UNIVERSITAT OBERTA DE CATALUNYA

Grau en Tecnologies de Telecomunicació

TFG DISSENY D'UN SUPERVISOR REMOT
DE TEMPERATURA VIA BLUETOOTH

Alumne/a: Carles Cardenal Hernando

Dirigit per: Carlos Alberto Pacheco Navas

CURS 2015-16 (Febrer)

Agraïments

En primer lloc m'agradaria agrair l'oportunitat que la Universitat Oberta de Catalunya m'ha ofert en poder cursar aquests estudis amb una flexibilitat adequada a les meves necessitats.

Sense cap mena de dubte, aquest treball de fi de grau no podria haver estat realitzat sense els coneixements adquirits al llarg d'aquests anys, tot gràcies a la dedicació de la comunitat de professionals que formen la UOC.

Agrair als companys que han participat activament a resoldre dubtes i crear un espai de treball enriquidor de què molts ens hem beneficiat.

Voldria agrair també la dedicació i suggeriments del meu supervisor, Carlos Alberto Pacheco Navas, qui m'ha guiat aportant valuoses observacions als dubtes que m'han anat sorgint, tot amb una brevetat admirable.

Per últim, agrair i dedicar a la meva família la realització d'aquest treball, el qual no hauria estat possible sense el suport incondicional rebut durant aquests anys.

Resum

L'electrònica ha estat un referent en el desenvolupament del control de processos industrials, on cada vegada prenen més importància els sensors i les tecnologies de transmissió de dades sense fils amb protocols de transmissió eficients. Aquest treball de fi de grau descriu el disseny d'un supervisor remot que permet captar la temperatura provinent d'un sensor i enviar-la per mitjà de l'àmpliament estès estàndard Bluetooth. Per a poder complir els terminis d'execució establerts es defineix una planificació detallada, la qual compta amb mecanismes de correcció. A partir d'aquest moment s'estudien components com mòduls Bluetooth, microcontroladors i sensors de temperatura per acabar seleccionant els més adequats abans de dissenyar els circuits analògics. Més endavant es defineix l'algoritme de control que dota el microcontrolador de la funcionalitat requerida. El treball es complementa amb el disseny d'un circuit imprès on s'implementa el dispositiu proposat i una valoració econòmica al detall.

Paraules clau: temperatura, sensor, supervisor, Bluetooth, microcontrolador, circuit imprès.

Electronics has been a leader in the development of industrial process control, where sensors and wireless data transmission technologies with efficient protocols are becoming more important. This final project describes the design of a remote supervisor which captures temperature from a sensor and sends it through the widespread standard Bluetooth. In order to meet the deadlines a detailed planning has been set, which has correction mechanisms. First components such as Bluetooth modules, temperature sensors and microcontrollers are studied and selected appropiately before designing analog circuits. Later is defined the control algorithm that provides the required functionality to the microcontroller. The work is complemented with the design of a printed circuit board which implements the device proposed and a detailed economic evaluation.

Keywords: temperature, sensor, supervisor, Bluetooth, microcontroller, printed circuit.

Índex de continguts

Agraïments i

Resum ii

Índex de continguts iii

Índex de figures v

Índex de taules vii

1. Introducció 8

1.1 Abast del projecte 8

1.2 Disseny conceptual 8

1.3 Objectius 9

1.3.1 Objectius de l'assignatura 9

1.3.2 Objectius de l'àrea del TFG 10

1.4 Planificació 10

1.4.1 Tasques i fites 10

1.4.2 Diagrama de Gantt 14

1.5 Incidències i riscos 17

1.6 Descripció dels següents capítols 18

2. Estudi i selecció de components 19

2.1 Mòdul Bluetooth 19

2.1.1 Introducció a l'estàndard Bluetooth 19

2.1.2 Selecció del mòdul Bluetooth 21

2.1.3 Funcionament del mòdul seleccionat 23

2.2 Sensor de temperatura 25

2.2.1 Tipus de sensors de temperatura 25

2.2.2 Selecció del sensor de temperatura 26

2.2.3 Característiques del sensor seleccionat 27

2.3 Microcontrolador 28

2.3.1 Selecció del microcontrolador 28
2.3.2 Informació del microcontrolador 29
3. Disseny dels circuits analògics 30
3.1 Esquema de connexió del mòdul Bluetooth 30
3.2 Circuit d'adaptació del sensor RTD 31
3.3 Esquema de connexió del microcontrolador 36
3.4 Font d'alimentació del supervisor 37
4. Programa de control 41
4.1 Algoritme funcional 41
4.2 Configuració del microcontrolador 42
4.3 Mòdul UART 44
4.4 Mòdul ADC 45
4.5 Supervisor de temperatura 46
5. Disseny de la PCB 50
5.1 Esquema global 50
5.2 Layout i obtenció de *Gerbers* 51
6. Muntatge i prova del prototip 53
7. Valoració econòmica 56
8. Conclusions 58
Glossari 59
Bibliografia 60
Annex A 61
Annex B 62

Índex de figures

Figura 1. Diagrama de blocs del supervisor 9

Figura 2. Gantt: definició del TFG, mòdul Bluetooth i sensor de temperatura 14

Figura 3. Gantt: microcontrolador PIC, font d'alimentació i disseny PCB 15

Figura 4. Gantt: programa de control 15

Figura 5. Gantt: implementació del supervisor i avaluació del TFG 16

Figura 6. Gantt: preparació de documentació 16

Figura 7. Mòduls Bluetooth de Microchip 22

Figura 8. Mòdul Bluetooth RN41 22

Figura 9. Pins del mòdul RN41 23

Figura 10. Sensor PT1000 ALTF-1 27

Figura 11. Microcontrolador PIC 16F916 28

Figura 12. Connexions del mòdul Bluetooth 30

Figura 13. Pont de *Wheatstone* en equilibri 31

Figura 14. Font de corrent contínua 32

Figura 15. Amplificador diferencial 33

Figura 16. Seguidors de tensió 34

Figura 17. Bode del filtre passabaix de primer ordre 35

Figura 18. Possibles connexions d'un sensor RTD 35

Figura 19. Circuit d'adaptació del sensor PT1000 35

Figura 20. Linealitat del circuit adaptació 36

Figura 21. Esquema de connexió del microcontrolador 36

Figura 22. Convertidor LM2574 i regulador LM317 37

Figura 23. Circuit d'adaptació del LM2574 38

Figura 24. Circuit adaptació del LM317 38

Figura 25. Esquema de la font d'alimentació 39

Figura 26. Resistència tèrmica del LM317EMP 40

Figura 27. Algoritme de control 41

Figura 28. Contingut del fitxer config.h 42
Figura 29. Configuració del WDT 43
Figura 30. Configuració de pins del PIC 16F916 43
Figura 31. Contingut del fitxer uart.c 44
Figura 32. Activació d'interrupcions 45
Figura 33. Procès de conversió A/D 45
Figura 34. Contingut del fitxer adc.c 46
Figura 35. Contingut del fitxer supervisor.h 47
Figura 36. Contingut del fitxer main.c 49
Figura 37. Esquema font d'alimentació i mòdul Bluetooth 50
Figura 38. Esquema circuit microcontrolador i adaptació PT1000 51
Figura 39. Vista del disseny de la PCB 52
Figura 40. Fotolits i atacat PCB 53
Figura 41. Soldadura de vies i components 53
Figura 42. PCB finalitzada 54
Figura 43. Calibratge i prova del supervisor 55
Figura 44. Aspecte del producte finalitzat 55

Índex de taules

Taula 1: Tasques del projecte 13

Taula 2. Fites del projecte 13

Taula 3. Incidències i riscos 17

Taula 4. Pla de contingència 17

Taula 5. Classes del estàndard Bluetooth 20

Taula 6. Versions del estàndard Bluetooth 20

Taula 7. Especificacions del mòdul RN41 23

Taula 8. Descripció dels pins del mòdul RN41 24

Taula 9. Comparació de sensors de temperatura 26

Taula 10. Tolerància de sensors RTD 26

Taula 11. Característiques del PIC 16F916 29

Taula 12. Descripció de pins utilitzats al PIC 29

Taula 13. Valors de l'adaptació del PT1000 33

Taula 14. Característiques elèctriques del supervisor 37

Taula 15. Fitxers del programa de control 42

Taula 16. Funcionalitat dels connectors de la PCB 51

Taula 17. Cost de disseny del supervisor remot 56

Taula 18. Cost de fabricació del prototip 57

1. Introducció

Des de ja fa algunes dècades l'electrònica ha entrat massivament a la indústria i les nostres llars per tal de dur a terme moltes tasques automatitzades. Cada vegada els dispositius electrònics ofereixen més funcionalitats, alhora que se'n veu reduïda la seva mida, un fet significatiu durant els darrers anys ha estat la tendència a substituir cablejat per solucions inal·làmbriques amb protocols de transmissió cada vegada més eficients.

1.1 Abast del projecte

En entorns industrials és molt habitual monitorar dades de tota mena per a poder actuar d'una manera eficient, aquesta informació resulta vital a sistemes de control per a prendre decisions sobre processos d'una certa complexitat.

El present treball de fi de grau detalla el procés de disseny i desenvolupament d'un sistema electrònic, el qual incorpora tecnologia de transmissió de dades inal·làmbrica, que permet captar informació des d'un sensor de temperatura i enviar-la remotament.

1.2 Disseny conceptual

El supervisor remot, el qual envia aquesta informació a través d'un mòdul Bluetooth, queda integrat en una placa de circuit imprès la qual es compon dels següents blocs:

- Font d'alimentació: el sistema rep una alimentació de 24 volts i és necessari adaptar aquesta tensió als diferents blocs del supervisor.
- Adaptació senyal: el senyal analògic rebut des del sensor de temperatura s'ha d'adaptar perquè el microcontrolador en pugui manipular la informació correctament.
- Mòdul Bluetooth: s'encarrega d'enviar la informació processada pel microcontrolador a dispositius amb connexió sense fils.
- Microcontrolador: processa la informació i pren decisions.

En la següent figura podem veure representats els blocs que conformen el supervisor remot de temperatura via Bluetooth.

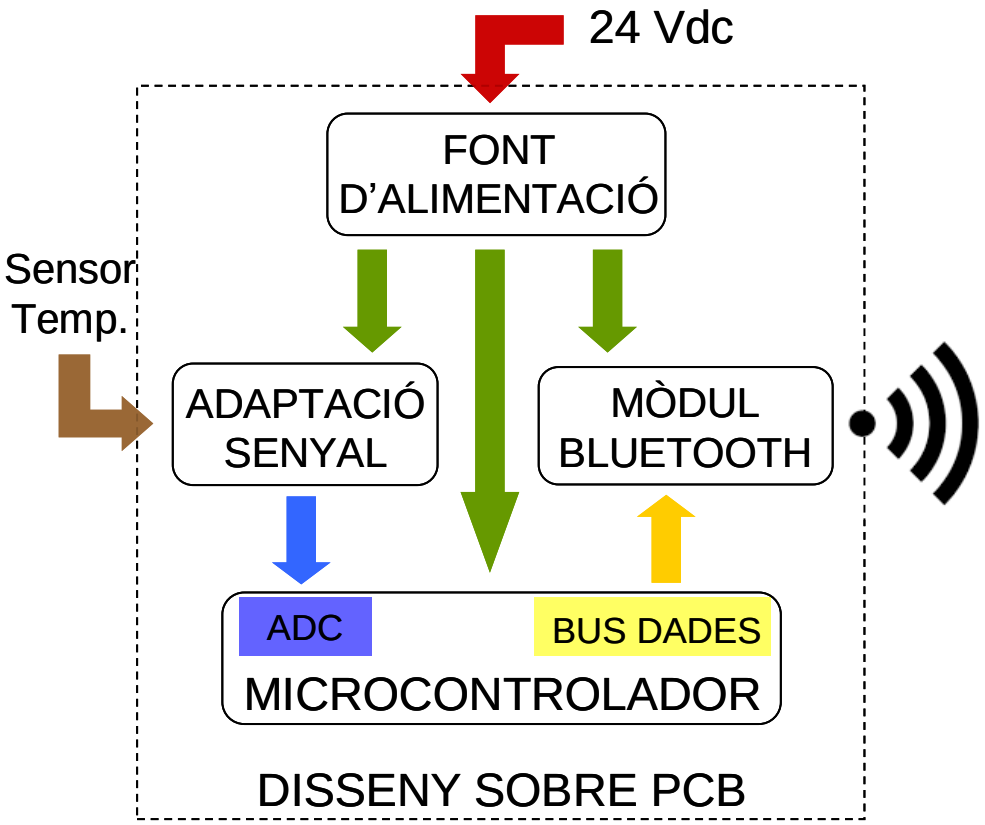


Figura 1. Diagrama de blocs del supervisor

1.3 Objectius

La realització del present treball de fi de grau pretén dues fites: per un costat adquirir formació en la direcció i seguiment de projectes, per l'altre assolir coneixements tècnics suficients per a poder implementar dissenys electrònics d'inici a fi.

1.3.1 Objectius de l'assignatura

L'assignatura Treball de Fi de Grau té com a objectius els punts que detallem tot seguit:

- Plantejament d'un projecte amb uns objectius definits des d'un inici.
- Seguiment i modificació d'un projecte segons necessitats puntuals.
- Redacció d'un projecte d'enginyeria vàlid per a ser presentat amb el rigor professional adequat.
- Ús d'eines de gestió de projectes

1.3.2 Objectius de l'àrea del TFG

Amb el present projecte es pretén assolir una sèrie de coneixements dins del camp del disseny de sistemes electrònics amb l'objectiu final de dissenyar i implementar un supervisor de temperatura remot via Bluetooth. Les tècniques que es treballaran per ordre cronològic són les següents:

- Selecció de components que compleixin els requeriments especificats en la proposta de projecte.
- Lectura de documentació tècnica, en especial *datasheets*.
- Disseny de circuits analògics i la seva posterior simulació amb programari específic.
- Programació de microcontroladors usats en el disseny de sistemes electrònics.
- Disseny de circuits impresos o PCB (Printed Circuit Board).
- Muntatge i comprovació de resultats.

1.4 Planificació

Per a poder realitzar el treball d'una manera satisfactòria i, per conseqüent, que permeti obtenir uns resultats òptims dins d'un termini establert ha calgut realitzar un estudi previ. Seguidament es mostra un resum de les tasques i fites planificades al detall, un diagrama de Gantt i un anàlisi de possibles riscos i incidències.

1.4.1 Tasques i fites

Al llarg del desenvolupament del projecte es duran a terme una sèrie de tasques les quals detallem tot seguit:

1. **Estudi i definició del TFG:** després d'haver llegit acuradament l'enunciat del treball es realitza una videoconferència amb el consultor de l'àrea i seguidament es procedeix a l'elaboració del present pla de treball.
2. **Mòdul Bluetooth:** es cerca informació referent a l'especificació Bluetooth i mòduls disponibles per seleccionar el més adequat per al projecte.
3. **Sensor de temperatura:** en aquesta tasca es cerca i selecciona un sensor de temperatura per a procedir al disseny del circuit d'adaptació d'aquest cap al microcontrolador.

4. **Microcontrolador PIC:** es selecciona el millor microcontrolador i es fa un estudi del mateix.
5. **Font d'alimentació:** definits tots els components que requereixen una font d'alimentació es procedeix al seu disseny.
6. **Disseny PCB:** s'unifiquen tots els circuits analògics i per mitjà del programari *eagle* es dissenya la PCB per acabar generant els *gerbers* de la mateixa.
7. **Programa de control:** aquesta tasca conforma el nucli de la funcionalitat del dispositiu. Primerament es defineix el diagrama de flux per més tard programar en llenguatge C el *firmware* que executarà el microcontrolador.
8. **Implementació del supervisor:** ja acabat tot el disseny del producte que conforma el TFG es procedeix a fer el muntatge d'una placa de proves i comprovar-ne el funcionament.
9. **Avaluació del TFG:** s'analitza el producte obtingut i s'estudien i detallen futures millores.
10. **Preparació de documentació:** s'integra tota la documentació generada en els anteriors capítols en la memòria final i amb ella es crea una presentació en vídeo.

La següent taula mostra les tasques comentades en aquest apartat desglossades en subtasques, a més inclou la seva predecessora, la data d'inici i finalització, durada en hores i setmana a la qual pertany cada una.

Setmana	Tasca	Predecessora	Inici	Fi	Hores
0	**1 Estudi i definició del TFG**	**-**	**25/02/16**	**08/03/16**	**36**
	1.1 Lectura de l'enunciat	1	25/02/16	25/02/16	2
	1.2 Pla de treball	1.1	26/02/16	08/03/16	29.5
	1.2.1 Recopilar informació	1.2	26/02/16	28/02/16	8
1	1.2.2 Videoconferència	1.2.1	29/02/16	29/02/16	1.5
	1.2.3 Esborrany pla de treball	1.2.2	29/02/16	06/03/16	14
2	1.2.4 Revisió esborrany	1.2.3	07/03/16	08/03/16	4
	1.3 Instal·lació de programari	1.2	08/03/16	08/03/16	4
	1.3.1 Schematics (Circuits analògics)	1.3	08/03/16	08/03/16	1
	1.3.2 Eagle (Disseny PCB)	1.3.1	08/03/16	08/03/16	1.5
	1.3.3 MPLAB X i compilador (PIC)	1.3.2	08/03/16	08/03/16	1.5
	Lliurament pla de treball (PAC 1)	**1.2.4**	**08/03/16**	**08/03/16**	**0.5**
	2 Mòdul Bluetooth	**1.3.3**	**09/03/16**	**14/03/16**	**24**
	2.1 Recopilar informació d'especificació	2	09/03/16	09/03/16	4
	2.2 Cerca de mòduls Bluetooth	2.1	10/03/16	10/03/16	3
	2.3 Seleccionar mòdul per al TFG	2.2	10/03/16	10/03/16	1
	2.4 Comanda del mòdul	2.3	11/03/16	11/03/16	1

	seleccionat				
	2.5 Estudi del funcionament del mòdul	2.4	11/03/16	12/03/16	7
2 – 3	2.6 Elaborar documentació	2.5	13/03/16	14/03/16	8
3	**3 Sensor de temperatura**	**2.6**	**15/03/16**	**21/03/16**	**26.5**
	3.1 Recopilar informació	3	15/03/16	15/03/16	3
	3.2 Seleccionar sensor per al TFG	3.1	15/03/16	15/03/16	1
	3.3 Comanda sensor seleccionat	3.2	16/03/16	16/03/16	1
	3.4 Dissenys de circuit d'adaptació	3.3	16/03/16	17/03/16	5
	3.5 Dissenyar el circuit d'adaptació	3.4	17/03/16	18/03/16	6
	3.6 Simular el circuit d'adaptació	3.5	19/03/16	19/03/16	1
	3.7 Comanda components	3.6	19/03/16	19/03/16	1.5
3 - 4	3.8 Elaborar documentació	3.5	19/03/16	21/03/16	8
4	**4 Microcontrolador PIC**	**3.8**	**21/03/16**	**25/03/16**	**17.5**
	4.1 Seleccionar microcontrolador PIC	4	21/03/16	22/03/16	3
	4.2 Comanda del microcontrolador	4.1	22/03/16	22/03/16	1
	4.3 Estudi del microcontrolador triat	4.2	22/03/16	23/03/16	5.5
	4.4 Elaborar documentació	4.3	24/03/16	25/03/16	8
4 - 5	**5 Font d'alimentació**	**4.4**	**26/03/16**	**30/03/16**	**20**
5	5.1 Avaluació de requisits	5	26/03/16	26/03/16	2
	5.2 Càlculs i dimensionament	5.1	26/03/16	28/03/16	9
	5.3 Simular font d'alimentació	5.2	28/03/16	28/03/16	1
	5.4 Comanda components	5.3	29/03/16	29/03/16	1
	5.5 Elaborar documentació	5.3	29/03/16	30/03/16	7
5 - 6	**Redactar PAC 2, enviar-la al consultor i modificacions.**	**5.5**	**31/03/16**	**04/04/16**	**15**
6	**Lliurament de la PAC 2**	**-**	**05/04/16**	**05/04/16**	**0.5**
	6 Disseny PCB	**5.5**	**05/04/16**	**12/04/16**	**29**
	6.1 Preparar esquema complet	6	05/04/16	06/04/16	6
	6.2 Disseny de pistes del circuit imprès	6.1	07/04/16	08/04/16	8
	6.3 Generació de Gerbers	6.2	09/04/16	09/04/16	2
	6.4 Comanda placa fotosensible positiva	6.3	09/04/16	09/04/16	1
	6.5 Redactar llistat de components	6.4	10/04/16	10/04/16	2
	6.6 Valoració econòmica	6.5	10/04/16	10/04/16	2
7	6.7 Elaborar documentació	6.6	11/04/16	12/04/16	8
	7 Programa de control	**6.7**	**13/04/16**	**04/05/16**	**69**
	7.1 Definir diagrama de flux	7	13/04/16	15/04/16	12
7 - 8	7.2 Formació compilador XC8	7.1	16/04/16	20/04/16	20
8 - 9	7.3 Implementar programa de control	7.2	21/04/16	30/04/16	25
9 - 10	7.4 Simular el programa	7.3	01/05/16	02/05/16	4
10	7.5 Elaborar documentació	7.4	03/05/16	04/05/16	8
10 - 11	**Redactar PAC 3, enviar-la al consultor i modificacions.**	**7.5**	**05/05/16**	**09/05/16**	**15**
11	**Lliurament de la PAC 3**	**-**	**10/05/16**	**10/05/16**	**0.5**
	8 Implementació del supervisor	**7.5**	**11/05/16**	**14/05/16**	**16**
	8.1 Fabricació de la PCB	8	11/05/16	12/05/16	6
	8.2 Muntatge de components	8.1	12/05/16	13/05/16	4
	8.3 Programació del microcontrolador	8.2	13/05/16	13/05/16	2
	8.4 Simulació i test	8.3	14/05/16	14/05/16	4
	9 Avaluació del TFG	**8.4**	**15/05/16**	**15/05/16**	**4**
	9.1 Conclusions	9	15/05/16	15/05/16	2

	9.2 Possibles millores	9.1	15/05/16	15/05/16	2
12	**10 Preparació de documentació**	**9.2**	**16/05/16**	**13/06/16**	**71**
	10.1 Recol·lecció de documentació	10	16/05/16	18/05/16	12
12 - 13	10.2 Composició de la memòria	10.1	19/05/16	26/05/16	30
13 - 15	10.3 Composició de la presentació	10.2	27/05/16	06/06/16	20
15	**10.4 Enviar memòria i presentació al consultor**	**10.3**	**07/06/16**	**07/06/16**	**1**
15 - 16	10.5 Correcció d'errors	10.4	07/06/16	13/06/16	8
16	**Lliurament final (PAC 4)**	**-**	**14/06/16**	**14/06/16**	**1**
18	DEBAT		**29/06/16**	**01/07/16**	**Total 315 h**

Taula 1: Tasques del projecte

Durant les 16 setmanes que durarà l'elaboració del TFG es poden arribar a dedicar 30 hores setmanals en cas de necessitat, fet pel qual se superaria amb escreix les 315 hores previstes en la planificació anterior en cas d'imprevistos.

Les fites més significatives són les dates d'entrega dels treballs al llarg del semestre, en especial la darrera entrega o PAC 4, les quals queden recollides en la següent taula:

Fita	Data
Lliurament pla de treball (PAC 1)	**08/03/16**
Lliurament de la PAC 2	**05/04/16**
Lliurament de la PAC 3	**10/05/16**
Lliurament final (PAC 4)	**14/06/16**

Taula 2. Fites del projecte

1.4.2 Diagrama de Gantt

Seguidament s'adjunta el diagrama de Gantt on es pot veure la planificació de tasques, la seva durada i interrelació:

	Nombre de tarea	Comienzo	Fin	Pre
2	**1 Estudi i definició del TFG**	**25/02/16**	**08/03/16**	
3	1.1 Lectura de l'enunciat	25/02/16	25/02/16	
4	**1.2 Pla de treball**	**26/02/16**	**08/03/16**	
5	1.2.1 Recopilar informació	26/02/16	28/02/16	3
6	1.2.2 Videoconferència	29/02/16	29/02/16	
7	1.2.3 Esborrany pla de treball	29/02/16	06/03/16	5
8	1.2.4 Revisió esborrany	07/03/16	08/03/16	7
9	**1.3 Instal·lació de programari**	**08/03/16**	**08/03/16**	
10	1.3.1 Schematics (Circuits analògics)	08/03/16	08/03/16	
11	1.3.2 Eagle (Disseny PCB)	08/03/16	08/03/16	10
12	1.3.3 MPLAB X i compilador (PIC)	08/03/16	08/03/16	11
13	**Lliurament de la PAC 1**	08/03/16	08/03/16	8
14	**2 Mòdul Bluetooth**	**09/03/16**	**14/03/16**	**2**
15	2.1 Recopilar informació d'especificació	09/03/16	09/03/16	
16	2.2 Cerca de mòduls Bluetooth	10/03/16	10/03/16	15
17	2.3 Seleccionar mòdul per al TFG	10/03/16	10/03/16	15
18	2.4 Comanda del mòdul seleccionat	11/03/16	11/03/16	17
19	2.5 Estudi del funcionament del mòdul	11/03/16	12/03/16	17
20	2.6 Elaborar documentació	13/03/16	14/03/16	18
21	**3 Sensor de temperatura**	**15/03/16**	**21/03/16**	**14**
22	3.1 Recopilar informació	15/03/16	15/03/16	
23	3.2 Seleccionar sensor per al TFG	15/03/16	15/03/16	22
24	3.3 Comanda sensor seleccionat	16/03/16	16/03/16	23
25	3.4 Dissenys de circuit d'adaptació	16/03/16	17/03/16	23
26	3.5 Dissenyar el circuit d'adaptació	18/03/16	18/03/16	25
27	3.6 Simular el circuit d'adaptació	18/03/16	19/03/16	26
28	3.7 Comanda components	18/03/16	19/03/16	26
29	3.8 Elaborar documentació	18/03/16	21/03/16	26

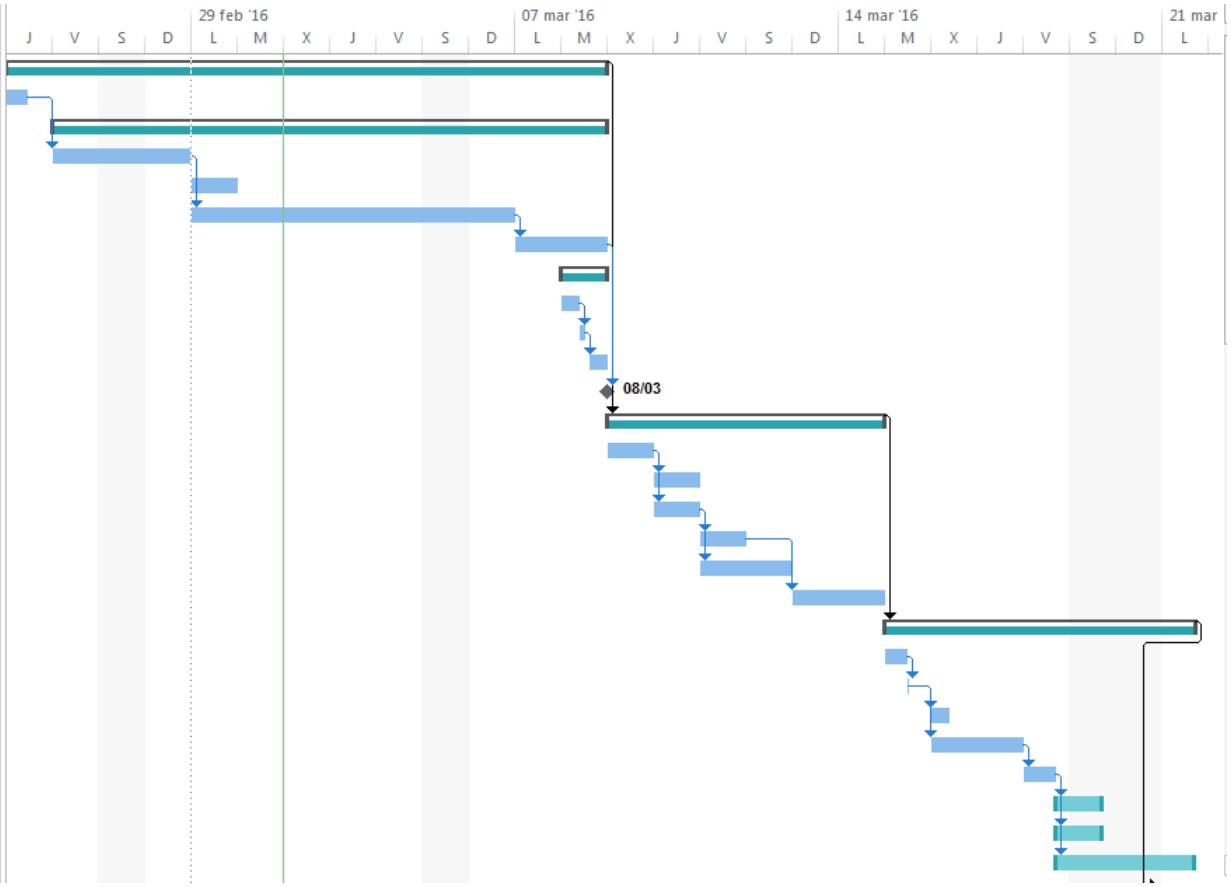


Figura 2. Gantt: definició del TFG, mòdul Bluetooth i sensor de temperatura

	Nombre de tarea	Comienzo	Fin	Pre
30	**4 Microcontrolador PIC**	**21/03/16**	**25/03/16**	**21**
31	4.1 Seleccionar microcontrolador PIC	21/03/16	22/03/16	
32	4.2 Comanda del microcontrolador	23/03/16	23/03/16	31
33	4.3 Estudi del microcontrolador triat	23/03/16	23/03/16	31
34	4.4 Elaborar documentació	24/03/16	25/03/16	33
35	**5 Font d'alimentació**	**26/03/16**	**30/03/16**	**30**
36	5.1 Avaluació de requisits	26/03/16	26/03/16	
37	5.2 Càlculs i dimensionament	26/03/16	28/03/16	36
38	5.3 Simular font d'alimentació	28/03/16	28/03/16	37
39	5.4 Comanda components	29/03/16	29/03/16	37
40	5.5 Elaborar documentació	29/03/16	30/03/16	37;
41	**PAC 2, enviar-la al consultor i canvis.**	31/03/16	04/04/16	40
42	**Lliurament de la PAC 2**	05/04/16	05/04/16	41
43	**6 Disseny PCB**	**05/04/16**	**12/04/16**	**35**
44	6.1 Preparar esquema complet	05/04/16	06/04/16	
45	6.2 Disseny de pistes del circuit imprès	07/04/16	08/04/16	44
46	6.3 Generació de Gerbers	09/04/16	09/04/16	45
47	6.4 Comanda placa fotosensible positiva	09/04/16	09/04/16	46
48	6.5 Redactar llistat de components	10/04/16	10/04/16	45
49	6.6 Valoració econòmica	10/04/16	10/04/16	48
50	6.7 Elaborar documentació	11/04/16	12/04/16	49

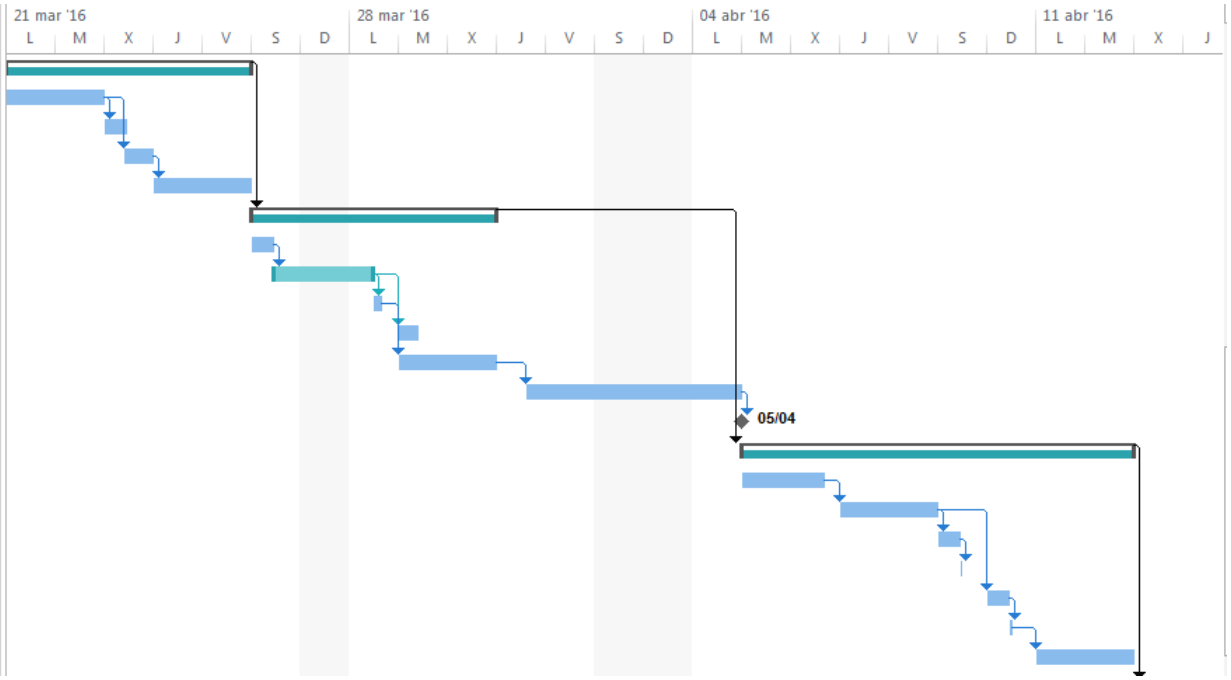


Figura 3. Gantt: microcontrolador PIC, font d'alimentació i disseny PCB

	Nombre de tarea	Comienzo	Fin	Pre
51	**7 Programa de control**	**13/04/16**	**04/05/16**	**43**
52	7.1 Definir diagrama de flux	13/04/16	15/04/16	
53	7.2 Formació compilador XC8	16/04/16	20/04/16	52
54	7.3 Implementar programa de control	21/04/16	30/04/16	53
55	7.4 Simular el programa	01/05/16	02/05/16	54
56	7.5 Elaborar documentació	03/05/16	04/05/16	55
57	**PAC 3, enviar-la al consultor i canvis.**	05/05/16	09/05/16	56
58	**Lliurament de la PAC 3**	10/05/16	10/05/16	57

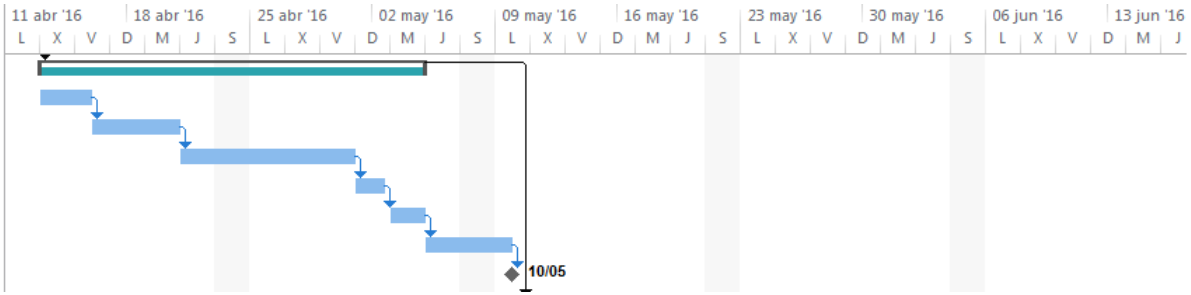
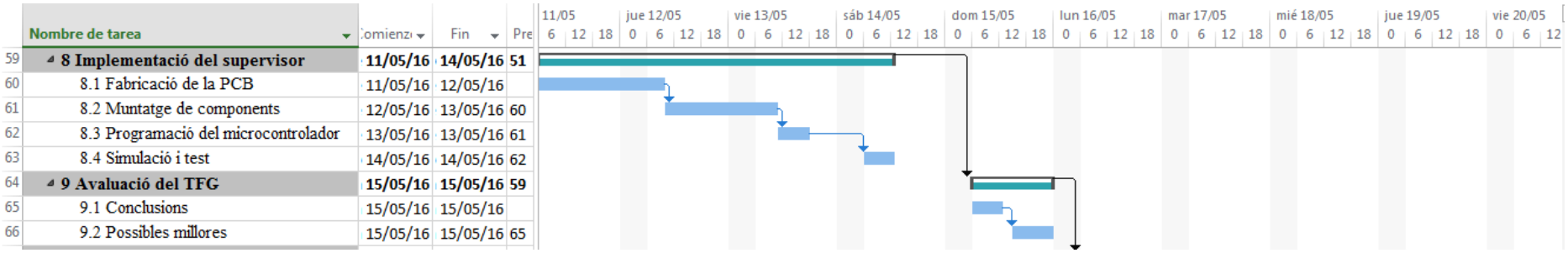
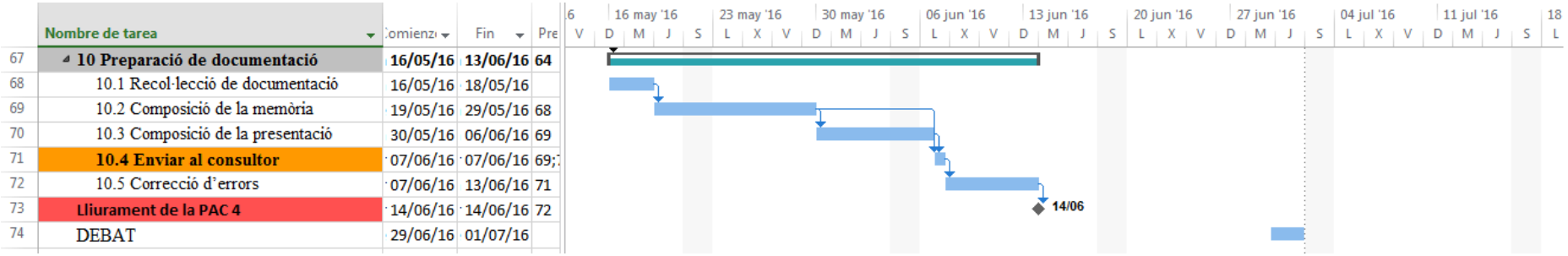


Figura 4. Gantt: programa de control



	Nombre de tarea	Comienzo	Fin	Pre
59	8 Implementació del supervisor	11/05/16	14/05/16	51
60	8.1 Fabricació de la PCB	11/05/16	12/05/16	
61	8.2 Muntatge de components	12/05/16	13/05/16	60
62	8.3 Programació del microcontrolador	13/05/16	13/05/16	61
63	8.4 Simulació i test	14/05/16	14/05/16	62
64	9 Avaluació del TFG	15/05/16	15/05/16	59
65	9.1 Conclusions	15/05/16	15/05/16	
66	9.2 Possibles millores	15/05/16	15/05/16	65

Figura 5. Gantt: implementació del supervisor i avaluació del TFG



	Nombre de tarea	Comienzo	Fin	Pre
67	10 Preparació de documentació	16/05/16	13/06/16	64
68	10.1 Recol·lecció de documentació	16/05/16	18/05/16	
69	10.2 Composició de la memòria	19/05/16	29/05/16	68
70	10.3 Composició de la presentació	30/05/16	06/06/16	69
71	10.4 Enviar al consultor	07/06/16	07/06/16	69;7
72	10.5 Correcció d'errors	07/06/16	13/06/16	71
73	Lliurament de la PAC 4	14/06/16	14/06/16	72
74	DEBAT	29/06/16	01/07/16	

Figura 6. Gantt: preparació de documentació

1.5 Incidències i riscos

En la següent taula queden recollides les possibles incidències que poden alterar el curs de l'elaboració i entrega del treball de fi de grau, a més tot seguit s'inclou un pla de contingència per a actuar sobre tals riscos:

CODI	DESCRIPCIÓ	CAUSA	PROBABILITAT	IMPACTE
R01	Pèrdua de dades	Fallada de disc dur o error en el fitxer	Mitja	Alt
R02	Ordinador avariat	Equip molt usat	Baixa	Alt
R03	Pèrdua de connexió a internet	Fallada del *router* o proveïdor	Baixa	Mitjà
R04	Incomplir dates previstes	Sobrecàrrega no planificada i imprevistos	Mitja	Alt
R05	Imprevistos familiars	Malaltia, avaria cotxe, altres...	Baixa	Baix
R06	Malaltia	Naturals o accident	Baixa	Mitjà – Alt
R07	Fabricació PCB no satisfactori	Procés de fabricació no professional	Mitja	Mitjà

Taula 3. Incidències i riscos

CODI	ACCIÓ	TIPUS	RISC RESIDUAL
A1R01	Fer còpies de seguretat periòdiques en dispositius externs o copiar dades al núvol	Mitigadora	Baix
A1R02	Disposar de programari preparat per instal·lar en un altre ordinador i A1R01	Mitigadora	Baix
A1R03	Connectar temporalment a internet a través de la xarxa 4G del telèfon mòbil	Correctora	Baix
A1R04	Dedicar més hores en aproximar-se una entrega, en especial caps de setmana	Correctora	Mitjà
A1R05	Distribuir les hores perdudes durant el següents dies	Correctora	Baix
A1R06	Ajustar de nou planificació de tasques	Correctora	Mitjà
A1R07	Encarregar la fabricació del circuit imprès a una empresa especialitzada	Correctora	Baix

Taula 4. Pla de contingència

1.6 Descripció dels següents capítols

Aquest primer capítol ha plantejat la realització d'un projecte de fi de grau amb una visió detallada de cada una de les etapes que el composen, tot seguit es detalla el contingut dels següents capítols.

El segon capítol "Estudi i selecció de components" detalla informació rellevant sobre l'estàndard Bluetooth, sensors de temperatura i microcontroladors, per a continuació donar una visió del funcionament de cada component seleccionat.

Al tercer capítol "Disseny dels circuits analògics" es presenta el disseny analògic dels subsistemes que conformen el supervisor remot de temperatura, tot detallant els càlculs realitzats.

El quart capítol "Programa de control" defineix l'algoritme funcional, executat per un microcontrolador, alhora que descriu amb detall les funcions implementades que permeten captar, processar i enviar la temperatura remotament.

Al capítol cinquè "Disseny de la PCB" es genera un circuit global reunificant els subsistemes, per a continuació dissenyar un circuit imprès on s'implementa la solució proposada.

Una vegada finalitzades totes les etapes de disseny, les quals han estat prèviament validades, al capítol sisè "Muntatge i prova del prototip" es detalla com s'ha implementat físicament el prototip, amb informació de les proves realitzades.

El capítol setè "Valoració econòmica" descriu amb tot detall el cost de realització del present projecte, a més del cost de fabricació del prototip.

Per finalitzar, el capítol vuitè "Conclusions" conclou el treball tot fent esment a aspectes clau que han facilitat el seu desenvolupament.

2. Estudi i selecció de components

El present capítol està dividit en tres parts on es dóna informació referent a tecnologia Bluetooth, sensors de temperatura i microcontroladors. En primer lloc s'ofereix una introducció a l'estàndard Bluetooth per tot seguit justificar l'elecció del mòdul que s'implementarà en aquest treball i detallar-ne el funcionament. A la segona part s'ofereix informació dels sensors de temperatura més usats a la indústria seleccionant el més adequat, alhora que s'ofereix informació tècnica del mateix. Per últim s'introdueix el concepte de microcontrolador i es justifica l'elecció del més adient.

2.1 Mòdul Bluetooth

En aquest apartat es dóna una breu introducció a l'estàndard Bluetooth, tot seguit s'explica què és un mòdul Bluetooth, quins mòduls es poden trobar al mercat i es justifica el mòdul escollit. Per últim s'amplia la informació referent al seu funcionament i connexions.

2.1.1 Introducció a l'estàndard Bluetooth

La tecnologia Bluetooth deu el seu nom al rei danès *Harald Blåtand* (*Harold Bluetooth* en anglès) qui durant el segle X va iniciar converses amb faccions enfrontades de l'actual Noruega, Suècia i Dinamarca per tal d'unificar-les. La clau del seu èxit es va deure a les seves habilitats comunicatives.

L'any 1994 la companyia de telecomunicacions Ericsson va promoure una iniciativa per a proveir els seus telèfons i dispositius d'un mitjà de connexió de baix cost i curt abast, aquesta iniciativa pretenia substituir línies de transmissió RS-232 cablades per un sistema inal·làmbric. Aquest fet va motivar altres fabricants a involucrar-se en el projecte culminant amb la creació del grup Bluetooth SIG (grup d'interès especial).

La finalitat del grup SIG és vetllar per la interoperabilitat dels dispositius Bluetooth entre fabricants, per això és important que qui vulgui treballar amb aquest estàndard s'afegeixi al SIG, el qual per mitjà de grups de treball ajuda a evolucionar l'estàndard Bluetooth.

Bluetooth constitueix una especificació oberta, per a comunicacions de veu i dades inal·làmbriques de curt abast, la qual funciona a la banda ISM (*Industrial, Scientific, Medical*) dels 2.4 GHz i no requereix de llicències per al seu ús, permetent connexions *ad hoc* entre dos dispositius que es trobin propers.

Quan dos dispositius estableixen comunicació es forma el que es coneix com a *piconet*, una petita xarxa de dispositius sense fils que pot arribar fins a vuit dispositius. El primer a connectar estableix el rol de màster i els restants d'esclau, tots compartint el mateix canal físic. El nombre de dispositius es pot veure incrementat en interconnectar petites xarxes *piconet* entre elles, tot formant el que es coneix com a *scatternet*, on un dispositiu màster d'una *piconet* es connecta a un esclau de l'altre.

La banda ISM de 2,4 GHz al ser lliure pot quedar saturada de dispositius treballant en les mateixes freqüències provocant interferències entre ells. Per contrarestar aquest problema Bluetooth defineix com a tècnica de modulació l'FHSS (espectre eixamplat per salt de freqüència), on cada paquet d'informació és enviat aleatòriament per un dels 79 canals d'1 MHz.

L'estàndard Bluetooth defineix tres classes segons la seva potència d'emissió, en la següent taula les podem veure resumides.

Classe	Potència màxima	Potència màxima	Abast (aproximat)
1	100 mW	20 dBm	100 m
2	2.5 mW	4 dBm	10 m
3	1 mW	0 dBm	1 m

Taula 5. Classes del estàndard Bluetooth

A més aquest estàndard ha evolucionat amb diverses versions, la següent taula ens mostra les versions més significatives i els seus amples de banda:

Versió	Ample de banda
1.2	1 Mbit/s
2.0 + EDR	3 Mbit/s
3.0 + HS	24 Mbit/s
4.0	32 Mbit/s

Taula 6. Versions del estàndard Bluetooth

Existeixen dues tecnologies Bluetooth: BLE (Bluetooth *Low Energy*) i *Classic* (versions anteriors a la 4.0). Entre les BLE hi podem trobar les *SMART* i *SMART READY*, permetent aquesta última interconnectivitat amb Bluetooth *Classic*.

Les versions BLE han estat dissenyades per a treballar amb un consum d'energia molt reduït, utilitzen 43 canals de 2 MHz i permeten enviar petites ràfegues de dades. Versions anteriors com la 2.1 + EDR són molt més esteses al mercat i ofereixen major velocitat de transmissió de dades.

2.1.2 Selecció del mòdul Bluetooth

Al mercat podem trobar diversos mòduls encapsulats els quals contenen la ràdio Bluetooth, un microcontrolador que permet configuracions del dispositiu i una antena impresa sobre PCB o un connector. Aquests mòduls venen en dues configuracions, amb pins soldats per a poder-hi connectar cables directament o en format SMD (*Surface Mounting Device*) per a soldar-los directament sobre un circuit imprès.

Donat que els mòduls necessiten poder comunicar-se amb altres dispositius, com per exemple microcontroladors, aquests vénen equipats amb protocols de comunicacions com UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*), SPI (*Serial Peripheral Interface*) o USB (*Universal Serial Bus*).

Entre alguns dels fabricants més importants hi podem trobar els següents:

- STMICROELECTRONICS
- MULTITECH
- QUALCOMM TECHNOLOGIES
- MICROCHIP
- ATMEL CORPORATION

En aquest treball hem optat pel fabricant Microchip per tenir una forta presència en el mercat, una extensa documentació i oferir productes OEM (*Original Equipment Manufacturer*).

A la figura 7 podem veure algunes de les opcions que ens ofereix Microchip en format SMD per a muntar en circuits impresos, totes elles amb antena integrada en format PCB i encapsulat per a protegir el circuit d'interferències electromagnètiques.

	RN41 / 41N	RN42 / RN42N	RN52	RN4020
Type	Class 1 Bluetooth 2.1	Class 2 Bluetooth 2.1	Class 2 Bluetooth 3.0	Bluetooth LE
Interfaces	← UART / USB →		Analog spk and mic, i2S, SPDIF, PCM, UART	UART
Profiles	← SPP / HID / iAP / HCI →		A2DP / ARVCP / HSP / HFP / SPP / iAP	GATT, Health, Fitness, Proximity, etc.; Custom data
Power	← 3.3 VDC →			
Antenna	ceramic on board	← PCB →		
Size (mm)	13.4 x 25.8 x 2.0		13.4 x 30 x 3.0	11.5 x 19.5 x2.5
Certifications	← BT SIG / FCC / CE / ICS →			

Figura 7. Mòduls Bluetooth de Microchip

A l'hora de seleccionar el dispositiu més adequat per al disseny del supervisor remot de temperatura s'han tingut en compte els següents criteris:

1. Connectivitat amb una àmplia gamma de productes.
2. Abast superior a 50 metres.
3. Protocol de comunicació UART.
4. Format reduït del dispositiu.
5. Baix consum energètic.

El mòdul que millor s'ajusta als nostres requeriments és el RN41, ja que es tracta d'un mòdul de classe 1 amb un abast aproximat de 100 metres, incorpora el protocol de comunicació UART i és compatible amb la versió 2.1 + EDR àmpliament estesa. La següent figura il·lustra el mòdul SMD amb antena incorporada en color blau:

Figura 8. Mòdul Bluetooth RN41

Les especificacions tècniques més notables d'aquest mòdul les trobem resumides en la següent taula:

Mòdul Bluetooth RN41	
Classe	1
Freqüència de treball	2402 ~ 2480 MHz
Potència Tx	15 dBm
Sensibilitat	-80 dBm
Modulacions	FHSS/GFSK
Encriptació	128 bits
Configuració	UART o RF
Temperatura funcionament	-40 ºC - +85 ºC
Tensió de treball	3 V - 3.6 V
Consum en Tx	65 mA (màx. 100 mA)
Consum en Rx	35 mA (màx. 60 mA)

Taula 7. Especificacions del mòdul RN41

2.1.3 Funcionament del mòdul seleccionat

El mòdul Bluetooth RN41 té un format SMD i presenta la següent distribució de pins:

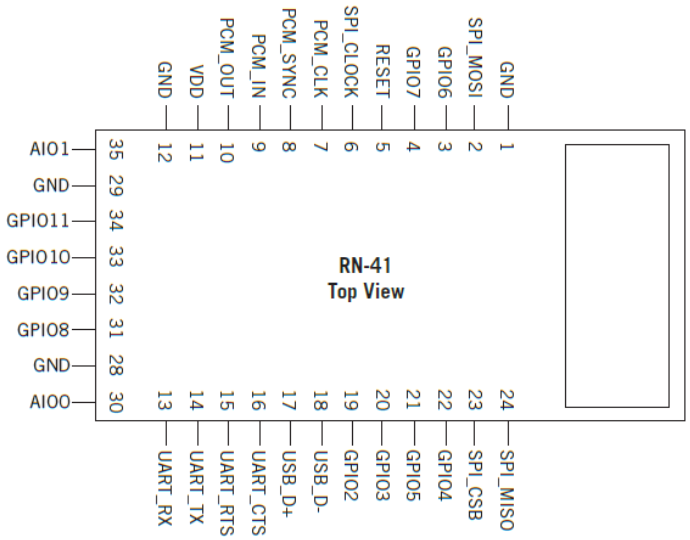


Figura 9. Pins del mòdul RN41

Per al nostre disseny no farem ús de totes les connexions que ofereix el mòdul, ja que ens ajustarem a la funcionalitat que requereix aquest projecte.

La taula 8 resumeix les entrades i sortides a utilitzar en el disseny amb una explicació de la seva funcionalitat:

Pin	Nom del pin	Funció	Descripció
1	GND	*Ground*	Connexió a massa
3	GPIO6	Bluetooth *master*	Connecta com a màster a un esclau
4	GPIO7	*Baudrate*	Permet seleccionar 9600 o 115000 bps
5	RESET	*Active-low reset*	Permet resetejar el mòdul Bluetooth
11	VDD	3.3V	Entrada de tensió
12	GND	*Ground*	Connexió a massa
13	UART_RX	UART *input*	Entrada de dades al mòdul Bluetooth
14	UART_TX	UART *output*	Sortida de dades del mòdul Bluetooth
19	GPIO2	*Status*	Connectat a un altre mòdul (LED blau)
20	GPIO3	*Auto discovery/pairing*	Permet la connexió d'un màster
21	GPIO5	*Status*	Espera / Mode comanda (LED verd)
22	GPIO4	*Factory reset*	Restableix la configuració inicial
28/29	GND	*Ground*	Connexió a massa

Taula 8. Descripció dels pins del mòdul RN41

El mòdul RN41 pot operar en dos modes diferents, un mode d'operació normal anomenat *data mode* on tota la informació rebuda serà transmesa i un mode de configuració del dispositiu anomenat *data command*.

La configuració es pot dur a terme de tres maneres diferents: a través del port sèrie connectat a un PC o microcontrolador, remotament a través d'una connexió Bluetooth o bé modificant *switchos* connectats al mòdul.

La via de configuració que utilitzarem en aquest treball és a través de la connexió UART que comunica el microcontrolador amb el mòdul RN41, el qual rebrà comandes AT.

Amb la comunicació establerta des del PC tenim uns segons per entrar en mode *data command*, si enviem els caràcters "$$$" a través de la connexió remota dins del terminal s'obtindrà la resposta del mòdul amb un "CMD". Una vegada s'hagi acabat de treballar amb el mode *data command* s'enviaràn els caràcters "---" per tal de restablir el funcionament a *data mode*.

El mòdul RN41 disposa de diferents tipus de comandes que permeten operar i configurar la seva funcionalitat, tot seguit els detallem:

- ***Set commands:*** permeten modificar la configuració del mòdul, per exemple el nom del dispositiu.
- ***Get commands:*** per mitjà de les comandes get es pot obtenir informació de la configuració guardada.
- ***Change commands:*** aquestes comandes donen la possibilitat de realitzar canvis en la configuració de manera temporal.
- ***Action commands:*** comandes que donen ordres per a dur a terme accions, com per exemple connectar a un altre dispositiu...
- ***GPIO commands:*** el mòdul RN41 disposa d'una sèrie de pins lliures que poden ser usats per funcionalitats concretes, a través de les comandes GPIO es poden configurar.

2.2 Sensor de temperatura

La temperatura pot ser captada per mitjà de diversos sensors i posteriorment processada. En les properes línies es dóna informació d'alguns tipus de sensors que són usats en la indústria, s'ofereix una justificació del sensor escollit i es detallen les seves característiques de funcionament.

2.2.1 Tipus de sensors de temperatura

Existeixen diversos mitjans per a mesurar la temperatura, en aquest apartat exposarem alguns dels sensors més usats per a treballar amb circuits electrònics.

Termoparell: sensor que està format per la unió de dos metalls de diferent composició que es troben en contacte, aquesta unió genera una petita diferència de potencial de l'ordre de mil·livolts que varia en funció de la temperatura aplicada. Existeixen diverses combinacions de metalls les quals ofereixen un gran ventall de rangs de mesura.

Termistor: sensor format per materials semiconductors dopats amb impureses que modifica la seva resistència en funció de la temperatura aplicada. Poden ser NTC

(*negative thermal coeficient*) o PTC (*positive thermal coeficient*) segons el dopatge aplicat, sent els NTC usats per a la medició de temperatura.

RTD (*resistor thermal detector*): sensor basat en la variació de la resistència d'un metall, per mitjà de la seva dilatació, en funció de la temperatura aplicada. Els metalls més usats són coure, níquel i platí, aquest últim ofereix una major precisió.

La següent taula resumeix les característiques més significatives de cada sensor:

Sensor	Rang de mesura	Sensibilitat	Estabilitat	Linealitat	Precissió	Preu
Termopar	-200 ºC - +2000 ºC	Baixa	Baixa	Mitja	Baixa	Baix
Termistor	-50 ºC - +200 ºC	Alta	Mitja	Baixa	Alta	Mitjà
RTD	-200 ºC - +850 ºC	Mitja - Alta	Alta	Alta	Mitja - Alta	Mitjà

Taula 9. Comparació de sensors de temperatura

2.2.2 Selecció del sensor de temperatura

Els sensors exposats en l'apartat anterior es troben en múltiples configuracions depenent del rang de temperatura a mesurar. En el cas del termistor i RTD poden venir en diferents encapsulats per a soldar directament sobre PCB, a més de trobar-los protegits per una baina connectats a diverses longituds de cable.

El criteris seguits per a seleccionar el sensor més adient són els següents:

1. Rang de mesura de 0 ºC a 150 ºC (amb possibilitat d'ampliació).
2. Precissió de mesura inferior a 1 ºC.
3. Alta linealitat.

El tipus de sensor que més s'ajusta és l'RTD, on la precisió ve definida segons la seva classe dins la norma EN 60751:2008.

Classe	Tolerància	Rang
B	±(0.3 + 0.005·|ºC|)	-200 ºC - +850 ºC
A	±(0.15 + 0.002·|ºC|)	-200 ºC - +650 ºC

Taula 10. Tolerància de sensors RTD

El sensor seleccionat i que compleix els requeriments és el model THERMASGARD ALTF-1 (clase B) de platí. Aquest sensor pot mesurar temperatures de canonades des de -35 ºC fins a +180 ºC i ofereix una resistència de 1000 Ω a 0 ºC.

Figura 10. Sensor PT1000 ALTF-1

2.2.3 Característiques del sensor seleccionat

El sensor RTD de platí seleccionat respon a una resistència concreta per a cada valor de temperatura mesurat, aquesta pot ser trobada segons la fórmula de *Callendar-Van Dusen* dins d'un rang de -200 ºC fins a 850 ºC.

$$\begin{aligned} R(t) &= R(0)\cdot\left[1 + A\cdot t + B\cdot t^2 + (t-100)\cdot C\cdot t^3\right] \quad t < 0^{o}C \\ R(t) &= R(0)\cdot\left[1 + A\cdot t + B\cdot t^2\right] \quad t \geq 0^{o}C \end{aligned} \quad on \begin{pmatrix} A = 3.9083\cdot 10^{-3}\left(^{o}C^{-1}\right) \\ B = -5.7750\cdot 10^{-7}\left(^{o}C^{-2}\right) \\ C = -4.1830\cdot 10^{-12}\left(^{o}C^{-4}\right) \\ R(0) = \Omega\left(0^{o}C\right) \\ R(t) = \Omega\left(RTD\right) \\ t = temperatura \end{pmatrix}$$

Una aproximació d'aquesta fórmula vé donada quan es mesura el pendent normalitzat entre 0 ºC i 100 ºC, obtenint el paràmetre de linealitat α:

$$\alpha = \left(\frac{R_{100^{o}} - R_{0^{o}}}{100^{o} - 0^{o}}\right) \Big/ 100 = 0.00385\left(^{o}C^{-1}\right)$$

Usant aquesta aproximació la resistència a temperatures majors de 0 ºC pot ser trobada amb la simplificació de la fórmula de *Callendar-Van Dusen*:

$$R(t) = R(0) + R(0)\cdot\alpha\cdot t$$

Llavors la temperatura en funció de la resistència serà:

$$t = \frac{R(t) - R(0)}{R(0)\cdot\alpha}$$

2.3 Microcontrolador

En les següents línies es presenten els requeriments que ha de satisfer el microcontrolador i es justifica l'elecció del més adequat, per últim es dóna informació del microcontrolador seleccionat.

2.3.1 Selecció del microcontrolador

Gràcies al fet que el microcontrolador només haurà de llegir la temperatura del sensor, processar aquesta informació i enviar-la al mòdul Bluetooth, amb un microcontrolador de 8 bits amb arquitectura *Harvard* podem satisfer les necessitats d'aquest projecte i mantenir un consum reduït al nostre sistema.

D'entre els múltiples fabricants de microcontroladors de 8 bits s'ha triat *Microchip* per tenir una àmplia gamma de productes i ser un fabricant altament consolidat en el mercat, el qual té una posició dominant en el sector de 8 bits.

A l'hora d'escollir el microcontrolador s'ha tingut en compte que compleixi el següent:

- Incorpori un ADC (*Analogic to Digital Converter*) amb prou resolució per a precisions inferiors a 1 ºC dins d'un rang comprès entre 0 ºC i 150 ºC.
- Accepti una tensió de 3.3 V (el mòdul Bluetooth treballa a 3.3 V).
- Disposi de mòdul UART per a enviar dades al mòdul Bluetooth.
- Estigui encara en producció i disposi d'eines de suport.
- Sigui compatible amb el programador PICKIT3.
- Tingui un consum molt reduït.

El microcontrolador escollit és el model 16F916, gamma mitjana de microcontroladors de 8 bits, amb format SOIC (*Small Outline Integrated Circuit*) de 28 pins. Aquest format permet reduir l'espai notablement al disseny de la PCB.

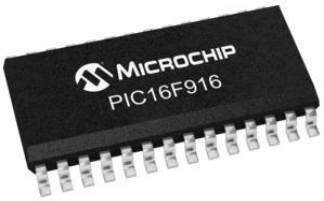


Figura 11. Microcontrolador PIC 16F916

2.3.2 Informació del microcontrolador

El microcontrolador seleccionat de Microchip incorpora una tecnologia anomenada *nanoWatt technology*, la qual redueix notablement el consum en sistemes encastats. La taula següent resumeix algunes de les característiques del PIC 16F916:

PIC 16F916	
Consum	<100 µA en repòs / 220 µA a 4 MHz
Memòria	14 KB
GPIO disponibles	Fins a 24
Canals ADC	5 de 10 bits de resolució
Temporitzadors	2 de 8 bits i 1 de 16 bits
AUSART	1
LCD *driver*	Fins a 16 segments de LCD

Taula 11. Característiques del PIC 16F916

El mòdul ADC de 10 bits ens permetrà un pas de quantificació i una resolució de:

$$\frac{3.3V}{2^{10}-1} = 3.22mV \quad \text{i} \quad \frac{150^{o}C}{2^{10}-1} = 0.14^{o}C$$

A la taula 12 es resumeixen els pins utilitzats i la funció adquirida, el text en color gris indica una funcionalitat opcional que va més enllà d'aquest projecte.

Pin	Funció	Connecta a	Pin	Funció	Connecta a
1	Reset/Prog.	Pin1 Pickit3	17	UART Tx	Pin13 RN41
2	ADC canal 0	Circuit PT1000	18	UART Rx	Pin14 RN41
3	SEG7	LCD	19	GND/Prog.	Pin3 Pickit3
4	COM2	LCD	20	3.3V/Prog.	Pin2 Pickit3
5	COM3	LCD	21	SEG0	LCD
6	SEG4	LCD	22	SEG1	LCD
7	SEG5	LCD	23	SEG2	LCD
11	VLCD1	LCD	24	SEG3	LCD
12	VLCD2	LCD	25	COM0	LCD
13	VLCD3	LCD	26	COM1	LCD
14	SEG6	LCD	27	Programar	Pin5 Pickit3
15	Reset RN41	Pin5 RN41	28	Programar	Pin4 Pickit3

Taula 12. Descripció de pins utilitzats al PIC

3. Disseny dels circuits analògics

Aquest tercer capítol mostra el disseny dels circuits analògics que calen per a adaptar el mòdul Bluetooth, el sensor de temperatura i microcontrolador al disseny global del supervisor, a més ofereix el disseny d'una font d'alimentació que alimentarà tots i cada un dels components i subcircuits.

3.1 Esquema de connexió del mòdul Bluetooth

El mòdul RN41 es troba assemblat sobre una PCB, la qual pot ser soldada en format SMD sobre la placa del supervisor de temperatura. En el nostre disseny adaptarem un petit circuit analògic connectat al mòdul que ens permetrà configurar diversos paràmetres i obtenir informació visual del seu estat.

La figura 12 mostra les connexions del mòdul Bluetooth amb el microcontrolador, on: RN41_RESET permet rebre un senyal per reinicialitzar el mòdul RN41, DATA_TO_RADIO rep la informació des del microcontrolador i DATA_FROM_RADIO envia informació rebuda des d'un altre dispositiu al microcontrolador.

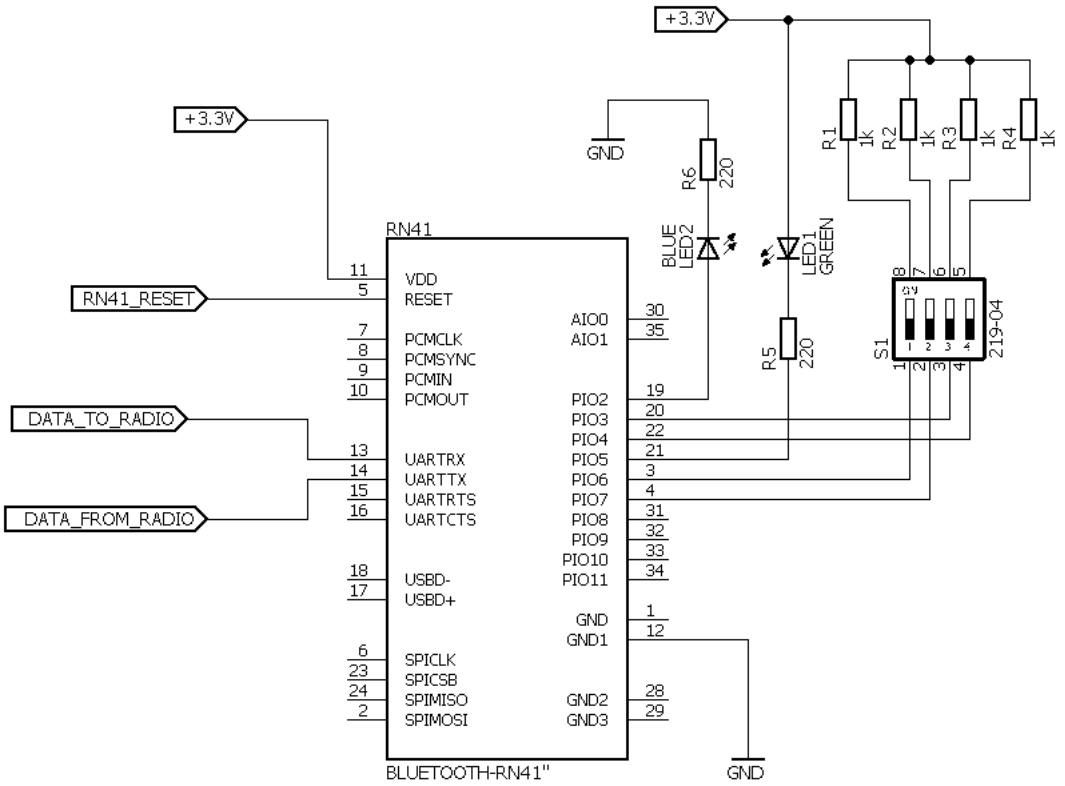


Figura 12. Connexions del mòdul Bluetooth

3.2 Circuit d'adaptació del sensor RTD

En mesurar temperatures amb sensors resistius és habitual fer ús de circuits d'adaptació, els quals permeten adaptar el senyal a uns valors adequats per a ser enviats a un ADC.

Un circuit molt emprat per a mesurar una resistència desconeguda és el que es coneix com a pont de *Wheatstone*. Aquest circuit quan es troba en equilibri presenta la següent relació entre les resistències que el formen:

$$R_{RTD} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1}$$

Quan el circuit ja no es troba en equilibri a causa de la variació d'una de les resistències, en aquest cas la RTD, cal fer ús de la següent fórmula obtinguda a través del càlcul per les lleis de *Kirchhoff* per a resoldre el seu valor.

$$V_0 = \left(\frac{1}{2} - \frac{R}{R + R_{RTD}} \right) \cdot V_i$$

La figura 13 ens mostra l'esquema del pont de *Wheatstone* en equilibri, on la tensió entre dos punts del seu centre és nul·la.

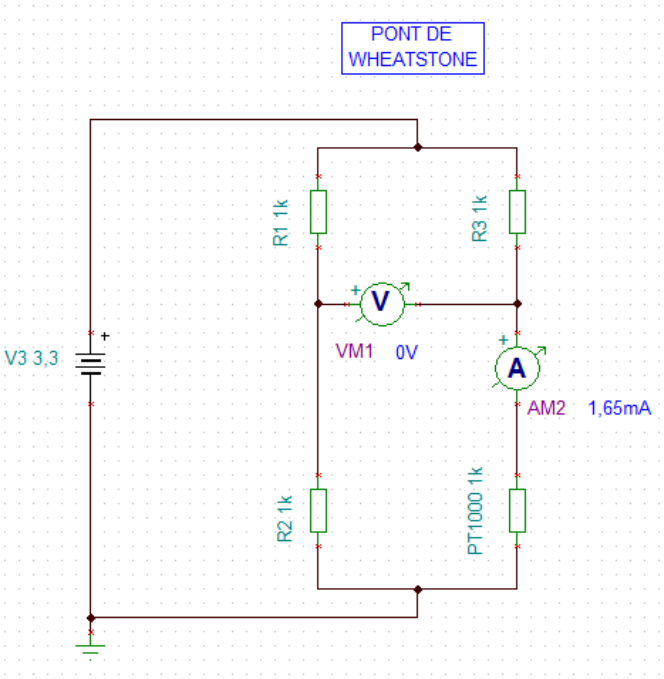


Figura 13. Pont de *Wheatstone* en equilibri

La sonda de temperatura PT1000 de platí és sensible a errors de lectura per culpa de l'escalfament que produeix el corrent que creua el metall. La següent fórmula mostra l'error de mesura afegit per escalfament del sensor:

$$Error(^{o}C) = \frac{I^2 \cdot R_{RTD}}{dissipació(Watts)}$$

Per a poder mitigar aquest efecte, a més de no danyar el fràgil sensor, cal usar una font de corrent constant. La següent imatge mostra una font de corrent constant, la qual assegura un corrent d'entrada estable al pont de 661,3 µA.

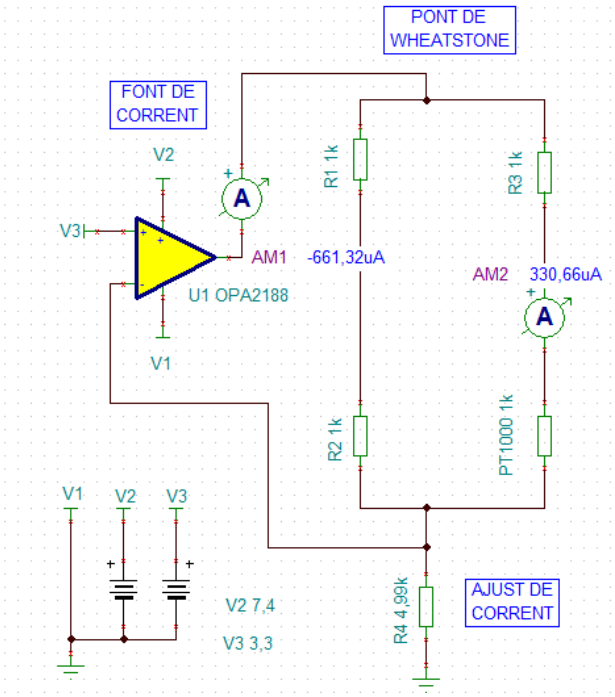


Figura 14. Font de corrent contínua

La font de corrent proposada es basa en un amplificador no inversor. El corrent que surt de l'amplificador operacional creua el pont de *Wheatstone* i la resistència R4 fins a arribar a massa. Això ens permet obtenir un corrent constant amb una tensió variable, la qual ve determinada pel guany de tensió a la sortida segons:

$$G = 1 + \frac{R_{Wheatstone}}{R4}$$

Sabem que el pont de *Wheatstone* es troba en equilibri a una temperatura de 0 ºC, sent aquesta la temperatura mínima i on el valor de corrent que creua el sensor RTD és màxim, en aquest cas l'error per escalfament es veu reduït a 0,02 ºC.

La fórmula que ens permet conèixer la resistència de la sonda queda modificada de la següent manera segons la llei d'Ohm:

$$V_0 = \left(\frac{1}{2} - \frac{R}{R + R_{RTD}}\right) \cdot R_T \cdot I_T \quad \rightarrow \quad R_{RTD} = \frac{I_T \cdot R^2 + 3 \cdot R \cdot V_0}{I_T \cdot R - V_0}$$

El circuit d'adaptació de la sonda RTD està dissenyat per a mesurar temperatures des de 0 ºC fins a 150 ºC, amb el circuit de la figura 14 obtenim una tensió de sortida que va des de 0 mV fins a 82,88 mV. Per a poder aprofitar tot el rang de mesures del ADC cal amplificar aquest senyal a un valor adequat, la següent taula mostra els valors de tensió que cal adaptar:

Temperatura	Voltatge pont	Voltatge ADC	Guany
0 ºC	0 V	0 V	39.58
150 ºC	82.88 mV	3.28 V	

Taula 13. Valors de l'adaptació del PT1000

Per a poder augmentar el dèbil senyal de sortida s'ha dissenyat un amplificador diferencial, tal com veiem a la figura següent.

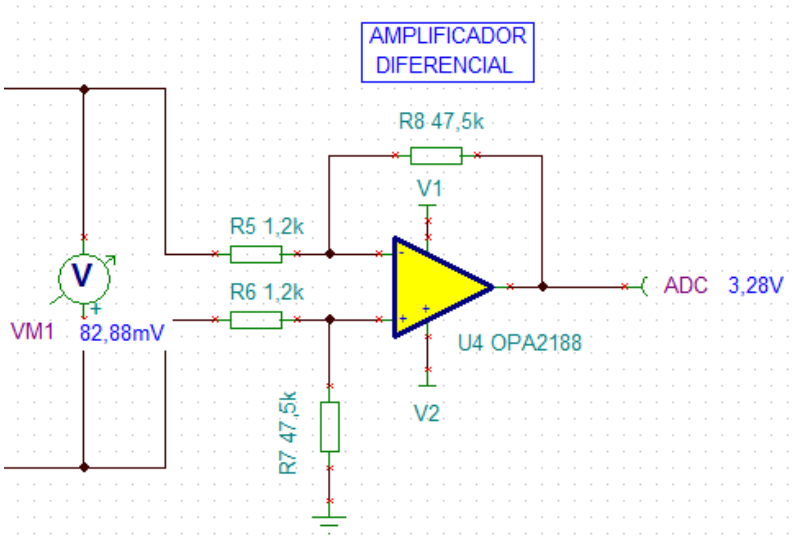


Figura 15. Amplificador diferencial

Aquest amplificador mesura la diferència de voltatge entre les seves entrades i l'amplifica segons la relació:

$$V_0 = (V_2 - V_1) \cdot \frac{R8}{R7} \quad \rightarrow \quad \frac{V_0}{(V_2 - V_1)} = \frac{R8}{R7} = Guany$$

Una necessitat en circuits electrònics es poden aïllar etapes, evitant així que la impedància d'una afecti les característiques de la següent. Mitjançant un amplificador operacional, amb la seva sortida realimentada a l'entrada negativa, podem aconseguir una impedància molt alta a l'entrada i molt petita a la seva sortida.

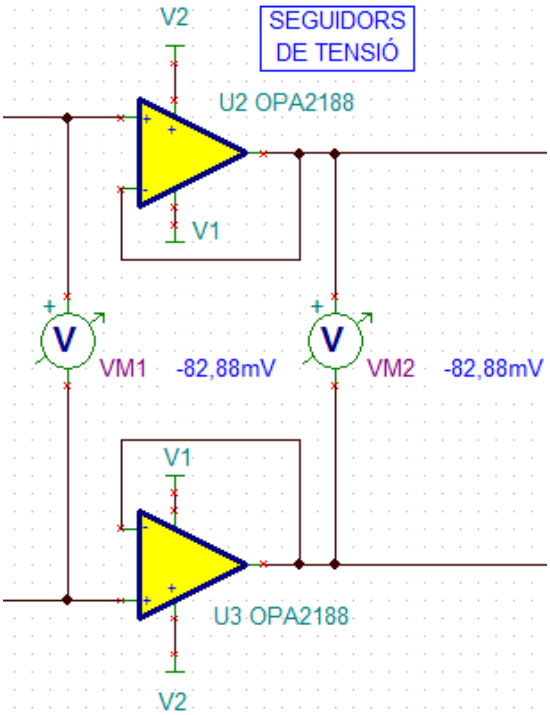


Figura 16. Seguidors de tensió

En el circuit d'adaptació proposat s'utilitzen resistències de precisió amb una tolerància d'un 0,1 %, per tal d'evitar una desviació important en la lectura de la tensió.

Els amplificadors operacionals reals poden arribar a entregar una tensió a la sortida tot i tenir curtcircuitades les entrades per variacions de temperatura i envelliment del dispositiu, fet que es coneix com tensió de desplaçament o d'*offset*. Els amplificadors OPA2188 ofereixen un nivell de tensió de desplaçament màxim de 25 µV, sent indicats per a circuits de mesura entre d'altres.

El circuit es completa amb un limitador de tensió amb dos díodes *Schottky* i filtres passabaix de primer ordre. Aquests s'han dissenyat per a obtenir una freqüència de tall de 50 Hz i poder eliminar el soroll captat pel sensor segons:

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$ (Freqüència de tall)

$$H(s) = \frac{1/R \cdot C}{s + 1/R \cdot C}$$ (Funció de transferència)

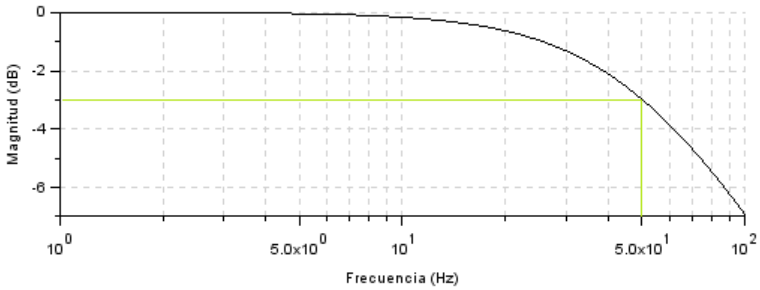


Figura 17. Bode del filtre passabaix de primer ordre

Existeixen dos mètodes alternatius al proposat per a compensar la resistència afegida pels cables, connexió a 3 i 4 fils. La connexió a 3 fils s'utilitza per a llargades de fins a 30 metres, mentre que la connexió a 4 fils es pot emprar en distàncies de fins a 1000 metres i mesures en laboratoris.

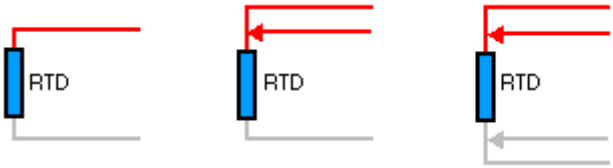


Figura 18. Possibles connexions d'un sensor RTD

Donat que la sonda RTD es trobarà sempre a prop del circuit d'adaptació, ja que l'encarregat de transmetre la lectura és el mòdul Bluetooth, s'ha optat per utilitzar un circuit d'adaptació a 2 fils.

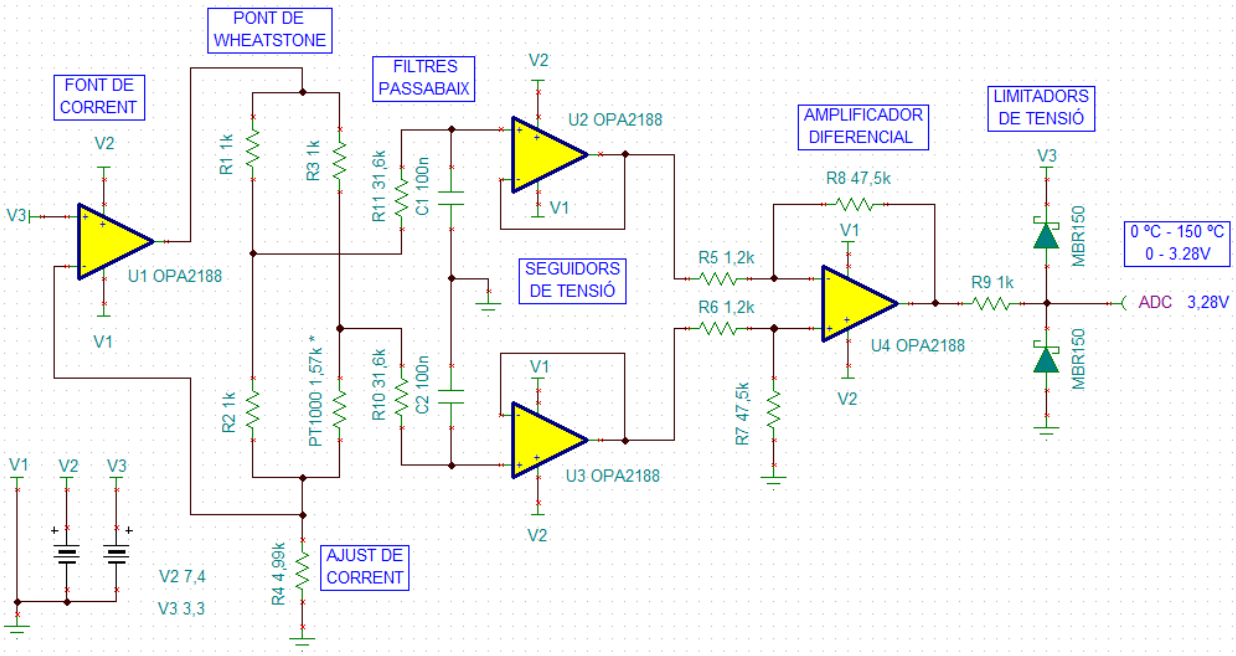


Figura 19. Circuit d'adaptació del sensor PT1000

El circuit d'adaptació complet mostrat a la figura 19 ofereix una tensió de sortida amb una alta linealitat respecte a la variació de la resistència de la sonda PT1000, com es pot observar a la simulació de la figura 20.

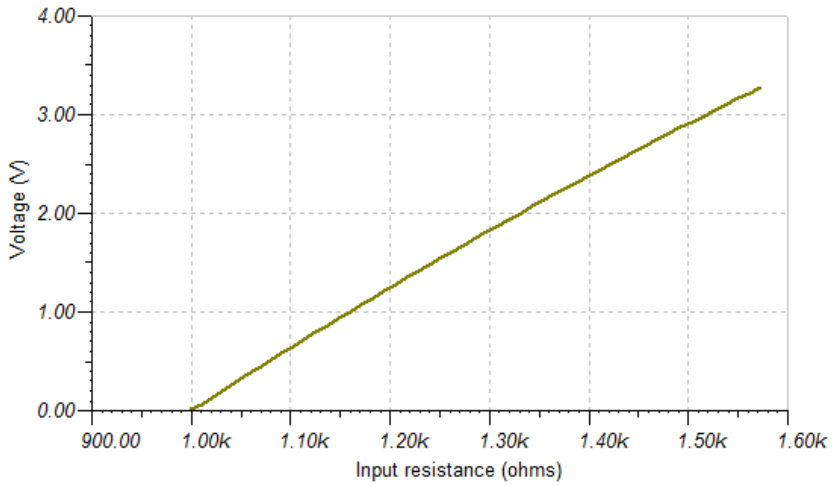


Figura 20. Linealitat del circuit adaptació

3.3 Esquema de connexió del microcontrolador

A la següent imatge es pot veure el circuit analògic necessari per a poder programar el microcontrolador, rebre el senyal de temperatura i enviar dades al mòdul Bluetooth. A més s'inclou un circuit opcional per a connectar un LCD (*Liquid Cristal Display*) de 4 dígits, el qual no serà implementat en aquest projecte.

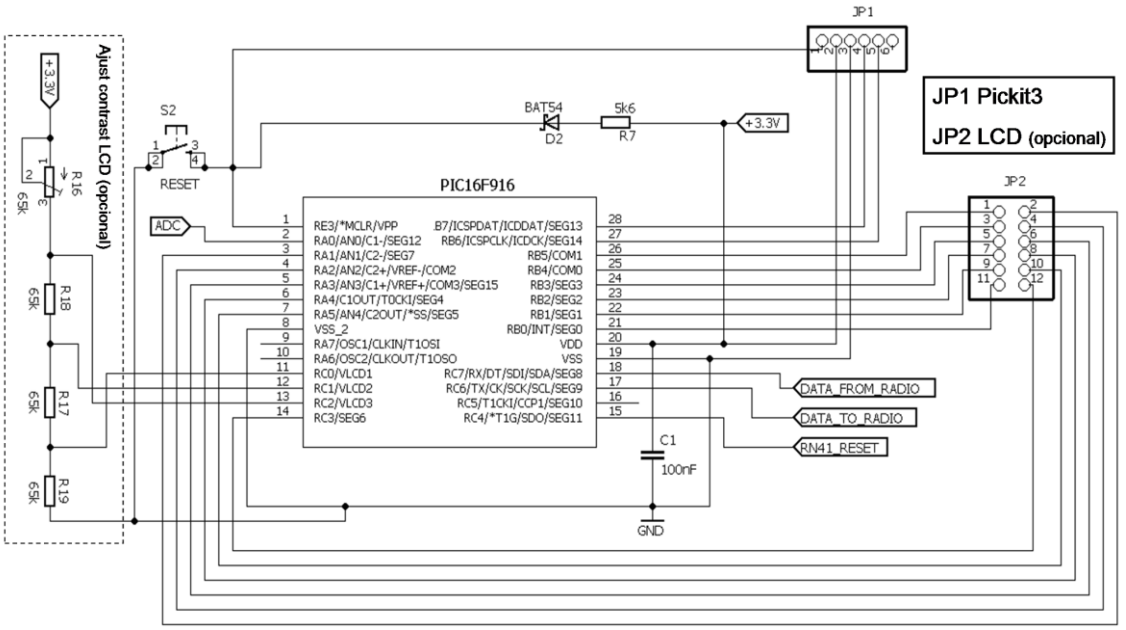


Figura 21. Esquema de connexió del microcontrolador

3.4 Font d'alimentació del supervisor

Segons les simulacions realitzades, a més de la informació recollida en els diversos *datasheets*, podem resumir els voltatges i corrents de cada part del supervisor en la següent taula:

Dispositiu	Voltatge	Corrent
Mòdul RN41	3 V - 3.6 V	65 mA (Tx)
PIC 16F916	2 V - 5.5 V	220 µA (4 MHz)
Pont *Wheatstone*	3.3 V	~153 pA
Amplificadors OP	4 V - 36 V (*single mode*)	~ 3 mA
LCD (opcional)	3.3 V	~ 1 µA/cm^2

Taula 14. Característiques elèctriques del supervisor

Segons la taula 14 podem reduir la tensió d'entrada a una tensió intermèdia entre 4 V i 24 V per alimentar els amplificadors operacionals i 3,3 V per la resta de components.

Per a fer una conversió de voltatge *step-down* es pot utilitzar reguladors lineals de tensió o convertidors de tensió DC/DC coneguts com a *Buck*. El primer presenta una alta linealitat a la seva sortida oferint una baixa eficiència per pèrdues en forma de calor, el segon pot arribar a oferir una eficiència superior al 90 % amb una sortida menys lineal per culpa de la seva freqüència d'oscil·lació.

El circuit d'adaptació de la sonda de temperatura i el microcontrolador PIC són més sensibles a fluctuacions de tensió que els amplificadors operacionals, fet que pot alterar la precisió de les mesures i el comportament del microcontrolador. El disseny proposat ofereix un punt d'equilibri entre eficiència i linealitat amb la combinació d'un convertidor LM2574 que redueix els 24 V d'entrada a una tensió intermèdia i un regulador lineal LM317 que l'adapta a 3,3 V.

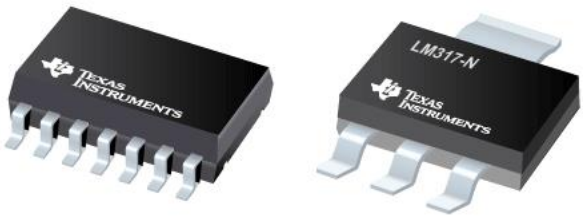


Figura 22. Convertidor LM2574 i regulador LM317

El convertidor de tensió LM2574 permet una tensió d'entrada variable compresa entre 4,75 V i 40 V, aquest però requereix el següent circuit d'adaptació que mitjançant un oscil·lador redueix la tensió alhora que n'amplifica el corrent de sortida.

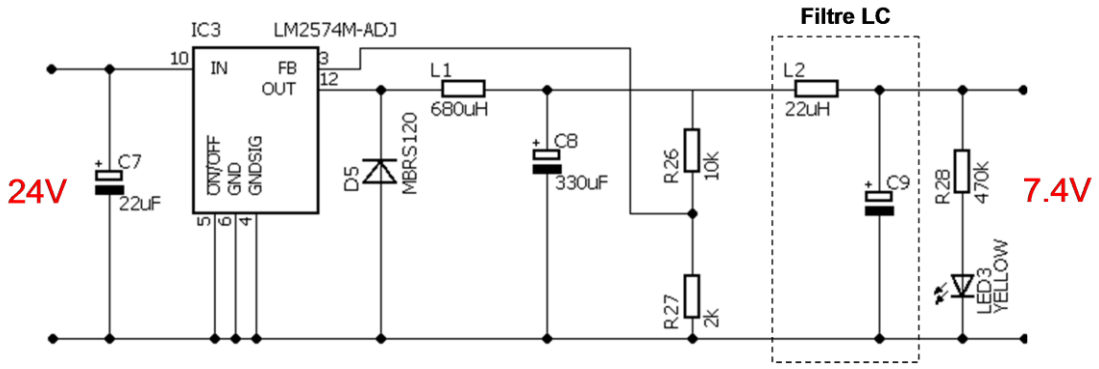


Figura 23. Circuit d'adaptació del LM2574

Les resistències R26 i R27 formen un divisor de tensió, el qual serveix com a referència per ajustar el voltatge de sortida segons:

$$V_{OUT} = V_{REF} \cdot \left(1 + \frac{R26}{R27}\right) \qquad (V_{REF} = 1.23V)$$

La sortida de l'anterior circuit conté un voltatge amb un cert arrissament, per això es complementa amb un filtre LC on la freqüència de tall ve definida per:

$$F_{Tall}(Hz) = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

Els amplificadors operacionals del circuit d'adaptació mostrats a la figura 19 són alimentats a 7,4 V i aquesta tensió limitada a 3,3 V per a la resta de components, per mitjà del regulador lineal LM317.

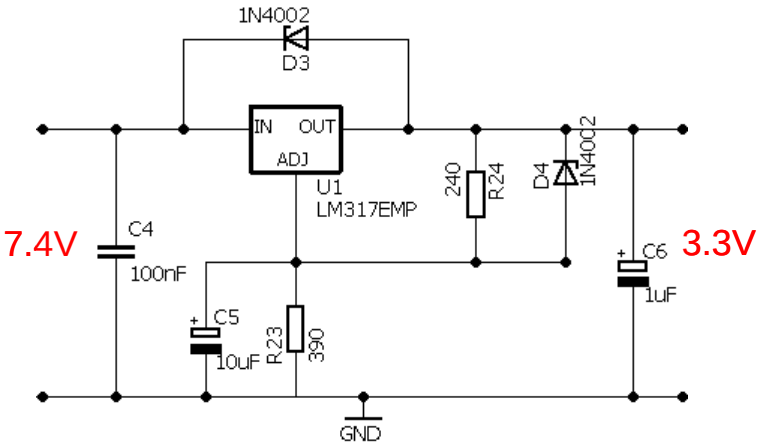


Figura 24. Circuit adaptació del LM317

El condensador C5 ajuda limitar l'arrissament introduït pel convertidor de tensió LM2574 i els díodes D3 i D4 protegeixen el circuit dels condensadors C4 i C6. La tensió de sortida és ajustada per les resistències R23 i R24 segons:

$$V_{OUT} = 1.25 \cdot \left(1 + \frac{R23}{R24}\right) + I_{ADJ} \cdot R23$$

El circuit es complementa amb un transistor MOSFET de canal P i un díode Zener que protegeixen el circuit en cas de connectar l'entrada invertida.

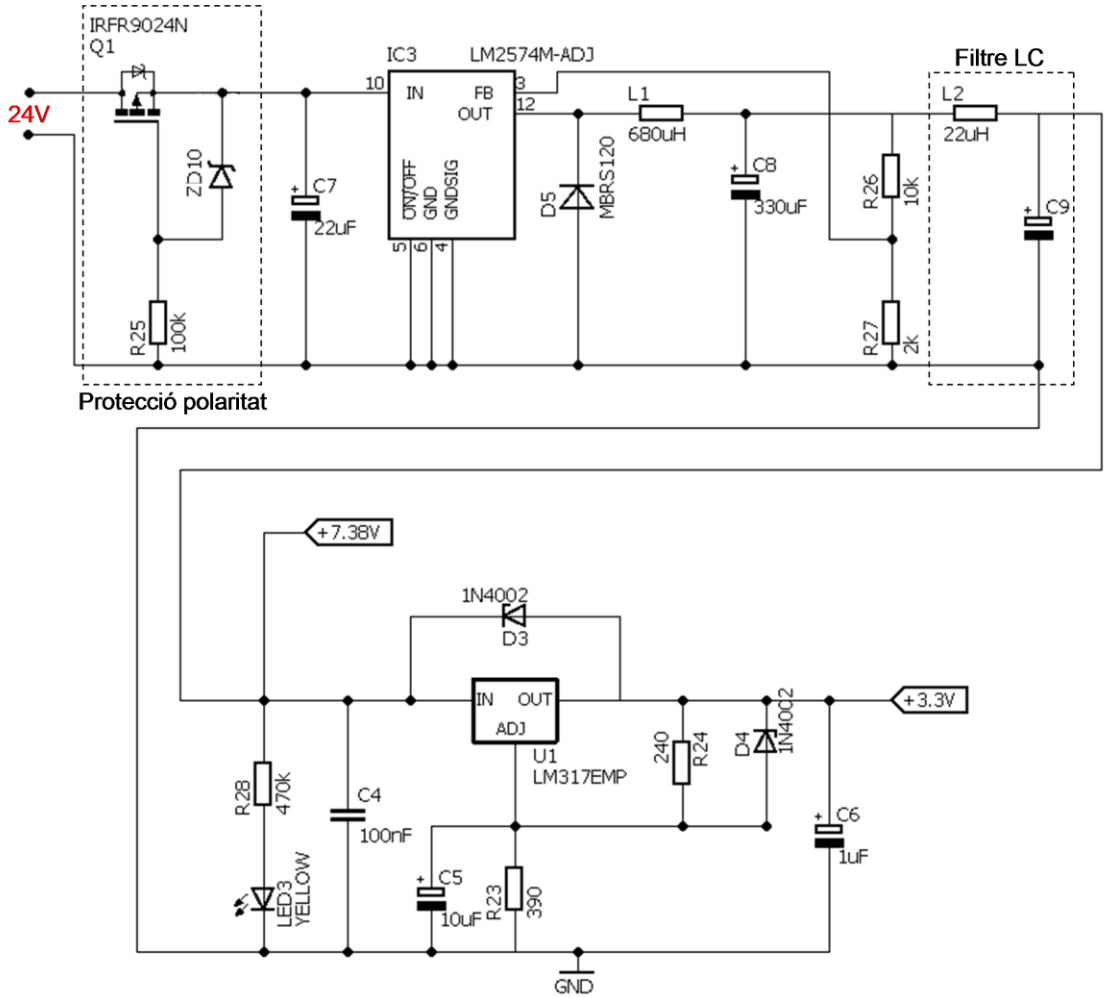


Figura 25. Esquema de la font d'alimentació

La font d'alimentació permet un estalvi d'energia considerable amb una primera etapa que redueix el voltatge i amplifica el corrent de sortida, fet que permet una dissipació d'energia mínima del regulador lineal LM317 calculada segons:

$$P(Watts) = (V_{IN} - V_{OUT}) \cdot I_{OUT} + V_{IN} \cdot I_{ADJ}$$

$$P = (7.38V - 3.3V) \cdot 0.1A + 7.38V \cdot 5 \cdot 10^{-5} A = 0.4W$$

Al càlcul anterior s'ha tingut en compte un consum de 100 mA, el qual es troba per sobre dels requeriments del disseny.

D'altra banda cal tenir en compte la capacitat de dissipació d'energia que té el regulador lineal LM317EMP, aquest es troba en un encapsulat SOT-223 d'una resistència tèrmica a l'ambient de 140 ºC/W i una temperatura màxima assolible de 125 ºC.

Si calculem una temperatura ambient màxima de 69 ºC podem recalcular la resistència tèrmica del regulador segons:

$$T_{R(màx)} = T_{J(màx)} - T_{A(màx)} \quad \rightarrow \quad T_{R(màx)} = 125^{o}C - 69^{o}C = 56^{o}C$$

$$\theta_{JA} = \frac{T_{R(màx)}}{P(Watts)} \quad \rightarrow \quad \theta_{JA} = \frac{56^{o}C}{0.4W} = 140^{o}C/W$$

Com es pot veure s'ha obtingut la resistència tèrmica límit de l'encapsulat SOT-223, la qual permet dissipar els 0,4 W fins a una temperatura límit de 69 ºC. De totes maneres aquest càlcul no contempla el *pad* de 6 mm^2 que anirà soldat al regulador, fet que redueix el paràmetre de resistència tèrmica a l'ambient com es pot veure a la figura 26.

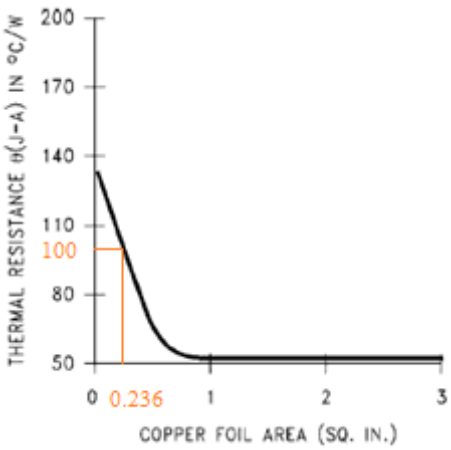


Figura 26. Resistència tèrmica del LM317EMP

Si tenim en compte la dissipació del *pad* soldat al regulador la temperatura màxima ambient serà de:

$$T_{R(màx)} = 0.4W \cdot 140^{o}C/W = 40^{o}C \quad \rightarrow \quad T_{A(màx)} = 125^{o}C - 40^{o}C = 85^{o}C$$

4. Programa de control

Al següent apartat es descriu l'algoritme que és implementat amb MPLABX i el compilador XC8 de Microchip, a més s'ofereix una taula resum dels fitxers que formen el programa i la seva funció. Seguidament es detalla el codi emprat per a la configuració del PIC, mòdul UART, mòdul ADC i supervisor de temperatura.

4.1 Algoritme funcional

L'algoritme implementat s'encarrega de configurar el mòdul Bluetooth, establir la connexió, vetllar per a què es trobi en un estat consistent en tot moment i enviar la lectura extreta del circuit del sensor RTD en graus Celsius.

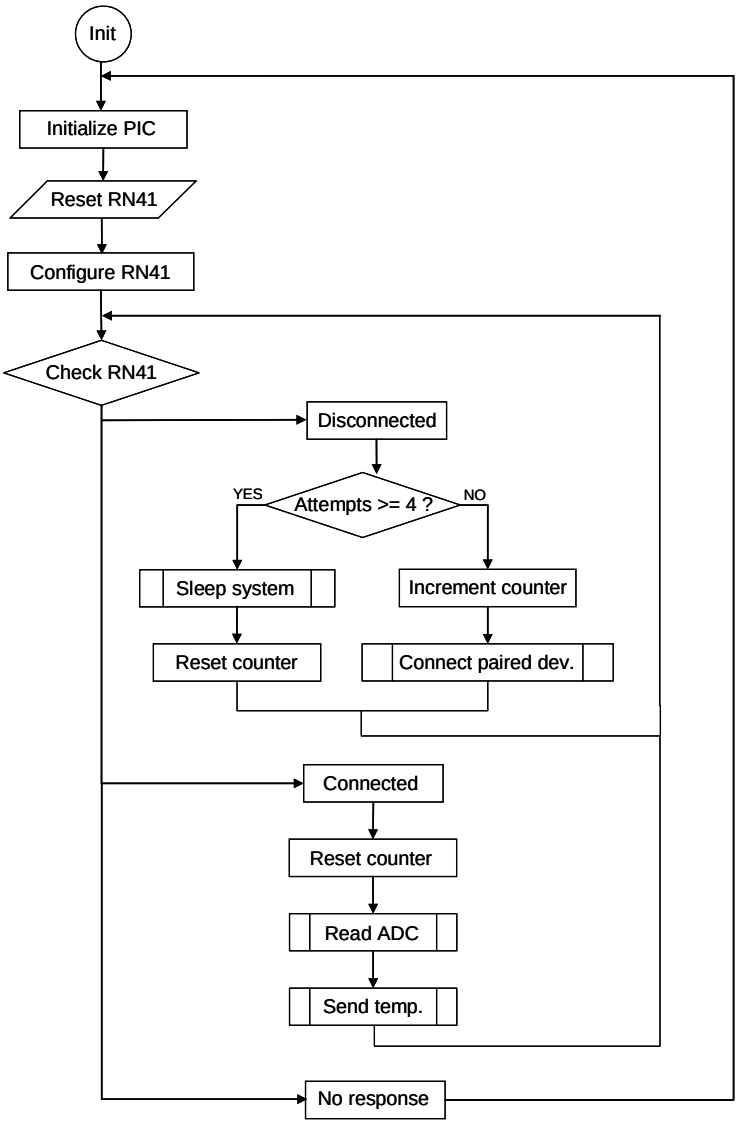


Figura 27. Algoritme de control

El mòdul Bluetooth s'encarrega d'establir la connexió per mitjà del MAC ID del dispositiu a connectar, per tant cal que aquest hagi estat aparellat prèviament.

Si durant més de quatre intents de connexió (aproximadament 12 segons) no hi ha hagut èxit, el microcontrolador ordena al mòdul Bluetooth passar a un estat de baix consum i s'adorm durant 67 segons per tornar a reiniciar tot el sistema. En aquest estat el consum del mòdul Bluetooth es redueix a 2 mA i el del PIC fins a 1 µA.

La següent taula resumeix els fitxers que conformen el programa:

Fitxer de codi	Fitxer capçalera	Descripció
--	config.h	Configuració del microcontrolador
--	gdefines.h	Freqüència de l'oscil·lador intern
uart.c	uart.h	Configuració i funcions del mòdul UART
adc.c	adc.h	Configuració i funcions del mòdul ADC
supervisor.c	supervisor.h	Funcions principals de l'algoritme
main.c	--	Programa principal

Taula 15. Fitxers del programa de control

4.2 Configuració del microcontrolador

La configuració del microcontrolador es troba al fitxer config.h, on es defineixen les directives del preprocessador que es mostren a la següent imatge:

```
/*Microcontroler configuration*/
#ifndef CONFIG_H
#define CONFIG_H

#include <xc.h>

#pragma config FOSC = INTOSCIO  // Oscillator Selection bits (INTOSCIO)
#pragma config WDTE = OFF       // Watchdog Timer disabled
#pragma config PWRTE = ON       // Power Up Timer Enable bit (PWRT enabled)
#pragma config MCLRE = ON       // RE3/MCLR pin function select bit
#pragma config CP = OFF         // Code Protection bit
#pragma config CPD = OFF        // Data Code Protection bit
#pragma config BOREN = ON       // Brown-out Reset Selection bits (BOR enabled)
#pragma config IESO = OFF       // Internal External Switchover bit
#pragma config FCMEN = OFF      // Fail-Safe Clock Monitor Enabled bit

#endif  /* CONFIG_H */
```

Figura 28. Contingut del fitxer config.h

En la configuració s'ha definit usar l'oscil·lador RC intern del microcontrolador, desactivar el WDT (*Watch Dog Timer*) que més endavant serà configurat i activar els bits PWRTE i BOREN per reiniciar el PIC si cau la tensió d'entrada.

El bit MCLRE es deixa activat per a poder reiniciar el microcontrolador a través d'un polsador, a més de permetre aparellar el mòdul Bluetooth interrompent el programa.

El bit IESO permet desactivar un dels dos oscil·ladors interns, LFINTOSC i HFINTOSC, per a reduïr el consum. En la nostra aplicació s'utilitza l'oscil·lador de baixa freqüència per desactivar temporalment el microcontrolador i el d'alta freqüència, configurat a 4 MHz en el fitxer *gdefines.h*, per executar el codi.

Per a poder activar i desactivar el microcontrolador, a través del bit SWDTEN, es configuren els registres WDTCON i OPTION_REG.

```
//Configure WDT (67.1s)
WDTCON = 0b00010010;        //WTD prescaler 1:16384 (524ms)
OPTION_REG = 0b00001111;    //Prescaler rate 1:128
SWDTEN = 0;                 //disable WDT
```

Figura 29. Configuració del WDT

L'oscil·lador LFINTOSC treballa a 31.25 KHz i permet assolir un *timeout* al WDT d'uns 67.1 segons amb la configuració anterior.

$$T = \frac{1}{31.25KHz} \cdot 16384 \cdot 128 = 67.1s$$

On el valor 16384 correspòn a la configuració dels bits WDTPS<3:0> del registre WDTCON i 128 als bits PS<2:0> del registre OPTION_REG.

Per últim es configura el pin 2 com a entrada analògica i el pin 15 com a sortida digital.

```
//Configure pins
TRISA = 0x01;           //pin2 as Input
ANSEL = 0x01;           //pin2 analog
TRISCbits.TRISC4=0;     //pin15 digital output
PORTCbits.RC4=0;        //pin15 low forces reset bluetooth
```

Figura 30. Configuració de pins del PIC 16F916

4.3 Mòdul UART

El microcontrolador 16F916 disposa d'un mòdul AUSART (*Addressable Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter*), tot seguit es detalla la configuració i ús del mòdul en mode asíncron o UART.

```c
#include "uart.h"
#include <xc.h>
#include "gdefines.h"

volatile unsigned char rcbuf[BUFLEN];   //buffer for RX UART ISR

void UART_Init(const long int baudrate){
    unsigned int x;
    x=(_XTAL_FREQ-(16*baudrate))/(16*baudrate);
    SPBRG = x;
    SYNC = 0;        //Asyncronous mode
    BRGH = 1;        //baudrate select bit (1 high speed)
    SPEN = 1;        //RX and TX pins as serial
    TRISC7 = 1;      //Asynchrounous reception
    TRISC6 = 1;      //Asynchrounous transmission
    CREN = 1;        //enables receiver
    TXEN = 1;        //enables transmitter
}

void UART_Write(unsigned int data_byte){
    while(!TXSTAbits.TRMT);   //Makes sure buffer is full
    TXREG = data_byte;   //Loads variable into the TXREG register
}

void UART_Write_Text(const char *txt){
    while(*txt != 0) UART_Write(*txt++);
}

void interrupt ISR(void){
    if (PIR1bits.RCIF){ //Checks if receive interrupt has fired
        t = RCREG;      //Reads received character to buffer
        //character is not new line and maximum length not reached
        if ( (t != '\n') && (rcindex < BUFLEN) )
        {
            rcbuf[rcindex] = t; //Appends received character to string
            rcindex++;          //Increments string index
        } else {
            rcindex--;                  //Decrements string index
            rcbuf[rcindex] = '\0';      //NULL terminate string
            rcindex = 0;                //Reset string index
        }
        PIR1bits.RCIF = 0;      //Resets receive interrupt flag
    }
}
```

Figura 31. Contingut del fitxer uart.c

El fitxer capçalera uart.h declara les funcions UART_Init, UART_Write i UART_Write_Text, a més de les variables *t*, *rcindex* i *rcbuf*.

Aquestes variables són declarades *volatile,* ja que són manipulades dins d'una ISR (*Interruption Service Routine*). A més la variable *rcbuf* es declara *extern* per a poder ser manipulada des d'altres fitxers.

La funció UART_Init és l'encarregada d'iniciar el mòdul, primer calcula el valor del registre SPBRG segons bauds = FOSC[16(x+1)], per més tard configurar els registres SYNC, BRGH, SPEN, CREN, TXEN, TRISC6 i TRISC7 com es detalla a la figura 31.

La funció UART_Write espera que s'activi el flag TRMT del registre TXSTA, el qual indica que s'han rebut 8 bits o 1 caràcter, per a carregar el byte d'informació al registre TXREG. Aquesta funció rep una cadena de caràcters de la funció UART_Write_Text.

Per a rebre dades des del mòdul Bluetooth s'han activat les interrupcions per perifèrics, generals i USART, aquesta última executa el codi del gestor ISR *interrupt*.

```
//Enable interrupts
INTCONbits.PEIE = 1;     //enable peripheral interrupts
INTCONbits.GIE = 1;      //enable interrupts
PIE1bits.RCIE=1;         //enable USART interrupt
```

Figura 32. Activació d'interrupcions

Quan un caràcter sigui transferit des del registre RST al registre PIR1 s'activa el flag RCIF, llavors el caràcter és transmès a la cadena *rcbuf* i es desactiva el flag, aquesta operació es repeteix fins a rebre una ordre de salt de linea o arribar al final del *buffer* rcbuf, moment en què s'afegeix un zero per finalitzar la cadena.

4.4 Mòdul ADC

El mòdul ADC es gestiona a través de dues funcions, la funció ADC_Init la qual inicialitza el convertidor i la funció ADC_Read que pren una lectura analògica i la converteix a un valor digital comprès entre 0 i 1023.

Segons especificacions del fabricant, el rellotge del convertidor A/D ha de permetre el temps suficient per a realitzar la conversió d'un bit, anomenat T_{AD}. El cicle complet de conversió de 10 bits es realitza en 11 T_{AD}, el qual queda resumit tot seguit:

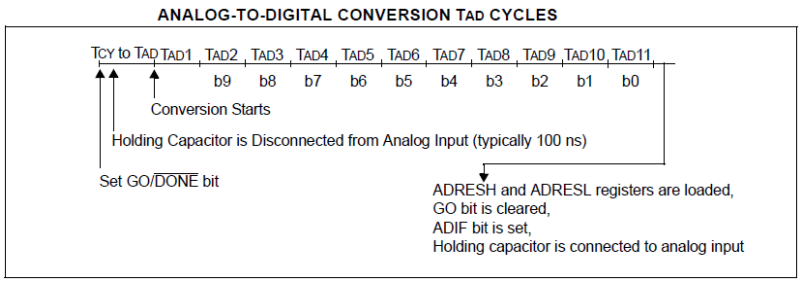


Figura 33. Procès de conversió A/D

La configuració del rellotge del convertidor ADC queda reflectida en els bits ADCS<2:0> del registre ADCON1, on T_{AD} val $(Fosc/16)^{-1} = 4\mu s$.

El convertidor ADC disposa de 8 canals d'entrada analògics multiplexats. La selecció del pin 2, o canal AN0, es realitza per mitjà dels bits CHS<2:0> del registre ADCON0.

Seguidament es selecciona que el resultat de la conversió sigui justificat per la dreta amb el bit ADFM i s'activa el convertidor ADC amb el bit ADON del registre ADCON0.

```
#include "adc.h"
#include <xc.h>
#include "gdefines.h"

void ADC_Init(){
    ADCON1bits.ADCS2=1;     //Conversion clock FOSC/16
    ADCON1bits.ADCS1=0;
    ADCON1bits.ADCS0=1;
    ADCON0bits.CHS2=0;      //Analog channel AN0
    ADCON0bits.CHS1=0;      //Pin 2
    ADCON0bits.CHS0=0;
    ADCON0bits.ADFM=1;      //Result right justified
    ADCON0bits.ADON=1;      //Turn ON ADC
}

unsigned int ADC_Read(void){
  __delay_us(200);     //Acquisition time to charge hold capacitor
  ADCON0bits.GO=1;              //Initializes A/D conversion
  while(ADCON0bits.GO);         //Waiting for conversion to complete
  return ((ADRESH<<8)+ADRESL); //Return result
}
```

Figura 34. Contingut del fitxer adc.c

La funció ADC_Read activa el bit $GO/\overline{DONE}$ per iniciar una conversió, una vegada aquesta s'ha realitzat el bit és desactivat per *hardware* i es retorna el valor del registre ADRESH justificat 8 posicions cap a l'esquerra més la suma del registre ADRESL per a poder obtenir una lectura de 10 bits.

4.5 Supervisor de temperatura

Els fitxers supervisor.h i supervisor.c contenen les definicions i declaracions per a què el programa es comporti tal com es mostra a l'algoritme de la figura 27.

Per a més claretat, en cas de calibrar i/o fer modificacions de hardware, s'han definit els valors VREF, RESOLUTION, GAIN, IT, R i ALPHA al fitxer capçalera. A més s'ha definit una estructura de dades la qual conté el valor de la conversió A/D i les variables que permeten obtenir el valor de temperatura en una cadena de caràcters.

La figura 35 mostra el fitxer supervisor.h amb les funcions declarades, constants *define*, estructura tempValues i cadena dname, aquesta última guardarà el nom del dispositiu segons les sigles "SPV-" i els últims quatre dígits hexadecimals de l'adreça MAC del mòdul Bluetooth.

```
#ifndef __SUPERVISOR_H__
#define __SUPERVISOR_H__

//Lenght of device name string
#define STRLEN 12
//TEMPERATURE CALCULATION PARAMETERS
#define VREF 3.28        //VREF ADC
#define RESOLUTION 1023 //2^(ADC bits)-1
#define GAIN 39.58       //op amp gain
#define IT 0.000652      //Current trough bridge (A)
#define R 1000           //bridge resistors value (Ohm)
#define ALPHA 0.00385    //PT100 constant

struct tempValues{
    short long adc;
    float temp;
    int intp, decp;
    char intpstr[4], decpstr[2];
};

unsigned char dname[STRLEN];
struct tempValues tValues;

/*Checks status of Bluetooth module*/
int check_Bluetooth(void);

/*Bluetooth module configuration*/
void bluetooth_Init(void);

/*Connects to Bluetooth module*/
void connect_Bluetooth(void);

/*Makes Bluetooth undiscoverable and switches all system to
 low power consumption mode, WDT is activated to wake up*/
void sleep_System(void);

/*Read several times ADC and averages to obtain more accuracy*/
void get_ADC(void);

/*Receives digitalized value from adc and returns temperature
  in a float number*/
float get_Temperature(long adc);

/*Calls getTemperature(), formats and send the value received*/
void send_Temperature(void);

#endif /* __SUPERVISOR_H__*/
```

Figura 35. Contingut del fitxer supervisor.h

Les tasques que executa cada funció definida al fitxer supervisor.c són:

- **bluetooth_Init**: configura el mòdul Bluetooth com indescobrible, esclau, 9600 bauds, pin habilitat (1234), UART *non-parity*, defineix el nom com "SPV" i afegeix el nom més els últims 4 dígits hexadecimals del dispositiu a la cadena dname.

- **connect_Bluetooth**: entra en command mode i força el mòdul a connectar-se amb l'adreça MAC del dispositiu previament aparellat.

- **check_Bluetooth**: per mitjà de get commands pregunta al mòdul Bluetooth si es troba connectat o desconnectat, retornant un 1 o un 0 respectivament. En cas de no rebre resposta o un valor inconsistent retorna un 2.

- **sleep_System**: entra en *command mode* i per mitjà d'*action commands* canvia l'estat del dispositiu a indescobrible i no connectable, a més de *low power mode*. En aquest moment atura el microcontrolador amb la funció SLEEP(), definida al compilador XC8, fins que el WDT el torna a activar. Una vegada es reprèn el codi on s'havia aturat es fa un reset al mòdul Bluetooth i es torna a configurar com indescobrible, ja que aquesta funció no queda activa de manera permanent.

- **get_ADC**: fa diverses cridesa la funció ADC_Read definida al fitxer adc.c per fer una ponderació de la lectura, d'aquesta manera es redueix al màxim els errors de lectura per fluctuació de voltatge a l'entrada del convertidor ADC.

- **get_Temperature**: rep com a paràmetre el valor digitalitzat del convertidor A/D i per mitjà dels càlculs definits a l'apartat 3.2 retorna la temperatura en coma flotant.

- **send_Temperature**: fa una crida a la funció get_Temperature i formata el resultat amb un sol decimal per enviar-lo al mòdul Bluetooth a través de la funció UART_Write_Text, la qual envia la cadena a través d'UART_Write. Aquesta última espera a tenir el *buffer* Tx ple per enviar els 8 bits d'un caràcter.

Per a formatar el valor rebut de get_Temperature s'ha evitat fer ús de la funció *sprintf*, ja que consumeix molta memòria del microcontrolador, en el seu lloc s'han usat les variables definides a l'estructura tempValues i la funció *itoa*() implementada al compilador XC8. D'aquesta manera s'ha reduït l'ús de memòria en gairebé un 60 %.

Les comandes utilitzades per a operar sobre el mòdul Bluetooth es poden trobar resumides a l'annex B d'aquest document.

A la següent imatge es pot veure el codi complet implementat al fitxer main.c, el qual forma l'algoritme de la figura 27.

```c
/*
 * File:   main.c
 * Author: carles cardenal hernando
 * Final project - UOC
 * Telecommunications Technologies degree
 * Remote Temperature Supervisor via Bluetooth
 * Created on 17 de abril de 2016, 19:43
 */

#include <xc.h>
#include <pic16f916.h>
#include "config.h"
#include "gdefines.h"
#include "uart.h"
#include "adc.h"
#include "supervisor.h"

void main(void) {
    enum bluetoothState {disconnected, connected};
    enum bluetoothState bluetooth;
    int cnt=0;

    //Configure WDT (67.1s)
    WDTCON = 0b00010010;        //WTD prescaler 1:16384 (524ms)
    OPTION_REG = 0b00001111;    //Prescaler rate 1:128
    SWDTEN = 0;                 //disable WDT

    //Configure pins
    TRISA = 0x01;           //pin2 as Input
    ANSEL = 0x01;           //pin2 analog
    TRISCbits.TRISC4=0;     //pin15 digital output
    PORTCbits.RC4=0;        //pin15 low forces reset bluetooth

    //Enable interrupts
    INTCONbits.PEIE = 1;    //enable peripheral interrupts
    INTCONbits.GIE = 1;     //enable interrupts
    PIE1bits.RCIE=1;        //enable USART interrupt

    //Initialize modules
    UART_Init(9600);        //Initialize UART at 9600bauds
    __delay_ms(100);        //Gives time to UART stabilize
    ADC_Init();             //Initialize ADC
    __delay_ms(500);        //Stabilize bluetooth
    PORTCbits.RC4=1;        //Pin15 high
    __delay_ms(750);        //Wait Bluetooth respond command mode
    bluetooth_Init();       //Set up bluetooth configuration

    while(1){
        bluetooth=check_Bluetooth();
        switch(bluetooth){
            case disconnected:
                if(cnt > 3){ //Attempts to connect up to 4 times
                    sleep_System();  //Sleeps 67s and resets bluetooth
                    cnt=0;
                } else cnt++;
                connect_Bluetooth(); //Connects to paired device
                break;
            case connected:
                cnt=0;
                get_ADC();      //Read ADC channel 0
                send_Temperature();  //Calculate & send
                break;
            default:
                asm("GOTO 0");        //Resets the system
                break;
        }
        CLRWDT();       //Clear WDT timeout
        SWDTEN = 0;     //Disable WDT
    }
}
```

Figura 36. Contingut del fitxer main.c

5. Disseny de la PCB

El present capítol té com a objectiu el disseny del circuit imprès, o PCB, que permetrà muntar els components dels circuits dissenyats en apartats anteriors. En una primera etapa es reunifiquen tots els subcircuits obtenint l'esquema global, a partir d'aquest moment es genera la PCB i s'enruten les pistes per a finalitzar amb l'obtenció dels fitxers *Gerber* estandarditzats RS-274X.

5.1 Esquema global

Una vegada dissenyats i simulats els subcircuits que formen el supervisor de temperatura remot aquests es reagrupen amb l'eina EAGLE CAD, la qual disposa d'una extensa llibreria de components i pot ser ampliada segons necessitat.

A la següent figura es pot veure l'esquema de la font d'alimentació i del mòdul Bluetooth, on les connexions entre subcircuits s'han fet amb etiquetes per a poder obtenir un esquema de fàcil lectura.

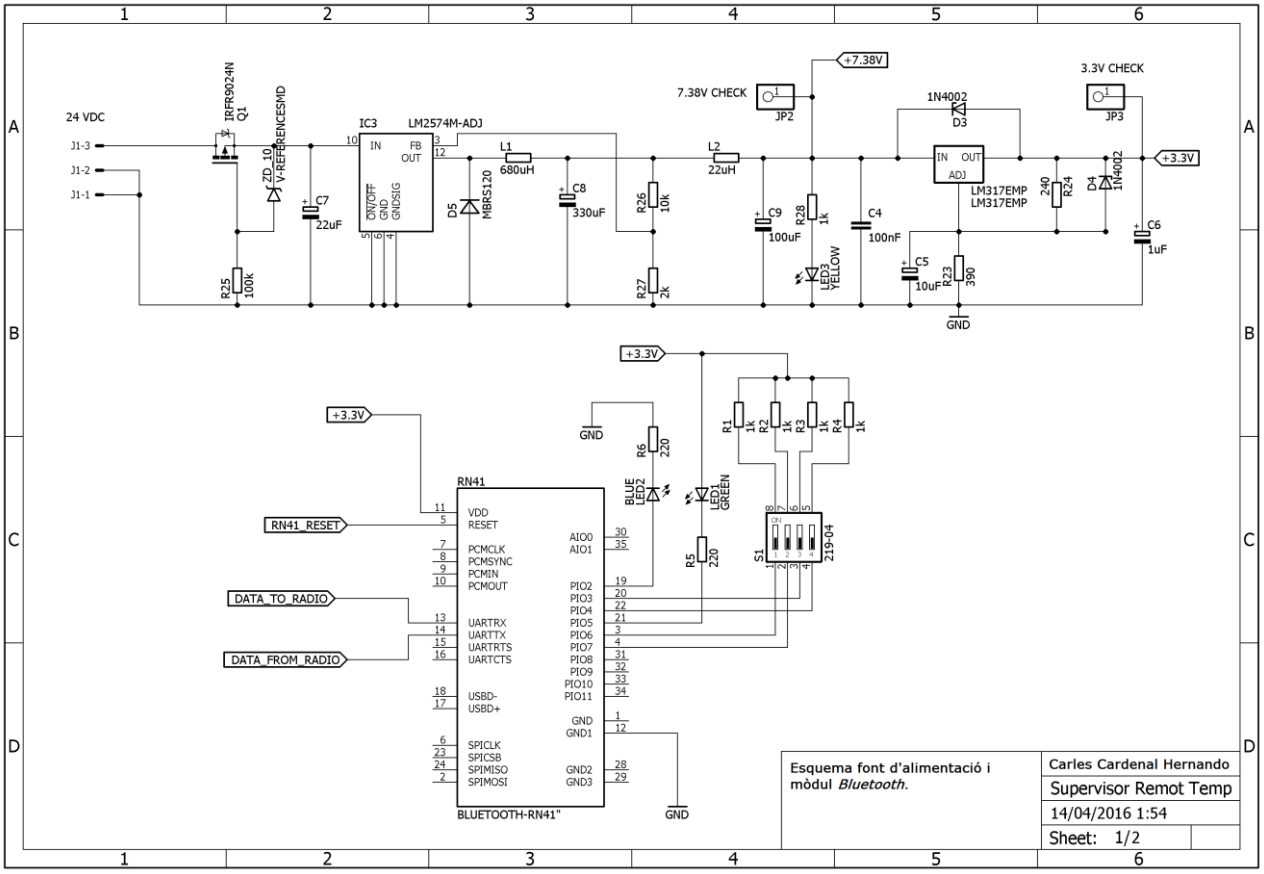


Figura 37. Esquema font d'alimentació i mòdul Bluetooth

Un segon full completa el disseny analògic amb el circuit d'adaptació de la sonda PT1000 i microcontrolador com podem veure a la figura 38.

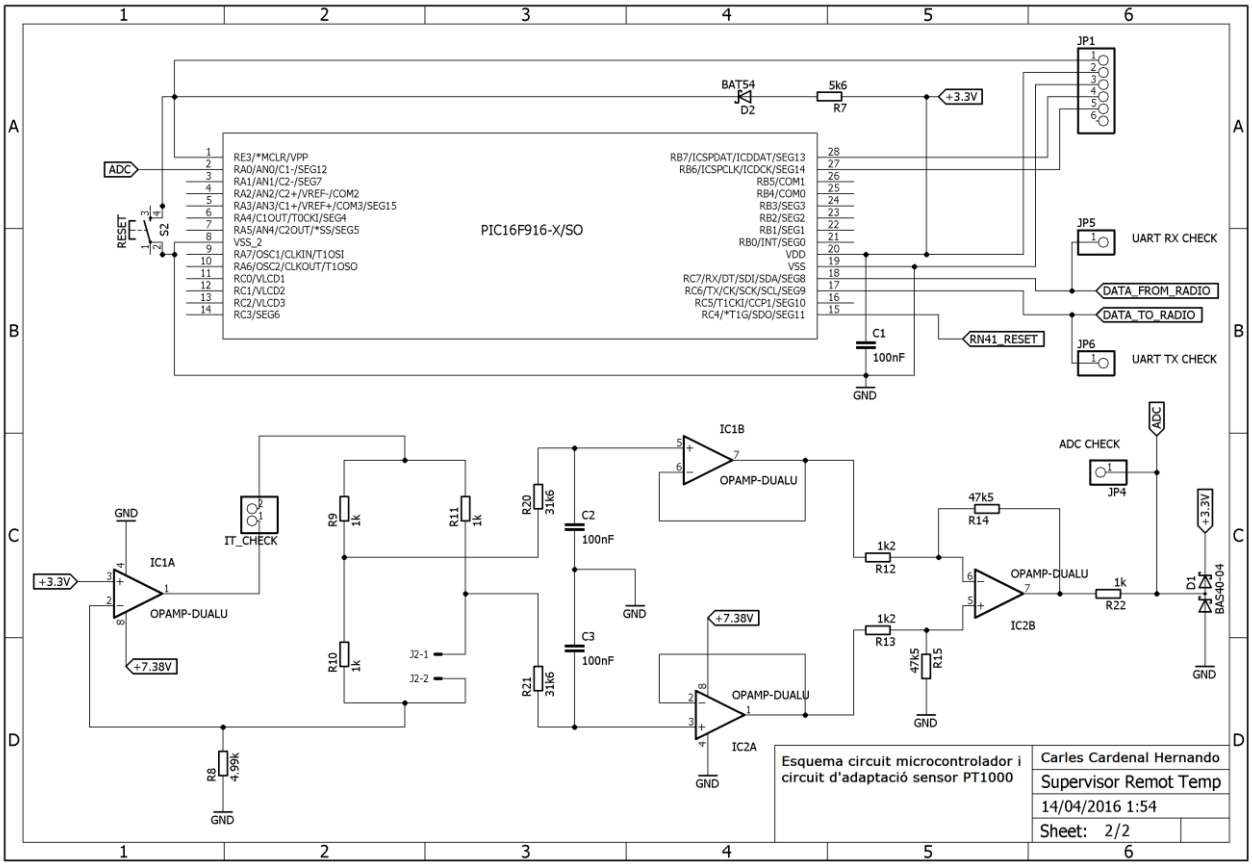


Figura 38. Esquema circuit microcontrolador i adaptació PT1000

En la següent taula podem trobar un resum dels connectors situats a l'esquema amb la seva funcionalitat:

Connector	Funcionalitat	Connector	Funcionalitat
J1	Alimentació circuit	JP4	ADC *probe checkpoint*
J2	Sensor PT1000	JP5	Rx PIC *probe checkpoint*
JP1	Programació PIC	JP6	Tx PIC *probe checkpoint*
JP2/JP3	*Supply checkpoint* 7.38V/3.3V	IT_CHECK	RTD *current checkpoint*

Taula 16. Funcionalitat dels connectors de la PCB

5.2 Layout i obtenció de *Gerbers*

Una vegada s'ha comprovat que no hi ha errors en l'esquema, per mitjà de l'eina ERC (*Electrical Rule Check*), es procedeix a dissenyar la PCB amb l'opció *switch to board*.

Els components apareixen desordenats i amb les interconnexions que els uneixen, a partir d'aquí s'han situat sobre una PCB de 87 mm x 53 mm seguint la distribució de l'esquema general i fent ús de l'eina *ratsnest*.

L'enrutat de pistes s'ha iniciat amb l'eina *autorouter* i completat a mà, millorant l'aspecte inicial. En la següent figura podem veure en vermell les pistes de la cara *top*, en blau les pistes de la cara *bottom*, les capes *tplace, tname* i *tdocu* amb la situació i informació dels components i, per últim, les vies i pads en color verd.

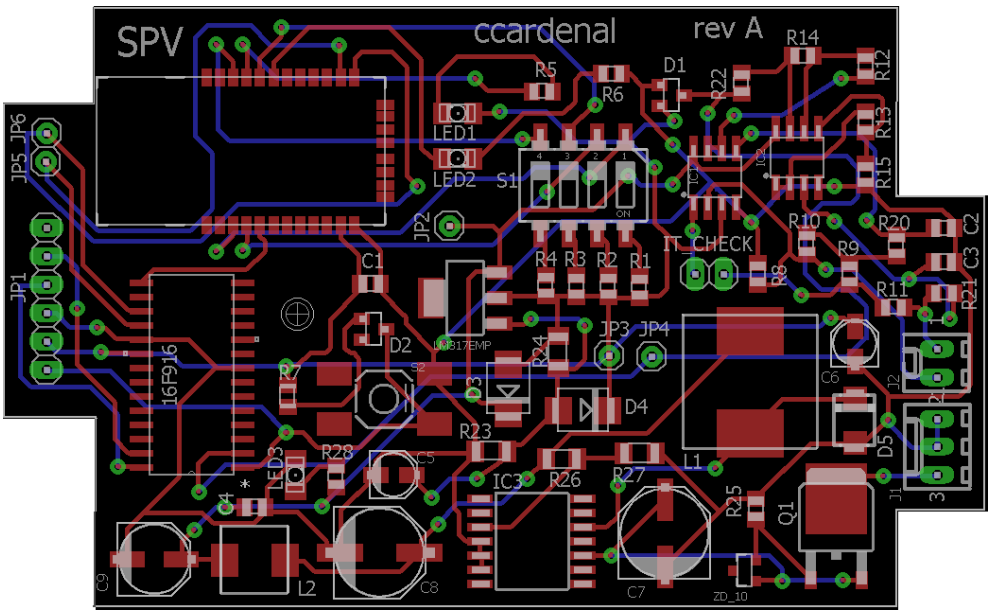


Figura 39. Vista del disseny de la PCB

Com a consideracions de disseny s'ha tingut en compte una amplada de pistes mínim de 16 mils i separació mínima entre elles de 20 mils, ja que s'implementarà sobre una PCB de doble cara de fabricació no professional. No obstant això aquest disseny permet una amplada de pistes inferior a 1 mil segons l'estàndard genèric IPC-2221 B.

Per últim s'han generat els següents fitxers *Gerber* amb l'eina CAM:

- Top_copper.gtl (capa superior amb vies i pads).
- Bottom_copper.gbl (capa inferior amb vies i pads).
- Top_silkscreen.gto (*silkscreen* capa superior).
- Top_soldermask.gts (*soldermask* capa superior).
- Bottom_soldermask.gbs (*soldermask* capa inferior).
- Drill.txt (forats a la PCB).

6. Muntatge i prova del prototip

Una vegada validades totes les etapes anteriors es procedeix al muntatge del supervisor, segons mostren les figures 40 i 41, per més endavant fer les comprovacions necessàries abans de donar el producte per finalitzat.

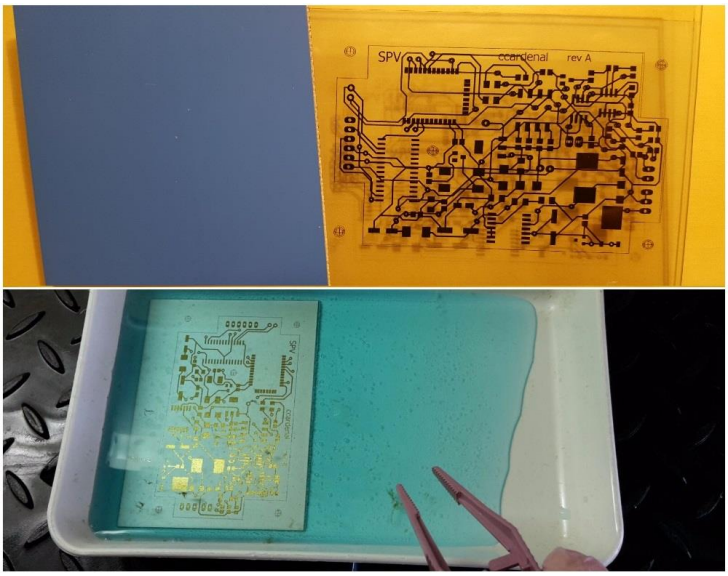


Figura 40. Fotolits i atacat PCB

El primer pas ha estat obtenir els fotolits de les dues cares per a insolar la placa fotosensible, procés dut a terme amb una làmpada de llum negra. Tot seguit s'ha atacat el vernís amb sosa càustica i la placa amb àcid (persulfat de sodi).

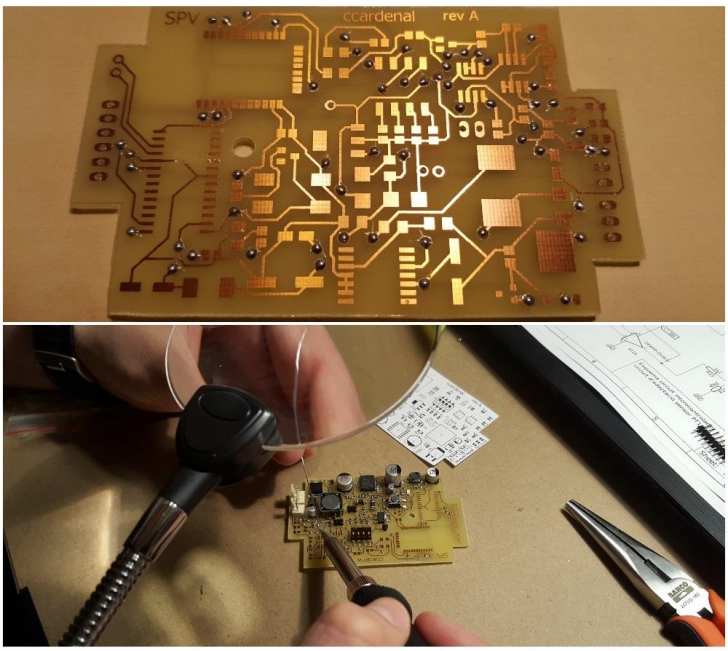


Figura 41. Soldadura de vies i components

El mecanitzat ha permès soldar les vies que connecten les pistes de les dues cares i connectors. A continuació s'han soldat els components SMD amb l'ajuda d'una lent donat el reduït espai entre *pads*, en especial al mòdul Bluetooth amb només 0,4 mm.

La següent figura mostra la placa finalitzada, on el connector JP1 ha permès programar el microcontrolador amb l'algoritme dissenyat via programador PICKIT3.

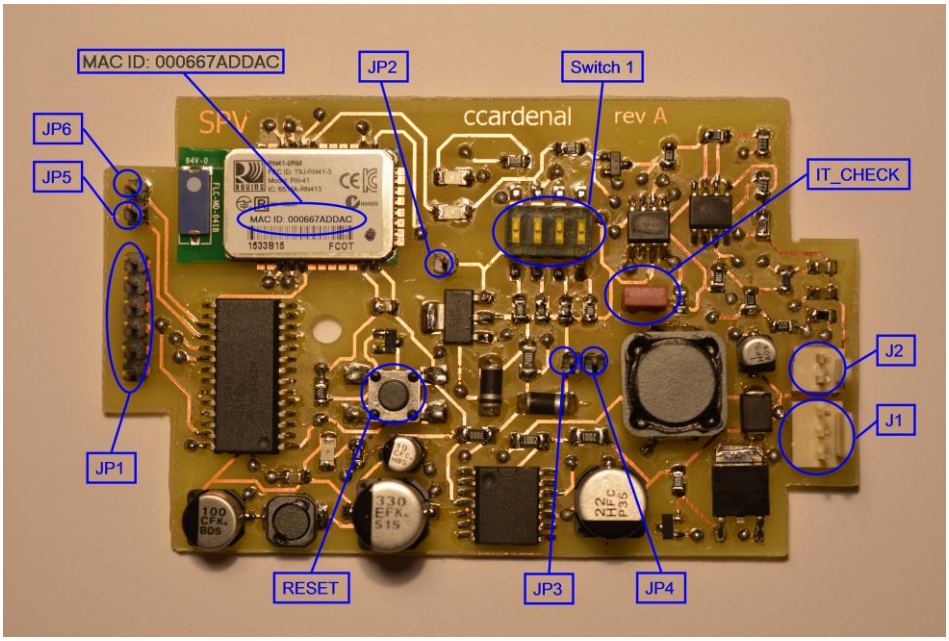


Figura 42. PCB finalitzada

A la imatge superior esquerra de la figura 43 s'observa la tensió de sortida del convertidor DC/DC (multímetre groc) que alimenta els amplificadors operacionals i la que ofereix el regulador lineal (multímetre vermell) segons s'especifica al capítol 3 d'aquest treball.

La imatge superior dreta mostra el corrent que travessa el pont de *Wheatstone* (multímetre groc) mesurat per mitjà del connector IT_CHECK. La mateixa imatge permet visualitzar la tensió de sortida variable del circuit d'adaptació de la sonda PT1000, gràcies al connector JP4 (multímetre vermell).

Gràcies a aquestes mesures es pot ajustar els paràmetres del càlcul de temperatura, especificats al fitxer supervisor.h del programa de control, per a una major precisió.

A les imatges inferiors de la mateixa figura es pot veure com el supervisor ha connectat amb el mòdul Bluetooth d'un PC, a través d'un port sèrie que espera

connexions entrants, per enviar la temperatura amb el nom del supervisor (quatre últims dígits de l'adreça MAC).

Figura 43. Calibratge i prova del supervisor

Donat que el supervisor està pensat per a ser utilitzat en entorns industrials, aquest s'ha encastat en una caixa de plàstic ABS de protecció IP-65, la qual protegeix contra entrades de pols i esquitxos d'aigua. A més l'entrada de cables es troba segellada amb protecció IP-68 oferint una protecció molt elevada, segons l'estàndard IEC 60529.

Figura 44. Aspecte del producte finalitzat

7. Valoració econòmica

La següent valoració econòmica està dividida en dues parts, per un costat s'inclou el cost del disseny del supervisor descrit en el present projecte i per l'altre el cost de fabricació del prototip.

Descripció	Codi	Quantitat	Preu unitari/€	Preu/€
Disseny supervisor remot				
Hores estudi requeriments	-	36	35	1260
Hores disseny analògic	-	88	35	3080
Hores disseny PCB	-	29	35	1015
Hores programació	-	69	35	2415
Preu final disseny supervisor remot				**7770 €**

Taula 17. Cost de disseny del supervisor remot

Per a la fabricació del prototip el preu dels materials s'ha obtingut de tres proveïdors: Reichelt Elektronik GmbH, Elfa Distrelec i SparkFun. A més, cal tenir en compte que aquests són preus sense cap tipus de descompte i per a la fabricació d'una sola unitat.

Descripció	Codi	Quantitat	Preu unitari/€	Preu/€
Font d'alimentació				
Connector PSK 254/3W	J1	1	0.05	0.05
Connector PSS 254/3G	J1	1	0.05	0.05
Connector 1-pin 2.54mm	JP2	1	0.005	0.005
Connector 1-pin 2.54mm	JP3	1	0.005	0.005
PSK-CONTACT	J1	2	0.014	0.028
Transistor MOSFET-P IRF9024N D-Pak	Q1	1	0.41	0.41
Díode Zener ZD10 SMD	ZD10	1	0.042	0.042
Díode Schottky MBRS 120 SMD	D5	1	0.137	0.137
Díode rectificador 1N4002 SMD	D3, D4	2	0.053	0.106
Díode LED EL 1206 GE SMD	LED3	1	0.084	0.084
Regulador LM2574-M ADJ SO-14	IC3	1	1.58	1.58
Regulador lineal LM317EMP SOT-223	LM317	1	0.84	0.84
Condensador X7R-G0805 100 nF SMD	C4	1	0.042	0.042
Condensador VF 10/16 C-B SMD	C5	1	0.105	0.105
Condensador VF 1.0/50 C-B SMD	C6	1	0.158	0.158
Condensador VF 22/50 C-E SMD	C7	1	0.168	0.168
Condensador VF 330/25 K-F SMD	C8	1	0.24	0.24
Condensador VF 100/16 K-D SMD	C9	1	0.126	0.126
Resistència 390Ω 0.1% 1206 SMD	R23	1	0.32	0.32
Resistència 240Ω 0.1% 1206 SMD	R24	1	0.32	0.32
Resistència 100k 5% 1206 SMD	R25	1	0.106	0.106
Resistència 10k 0.1% 1206 SMD	R26	1	0.32	0.32
Resistència 2k 0.1% 1206 SMD	R27	1	0.32	0.32
Resistència 1k 5% 0805 SMD	R28	1	0.108	0.108
Inductor L-PIS47520 680μH 20% SMD	L1	1	1.26	1.26
Inductor L-PIS 2408 22μH 20% SMD	L2	1	0.78	0.78
Subtotal font d'alimentació				7.71

Circuit adaptació PT1000				
Connector PSK 254/2W	J1	1	0.05	0.05
Connector PSS 254/2G	J1	1	0.05	0.05
Connector 1-pin 2.54mm	JP4	1	0.005	0.005
PSK-CONTACT	J1	2	0.014	0.028
Amplificador operacional dual OPA2188	IC1, IC2	2	4.12	8.24
Resistència 5.6k 5% 0805 SMD	R8	1	0.108	0.108
Resistència 1k 0.1% 0805 SMD	R9,	4	0.25	1
Resistència 31k6 0.1% 0805 SMD	R20, R21	2	0.25	0.5
Resistència 1k2 0.1% 0805 SMD	R12, R13	2	0.25	0.5
Resistència 47k5 0.1% 0805 SMD	R14, R15	2	0.25	0.5
Condensador X7R-G0805 100 nF SMD	C2, C3	2	0.042	0.084
Díode Schottky BAS 40-04 SOT-23	D1	1	0.053	0.053
Sensor ALTF1-PT1000-Si-35-180	PT1000	1	23.14	23.14
Subtotal circuit adaptació PT1000				34.25
Circuit mòdul Bluetooth				
Díode LED EL 1206 GR SMD	LED1	1	0.084	0.084
Díode LED EL 1206 BL SMD	LED2	1	0.084	0.084
Resistència 1k 5% 0805 SMD	R1, R2, R3, R4	4	0.108	0.432
Resistència 220Ω 5% 0805 SMD	R5, R6	2	0.108	0.216
Dip Switch 4-pin SMD	S1	1	0.6	0.6
Mòdul Bluetooth RN41 SMD	RN41	1	28.61	28.61
Subtotal circuit mòdul Bluetooth				30.22
Circuit microcontrolador				
Connector 6-pin 2.54mm	JP1	1	0.030	0.030
Resistència 5.6k 5% 0805 SMD	R7	1	0.108	0.108
Connector 1-pin 2.54mm	JP5	1	0.005	0.005
Connector 1-pin 2.54mm	JP6	1	0.005	0.005
Condensador X7R-G0805 100 nF SMD	C1	1	0.042	0.042
Díode Schottky BAT54 SOT-23 SMD	D2	1	0.042	0.042
Pushbutton SMD	S2	1	0.87	0.87
Microcontrolador PIC 16F916-I SO-28	16F916	1	3.52	3.52
Subtotal circuit microcontrolador				4.62
Material divers				
PCB Fotosensible positiva 100x75mm	-	1	1.47	1.47
Revelador PCB (hidròxid de sodi) – 1g	-	3	0.104	0.31
Àcid PCB (persulfat de sodi) – 1g	-	25	0.042	1.05
Estany 0.5mm Sn60/Pb40 – 1gr	-	25	0.044	1.1
Subtotal material divers				3.93
Subtotal materials prototip				**80.84**
Fabricació PCB i muntage				
Hores fabricació PCB	-	2	35	70
Hores muntatge components	-	8	35	280
Hores programació PIC i testeig	-	2	35	70
Subtotal fabricació PCB i muntatge				420
Preu final del prototip				**500.73 €**

Taula 18. Cost de fabricació del prototip

Una vegada finalitzada la fase de prototipatge, i assolida la revisió final per al llançament del producte al mercat, la inversió del cost del prototip i disseny del supervisor remot de temperatura via Bluetooth serà retornada amb el benefici de les vendes.

8. Conclusions

La realització d'aquest treball de fi de grau plantejava una sèrie d'objectius vinculats a un projecte d'enginyeria, en concret el plantejament i implementació d'un supervisor remot de temperatura via Bluetooth per a ser usat en entorns industrials. Aquests tipus de projectes requereixen un equip multidisciplinari, a més de la figura del director de projecte, per a completar amb èxit el producte desitjat en un temps establert. El present treball ha permès treballar cada un dels rols requerits i, per conseqüent, entendre la complexitat del desenvolupament d'un producte dins l'àrea de l'electrònica.

El vessant de gestió ha estat clau en el seguiment de cada una de les etapes vinculades al projecte, on el plantejament i planificació inicial han ajudat a mitigar les etapes més conflictives, gràcies a un pla de contingència definit abans d'iniciar l'execució del projecte. Durant l'execució han sorgit problemes logístics a l'etapa de muntatge del prototip, per localitzar un amplificador operacional defectuós, on una correcta gestió ha estat clau per tal de no endarrerir la prova i entrega del mateix.

Durant la realització de cada una de les etapes tècniques que conformen el projecte ha estat de vital importància l'ús d'eines informàtiques de simulació, les quals han permès ajustar al màxim els requeriments exigits, alhora que han ajudat a visualitzar possibles errors de càlcul.

Una vegada completat tot el disseny s'ha procedit al muntatge i prova del prototip, per tal de validar que el producte dissenyat satisfà tots els requeriments especificats. Aquesta etapa ha permès implementar de manera pràctica el disseny proposat, no obstant ha calgut incrementar les hores de treball planificades perquè no tenia experiència prèvia en construcció de circuits impresos. Una vegada finalitzada la PCB, per mitjà d'aparells de mesura com multímetres i oscil·loscop, s'han contrastat els valors mesurats amb la solució teòrica.

Podem concloure que l'execució del present treball ha estat una oportunitat que ha permès posar en pràctica coneixements adquirits durant els estudis, al mateix temps que s'ha aprofundit dins d'una àrea de l'enginyeria de Telecomunicacions. Per últim ressaltar que aquest treball ha ajudat a entendre com afrontar un projecte d'enginyeria amb total garantia d'èxit.

Glossari

- **ADC**: dispositiu que transforma un voltatge continu en valors digitals.
- **Bluetooth**: tecnologia estandarditzada per a comunicacions de curt abast que utilitza freqüències de la banda ISM.
- ***Callendar-Van Dusen***: equació que descriu la relació entre temperatura i resistència de sensors RTD.
- **Fotolit**: impressió sobre film transparent que permet insolar l'objecte que representa sobre una superfície fotosensible.
- ***Gerber***: estàndard obert de codi ASCII utilitzat per a la fabricació de PCB.
- **ISM**: franja de l'espectre radioelèctric usada internacionalment per aplicacions industrials, mèdiques i científiques. Com que no està regulada, els equips han de ser robustos a interferències d'altres equips operant a la mateixa banda.
- **MAC**(adreça): identificador de 48 bits o 6 blocs hexadecimals d'un dispositiu de xarxa.
- **Microchip**: fabricant de microcontroladors, memòries i semiconductors.
- **Microcontrolador**: petit ordinador muntat sobre un sol circuit integrat dissenyat per a ser usat en aplicacions específiques, en especial automatització.
- **OEM**: producte fabricat per una empresa i venut per a fabricar productes d'una altra empresa, la qual posa el producte a la venda sota el seu nom.
- **PCB**: placa mecanitzada on es munten components electrònics i s'interconnecten per mitjà de pistes de coure.
- **PT1000**: tipus de sensor RTD que presenta una resistència de 1000 Ω a 0 ºC.
- **RTD**: detector de temperatura resistiu que segueix una relació de *Callendar-Van Dusen*.
- **SMD**: tècnica usada en la fabricació de circuits impresos o PCB on els components són muntats directament sobre la superfície.
- **UART**: dispositiu que tradueix informació entre paral·lel i sèrie per a la seva posterior transmissió sobre un canal de comunicació sèrie.
- ***Wheatstone***(pont): circuit elèctric emprat per al càlcul d'una resistència desconeguda, el qual permet assolir mesures de molta precisió.

Bibliografia

- Bara, M. **L'amplificador Operacional**. Universitat Oberta de Catalunya.
- Pérez, A.; Roselló, M. **Aplicacions electromagnètiques i introducció al càlcul d'errors**. Universitat Oberta de Catalunya.
- Acromag Inc. (2011). ***Criteria for temperature sensor selections of T/C and RTD sensor types***.
- Microchip Technology Inc. ***Datasheet* microcontrolador PIC 16F916**. Disponible a: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/41250E.pdf
- Microchip Technology Inc. ***Datasheet* mòdul Bluetooth RN41**. Disponible a: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/rn-41-ds-v3.42r.pdf
- Texas Instruments Inc. ***Datasheet* regulador lineal LM317**. Disponible a: http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm317.pdf
- Texas Instruments Inc. ***Datasheet* regulador voltatge LM2574**. Disponible a: http://www.ti.com.cn/cn/lit/ds/symlink/lm2574.pdf
- CadSoft Computer. **Disseny circuit imprès amb programari Eagle**. Disponible a: http://www.cadsoftusa.com/
- Muñoz, O. **Filtratge Analògic**. Universitat Oberta de Catalunya.
- Bataller, A. **Gestió i desenvolupament de projectes**. Universitat Oberta de Catalunya.
- Microchip Technology Inc. **Guia d'usuari Compilador XC8**. Disponible a: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/50002053F.pdf
- Microchip Technology Inc. **Guia d'usuari RN41 *data command***. Disponible a: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/bluetooth_cr_UG-v1.0r.pdf
- Bluetooth SIG. **Informació sobre l'estàndard Bluetooth**. Disponible a: http://www.bluetooth.org
- Sáenz, N.; Vidal, R. **Redacció de textos cientificotècnics**. Universitat Oberta de Catalunya.

Annex A

Pt 1000: Temperature / resistor table

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
-80	683,25	687,27	691,29	695,3	699,31	703,32	707,33	711,34	715,34	719,34	723,35
-70	723,35	727,35	731,34	735,34	739,34	743,33	747,32	751,32	755,3	759,29	763,28
-60	763,28	767,26	771,25	775,23	779,21	783,19	787,17	791,14	795,12	799,09	803,06
-50	803,06	807,03	811	814,97	818,94	822,9	826,87	830,83	834,79	838,75	842,71
-40	842,71	846,66	850,62	854,57	858,53	862,48	866,43	870,38	874,33	878,27	882,22
-30	882,22	886,16	890,1	894,04	897,99	901,92	905,86	909,8	913,73	917,67	921,6
-20	921,6	925,53	929,46	933,39	937,32	941,24	945,17	949,09	953,02	956,94	960,86
-10	960,86	964,78	968,7	972,61	976,53	980,44	984,36	988,27	992,18	996,09	1000
0	1000	1003,9	1007,8	1011,7	1015,6	1019,5	1023,4	1027,3	1031,2	1035,1	1039
10	1039	1042,9	1046,8	1050,7	1054,6	1058,5	1062,4	1066,3	1070,2	1074	1077,9
20	1077,9	1081,8	1085,7	1089,6	1093,5	1097,3	1101,2	1105,1	1109	1112,9	1116,7
30	1116,7	1120,6	1124,5	1128,3	1132,2	1136,1	1140	1143,8	1147,7	1151,5	1155,4
40	1155,4	1159,3	1163,1	1167	1170,8	1174,7	1178,6	1182,4	1186,3	1190,1	1194
50	1194	1197,8	1201,7	1205,5	1209,4	1213,2	1217,1	1220,9	1224,7	1228,6	1232,4
60	1232,4	1236,3	1240,1	1243,9	1247,8	1251,6	1255,4	1259,3	1263,1	1266,9	1270,8
70	1270,8	1274,6	1278,4	1282,2	1286,1	1289,9	1293,7	1297,5	1301,3	1305,2	1309
80	1309	1312,8	1316,6	1320,4	1324,2	1328	1331,8	1335,7	1339,5	1343,3	1347,1
90	1347,1	1350,9	1354,7	1358,5	1362,3	1366,1	1369,9	1373,7	1377,5	1381,3	1385,1
100	1385,1	1388,8	1392,6	1396,4	1400,2	1404	1407,8	1411,6	1415,4	1419,1	1422,9
110	1422,9	1426,7	1430,5	1434,3	1438	1441,8	1445,6	1449,4	1453,1	1456,9	1460,7
120	1460,7	1464,4	1468,2	1472	1475,8	1479,5	1483,3	1487	1490,8	1494,6	1498,3
130	1498,3	1502,1	1505,8	1509,6	1513,3	1517,1	1520,8	1524,6	1528,3	1532,1	1535,8
140	1535,8	1539,6	1543,3	1547,1	1550,8	1554,6	1558,3	1562	1565,8	1569,5	1573,3
150	1573,3	1577	1580,7	1584,5	1588,2	1591,9	1595,6	1599,4	1603,1	1606,8	1610,5
160	1610,5	1614,3	1618	1621,7	1625,4	1629,1	1632,9	1636,6	1640,3	1644	1647,7
170	1647,7	1651,4	1655,1	1658,9	1662,6	1666,3	1670	1673,7	1677,4	1681,1	1684,8
180	1684,8	1688,5	1692,2	1695,9	1699,6	1703,3	1707	1710,7	1714,3	1718	1721,7
190	1721,7	1725,4	1729,1	1732,8	1736,5	1740,2	1743,8	1747,5	1751,2	1754,9	1758,6
200	1758,6	1762,2	1765,9	1769,6	1773,3	1776,9	1780,6	1784,3	1787,9	1791,6	1795,3
210	1795,3	1798,9	1802,6	1806,3	1809,9	1813,6	1817,2	1820,9	1824,6	1828,2	1831,9
220	1831,9	1835,5	1839,2	1842,8	1846,5	1850,1	1853,8	1857,4	1861,1	1864,7	1868,4
230	1868,4	1872	1875,6	1879,3	1882,9	1886,6	1890,2	1893,8	1897,5	1901,1	1904,7
240	1904,7	1908,4	1912	1915,6	1919,2	1922,9	1926,5	1930,1	1933,7	1937,4	1941
250	1941	1944,6	1948,2	1951,8	1955,5	1959,1	1962,7	1966,3	1969,9	1973,5	1977,1
260	1977,1	1980,7	1984,3	1987,9	1991,5	1995,1	1998,7	2002,3	2005,9	2009,5	2013,1
270	2013,1	2016,7	2020,3	2023,9	2027,5	2031,1	2034,7	2038,3	2041,9	2045,5	2049
280	2049	2052,6	2056,2	2059,8	2063,4	2067	2070,5	2074,1	2077,7	2081,3	2084,8
290	2084,8	2088,4	2092	2095,6	2099,1	2102,7	2106,3	2109,8	2113,4	2117	2120,5
300	2120,5	2124,1	2127,6	2131,2	2134,8	2138,3	2141,9	2145,4	2149	2152,5	2156,1

Annex B

Resum de comandes usades en la configuració i manipulació del mòdul RN41.

ACTION COMMANDS

Command	Description
$$$	Enter Command Mode.
---	Exit Command Mode.
C	Connect Immediately to the Stored Remote Address.
C,<*address*>	Connect to Address.
Q	Quiet, Turn off Discovery and Connectability.
R,1	Reboot.
Z	Enter Low-Power Sleep Mode.

GET (DISPLAY) COMMANDS

Command	Description
GB	Bluetooth Address.
GK	Connection Status.

SET COMMANDS

Command	Description	Factory Settings
SA,<0,1,2,4>	Authentication Enable/Disable.	0, Disabled
SL,<E,O,N>	Parity.	N, None
SM,<0,1,2,3,4,5>	Mode (0 = Slave, 1 = Master, 2 = Trigger, 3 = Auto, 4 = DTR, 5 = Any).	4, DTR
SN,<*string*>	Name.	FireFly-*xxxx*
SR,<*hex value*>	Remote Address (Use SR,Z to Remove).	None Set
SU,<*value*>	Baud Rate.	115 K