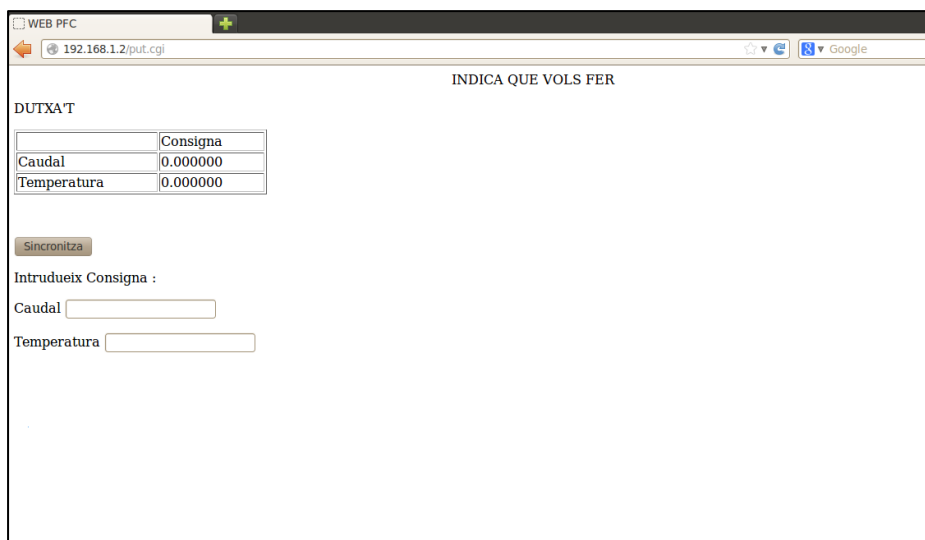


Fig. 8.1. Pàgina web interfície home-màquina

### 8.2.2. Servidor TCP-IP i comunicació entre nuclis

La comunicació entre nuclis i la connexió TCP-IP amb l'exterior estan íntimament lligades. Les dades que es volen exportar són les dades del control, ja siguin consignes, lectures, errors, senyals, etc. Ja que el control és realitzat pel C28, les dades estan en la seva memòria dedicada i necessiten passar a l'ARM per a ser exportades.

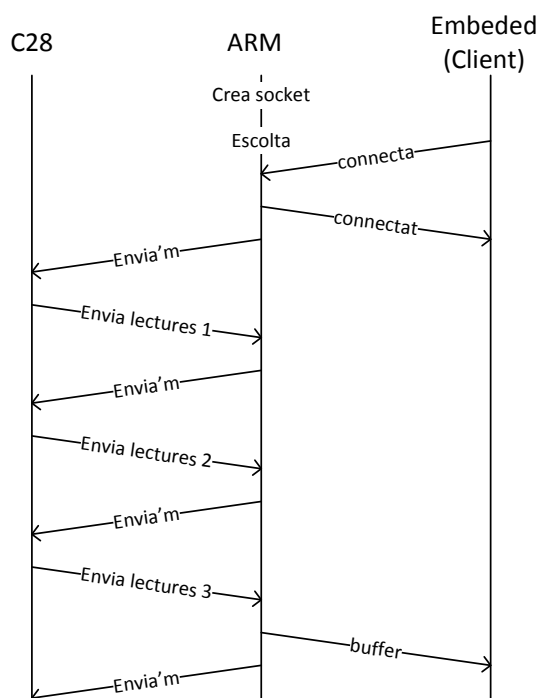


Fig. 8.2. Diagrama d'operació de comunicacions

La figura Fig. 4.3 mostra l'operació del bucle de comunicacions. El servidor TCP-IP crea un *socket* i el posa a "escoltar" per si arriben connexions entrants. En rebre la petició d'un client activa la connexió entre l'ARM i el C28 i activa el bucle de comunicacions: llegeix un missatge del C28, el col·loca en un buffer i posteriorment avisa al C28 que ja està preparat per a rebre un altre missatge. Quan el buffer és ple, l'ARM l'envia a través de la connexió que s'ha creat amb el client perquè aquest gestioni les dades per al posterior anàlisi.

### 8.3. Programació del *PC-embedded*

El *PC-embedded* actua com a client TCP-IP; el programa crea un arxiu CSV i envia una petició de connexió, en rebre la confirmació comença a llegir el buffer amb les variables que li va enviant l'ARM. Les dades que rep es troben en diferents formats i s'han de gestionar per a posteriorment col·locar-les a l'arxiu CSV en format text. Amb aquest arxiu s'han creat les gràfiques per millorar el control i comprovar la resposta dinàmica i l'error, però en una aplicació final serviria per gestionar els historials i poder prendre decisions a partir de les dades de consum.

### 8.4. Programació del C28

Com s'ha comentat anteriorment el C28 s'encarrega del control. El control està dividit en dues parts: la primera consisteix en el control de cabal i la segona en el control de temperatura. Per poder realitzar aquest control primer s'ha hagut de configurar les lectures dels ADC, de l'ECAP, i configurar l'SPI per a enviar les ordres al DAC.

#### 8.4.1. Lectures ADC i ECAP

S'utilitzen dos canals del ADC, ADC0 i ADC1 per llegir la temperatura i la posició de la vàlvula mescladora respectivament. Els ADCs estan configurats per començar la conversió cada 5ms. L'ECAP és actualitzat en rebre dos polsos i per tant el temps d'actualització depèn de la freqüència del tren de polsos que arriba.

#### 8.4.2. Ordres SPI i DAC

Per enviar ordres a les vàlvules s'utilitza un DAC de dos canals que s'actualitza mitjançant SPI. En cada cicle el microcontrolador llegeix el cabal i la temperatura, aplica l'algoritme de control i envia la informació al DAC. El DAC té uns registres de 16 bits i se li envia una trama

amb 4 bits de configuració (D15-D14), 10 bits per al valor del DAC (D11-D3) i 2 bits finals (D1-D0) que estan en tot moment a nivell baix.

D15	D14	D13	D12	D11	D10	D9	D8	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	
R1	SPD	PWR	R0	MSB						10 Data bits				LSB	0	0

Fig. 8.3. Trama per a la configuració del DAC

Els bits de configuració indiquen el comportament del DAC en rebre la trama SPI. El bit SPD determina si s'utilitza el mode ràpid o el mode lent, el bit PWR serveix per encendre i apagar el DAC i els bits R1 i R0 serveixen per escollir el mode de funcionament tal i com indica la taula següent:

R1	R0	Registre
0	0	Escriure dades al DAC B i al buffer
0	1	Escriure dades al buffer
1	0	Escriure dades al DAC A i carregar el DAC B amb el buffer
1	1	Reservat

Fig. 8.4. Taula de combinacions per a l'actualització del SPI

S'ha escollit un funcionament per actualitzar els dos canals a la vegada: primer s'actualitza el buffer i després s'escriuen les dades al DAC A i es carrega el DAC B amb el buffer.

### 8.4.3. Control del cabal

El control del cabal el realitza la vàlvula proporcional amb l'ajuda del cabalímetre per la presa de mesures. En un principi s'ha ideat per gestionar el control amb un controlador PI convencional, però el funcionament de la vàlvula fa que el comportament no sigui l'idoni. Per motius de seguretat, la vàlvula es tanca instantàniament si la consigna no supera un nivell de tensió llindar. Aquest fet lligat amb el sobrepic produït amb el controlador PI fa que la vàlvula s'obri i es tanqui en instants no desitjats.

Per sortejar aquest problema però seguir tenint una configuració semblant a la del controlador PI, s'ha decidit utilitzar la mateixa estructura del controlador PI sumada a una constant que correspon a la meitat del senyal a enviar, així s'aconsegueix evitar aquest problema i mantenir una resposta idèntica a un controlador PI.

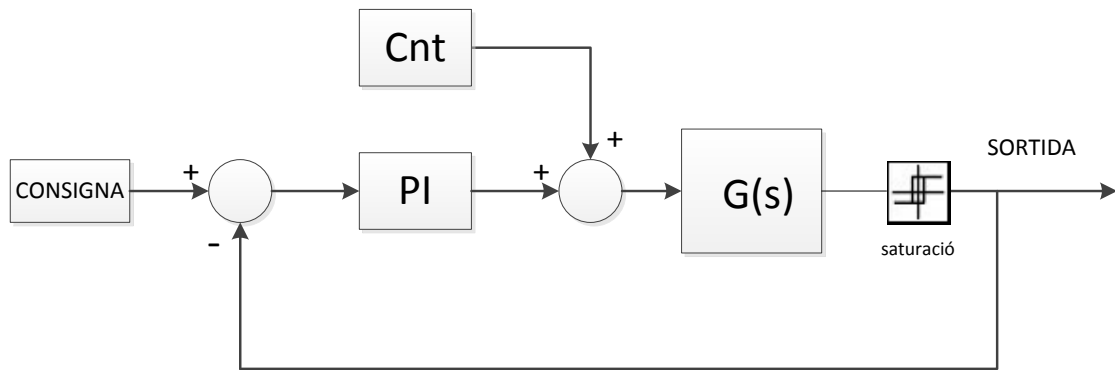


Fig. 8.5. Esquema del control

#### 8.4.3.1. *Anti-Windup* i Saturació

Un problema de la part integradora del controlador PI és que si l'error no s'aconsegueix fer 0 per algun motiu, aquesta creix indefinidament podent comportar situacions perilloses degut a sortides extremadament elevades o canvis extremadament bruscos en la sortida. Per aquest motiu s'introdueix *Anti-Windup* que no deixa créixer la part integral de l'error a partir d'un valor establert.

Els límits s'han escollit de tal manera que el control sigui capaç d'arribar als dos límits de la vàlvula amb error estacionari 0.

$$0 < 512 + KP \cdot 0 + \text{Integral de l'error} < 1024 \quad \text{Eq. 8.1}$$

$$-512 < \text{Integral de l'error} < 511 \quad \text{Eq. 8.2}$$

La saturació, per altra banda, s'introdueix per a no superar els límits lògics del DAC i tenir problemes amb l'enviament de dades per culpa de la representació binària de les dades.

Per a l'enviament de dades al DAC s'utilitza una estructura amb la següent configuració:

```
struct SPI_BITS
{
    Uint16 D1D0 :2;
    Uint16 data :10;
    Uint16 conf :4;
};
```

Com es pot comprovar, les dades (data) són 10 bits als quals se'ls hi assigna el valor de la sortida del controlador, així doncs en el cas que superés 1023 el valor que rebria el DAC seria erroni i el sistema no tindria el comportament desitjat.

En aquest cas s'ha forçat que si la sortida del controlador sobrepassa -superior o inferiorment- qualsevol dels límits el valor enviat al DAC serà el seu límit superior o inferior respectivament.

#### 8.4.3.2. Sintonització del les constants del PI

L'anàlisi i la modelització matemàtica de la planta són molt complicades. El comportament de la vàlvula proporcional no està modelitzat i l'anàlisi de la resposta transitòria dels fluids a l'obertura d'una vàlvula és un exercici de difícil resolució per a la mecànica de fluids. Per aquest motiu la sintonització dels valors del controlador PI s'ha realitzat seguint un mètode heurístic.

En una primera instància s'ha intentat dur a terme el mètode Ziegler-Nichols en llaç tancat, però la sortida no ha presentat unes oscil·lacions clares i amb un període establert per cap KP degut al comportament de la vàlvula i al seu límit superior. Per tant s'ha procedit a utilitzar el mètode prova i error.

Per realitzar el mètode prova i error s'ha començat per anar augmentant la KP des de zero buscant un comportament indesitjat degut al comportament de tancament abans mencionat. Aquest comportament s'ha trobat amb una constant proporcional de 6000.

Posteriorment s'ha reduït aquesta constant proporcional fins a 5000 i s'ha anat incrementant la constant integradora fins que l'error estacionari s'ha reduït en un temps raonable i sense un sobrepic excessiu. La primera prova s'ha realitzat amb una KI de 5.

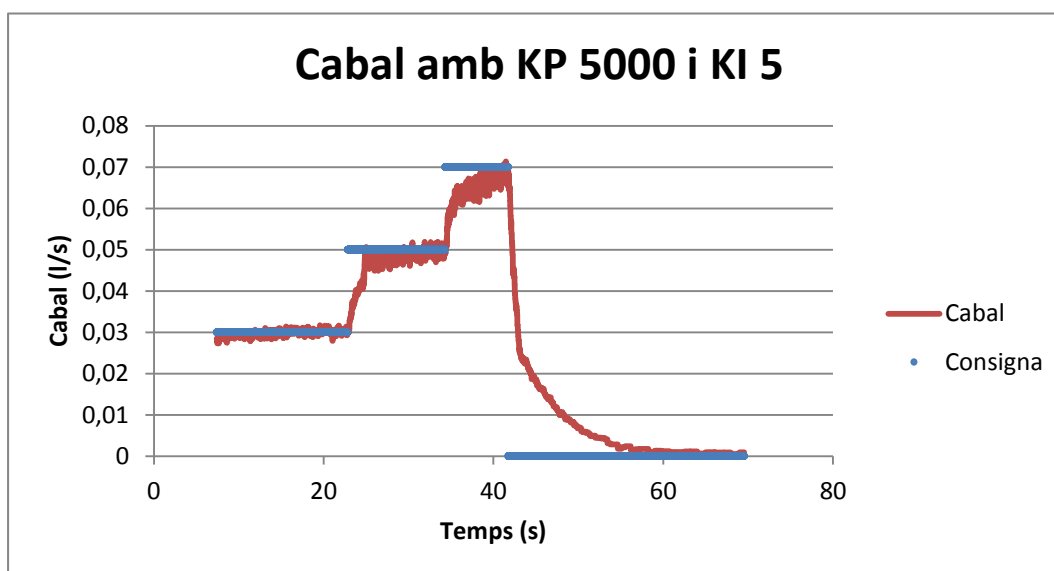


Fig. 8.6. Resposta temporal del cabal 1

Com es pot veure en la Fig. 8.6 la resposta temporal no és el suficientment ràpida i s'ha procedit a incrementar la  $K_I$  fins a 10.

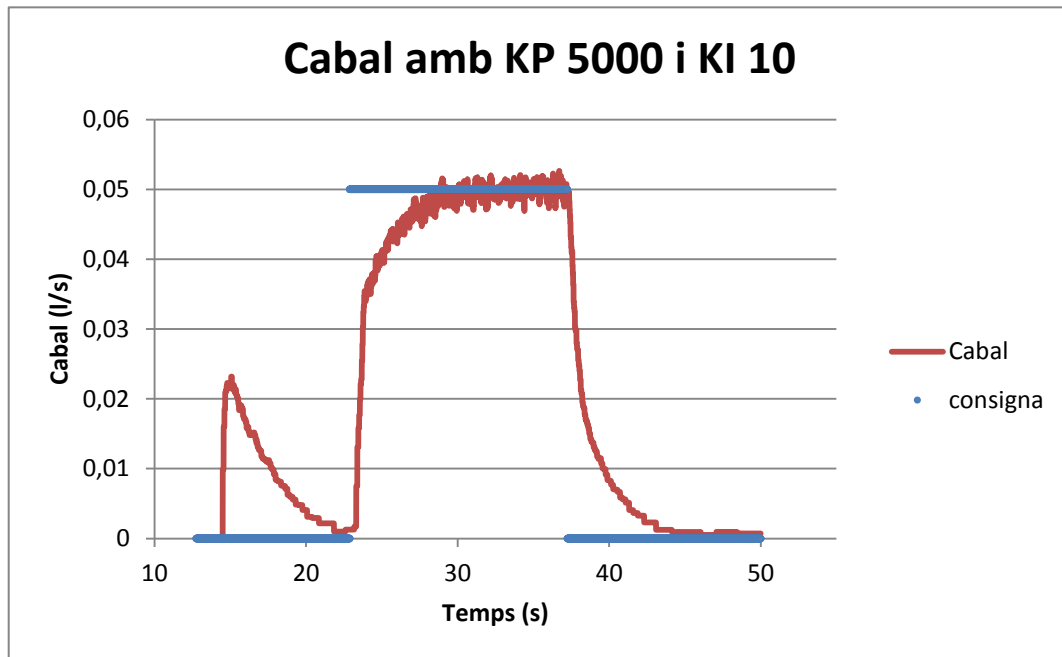


Fig. 8.7. Resposta temporal del cabal 2

Aquest procés s'ha repetit amb un valor de  $K_I = 15$ .

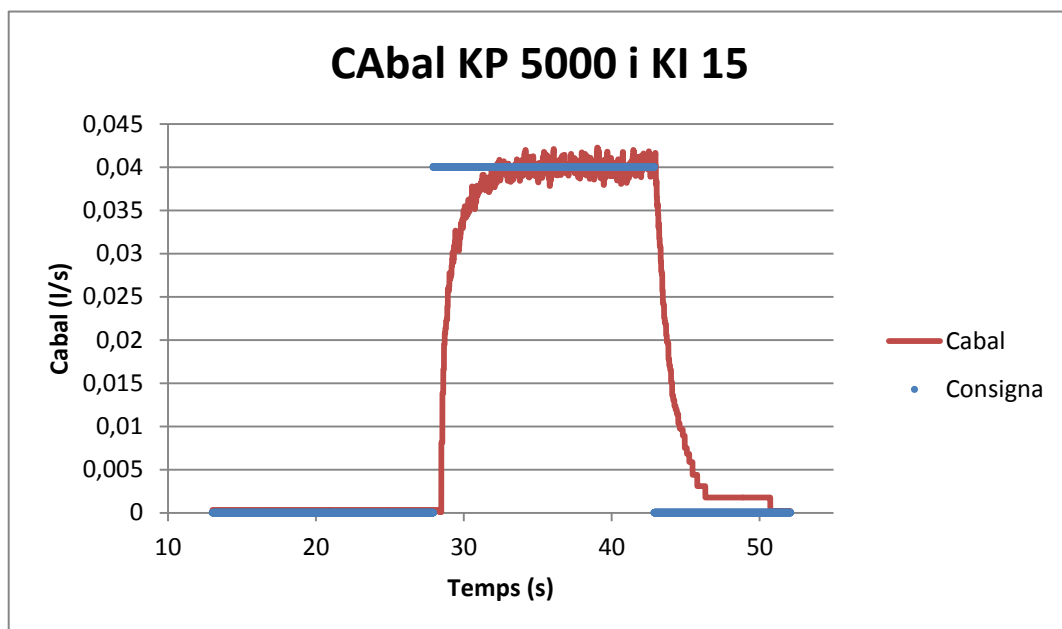


Fig. 8.8. Resposta temporal del cabal 3

La resposta amb  $KI = 15$  encara no és l'òptima i s'ha prosseguit amb l'increment de  $KI$  fins a 20.

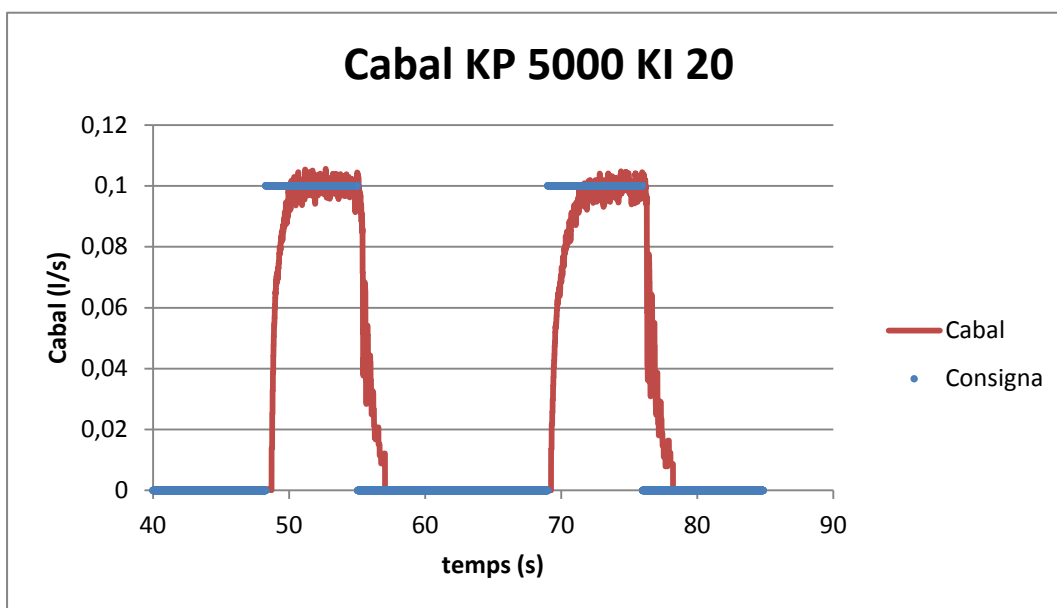


Fig. 8.9. Resposta temporal del cabal 4

La resposta dinàmica amb un  $KI$  de 20 és suficientment ràpida però presenta un problema a l'hora de tancar: s'obra i es tanca repetides vegades abans d'acabar tancant-se completament. Aquest fet s'ha atribuït a una constant proporcional molt elevada, i s'ha procedit a reduir-la a la meitat.

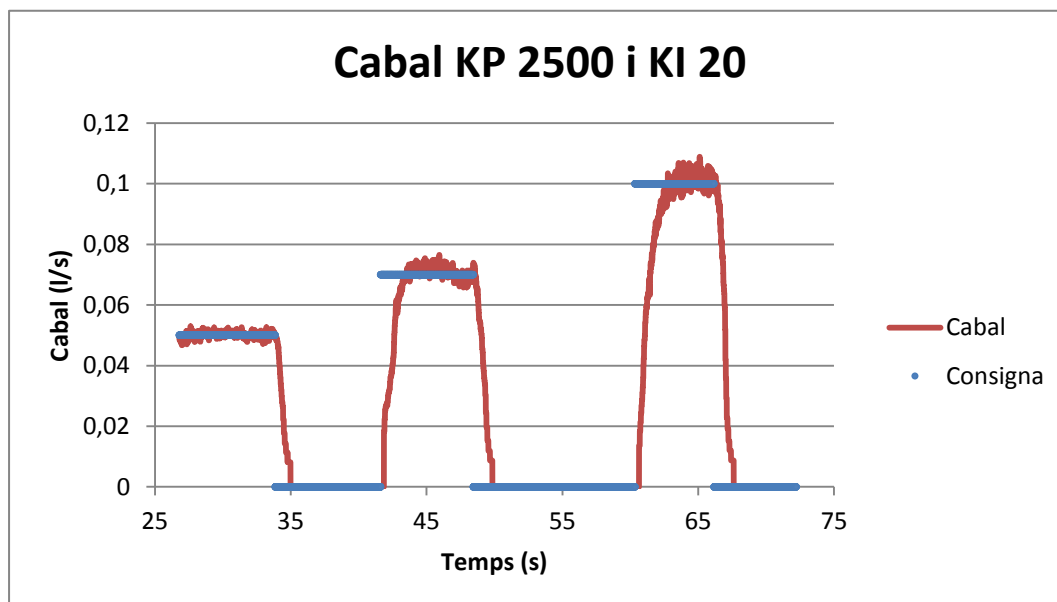


Fig. 8.10. Resposta temporal del cabal 5



Amb aquesta configuració s'obté també una resposta suficientment ràpida. A l'hora de tancar però, apareix un problema quan es tanca des de cabals per sobre de 0.06 l/s; en aquests casos el tancament sobtat de la vàlvula proporcional per culpa d'un senyal de comandament per sota del llindar mínim provoca un cop d'ariet indesitjat.

Per millorar aquesta situació sense perdre velocitat en altres respostes s'ha procedit a crear un algoritme per als casos en que es desitja finalitzar la dutxa. L'algoritme es basa en una reducció de la constant integradora quan el cabal és superior a 0,06l/s a un valor de 6 per als casos en que la consigna final és 0.

Aquesta modificació elimina el cop d'ariet però presenta un problema: la disminució no suficientment ràpida de la consigna fa que la vàlvula proporcional deixi passar un cabal tan petit que el cabalímetre no és capaç de detectar abans de tancar, fet que provoca que el sistema cregui que ja està tancat i no acabi de tancar-se totalment.

Per fer desaparèixer aquest efecte s'ha buscat un cabal per al qual un tancament bruscat de la vàlvula proporcional no desencadeni un cop d'ariet i s'ha ajustat que l'ordre a la vàlvula per valors inferiors a aquest sigui zero si la consigna és zero.

Aquesta modificació final soluciona tots els problemes. Amb aquest algoritme el funcionament del control de cabal ja és l'adequat i s'han anat fent petites modificacions al valors de  $Kp$  i  $Ki$  fins arribar a una solució considerada òptima amb uns valors de  $Kp = 2750$  i  $Ki = 20$ .

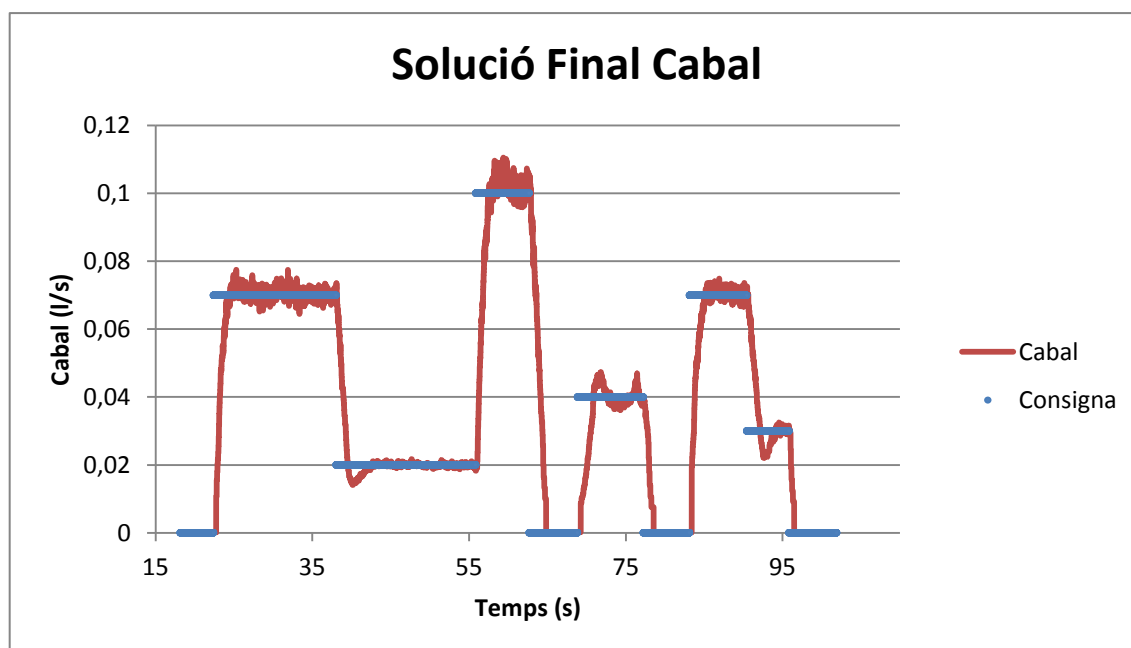


Fig. 8.11. Resposta temporal del cabal solució final

#### 8.4.4. Control de la temperatura

Per al control de la temperatura s'han realitzat diverses proves. En un primer moment s'ha intentat realitzar el control amb un controlador PID, però no s'han pogut ajustar els valors de les constants perquè la resposta sigui adequada per a una dutxa domèstica. El funcionament de la vàlvula i la lentitud de resposta del termistor fan que un controlador PID no sigui adequat per aquest sistema. Finalment, i a petició del director del projecte, s'ha decidit fer un control en llaç obert dividint el tram de recorregut de la vàlvula proporcional en vint trams equidistants que l'usuari podrà escollir com a vint nivells de temperatura.

En aquesta secció s'explica quin procediment s'ha seguit a l'hora d'ajustar el PID i quins han estat els resultats, així com quina ha estat la versió final del control.

##### 8.4.4.1. Controlador PID

Per al control de temperatura s'ha intentat realitzar el mètode Ziegler-Nichols en llaç tancat, però degut al comportament de la vàlvula mescladora i al retard que introdueix el termistor, les oscil·lacions són mantingudes per molts rangs de  $K_p$  i, per tant, s'ha procedit a realitzar l'ajust manual del controlador PID mitjançant el mètode de prova i error.

Després de moltes proves s'ha determinat que amb un controlador PID no és possible controlar aquesta planta de manera eficient; la velocitat de la vàlvula mescladora és constant per a qualsevol posició i consigna, és a dir, la velocitat de la vàlvula davant de consignes determinades no varia en funció de l'error de posició d'aquesta i, per aquest motiu, un controlador PID no introdueix cap millora sensible a la resposta dinàmica.

En un primer instant s'ha intentar implementar un control PI. El principal problema del control PI roman en que per a errors grans la part integral fa créixer la sortida del control fins al límit de saturació i la temperatura no creix d'una forma evident fins que la vàlvula mescladora arriba gairebé al límit superior o inferior. Aquest fet sumat al retràs del termistor introdueix un retard a la planta que fa impossible el control amb el PI i apareixen sobrepics inacceptables.

S'ha reduït la part integral fins a un nivell en que la velocitat de la vàlvula superés la velocitat de creixement de la part integral per intentar eliminar el sobrepic. En aquest cas a part d'obtenir una resposta dinàmica molt lenta, el retràs del termistor fa que hi hagi oscil·lacions d'uns dos graus.

Per salvar aquest problema s'ha introduït una part derivativa convertint el controlador en un PID. La missió d'aquesta part derivativa consisteix en que quan la temperatura s'apropa a la

consigna determinada, l'error disminueix i per tant la sortida del controlador també. Aquesta estratègia redueix els sobrepics però les oscil·lacions continuen existint.

Aquest procés s'ha anat repetint diverses vegades combinant augments i disminucions de les diferents constants de controlador, però ni buscant una resposta inacceptablement lenta s'ha obtingut un resultat satisfactori.

Posteriorment s'ha pensat en utilitzar una estratègia de control basada en un predictor d'Smith. Aquest tipus de controlador pretén separar la planta i el retràs i permet utilitzar mètodes de control com PIDs per a sistemes amb retràs. Un inconvenient en aquest cas és la modelització de la planta. El fet que el retràs depengui del cabal d'aigua calenta i de la temperatura d'aquesta, dificulta notablement la realització d'un predictor Smith. Per aquest motiu s'ha decidit utilitzar la divisió en vint nivells tenint en compte que l'exactitud de la temperatura no és un factor crític en una dutxa convencional.

#### **8.4.4.2. Divisió en vint nivells**

La divisió en vint nivells de temperatura converteix la part mescladora en un regulador manual en que l'usuari decideix si augmentar o disminuir la temperatura, però sense conèixer-la exactament. El que s'ha intentat optimitzar en aquest cas és el temps que triga la temperatura de l'aigua de sortida a assolir el nivell establert.

En una instal·lació domèstica típica, l'aigua calenta s'escalfa en una caldera i posteriorment es barreja a l'aixeta amb l'aigua feda per obtenir-ne una mescla a la temperatura desitjada. Un dels problemes d'aquests tipus d'instal·lacions és que en tancar l'aixeta, el tub d'aigua calenta queda ple i després d'un cert temps aquesta aigua es refreda; per tant en tornar a obrir l'aixeta es necessita que aquesta aigua romanent es buidi perquè l'aigua escalfada a la caldera arribi a la mescla. El segon problema és que el circuit també està fred i s'ha d'escalfar prèviament perquè l'aigua a la sortida estigui calenta.

L'única manera d'aconseguir-ho és obrir l'aigua calenta, esperar que es buidi el tub, i que l'aigua escalfada a la caldera escalfi el circuit de canonades. Perquè aquest procés sigui el més ràpid possible, mentre la temperatura de la sortida no mostri un clar símptoma d'augment l'aigua calenta estarà totalment oberta.

Mitjançant un procediment experimental s'ha dissenyat un algorisme que determina quin és el l'increment de temperatura òptim en funció del nivell escollit.

Amb el procediment experimental s'ha determinat que s'obri al màxim l'aigua calenta sempre que la temperatura no superi els 20°C més un factor multiplicat pel nivell escollit. A partir d'una sèrie de proves partint del sistema en repòs, és a dir, amb les canonades plenes d'aigua freda, s'ha trobat que el valor òptim per a aquest factor és de 0,65.

En la figura Fig. 8.12 es mostra la resposta temporal de la temperatura amb l'algorisme abans mencionat. Es pot comprovar que en els primers instants la temperatura pateix una lleugera disminució degut a que l'aigua dels tubs interiors de la paret està més freda que la que roman en el sistema exterior. A partir d'aquest moment es manté constant fins que tota l'aigua que hi ha a l'interior de la canonada calenta es buida i l'aigua escalfada a la caldera arriba a la mescla (instant 40 s). En aquest punt la temperatura comença a créixer fins a assolir una temperatura estable de 35°C. El retràs de la resposta es d'uns 15s, i tarda uns 45s en arribar a l'estat estacionari. La prova s'ha fet amb un cabal de 0,03l/s.

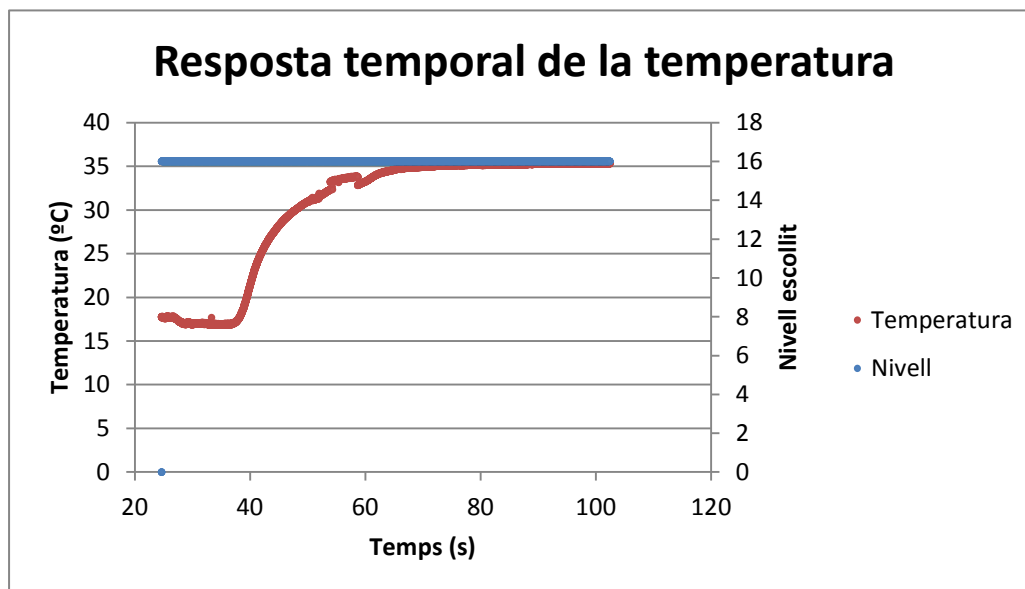


Fig. 8.12. Resposta temporal de la temperatura optimitzada (Nivell 16 i cabal 0,03l/s)

En la figura Fig. 8.13 es mostra la resposta temporal de la temperatura sense aplicar l'algorisme abans mencionat. Es pot comprovar que el retràs és d'uns 20s, 5 segons més que amb l'algorisme. El transitori dura 60s fins a arribar a l'estat estacionari, 15 segons més que amb l'algorisme anterior.

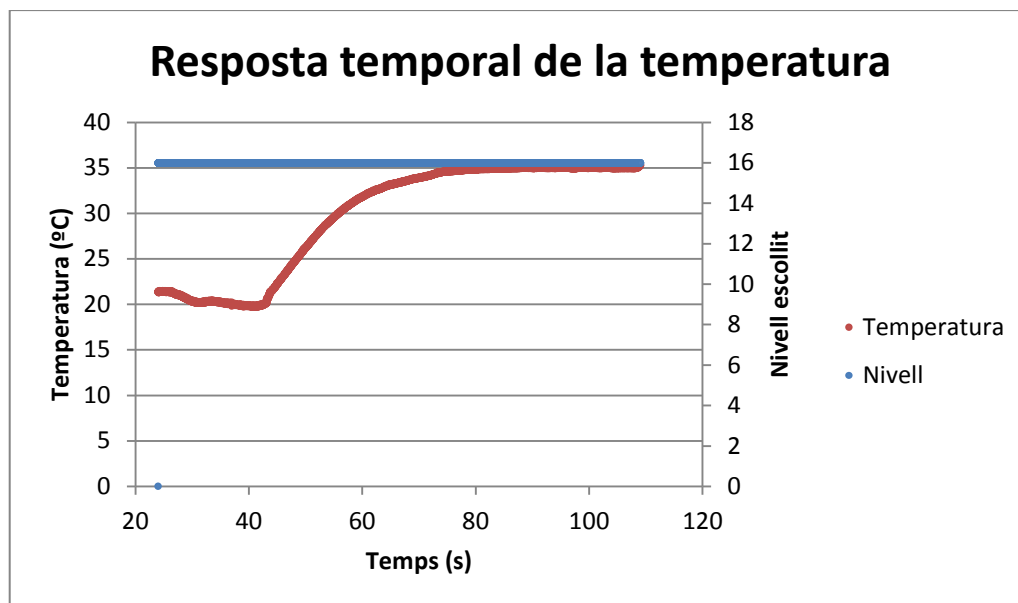


Fig. 8.13. Resposta temporal de la temperatura sense optimitzar (Nivell 16 i cabal 0,03 l/s)

Les figures Fig. 8.14 i Fig. 8.15 mostren un anàlisi semblant a l'anterior per al nivell 12 i amb un cabal de 0,05 l/s. En aquest cas es pot comprovar com el retràs és d'uns 12s en el cas en que no està optimitzat i d'uns 10s en el que sí que ho està, però la diferència més notable roman en el fet que l'estat estacionari és assolit en 30s per al primer cas i en uns 15s en el segon cas.

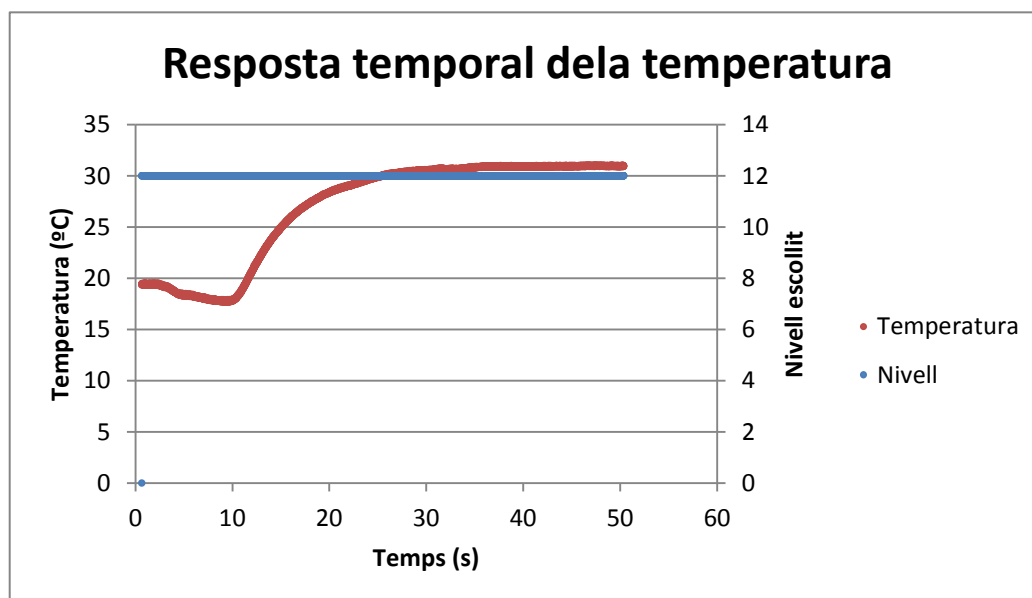


Fig. 8.14. Resposta temporal de la temperatura sense optimitzar (Nivell 12 i cabal 0,05l/s)

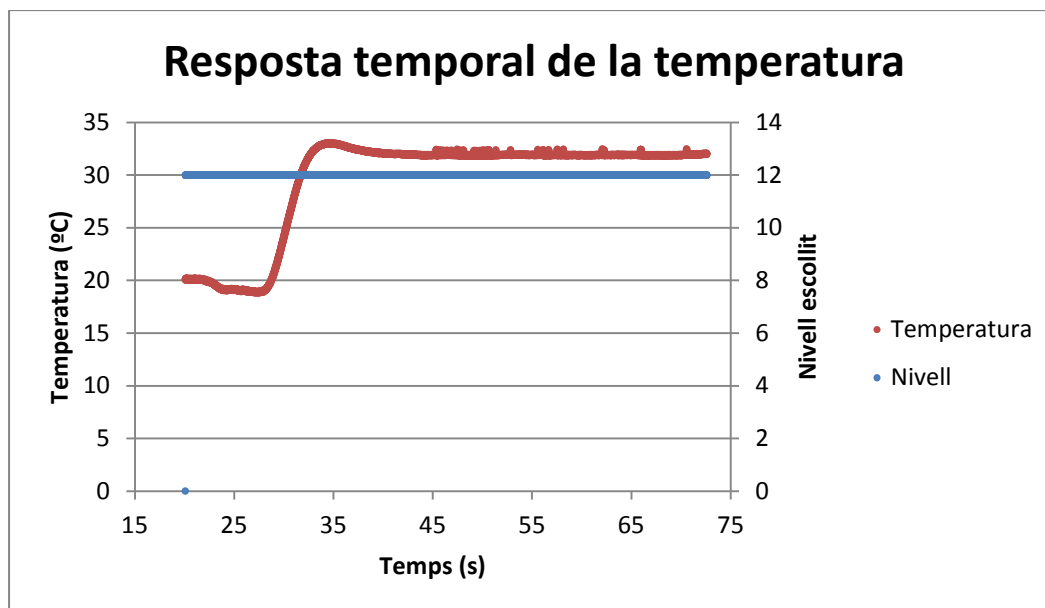


Fig. 8.15. Resposta temporal de la temperatura optimitzada (Nivell 12 i cabal 0,05l/s)

En la figura anterior es pot observar un lleuger sobrepic abans d'arribar a l'estat estacionari. Aquest fet és degut a que l'actuador no és suficientment ràpid per tornar a la posició que correspon al nivell escollit abans que la temperatura superi el nivell de l'estat estacionari.

El compromís entre el sobrepic i la velocitat de resposta del sistema ve marcat pel factor de l'algorisme d'optimització. La decisió de que el factor òptim per l'algorisme d'optimització sigui 0,65 ha estat motivada perquè el sobrepic per al nivell 12 -on aquest és màxim en termes absoluts- no superi 1°C.

El tram de canonada que hi ha després del sensor de temperatura actua com a filtre i, per tant, en la sortida no es reflexa un sobrepic tan accentuat. Aquest sobrepic ha estat impossible de detectar mitjançant la comprovació al tacte.

En les figures Fig. 9.16. i Fig. 9.17. es mostren dues simulacions de funcionament amb les mateixes consignes de temperatura. Com es pot comprovar la temperatura de cada nivell no és la mateixa per a les dues figures, i la diferència en el cas més extrem (Nivell 15) és de 1,5 °C. Aquest comportament indica que la repetitivitat del sistema no és l'òptima.

La diferència de temperatura per al mateix nivell en instants diferents és deguda a les condicions atmosfèriques i al nivell d'escalfament de l'aigua calenta. En el cas de la Universitat la variabilitat de la temperatura d'aigua calenta és molt elevada, i aquesta s'acaba en un temps reduït. Aquest fet afegeix dificultat al disseny de l'algorisme de control i a la possibilitat d'optimitzar el temps del transitori.

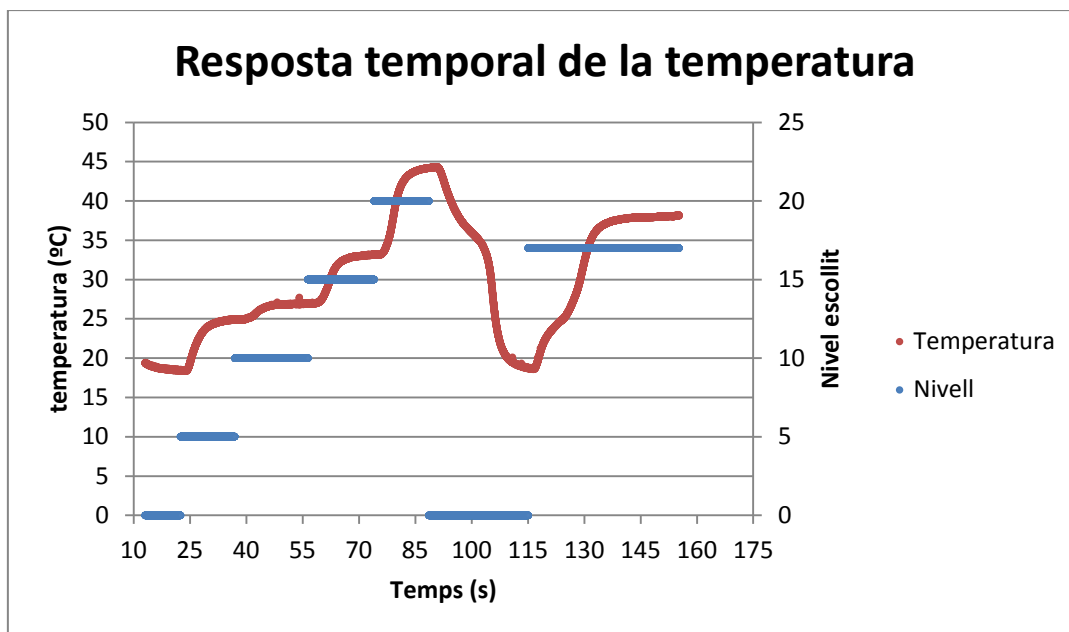


Fig. 8.16. Resposta temporal de la temperatura funcionament normal

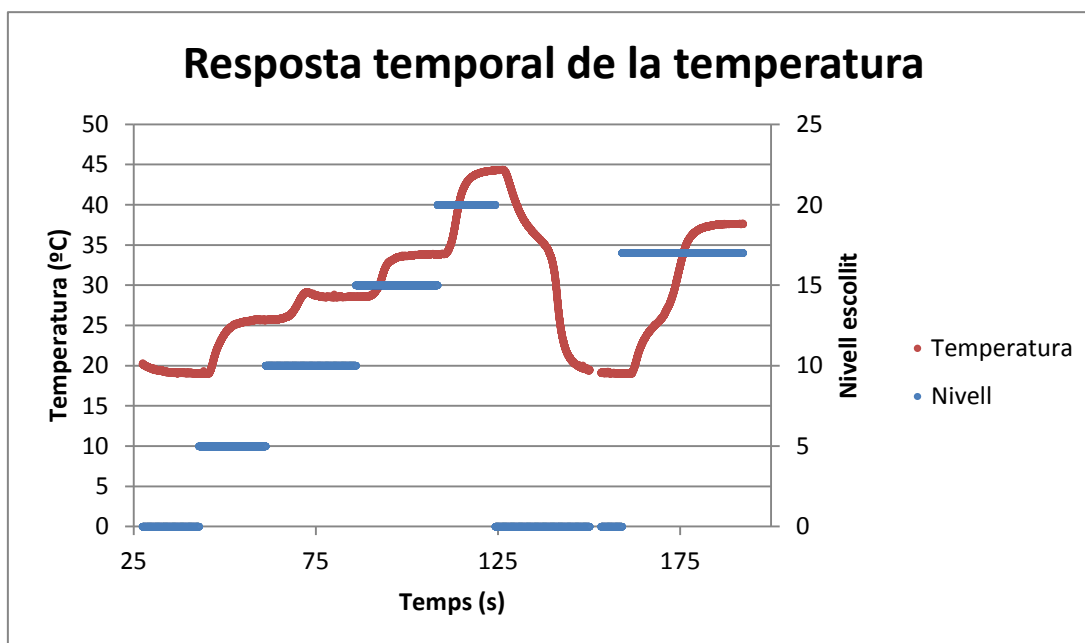


Fig. 8.17. Resposta temporal de la temperatura funcionament normal optimitzat

Es pot comprovar també la dificultat en la modelització del sistema en els canvis de nivell entre 20 i 0 o 0 i 17. La corba de temperatura dibuixa una “S” degut a que en els nivells extrems 0 i 20 l'obertura és total cap a l'aigua freda o cap a l'aigua calenta respectivament.

Si es pren com a exemple el canvi de nivell del 20 al 0 es pot observar que en el moment en que l'actuador s'aparta de l'extrem deixa circular també aigua freda i la pendent s'accentua

( $t = 90s$ ); que en el tram intermedi ( $t=98s - t=105s$ ) la pendent és més reduïda degut a que l'actuador no ha arribat a l'altre extrem; i que a partir de l'instant ( $t=105$ ) la vàlvula mescladora només deixa circular aigua freda i la pendent torna a accentuar-se.

Aquesta resposta de la temperatura és deguda a que, per als casos en que la vàlvula mescladora està pròxima als límits, no és capaç de regular la barreja de cabals amb una resolució prou acurada, fet que dificulta també l'optimització del control.



## 9. Muntatge del sistema

El muntatge del sistema s'ha dut a terme tenint en compte que és una versió beta i, amb aquesta premissa, ni la imatge ni la integrabilitat del producte en una instal·lació domèstica han estat els principals objectius a assolir. El sensor de temperatura i sobretot l'actuador de la vàlvula proporcional, són de difícil incorporació en una instal·lació no preparada, però la possibilitat d'adquirir-los a un preu sensiblement inferior ha fet que s'escollissin com a principals elements del prototip. Per a un producte final, la mida d'aquests components s'hauria de reduir considerablement i s'hauria de buscar la possibilitat de fer la instal·lació del producte d'una forma fàcil i còmoda. Partint d'aquestes premisses i amb els components abans mencionats s'ha reproduït una instal·lació domèstica en una paret de fusta.

### 9.1. Disseny del circuit de canonades

El circuit de canonades ha estat dissenyat amb un objectiu principal i seguint les restriccions que els components requerien.

Com s'ha mencionat anteriorment, la temperatura depèn de la mescla de dos fluxos d'aigua que es barregen a la vàlvula mescladora, de manera que el primer element del circuit és la vàlvula mescladora. Aquesta pren de la instal·lació de la Universitat les dues entrades -freda i calenta- les barreja i condueix la mescla a la sortida per al seu posterior control.



Fig. 9.1. Detall de la vàlvula mescladora i entrades freda i calenta

El principal objectiu és minimitzar l'efecte del retràs del sensor de temperatura per poder obtenir el senyal real el més aviat possible. D'aquesta manera s'ha intentat col·locar el sensor de temperatura el més proper possible a la sortida de la vàlvula mescladora aconseguint així que la mescla contacti el termistor amb el mínim retràs.

El sensor de temperatura té una llargada de 22cm i ha d'estar totalment dins de la canonada. Per aquest motiu a la sortida de la vàlvula mescladora s'ha hagut d'instal·lar una "Te" i un tram de canonada de 24cm per encabir-hi el sensor.



Fig. 9.2. Detall de la sortida de la vàlvula mescladora i tram per al sensor de temperatura

El cabalímetre té una sèrie de normes d'utilització. La més important consisteix en que la sortida del sistema estigui per sobre del seu nivell. Per aquest motiu s'ha aprofitat l'anterior tram de canonada per disminuir el nivell del cabalímetre.

Es recomana tenir un tram de canonada sense cap corba abans i després del cabalímetre perquè el fluid estigui totalment desenvolupat a l'entrada d'aquest. Per aquest motiu després de girar 90° el primer tram de canonada s'ha afegit un tram de 8 cm abans del cabalímetre. I per la mateixa raó abans de tornar a girar 90° per elevar l'alçada de la sortida s'ha afegit un altre tram de 8cm.



Fig. 9.3. Detall del cabalímetre amb els trams anterior i posterior

Finalment només queda instal·lar la vàlvula proporcional que no té cap restricció addicional, així que s'ha decidit tornar a corbar el tub 90° per deixar-lo novament horitzontal i posteriorment instal·lar-hi la vàlvula.



Fig. 9.4. Detall de la vàlvula proporcional i tram d'elevació d'alçada

El muntatge experimental s'ha realitzat als lavabos del laboratori d'electrotècnia, és a dir, en un dels punts més baixos de la Universitat. Aquest fet ha comportat que la pressió de la instal·lació superés els 4,5 bars de pressió i que alguns dels components de la instal·lació no tinguessin el comportament esperat. Així que s'ha hagut d'acoblar unes vàlvules reductores de pressió a la

sortida de les preses d'aigua que hi ha instal·lades. Amb la reducció de pressió corresponent el comportament del sistema ha passat a ser l'esperat.



Fig. 9.5. Detall de les vàlvules reductores de pressió

Finalment el sistema complet queda de la següent manera:



Fig. 9.6. Sistema de fontaneria complet

I el sistema amb les connexions amb el PC per a utilitzar la web com a interfície home-màquina.



Fig. 9.7. Sistema de fontaneria amb interfície home-màquina

## 9.2. Anàlisi i calibratge dels aparells de mesura

Els aparells de mesura necessiten ser testejats per convertir els valors dels ADC, i l'ECAP, relatius a la temperatura i cabal respectivament, en valors reals de graus centígrads i litres per segon.

El circuit de temperatura ha estat dissenyat per tal que en els rangs de 0 a 60°C els valors dels ADC siguin 4096 i 0 respectivament. No obstant, la imperfecció dels elements de muntatge ha fet que aquests valors teòrics divergeixin de la realitat. Per tant s'ha realitzat una prova per poder convertir els valors de lectura en valors de graus centígrads reals.

La prova per al termistor s'ha fet en llaç obert. S'han enviat ordres a la vàlvula mescladora dividint la seva carrera en deu trams equidistants, i amb un termòmetre a la sortida s'han pres

els valors de temperatura real i els valors dels ADC per posteriorment realitzar una recta de regressió i trobar la funció de transferència.

A la figura Fig. 9.8 estan representats els valors de temperatura real en funció dels valors del ADC i la recta de regressió que dona la funció:

$$T \text{ } ^\circ\text{C} = -0,0117 * T \text{ ADC} + 52,283$$

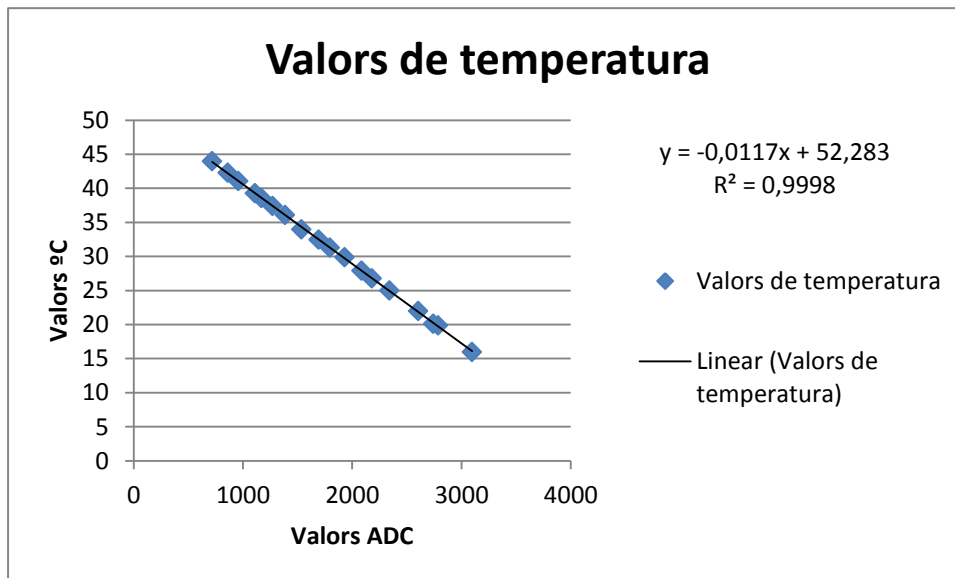


Fig. 9.8. Recta de regressió per al calibratge del sensor de temperatura

La mesura del cabal s'obté mitjançant un cabalímetre que emet un tren de polsos; en funció de la freqüència d'aquests polsos estarà circulant més o menys cabal.

En el *datasheet* del cabalímetre s'hi indica que aproximadament esdevenen 540 polsos per cada litre de fluid que circula per l'aparell. Primerament s'ha fet un anàlisi per a determinar el valor en l/s en funció del valor de l'ECAP.

L'ECAP està configurat per guardar el valor d'un comptador cada dos polsos. Així que sabent la freqüència del comptador 75MHz s'obté:

$$Q_{l/s} = \frac{1 \text{ pols}}{ECAP_{150} \text{ clocks}} \cdot \frac{1 \text{ l}}{540 \text{ polsos}} \cdot \frac{75 \cdot 10^6 \text{ clocks}}{s} \quad \text{Eq. 9.1}$$

En la comprovació de la coincidència del valor real amb la mesura s'ha observat una petita desviació, fet que ha portat a aplicar un factor de correcció per tal que la mesura i el cabal real coincideixin. Per trobar aquest factor corrector s'ha aplicat un mètode iteratiu que ha donat els millors resultats amb K=0.95. L'equació del cabal ha quedat de la següent manera:

$$Q_{l/s} = \frac{1 \text{pols}}{0.95 \cdot ECAP_{150} \text{ clocks}} \cdot \frac{1l}{540 \text{polsos}} \cdot \frac{75 \cdot 10^6 \text{ clocks}}{s} \quad \text{Eq. 9.2}$$

Cal destacar també dos problemes en la lectura del Cabal. El primer problema, el menys important, és degut a que el  $Q_{l/s}$  és inversament proporcional al valor de l'ECAP, i per tant en els instants inicials, quan el valor del registre és 0  $Q_{l/s}$ , pren valors erronis. Ja que el valor de cabal a l'inici és 0 s'ha pres la decisió de forçar a 0  $Q_{l/s}$  en el cas de que l'ECAP valgui 0.

El segon problema recau en el fet que la lectura de l'ECAP es produeix quan s'activa la interrupció provocada per un pols. Així quan el cabal circulat és 0 no s'indueix cap pols i per aquest motiu el valor de l'ECAP no s'actualitza i el microcontrolador no percep la no circulació de cabal. Per salvar aquest problema s'ha utilitzat la poca repetibilitat del sistema de mesura. S'ha dissenyat un comptador que incrementa cada cop que l'ECAP no ha canviat; si aquest comptador arriba a 250 s'ha determinat que no existeix cabal circulat pel sistema.





## 10. Impacte mediambiental

En aquest apartat s'estudia l'impacte ambiental de la realització d'aquest projecte. Com s'ha comentat en els primers apartats del treball, la principal raó de ser del sistema dissenyat té un fort lligam amb l'estalvi d'un bé primari com és l'aigua. Per la correcta valoració del benefici mediambiental d'aquest producte, s'hauria de fer un estudi a fons en una instal·lació sobre la qual es tinguessin uns coneixements amplis dels historials de consum. Com que la realització d'aquest estudi implica un temps excessiu, no s'ha pogut dur a terme i només s'ha pogut valorar el cost mediambiental més tangible derivat de la contaminació que suposa els residus dels components electrònics amb metalls nocius.

L'any 2006 va entrar en vigor la directiva RoHS, la qual restringeix la utilització d'una sèrie de materials perillosos en la fabricació d'equips electrònics. Aquestes substàncies són el plom, el mercuri, el cadmi, el crom hexavalent, el PBB i el PBDE. Aquesta normativa limita la concentració dels materials esmentats en els circuits integrats. Tots els components de la PCB i de la instal·lació compleixen aquesta normativa i, per tant, es pot considerar que l'impacte ambiental d'aquesta és baix; tanmateix no s'ha de menystenir, i en el cas que aquest projecte agafés dimensions més enllà de les acadèmiques, s'hauria de realitzar un estudi sobre la durada dels components i substituir els que puguin limitar la vida útil del dispositiu.

En referència al desmantellament i reciclatge dels aparells elèctrics i electrònics del projecte es seguirà una normativa europea coneguda com a RAEE que promou el reciclatge, la recuperació de residus i la reutilització dels components electrònics.

En la mesura del possible s'han utilitzat elements d'altres projectes antics que tenien unes prestacions similars als elements projectats.

La PCB utilitzada en el projecte fa servir una placa d'avaluació com a motor principal, aquesta pot ser extreta fàcilment i utilitzada en qualsevol altre projecte o com a eina d'aprenentatge per a nou personal del CITCEA en finalitzar el projecte. A més a més, les funcions de la placa secundària són molt generals disposant de dues entrades analògiques, dues sortides analògiques i una entrada per a la mesura de freqüència de polsos. Així es veu que és fàcilment reutilitzable per a qualsevol projecte de control futur en el cas que sigui necessari.



## 11. Anàlisi econòmic

Per l'anàlisi econòmic del projecte es diferencien dos blocs. El primer bloc consta dels recursos humans que consisteixen en les hores que s'han dedicat al disseny del projecte i les que s'han utilitzat per al muntatge real del projecte. El segon bloc consta dels recursos materials, on es veuen reflectides les partides corresponents als costos dels components i equips necessaris per al desenvolupament del projecte.

### 11.1. Recursos humans

Els recursos humans es divideixen en dos grups. El primer és el d'aprenentatge i investigació i el segon és el de realització real del projecte. Les hores de la part d'aprenentatge s'han valorat en 20 €/h, les de la part de muntatge de hardware també es s'han valorat en 20€/h. En canvi les de les parts de disseny i implementació del sistema s'han valorat en 40 €/h.

	Hores	Preu	Cost
Aprenentatge de programació sistema operatiu RTOS	240	20 €	4.800 €
Aprenentatge de programació per a Linux	75	20 €	1.500 €
Aprenentatge del models conceptuals de la mecànica de fluids	80	20 €	1.600 €
Aprenentatge de les tècniques per al disseny de circuits integrats	60	20 €	1.200 €
Investigacions complementàries	60	20 €	1.200 €
<b>Sub total</b>			<b>10.300 €</b>

Fig. 11.1. Taula de costos dels recursos humans d'aprenentatge i investigació

El cost total de l'aprenentatge ha estat de 10.300€. Aquesta part es considera un cost per l'alumne ja que, en un entorn professional, una empresa que es dediqués a l'automatització i al disseny d'equips automàtics partiria amb l'avantatge d'un equip professional qualificat per dur a terme aquestes tasques i sense la necessitat d'aprendre molts dels conceptes abans presentats.

La segona part dels recursos humans sí que pot ser considerada un cost real del projecte. Les tasques incloses en aquesta segona taula representen un esforç real el qual s'hauria de dur a terme per a qualsevol projecte amb independència dels coneixements dels seus autors.

	Hores	Preu	Cost
Elaboració del programa per al microcontrolador	120	40 €	4.800 €
Elaboració del programa per al PC- <i>embeded</i>	40	40 €	1.600 €
Elaboració de les simulacions del sistema	80	40 €	3.200 €
Disseny de la placa PCB	120	40 €	4.800 €
Muntatge i soldadura de la PCB	40	20 €	800 €
Disseny del sistema de fontaneria	48	40 €	1.920 €
Muntatge del sistema de fontaneria	80	20 €	1.600 €
Realització de les proves de la instal·lació	40	20 €	800 €
Redacció de la memòria	170	20 €	3.400 €
Subtotal			22.920 €

Fig. 11.2. Taula de costos dels recursos humans per l'elaboració i muntatge

El cost total del disseny i implementació del sistema és de 22.920 €.

## 11.2. Recursos materials

En els recursos materials s'inclouen tots els components necessaris per a la realització del projecte.

	Preu Unitari	Quantitat	Cost
Placa	29 €	1	29 €
Components per a la placa	30 €	1	30 €
Vàlvula proporcional	171 €	1	171 €
Actuador per a la vàlvula proporcional	170 €	1	170 €
Vàlvula mescladora	59,95	1	60 €
Actuador per vàlvula mescladora	97,23	1	97 €
Sensor de temperatura	28,33	1	28 €
Cabalímetre	172	1	172 €
Subtotal			758 €

Fig. 11.3. Taula de costos dels recursos materials per l'elaboració i muntatge

El cost total dels recursos materials és de 758€, així doncs, el cost total del projecte és de 23678€. Cal destacar que la realització del projecte té un cost fix molt elevat, i d'aquesta manera perquè aquest fos rentable s'hauria de realitzar una producció molt elevada. Com que el caire del projecte és purament acadèmic, la rendibilitat no ha estat una premissa a seguir i la producció final ha estat de tan sols un prototip.

## Conclusions i línies futures

En la primera part del projecte s'ha realitzat un estudi per poder determinar les constants de cabal necessàries de les vàlvules. Aquests factors van lligats al comportament del sistema de control del cabal que s'ha realitzat amb èxit, d'aquesta manera es pot concloure que l'estudi realitzat per a la instal·lació es pot convertir en un estàndard per a qualsevol edifici en el que es vulgui instal·lar el producte final.

El control de temperatura no s'ha pogut realitzar amb la precisió que s'esperava. Les dificultats trobades en la modelització de la resposta temporal de la temperatura, el funcionament atípic de la vàlvula mescladora -degut a la impossibilitat de regular amb una resolució acceptable en la zona de treball pròxima als límits superior i inferior-, i la lentitud del sensor de temperatura, deixen oberta una línia futura d'investigació per a l'aplicació. Aquesta podria consistir en canviar els components abans esmentats i instal·lar el sistema en un ambient on ja hi hagués un control sobre el comportament dels cabals d'aigua freda i aigua calenta -com podria ser un gimnàs amb un circuit tancat per a l'aigua calenta-. Amb una instal·lació d'aquest tipus la modelització de la resposta temporal de la temperatura seria més assequible, i s'eliminaria el retràs al tenir el tub d'aigua calenta sempre escalfat; per tant el controlador PID tindria l'efecte desitjat.

En relació al disseny i implementació de la PCB els resultats obtinguts han estat els esperats. Els components escollits han funcionat correctament en tot el procés del disseny i no hi ha hagut parts sobreescalfades ni amb risc de fallida. Les lectures de temperatura, cabal i posició no han patit interferències en cap de les proves realitzades, i les vàlvules proporcional i mescladora han respost tal i com s'esperava a les ordres que se'ls hi enviaven des de la placa. En vista d'aquests fets es pot afirmar que en una aplicació final es podria utilitzar la PCB dissenyada per aquest prototip, incloent les modificacions pertinents si fos necessari canviar el termòmetre i la vàlvula mescladora.

Respecte a la programació del sistema de comunicacions, la pàgina web i l'extracció de dades per a la posterior anàlisi o gestió d'historials, s'ha de mencionar que tot i la quantitat d'elements que intervenen i els diferents tipus de protocols que s'utilitzen, ha funcionat a la perfecció i s'ha pogut enviar ordres i rebre dades sense cap problema. Així doncs, en una aplicació final es podria fer servir la mateixa estructura de comunicacions per desenvolupar la dutxa i, posteriorment, utilitzar-la.

Cal recordar que aquest projecte ha nascut amb la intenció de promoure l'estalvi d'aigua. Més enllà del que es pugui aconseguir per l'augment en la velocitat de regulació del cabal i la temperatura en front d'un sistema de regulació manual, un dels avantatges que aquest projecte aporta és la possibilitat de monitoritzar i enregistrar les dades del consum. D'aquesta manera, una línia futura de desenvolupament podria consistir en el disseny d'una aplicació per analitzar les dades obtingudes.

A part de la disminució en el consum d'aigua aconseguit a través de la tecnologia, un dels principals motors per l'estalvi és la conscienciació de les persones que utilitzen els recursos a estalviar. Aquest també podria ser un camí a explorar per a l'aplicació del sistema. Aplicar mesures com bonificar els usuaris d'un gimnàs que han gastat menys aigua, o afegir a la factura del client comparatives amb el consum mitjà dels altres usuaris d'un hotel, podrien contribuir a fer prendre consciència de la importància que té l'estalvi d'un bé tant important com és l'aigua.

## Agraïments

En aquest espai és impossible agrair a tota la gent que m'ha ajudat a arribar fins aquí. Si més no, m'agradaria fer menció a les persones que m'han ajudat més directament en la realització d'aquest projecte.

Primer de tot agrair al CITCEA-UPC per tots els recursos i facilitats que m'ha donat, i a tots els seus membres que en major o menor mesura m'han ajudat durant el transcurs d'aquest treball.

Gràcies al director del treball Samuel Galceran per l'eficàcia i rapidesa en que ha resolt tots els problemes que l'hi he plantejat, no només els de caràcter tècnic sinó tots els altres, que molt sovint són els més complicats de solucionar des de la posició de l'estudiant.

Gràcies també als meus companys de despatx que m'han ajudat en les diferents tasques que he hagut de realitzar, i als bons consells que m'han anat donant durant tot el període que ha durat el projecte; gràcies Àngel, Chepe, Jaume, Josep i Míriam. Voldria agrair especialment a l'Héctor que probablement és la persona a qui més vegades he hagut de recórrer i sempre ha mostrat una actitud receptiva a l'hora d'ajudar-me, "*gracias*".

He d'agrair també a la feina feta a l'equip de manteniment de la Universitat que va fer la instal·lació de les preses d'aigua al laboratori d'electrotècnia perquè pogués realitzar les proves experimentals que m'han dut als resultats obtinguts.

Per acabar agraeixo a la meva família i amics. Amb especial menció a la Júlia, per tots els esforços que ha fet amb aquest treball i els que fa cada dia al meu costat; a mon padrí, que sempre m'ha ajudat en el que he necessitat i ha dipositat tota la confiança en mi sense demanar mai explicacions; i a ma padrina, probablement la persona que menys entén el camí que he escollit seguir a partir d'ara, però de ben segur la persona a qui més il·lusió li fa que tanqui aquesta etapa de la meva vida.

Moltes gràcies.





## Bibliografia

BONALS, LL.A. *Transferència de calor Apunts de classe*, Espanya: 2012.

MORENO, J. *Instalaciones interiores para el suministro de agua en edificaciones*, Màlaga: 2001.

FERRER, J.; GARCIA, R.; GARCIA, V. *Curso completo de HTML*, (sense informació), (sense data).

GARCIA, J.; RODRIGUEZ, J.I.; GOÑI, R.; BRAZÁLEZ, A.; FUNES, P.; RODRIGUEZ, R. *Aprenda lenguaje ANSI C como si estuviera en primero*, San Sebastian: 1998.

VIGNONI, J.R. *Válvulas de control, Instrumentación y comunicaciones Industriales* (Sense informació): 2005.

VIRTO, A. *Mecanica de fluids fonaments I*, Barcelona: 1993.

VIRTO, A. *Mecanica de fluids fonaments II*, Barcelona: 1996.

CODINA, E.; BERGADÀ, J.M<sup>a</sup>.; DE LAS HERAS S. *Máquinas hidráulicas. Problemas resueltos*, Barcelona : 1998.

GOLDT, S.; VAN DER MEER, S.; BURKETT, S.; WELSH, M. *Guía Linux de Programación (GULP), Versión 0.4*, (Sense informació): 1995.

HALLINAN, C. *Embeded Linux Primer*,

PALLÁS R.; *Sensores y acondicionadores de señal 1999*.

*Open Systems & Control TAC Building Automation Catalogo 2005*.

TEXAS INSTRUMENTS. *Technical Reference Manual Concerto F28M35x*, 2012

TEXAS INSTRUMENTS. *TI SYS/BIOS v6.35 Real-time Operating System Users Guide* , 2013

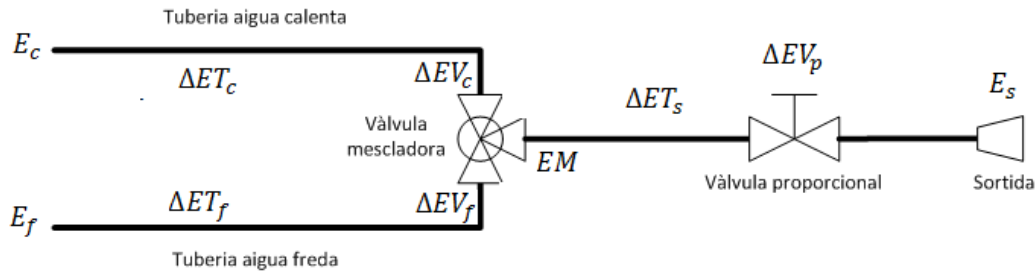
TEXAS INSTRUMENTS. *TI-RTOS 1.10 User's Guide*, 2013



## Annex 1

### Càlculs per a la determinació de les $KV_s$

#### Anàlisi del sistema a instal·lar



$$EM_c = E_c - \Delta ET_c - \Delta EV_c$$

$$EM_c = EM_f = EM$$

$$EM_f = E_f - \Delta ET_f - \Delta EV_f$$

$$EM = E_s + \Delta ET_s + \Delta EV_p$$

$$Q_f + Q_c = Q_t$$

Balanç d'energia branca calenta:

Balanç d'energia branca freda:

$$E_c = Z_c + \frac{P_c}{\rho \cdot g} + \frac{Q_c^2}{2 \cdot g \cdot S}$$

$$E_f = Z_f + \frac{P_f}{\rho \cdot g} + \frac{Q_f^2}{2 \cdot g \cdot S}$$

$$\Delta ET_c = f \cdot \frac{L_c \cdot 8 \cdot Q_c^2}{D^5 \cdot \Pi^2 \cdot g}$$

$$\Delta ET_f = f \cdot \frac{L_f \cdot 8 \cdot Q_f^2}{D^5 \cdot \Pi^2 \cdot g}$$

$$\Delta EV_c = K_{Mc} \cdot Q_c^2$$

$$\Delta EV_f = K_{Mf} \cdot Q_c^2$$

Balanç d'energia branca final:

$$E_s = Z_s + \frac{P_{atm}}{\rho \cdot g} + \frac{Q_t^2}{2 \cdot g \cdot S}$$

$$\Delta ET_s = f \cdot \frac{L_s \cdot 8 \cdot Q_t^2}{D^5 \cdot \Pi^2 \cdot g}$$

$$\Delta EV_p = K_p \cdot Q_t^2$$

Fent els canvis de variable:

$$Z_c + \frac{P_c}{\rho \cdot g} = a \quad ; \quad \frac{1}{2 \cdot g \cdot S} = b \quad ; \quad f \cdot \frac{8 \cdot L_{1c}}{g \cdot \pi^2 \cdot D_{1c}^5} = c \quad ; \quad \frac{10 \cdot 3600^2}{KM_{cv}^2} = d$$

$$Z_f + \frac{P_f}{\rho \cdot g} = e \quad ; \quad \frac{1}{2 \cdot g \cdot S} = f \quad ; \quad f \cdot \frac{8 \cdot L_{1f}}{g \cdot \pi^2 \cdot D_{1f}^5} = g \quad ; \quad \frac{10 \cdot 3600^2}{KM_{fv}^2} = h$$

$$Z_s + \frac{P_{atm}}{\rho \cdot g} = r \quad ; \quad \frac{1}{2 \cdot g \cdot S} = s \quad ; \quad f \cdot \frac{8 \cdot L_s}{g \cdot \pi^2 \cdot D_s^5} = t \quad ; \quad \frac{10 \cdot 3600^2}{KP_v^2} = v$$

Del *datasheet* de la vàlvula mescladora se'n dedueix que:

$$KM_{fv} = KM_{vs} - KM_{cv}$$

I per tant es troben els cabals en funció de  $KM_{cv}$  :

$$Q_c = \frac{a-r}{s+t+v \cdot 1+2 \cdot \frac{b+c+d}{f+g+h} + \frac{b+c+d}{f+g+h} - b+c+d}$$

$$Q_f = \frac{b+c+d}{f+g+h} \cdot Q_c$$

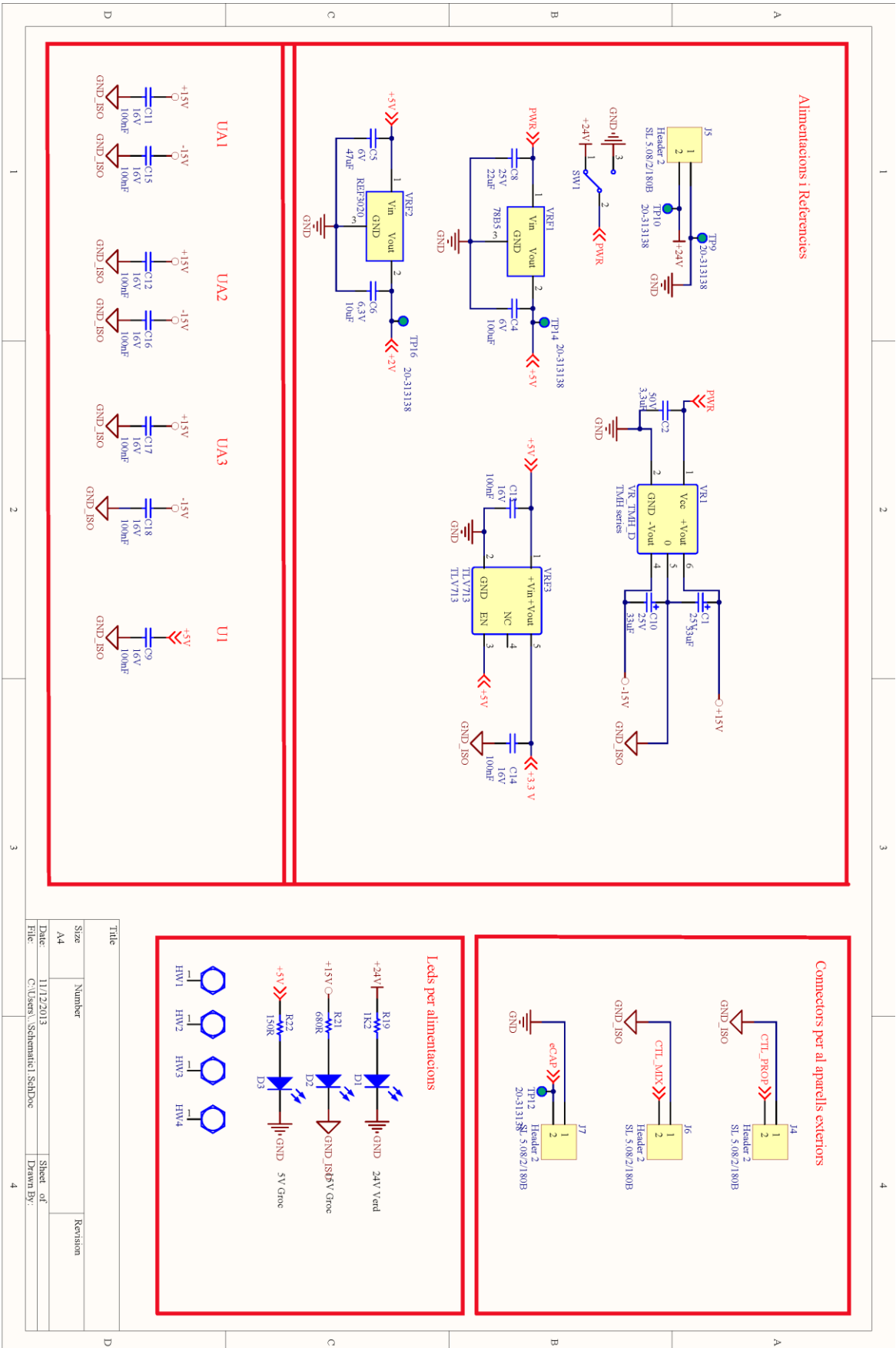
$$Q_t = Q_c + Q_f$$

## Annex 2

En aquest annex s'inclouen tots els documents relatius al hardware de la PCB.

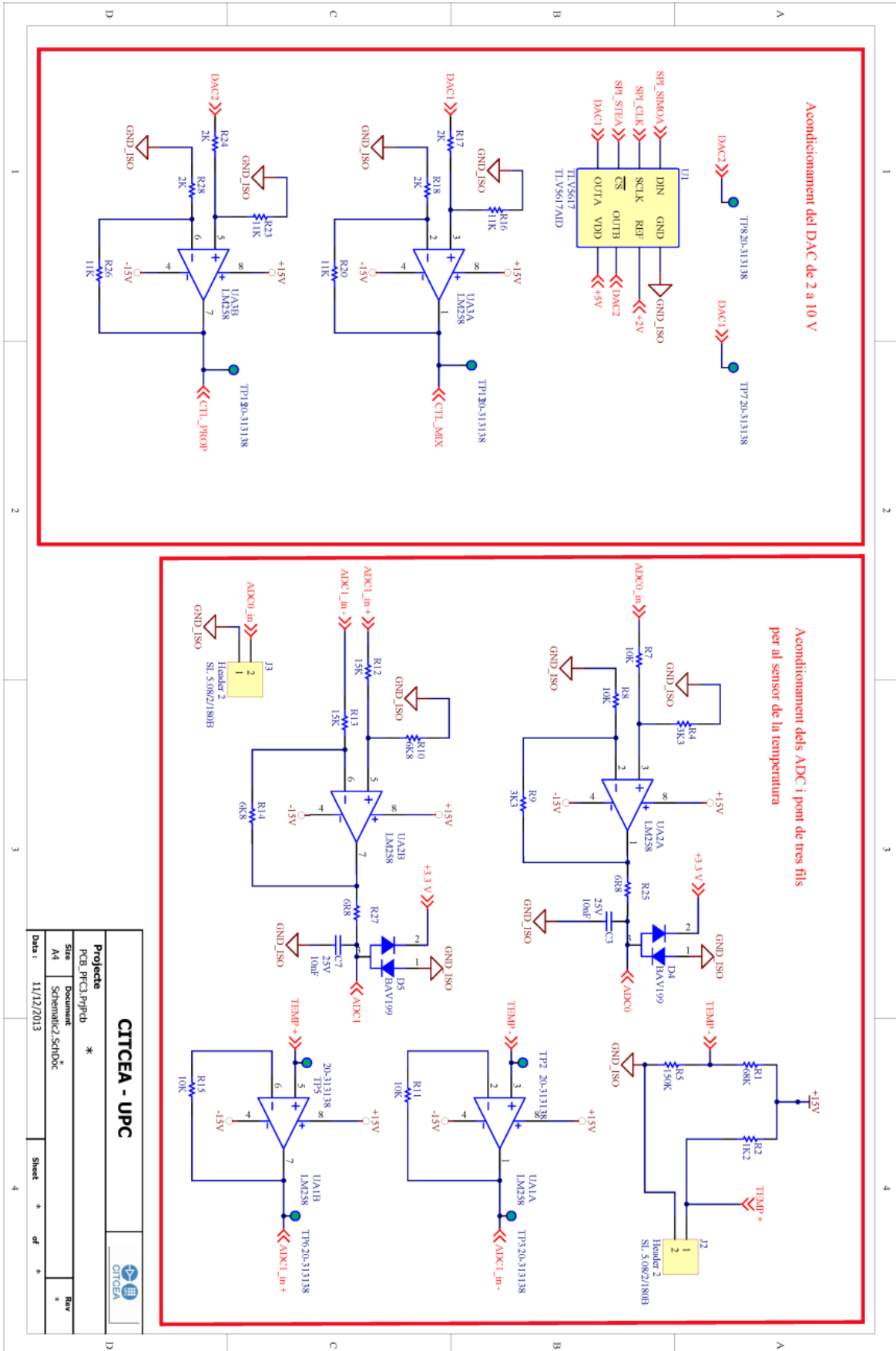
En les pàgines següents es poden trobar amb el mateix ordre:

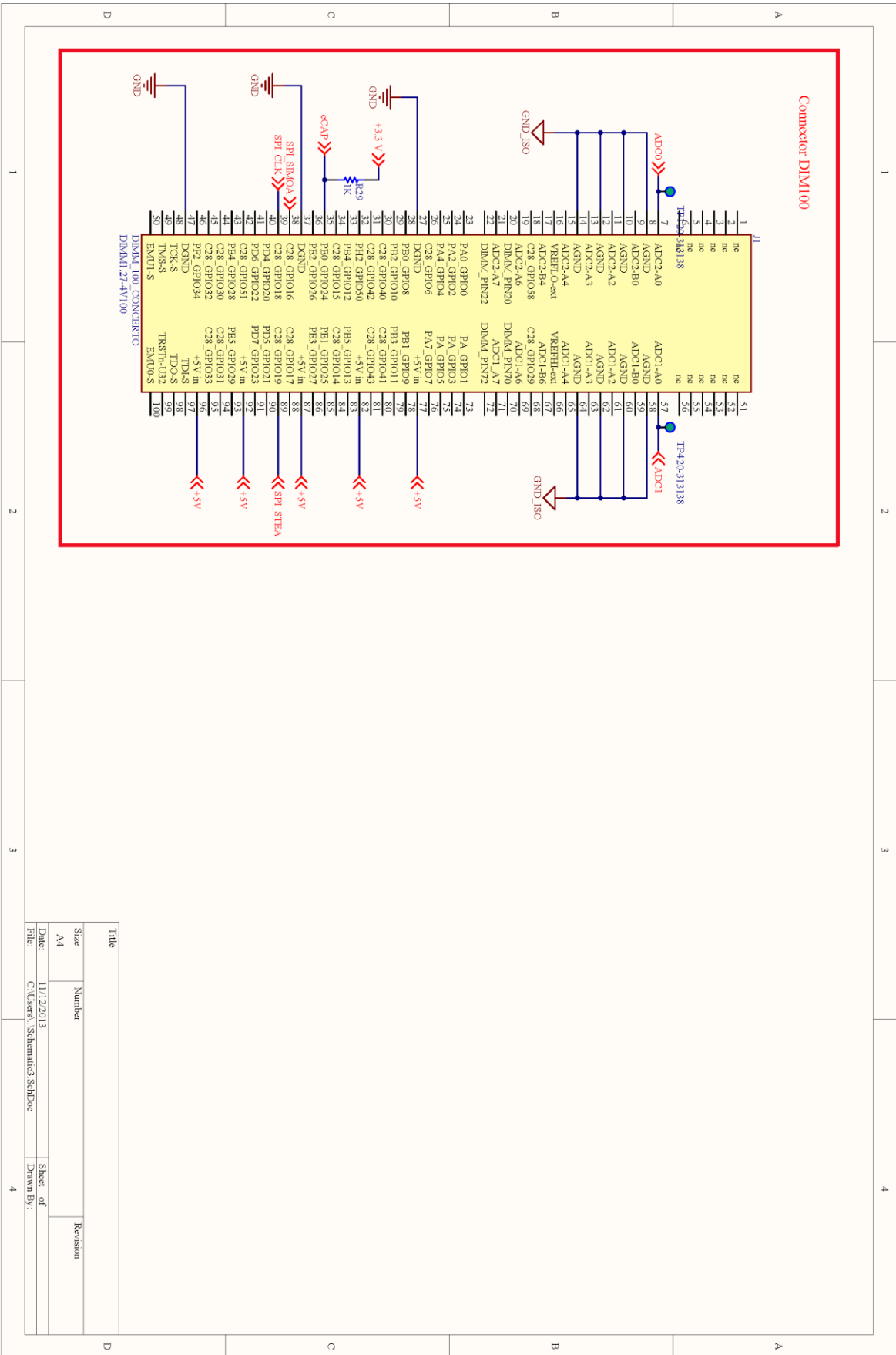
- Esquemàtics 1
- Esquemàtics 2
- Esquemàtics 3
- Top Layer (Capa Superior)
- Botom Layer (Capa Inferior)
- Representació 3D



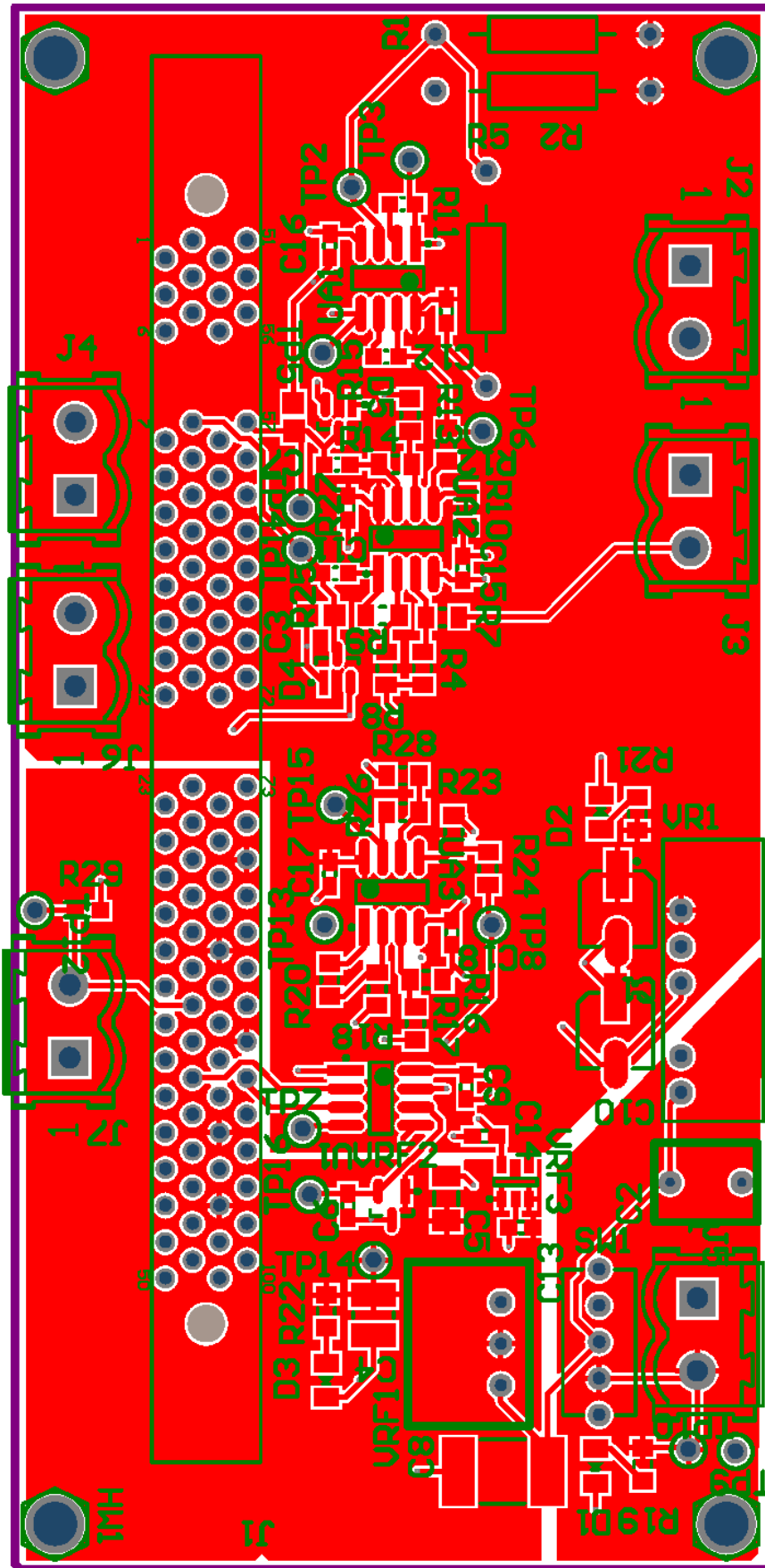
Title		Revision	
Size	Number	Sheet of	
A4		4	
Date	11/12/2013	Drawn by:	
File	C:\Users\..._Schemate\1_SchDoc		

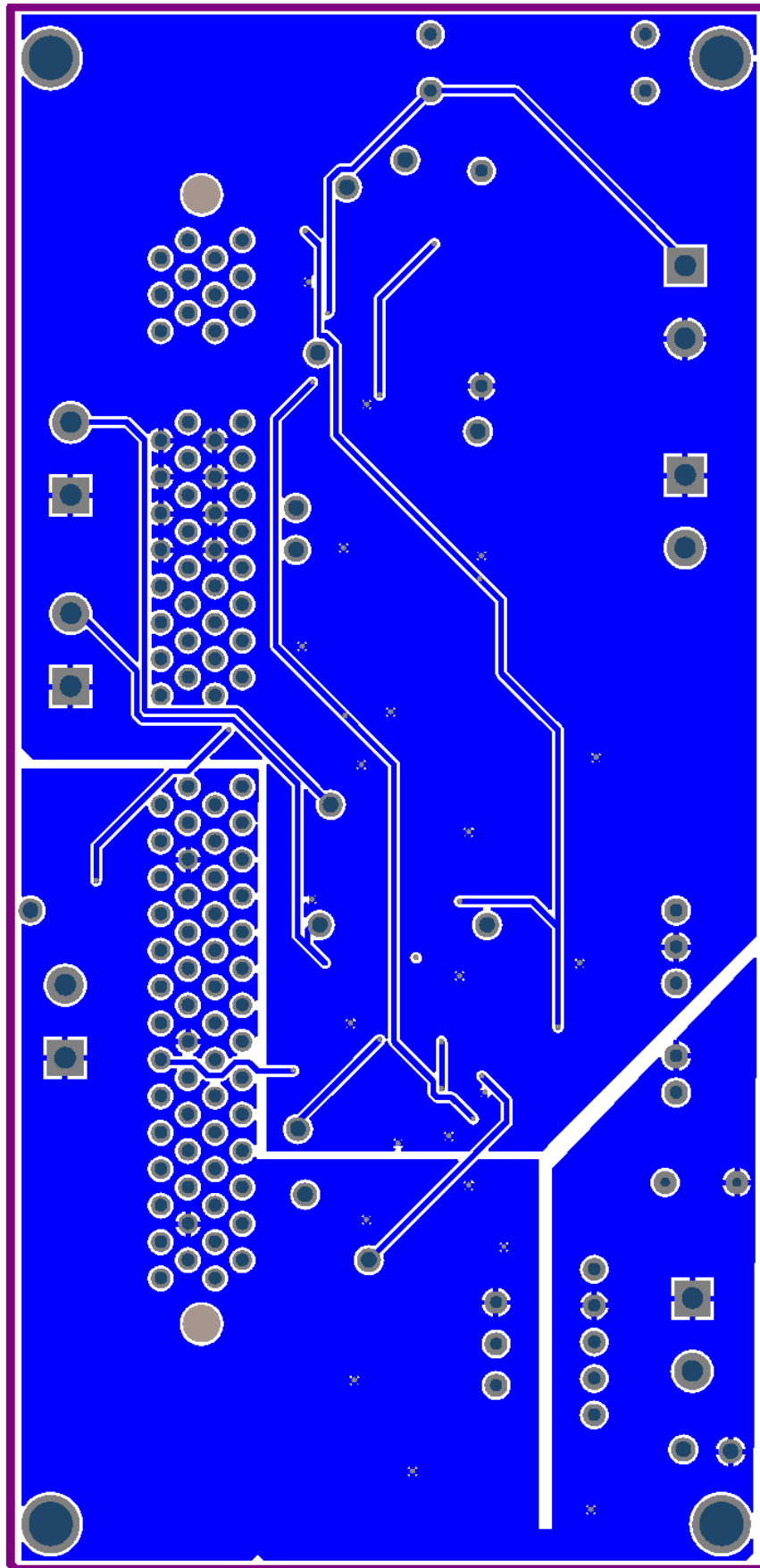


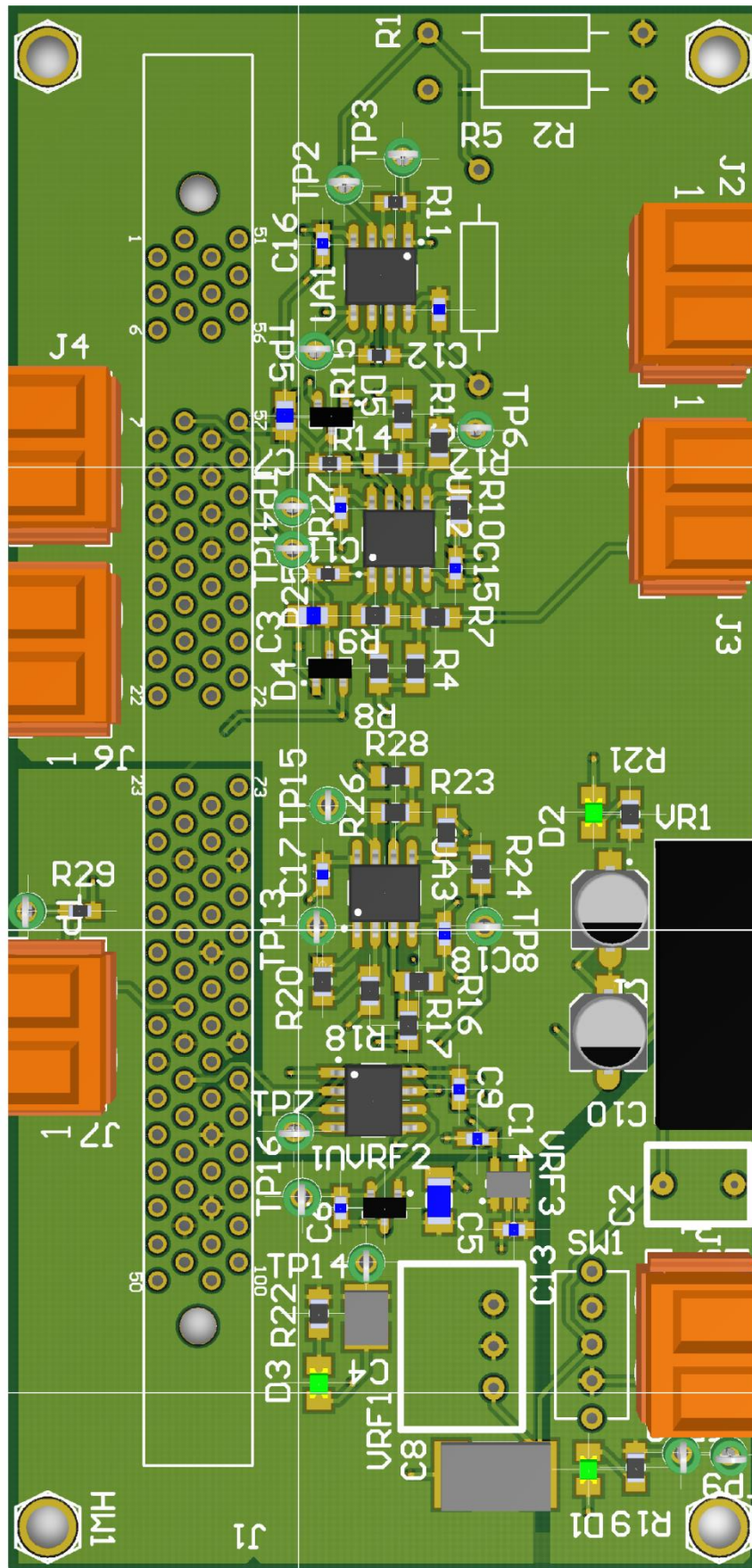














## Annex 3

En aquest Annex s'inclouen les parts més importants dels codis font.

### Codi font de l'ARM

En la programació de l'ARM només s'inclourà la funció principal. Altres funcions com les que s'activen mitjançant la pàgina web o les creacions dels arxius html per l'ús del servidor web s'han omès degut a l'extensió.

#### Funció principal

Aquest és el codi font de la funció principal del ARM:

```
/// Declaració de variables Globals

float consigna_T;
float consigna_C;
float consigna_T_a;
float consigna_C_a;

Float Temperature; // Lectures de la temperatura
Float Cabal;       // Lectures del cabal
Float Posicio;     // Lectures de la posició
UInt32 TempsC;    // Temps de lectura del cabal
UInt32 TempsT;    // Temps de lectura de la temperatura
UInt32 TempsP;    // Temps de lectura de la posició
int envia_que=0;  // assistent per al canvi de lectura
int start=0;     // variable per iniciar bucle de comunicacions

/* Funció principal */

Void temperature_func(UArg arg0, UArg arg1)
{
    // Variables per als missatges entre processos

    MessageQ_Msg      msg;
    MessageQ_Handle   messageQ;
    MessageQ_QueueId  remoteQueueId;
    Int                status;
    Ptr                buf;
    HeapBuf_Handle     heapHandle;
    HeapBuf_Params     hbparams;
    SizeT              blockSize;
    UInt               numBlocks;
```

```

UInt          i = 0;
FILE          *dst;
Char          logBuffer[40];
Error_Block   eb;

//Part de variables per al tcp

SOCKET lSocket;
struct sockaddr_in sLocalAddr;
SOCKET clientfd;
struct sockaddr_in client_addr;
Int  addrlen=sizeof(client_addr);
Int  optval;
Int  optlen = sizeof(optval);
Int  nbytes;
Int  accepted=0;

Char *bufferTCP;

//inici de la configuració del TCP
fdOpenSession(TaskSelf()); // obra sessió de file descriptor

// crea socket
lSocket = socket(AF_INET, SOCK_STREAM, IPPROTO_TCP);
if (lSocket < 0) {
    System_printf("tcpHandler: socket failed\n");
    Task_exit();
    return;
}

// Configura adreça
memset((char *)&sLocalAddr, 0, sizeof(sLocalAddr));
sLocalAddr.sin_family = AF_INET;
sLocalAddr.sin_len = sizeof(sLocalAddr);
sLocalAddr.sin_addr.s_addr = htonl(INADDR_ANY);
sLocalAddr.sin_port = htons(1000);

// lliga socket amb adreça
status = bind(lSocket, (struct sockaddr *)&sLocalAddr,
sizeof(sLocalAddr));
if (status < 0) {
    System_printf("tcpHandler: bind failed\n");
    fdClose(lSocket);
    Task_exit();
    return;
}

// posa a escoltar el socket
if (listen(lSocket, 5) != 0){
System_printf("tcpHandler: listen failed\n");
fdClose(lSocket);
Task_exit();
return;
}

```

```
}

//Configuració dels heaps per als missatges entre nuclis

numBlocks = 2;
blockSize = sizeof(TempMsg);

// reserva memòria per al buffer
buf = Memory_alloc(0, numBlocks * blockSize, 0, NULL);

// Crea una heap per als missatges entre processos
Error_init(&eb);
HeapBuf_Params_init(&hbparams);
hbparams.align          = 0;
hbparams.numBlocks     = numBlocks;
hbparams.blockSize     = blockSize;
hbparams.bufSize       = numBlocks * blockSize;
hbparams.buf           = buf;
heapHandle = HeapBuf_create(&hbparams, &eb);
if (heapHandle == NULL) {
    System_abort("HeapBuf_create failed\n" );
}

// registra el missatge amb la heap
MessageQ_registerHeap((IHeap_Handle)(heapHandle), HEAPID);

// crea la cua local per al missatge
messageQ = MessageQ_create(M3QUEUEUENAME, NULL);
if (messageQ == NULL) {
    System_abort("MessageQ_create failed\n" );
}

//obra la cua remota
do {
    status = MessageQ_open(C28QUEUEUENAME, &remoteQueueId);
    /*
     * Sleep for 1 clock tick to avoid inundating remote processor
     * with interrupts if open failed
     */
    if (status < 0) {
        Task_sleep(1);
    }
} while (status < 0);
```

```

/*
 * Esperar Missatge del C28 per a poder gestionar els historials
 * i la WEB
 */
while(start==0) // la variable start s'activa amb la web
{
    Task_sleep(50); // si aquesta no està activada espera
}

while (TRUE)
{
    // espera connexions TCP entrants
    if(accepted==0)
    {
        clientfd = accept(lSocket, (struct sockaddr*)&client_addr, &addrlen);
    }
    if(clientfd==-1)
    {
        perror("\n accept() error");
    }

    else
    {
        // si estem connectats reserva memòria per al buffer
        accepted=1;
        bufferTCP = Memory_alloc(0, 192, 0, NULL);
        for(i=0;i<8;i)
        {

            // rep el missatge de C28 (Consigna i temps)
            status = MessageQ_get(messageQ, &msg, MessageQ_FOREVER);
            if (status < 0) {
                System_abort();
            }

            // copia el contingut buffer amb l'ordre correcte
            if(envia_que==TEMPERATURE)
            {
                Temperature = ((TempMsg *)msg)->Temperature;
                TempsT = ((TempMsg *)msg)->Temps;

                bufferTCP[24*i]=*((char*)&Temperature);
                bufferTCP[24*i+1]=*((short*)&Temperature) & 0xFF00 >> 8;
                bufferTCP[24*i+2]=*((int*)&Temperature) & 0xFF0000 >> 16;
                bufferTCP[24*i+3]=*((int*)&Temperature) & 0xFF000000 >> 24;
                bufferTCP[24*i+4]=*((char*)&TempsT);
                bufferTCP[24*i+5]=*((short*)&TempsT) & 0xFF00 >> 8;
                bufferTCP[24*i+6]=*((int*)&TempsT) & 0xFF0000 >> 16;
                bufferTCP[24*i+7]=*((int*)&TempsT) & 0xFF000000 >> 24;

                envia_que=CABAL;
            }
        }
    }
}

```



```

        else if(envia_que==CABAL)
        {
            Cabal = ((CabalMsg *)msg)->Cabal;
            TempsC = ((CabalMsg *)msg)->Temps;

            bufferTCP[24*i+8]=*((char*)&Cabal);
            bufferTCP[24*i+9]=*((short*)&Cabal) & 0xFF00 >> 8;
            bufferTCP[24*i+10]=*((int*)&Cabal) & 0xFF0000 >> 16;
            bufferTCP[24*i+11]=*((int*)&Cabal) & 0xFF000000 >> 24;
            bufferTCP[24*i+12]=*((char*)&TempsC);
            bufferTCP[24*i+13]=*((short*)&TempsC) & 0xFF00 >> 8;
            bufferTCP[24*i+14]=*((int*)&TempsC) & 0xFF0000 >> 16;
            bufferTCP[24*i+15]=*((int*)&TempsC) & 0xFF000000 >> 24;

            envia_que=POSICIO;
        }
        else if(envia_que==POSICIO)
        {
            Posicio = ((CabalMsg *)msg)->Cabal;
            TempsP = ((CabalMsg *)msg)->Temps;

            bufferTCP[24*i+16]=*((char*)&Posicio);
            bufferTCP[24*i+17]=*((short*)&Posicio) & 0xFF00 >> 8;
            bufferTCP[24*i+18]=*((int*)&Posicio) & 0xFF0000 >> 16;
            bufferTCP[24*i+19]=*((int*)&Posicio) & 0xFF000000 >> 24;
            bufferTCP[24*i+20]=*((char*)&TempsP);
            bufferTCP[24*i+21]=*((short*)&TempsP) & 0xFF00 >> 8;
            bufferTCP[24*i+22]=*((int*)&TempsP) & 0xFF0000 >> 16;
            bufferTCP[24*i+23]=*((int*)&TempsP) & 0xFF000000 >> 24;

            envia_que=TEMPERATURE;
            i++;
        }

        //Allibera memòria compartida perquè el C28 pugui tornar utilitzar-la
        MessageQ_free(msg);

        //Avisa al C28 que ja està preparat per rebre un missatge nou
        status = Notify_sendEvent(1,0,PASSA_ENVIA,1,TRUE);
        if (status < 0) {
            System_abort("Notify_sendEvent failed\n");
        }
    }
}
//Amb el buffer ple envia'l al PC embeded
nbytes=send(clientfd, (char *)bufferTCP,192, 0 );
if(nbytes<0)
{
    shutdown(clientfd,SHUT_RDWR);
    accepted=0;
}

        //Allibera memòria
        Memory_free(0,bufferTCP,192); }}

```

## Codi font del C28

Igual que en l'apartat anterior, en aquest només s'inclourà la funció principal del nucli C28 i les funcions més importants que aquesta inclou. Totes les funcions de configuració de les funcionalitats tals com l'ADC, ECAP i SPI, entre altres, s'han omès degut a l'extensió d'aquestes.

### Funció principal

Aquest és el codi fons de la funció principal del C28:

```
// variables per a l'enviament del SPI
struct SPI_BITS {
    Uint16 D1D0 :2;
    Uint16 data :10;
    Uint16 conf :4;
};

union SPI_DATA {
    Uint16 all;
    struct SPI_BITS bit;
} SPI_DATA;

//variables de Consignes i mesures

float Cabal;           // valor del cabal (Registre ECAP)
float Cabal_ls;       // valor del cabal en l/s
float Consigna_Cabal; // Consigna de canal l/S
Int32 Senyal_Cabal;  // Valor a enviar al DAC

float Error_cabal;           // Error del cabal
float error_acumulat_cabal=-510; //part integral del error del cabal
UInt cont_cabal=0;         // comptador per a cabal 0

float Temperature;       // valor de la temperatura (ADC)
float Temperature_C;     // valor de la temperatura °C
float Consigna_Temp;     // consigna de temperatura °C
Int32 Senyal_Temp;      // Valor a enviar al DAC

UInt Posicio;           // valor de la posició mescladora

float Kp_C=KP_C, Ki_C=KI_C, // constants per al PI

int envia=1;           // indicador per si tinc dret sobre la memòria compartida
int start=0;          // variable per iniciar bucle de comunicacions
int envia_que=0;      // assistent per al canvi de lectura
```

```
// funcio principal
Void tsk0_func(UArg arg0, UArg arg1)
{
    // variables per als missatges entre processos

    MessageQ_Msg      msg;
    MessageQ_Handle   messageQ;
    MessageQ_QueueId  remoteQueueId;
    Int                status;
    Ptr                buf;
    HeapBuf_Handle     heapHandle;
    HeapBuf_Params     hbparams;
    SizeT              blockSize;
    UInt               numBlocks;
    Error_Block        eb;
    UInt32              Temps;

    //Configuració dels heaps per als missatges entre nuclis
    numBlocks = 2;
    blockSize = sizeof(TempMsg);

    // reserva memòria per al buffer
    buf = Memory_alloc(0, numBlocks * blockSize, 0, NULL);

    // Crea una heap per als missatges entre processos
    Error_init(&eb);
    HeapBuf_Params_init(&hbparams);
    hbparams.align      = 0;
    hbparams.numBlocks  = numBlocks;
    hbparams.blockSize  = blockSize;
    hbparams.bufSize    = numBlocks * blockSize;
    hbparams.buf        = buf;
    heapHandle = HeapBuf_create(&hbparams, &eb);
    if (heapHandle == NULL) {
        System_abort("HeapBuf_create failed\n" );
    }

    // registra el missatge amb la heap
    MessageQ_registerHeap((IHeap_Handle)(heapHandle), HEAPID);

    // crea la cua local per al missatge
    messageQ = MessageQ_create(C28QUEUEENAME, NULL);
    if (messageQ == NULL) {
        System_abort("MessageQ_create failed\n" );
    }
}
```

```

// Obre la cua
do {
    status = MessageQ_open(M3QUEUEUENAME, &remoteQueueId);
    /*
     * Dorm per no avassallar d'interrupcions
     */
    if (status < 0) {
        Task_sleep(1);
    }
} while (status < 0);

/* Agafa un espai de memòria */

msg = MessageQ_alloc(HEAPID, sizeof(TempMsg));
if (msg == NULL) {
    System_abort("MessageQ_alloc failed\n" );
}

MessageQ_setMsgId(msg, TEMPERATURE_CONVERSION);

while(start==0)    // la variable start s'activa quan avisa l'ARM
{
    Task_sleep(50); // si aquesta no està activada espera
}

while (TRUE)
{

    //Llegeix variables
    llegeix_Tmp();
    llegeix_Cabal();
    llegeix_Posicio();
    Temps = (UInt32)Timestamp_get32();

    //Calcula i envia ordres
    CalculaConsigna();
    EnviaConsigna();

    if(envia==1) // si l'ARm està preparat envia el missatge que toca
    {
        /* Envia missatge al M3 */

        if(envia_que==TEMPERATURE)
        {
            ((TempMsg *)msg)->Temperature = Temperature;
            ((TempMsg *)msg)->Temps = Temps;
            envia_que = CABAL;
        }
    }
}

```

```

else if(envia_que==CABAL)
{
    ((CabalMsg *)msg)->Cabal = Cabal;
    ((CabalMsg *)msg)->Temps = Temps;
    envia_que = POSICIO;
}

else if(envia_que==POSICIO)
{
    ((CabalMsg *)msg)->Cabal = Posicio;
    ((CabalMsg *)msg)->Temps = Temps;
    envia_que = TEMPERATURE;
}

//recupera el dret de la memòria compartida

msg = MessageQ_alloc(HEAPID, sizeof(TempMsg));
if (msg == NULL) {
    System_abort("MessageQ_alloc failed\n" );
}

//dóna nom al missatge
MessageQ_setMsgId(msg, TEMPERATURE_CONVERSION);

//envia el missatge a l'ARM

status = MessageQ_put(remoteQueueId, msg);
if (status < 0) {
    System_abort("MessageQ_put had a failure/error\n");
}
//prohibeix al C28 tornar a enviar fins que l'ARM ho digui

envia=0;
}
}
}

```

**CalculaConsigna()**

```

{
    Int16 Senyal_Cabal_aux; // variable per a la part integradora

    /* algorisme per al control de temperatura */
    if(Temperature_C<(20+Consigna_Temp*0.65))
    {
        Senyal_Temp=0;
    }

    else
    {
        Senyal_Temp=1000-50*Consigna_Temp;
    }
}

```

```
// reducció de la constant integradora pel cop d'ariet
if(Consigna_Cabal==0&&Cabal_ls>=0.07)
{
    Ki_C=6;
}
else
{
    Ki_C=KI_C;
}

// gestió del PI i l'anti wind up
Error_cabal=Consigna_Cabal-Cabal_ls;

error_acumulat_cabal=error_acumulat_cabal+Ki_C*Error_cabal;

if(error_acumulat_cabal>=512)
{
    error_acumulat_cabal=512;
}
else if(error_acumulat_cabal<=-512)
{
    error_acumulat_cabal=-512;
}

Senyal_Cabal_aux=Kp_C*Error_cabal+error_acumulat_cabal;

Senyal_Cabal=512+Senyal_Cabal_aux;

// Assegura que tanca totalment sense ariet
if(Consigna_Cabal==0&&Cabal_ls<0.03)
{
    Senyal_Cabal=0;
}

}
```