

Sistema telemètric per el sensat de temperatura

Carles Pey Perpiñà

Memòria del Projecte Fi de Carrera
d'Enginyeria Electrònica

dirigit per:

Dr. Jordi Aguiló Llobet



Department de Microelectrònica i Sistemes Electrònics
Universitat Autònoma de Barcelona
Febrer 2007

A la meva família

Sistema telemètric per el sensat de temperatura

Carles Pey Perpiñà

Febrer 2007

Resum

El protocol de transplants, especifica que l'òrgan a ser transplantat és conserva a una temperatura de 4°C en el seu nucli, just després de ser extret del donant. Aquesta temperatura es manté durant el seu transport fins el destinatari. L'extracció es realitza mitjançant la isquèmia, en la que es suspèn la circulació arterial. Un cop l'òrgan ha arribat a la destinació final i el pacient està a punt, es retira l'òrgan de la banyera de gel i es coseix en el lloc pertinent del receptor. En aquest estat, previ a la reperfusió (reactivació del rec sanguini) l'òrgan va guanyant temperatura a poc a poc degut a l'exposició a la temperatura ambient o del propi cos del receptor. En tot aquest procés, cal tenir controlada la temperatura de l'òrgan, ja que la isquèmia calenta el podria malmetre irreversiblement.

Aquest projecte proporciona un producte per el mesurament remot de la temperatura. Està destinat a la monitorització de l'estat tèrmic dels òrgans dins el protocol de transplants explicat.

El producte està format per un dispositiu transmissor, en contacte directe amb l'òrgan i un receptor connectat a un ordinador així com el seu software. La comunicació entre els aparells transmissor i receptor es realitza mitjançant radiofreqüència. L'aparell transmissor té característiques de baix cost, baix consum i petites dimensions.

En el desenvolupament del projecte s'intenta en tot moment donar-hi dimensió de producte. Per això juntament amb la informació referent al producte en si, amb més caire tècnic, es mostra un breu estudi legislatiu en el capítol introductor i es realitza una valoració dels costos reals que comporta la seva fabricació.

El signant Dr. Jordi Aguiló Llobet, director i professor del Departament de Microelectrònica i Sistemes Electrònics de la Universitat Autònoma de Barcelona

Certifica:

Que el treball corresponent a la present memòria ha estat realitzat sota la meva direcció per Carles Pey Perpiñà. I perquè així consti ho signo

Jordi Aguiló Llobet

Bellaterra, 22 de gener de 2007

Agraïments

Donc les gràcies a les parts que han contribuït de manera directa o indirecta amb la realització d'aquest projecte. Al Grup d'Aplicacions Biomèdiques del Centre Nacional de Microelectrónica, dirigit per Rosa Villa, Aliette Mouroux i Enric Calderon de i2m Design i finalment a Jordi Aguiló.

Índex

Resum	iii
Agraïments	v
Índex	ix
Índex de figures	xiii
Índex de taules	xv
1 Introducció	1
1.1 Objectius	1
1.2 Especificacions inicials	1
1.3 Legislació	2
1.3.1 Compatibilitat electromagnètica	3
1.3.2 Equips de telecomunicació	4
1.3.3 Productes sanitaris	4
1.4 Estat de l'art	7
1.5 Organització de la memòria	7
2 Mesurar la temperatura	9
2.1 Termistor NTC	9
2.2 Adquisició de la temperatura	10
3 Arquitectura del sistema	15

3.1	Transmissor	15
3.1.1	Microcontrolador	15
3.1.2	Esquema elèctric	16
3.1.3	Alimentació	18
3.1.4	<i>Layout</i>	18
3.1.5	Programació de la PROM	21
3.2	Receptor	23
3.2.1	Demodulació	23
3.2.2	Esquema elèctric i <i>Layout</i>	23
4	Sistema de comunicació	27
4.1	Estàndard RS232	27
4.2	Protocol	28
4.2.1	Format de dades i trama	28
4.2.2	Sistema d'anticol·lisió	31
5	Firmware	35
5.1	Programa	35
5.1.1	Configuració del microcontrolador	36
5.1.2	Conversió Analògica Digital	40
5.1.3	Creació de la trama	41
5.1.4	Modul de transmissió	42
5.1.5	Càlcul del temps de retransmissió	42
5.1.6	Programació de la interrupció	42
5.1.7	Esperar desconnexió	43
5.1.8	Espera entre transmissions	43
5.2	Llistat de fitxers	44
5.3	Eina de suport per el desenvolupament	47
5.4	Software per actualitzar dades EEPROM	47
6	Software del PC	51

6.1	Diagrama de flux	51
6.2	Programa	51
6.2.1	Classe ClsComm	58
6.2.2	Classe ClsData	58
6.2.3	Classe ClsFile	60
7	Encapsulat	61
7.1	Materials i procediment	61
8	Test i verificació	67
8.1	Anàlisis	67
8.1.1	Precisió en el sensat de resistència a temperatura ambient	68
8.1.2	Efecte de la variació de temperatura en el sensat de resistència	68
8.1.3	Funcionament de l'alimentació del sistema a baixes temperatures	69
8.1.4	Efecte de l'encapsulat en el funcionament de la bateria	70
8.1.5	Validar l'encapsulat	70
8.1.6	Verificar corba característica del termistor	70
8.1.7	Funcionament del firmware sota un ús inapropiat i/o mal intencionat	72
9	Valoració de costos	75
10	Experimentació	81
10.1	Monitoritzar comportament animal	81
11	Conclusions	85
12	Treballs futurs	87
	Bibliografia	89
A	Biocompatibilitat	91

Índex de figures

1.1	Sistema Termosense.	2
2.1	Corba característica del termistor NTC de Genesse Biomedical, referència 2123.	10
2.2	Circuit d'adquisició de temperatura.	11
2.3	Càlcul de l'error en funció de la resistència R_{tc}	12
2.4	Corbes de la sensibilitat del sistema expressada en LSB/Ω i $LSB/^{\circ}C$ utilitzant una resistència R_{tc} de $22K\Omega$	13
3.1	Arquitectura del sistema transmissor.	16
3.2	Esquema elèctric del sistema transmissor.	19
3.3	Esquema elèctric del mòdul de control d'encesa del sistema transmissor.	20
3.4	Diagrama del consum.	20
3.5	Layout del circuit dels circuits de les figura 3.2 i 3.3. Escala 3:1. Cara superior a l'esquerra i inferior a la dreta.	21
3.6	Fotografia del Termosense.	22
3.7	Programació del Termosense.	22
3.8	Mòdul de recepció UHF FM de Radiometrix.	24
3.9	Esquema elèctric del mòdul de recepció UHF FM de Radiometrix	24
3.10	Arquitectura del receptor.	25
3.11	Esquema elèctric del circuit receptor per a la demodulació i adaptació de nivells lògics.	25
3.12	Layout del circuit de la figura 3.11. Escala 1:1. Cares superior i inferior de dalt a baix.	26

4.1	Nivells de tensió senyal del transmissor (canal 1) i del receptor (canal 2).	29
4.2	Format de la trama de comunicació.	30
4.3	Format de la trama de comunicació amb estabilització de receptor.	31
4.4	Estabilització del receptor.	31
4.5	Sistema d'anticol·lisió.	32
4.6	Transmissió, conversió AD i retransmissió.	33
4.7	Temps de retransmissió de trames.	34
5.1	Diagrama de flux del firmware.	37
6.1	Diagrama de flux del software en les etapes de recepció i procés.	52
6.2	Diagrama de les possibilitats inicials del formulari principal.	53
6.3	Formulari principal.	54
6.4	Diagrama de les accions a realitzar en introduir el número de port.	55
6.5	Càlcul de la mitjana i desviació estàndard del programa de recepció.	55
6.6	Programa de recepció.	56
6.7	Interacció entre els objectes de les diferents classes.	57
7.1	Fotografia de l'elastòmer utilitzat, el procés de buit i la barreja de la base amb l'agent curador sense aire.	62
7.2	Base de policarbonat per a l'encapsulament.	63
7.3	Peça delimitadora de policarbonat de 3 mm de gruix per a l'encapsulament.	63
7.4	Estructura per a l'encapsulament de dos dispositius.	64
7.5	Procés d'encapsulat.	65
7.6	Abans, durant i després de l'encapsulament (d'esquerra a dreta).	65
8.1	Sensat de resistència amb decrement de temperatura.	69
8.2	Test funcionament bateria a baixes temperatures.	70
8.3	Bateries encapsulades.	71
8.4	Test encapsulat bateries.	71

8.5	Enregistrament de temperatura d'un dispositiu submergit en aigua. . .	72
8.6	Test temperatura, rang de -5 a 10 °C.	73
8.7	Test temperatura, rang de 10 35 °C.	73
8.8	Test temperatura, rang de 35 a 50 °C.	74
8.9	Diferència entre les temperatures del termòmetre i el Termosense. . .	74
9.1	Contribució de les diferents parts del producte en el preu unitari final, en funció del nombre d'unitats fabricades.	78
10.1	Introducció del dispositiu transmissor dins el rumen de la vaca.	82
10.2	Gràfica de la mesura de temperatura de la llet.	83
10.3	Gràfica de la mesura de temperatura del rumen.	83

Índex de taules

2.1	Error i sensibilitat del sistema en els rangs de temperatures indicats, per a una resistència R_{tc} de $22K\Omega$ i un convertor AD de 10 bits. . . .	11
2.2	Error i sensibilitat del divisor en els rangs de temperatures indicats, per a una resistència R_{tc} de $22K\Omega$ i un convertor AD de 10 bits. . . .	12
3.1	Versions del xip rfPIC12F675.	16
3.2	Potència del mòdul transmissor segons la resistència R_{fp}	17
3.3	Autonomia de la bateria BR2032 de panasonic per diferents períodes de transmissió.	18
4.1	Trama de dades.	30
5.1	Llista de fitxers	47
5.2	Format del fitxer objecte Hexadecimal.	48
5.3	Format de registre genèric del fitxer objecte Hexadecimal.	48
5.4	Menú del programa per a l'actualització del fitxer Hexadecimal. . . .	50
8.1	Avaluació de la precisió del sistema a temperatura ambient sense l'agulla de temperatura.	68
9.1	Preus dels components.	77
9.2	Preus dels termistors	79
9.3	Preus fabricació placa de circuit imprès	79
9.4	Preus fabricació dispositiu transmissor	79

Capítol 1

Introducció

Aquest projecte ha estat desenvolupat en col·laboració amb el Grup d'Aplicacions Biomèdiques del Centre Nacional de Microelectrònica i i2m Design.

1.1 Objectius

Els objectius principals s'emmarquen en el desenvolupament d'un sistema electrònic complet a partir de les especificacions inicials i considerant totes les etapes de disseny. Aproximació inicial, prototipatge, refinament, verificació i producció. Finalment s'ha de disposar d'un sistema de telemetria per al sensat de temperatura, de baix cost, baix consum i petites dimensions. La tasca inclou desenvolupar el dispositiu transmissor, el receptor i el software d'ordinador per a l'enregistrament i visualització de dades.

1.2 Especificacions inicials

El sistema electrònic en qüestió, que rep per nom Termosense, ha de sensar la temperatura en un medi i transmetre-la via radio freqüència, a un destinatari (PDA/PC) que es trobi a una distància entre 5 i 10 metres. El sistema Termosense inclou per tant un dispositiu que s'ocupi del sensat i la transmissió (dispositiu transmissor), un receptor que demoduli la informació i l'adqüi a un medi i format coneguts per l'ordinador, i finalment l'ordinador amb el software corresponent per a processar la informació. Veure figura 1.1.

Encara que el sistema pugui destinar-se a altres aplicacions, la necessitat és disposar d'un sistema de sensat de temperatura per a un òrgan en el procés de

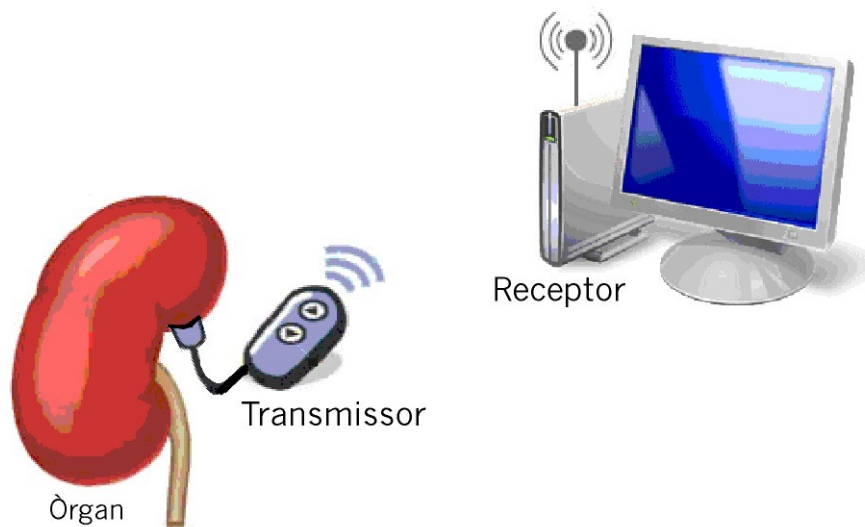


Figura 1.1: Sistema Termosense.

trasllat i preparació per al seu transplant. Això significa que el dispositiu ha de ser de baix consum, petites dimensions, de cost el més ajustat possible i capaç de ser submergit. Per tant, a més del disseny hardware del dispositiu transmissor i el software del mateix així com de l'aparell receptor, cal parar atenció amb el seu encapsulament (material, motlles, ...) i sistema d'encesa. Es proposa l'encesa mitjançant un contactor magnètic.

Es pensa en un sistema d'utilitzar i llençar. Amb una autonomia mínima d'entre 24 i 48 hores. Es pretén aconseguir un tamany mínim. Com a exemple quotidià, si la superfície sigués esfèrica, el seu diàmetre seria de l'ordre del d'una moneda de 2 euros.

El sensat de temperatura s'implementarà utilitzant un termistor. La seva precisió marcarà la màxima precisió del sistema. Per tant, el sistema ha de tenir una millor sensibilitat en comparació amb al sensor.

Tot plegat amb tecnologia de PCB.

1.3 Legislació

Tot seguit es fa un resum interpretatiu de la legislació aplicable per l'aplicació presentada. Pretén ser un ajut per a l'enteniment de l'esmentada legislació, per tant en cap cas és vinculant legalment i qualsevol error o omissió haurà de ser disculpada.

1.3.1 Compatibilitat electromagnètica

La compatibilitat electromagnètica és l'aptitud d'un dispositiu, d'un aparell o d'un sistema per funcionar de forma satisfactòria en el seu entorn electromagnètic, sense produir pertorbacions electromagnètiques intolerables en els aparells que es trobin dins l'esmentat entorn.

La norma s'aplica als aparells que poden crear pertorbacions electromagnètiques i que en el seu normal funcionament poden ser perjudicats per les esmentades pertorbacions. La Directiva 89/336/CEE del Consell, de 3 de maig de 1989, determina els requisits de protecció així com les modelitats de control corresponents. En el 4rt article de la Directiva 89/336/CEE s'informa que els esmentats aparells hauran de constituir-se de forma que:

- Les pertorbacions electromagnètiques generades quedin limitades a un nivell que permeti als aparells de radio i telecomunicacions i altres aparells funcionar d'acord amb el fi per el que han estat previstos.
- Els aparells tinguin un nivell adequat d'immunitat¹ intrínscica contra les pertorbacions electromagnètiques que els permeti funcionar d'acord amb el fi per el que han estat previstos.

El Reial Decret 444/1994 de l'11 de març de 1994 és la incorporació a la legislació espanyola de la Directiva del Consell 89/336/CEE, pel qual s'estableixen procediments d'avaluació de la conformitat i els requisits de protecció relatius a la compatibilitat electromagnètica dels equips, sistemes i instal·lacions. S'hi especifica que el comercialitzador del producte a l'Estat Espanyol té l'obligació de comprovar el marcat CE sobre el material, així com estar en condicions de proporcionar a l'administració competent el document que certifiqui la declaració del marcat CE i l'expedient tècnic. A més, ha de comprovar l'existència juntament amb l'aparell d'un manual d'instruccions que permetin la seva utilització conforme la seva destinació.

La col·locació del marcat CE, suposarà que el producte compleix a més de la directiva de compatibilitat electromagnètica, totes les altres directives que li siguin d'aplicació.

El Reial Decret 1950/1995 de l'1 de desembre de 1995 modifica el RD 444/1994.

La dades que ha de contenir cada aparell amb la declaració CE de conformitat són:

- Descripció de l'aparell o aparells que es tracti.

¹L'aptitud d'un dispositiu, d'un aparell o d'un sistema per funcionar sense empitjorament de la qualitat en presència d'una pertorbació electromagnètica.

- Referència de les normes o especificacions tècniques a les quals es declara la conformitat, i en el seu cas, el resultat documentat dels assaigs efectuats i les mesures internes aplicades per garantir la conformitat dels aparells a les disposicions del Reial Decret 1950/1995.
- Identificació del signatari habilitat per representar al fabricant o al seu representat legal establert a la Unió Europea.
- En el seu cas, la referència del Certificat CE de tipus expedit per un organisme de control notificat.

La resta de legislació aplicable es troba en les lleis:

- Llei 31/1987, de 18 de desembre, d'Ordenació de les Telecomunicacions.
- Llei 32/1992, de 3 de desembre, que modifica la Llei 31/1987.

1.3.2 Equips de telecomunicació

És necessari regular l'ús dels equips i aparells radioelèctrics establint les seves característiques tècniques i el control del seu compliment i revisar les condicions demanades per a l'establiment i règim de les estacions radioelèctriques amb l'obligada subjecció a les disposicions del Reglament de Radiocomunicacions vigent, annex al Conveni Internacional de Telecomunicacions, tal i com estableix el El Reial Decret 2704/1982, de 3 de setembre. Aquest disposa, a més, les recomanacions elaborades per la Conferència Europea d'Administracions de Correus i Telecomunicacions (CEPT) de la que Espanya és membre.

El Reial Decret 1787/1996, de 19 de juliol té àmbit d'aplicació als equips, aparells, dispositius i sistemes de qualsevol naturalesa que utilitzin l'espectre de freqüències radiolèctriques, estiguin destinats a connectar-se directa o indirectament als punts de terminació d'una xarxa pública de telecomunicació amb fi d'enviar, processar o rebre senyals, o puguin pertorba el normal funcionament d'un servei de telecomunicació.

1.3.3 Productes sanitaris

La Directiva del Consell 90/385/CEE fa referència a l'aproximació de les legislacions dels Estats membres sobre els productes sanitaris implantables actius.

Es defineix en l'apartat 2 de l'article 1 de l'esmentada Directiva:

Producte sanitari és qualsevol instrument, dispositiu, equip, material o altre article, inclosos els accessoris i programes lògics que intervinguin en el seu bon funcionament, destinat per el fabricant a ser utilitzat en éssers humans, sol o amb combinació amb altres, amb fins de:

- diagnòstic, prevenció, control, tractament o alleujament d'una enfermetat o lesió,
- investiació, substitució o modificació de l'anatomia o d'un procés fisiològic,
- regulació de la concepció,

i l'acció principal que es desitja obtenir no s'abasti per mitjans farmacològics, químics o immunològics, ni per el metabolisme, però a la funció del qual puguin concórrer els esmentats mitjans.

Producte sanitari actiu és qualsevol producte sanitari que depengui de l'electricitat o de qualsevol altre font d'energia diferent de la generada directament per el cos humà o per la gravetat, per funcionar adequadament.

Producte sanitari implantable actiu és qualsevol producte sanitari actiu destinat a ser introduït total o parcialment, mitjançant intervenció quirúrgica o mèdica, en el cos humà, o mitjançant intervenció mèdica en un orifici natural, i destinat a estar-s'hi després de l'esmentat procés.

Producte sanitari destinat a investigacions clíniques és qualsevol producte sanitari implantable actiu destinat a ser posat a disposició d'un metge especialista per què sigui objectiu d'investigacions en humans efectuades en un entorn clínic adequat.

D'entre els requisits relatius al disseny i fabricació dels productes sanitaris implantables actius i els productes sanitaris destinats a investigacions clíniques es troben:

- Els productes implantables hauran de dissenyar-se, fabricar-se i condicionar-se en embalatges no reutilitzables conforme a procediments adequats que assegurin la seva condició d'estèrils en el moment de la seva comercialització i que en les condicions d'emmagatzemament i transport previstes per el fabricant mantinguin aquesta qualitat fins que s'obri l'embalatge amb vistes a la seva implantació.
- Els productes hauran de dissenyar-se amb especial atenció a:

- elecció dels materials utilitzats, especialment en el que respecta a toxicitat.
- la compatibilitat recíproca entre els materials utilitzats i els teixits, cèl·lules biològiques i líquids corporals, tenint en compte la utilització prevista del producte.²
- la fiabilitat de la font d'energia
- l'adequada estanquitat.

Informació referent a l'embalatge en el punt 14 de l'annex 1 de la Directiva del Consell 90/385/CEE. La Directiva del Consell 93/42/CEE del 14 de juny, modifica la Directiva 90/385/CEE.

El Reial Decret 414/96 de l'1 de març, trasposa la Directiva del Consell 90/385/CEE. Referent als productes amb funció de medicació hi diu:

1. Els productes amb funció de medicació hauran de dissenyar-se i fabricar-se de forma que proporcionin una constància i una precisió de la medicació suficients dins els límits de precisió adequats a la finalitat del producte. Els límits de precisió seran indicats per el fabricant.
2. L'escala de mesura, de control i de visualització haurà de dissenyar-se amb arranjament a principis ergonòmics que tinguin en compte la finalitat del producte.
3. Les mesures efectuades per els productes amb funció de medicació hauran d'expressar-se amb unitats legals amb arranjament al disposat en la Directiva 80/181/CEE del Consell, de 20 de desembre de 1979, relativa a l'aproximació de les legislacions dels estats membres sobre les unitats de mesura.

Requisits per els productes sanitaris connectats a una font d'energia o equipats amb una font d'energia:

1. Els productes que portin incorporats sistemes electrònics programables, hauran de dissenyar-se de forma que garanteixin la repetibilitat, fiabilitat i eficàcia de dits sistemes, en consonància amb l'utilització a que estiguin destinats. En cas de condicions de primer defecte en el sistema, hauran de preveure's el medis per poder eliminar o reduir el més possibles els riscos.
2. Els productes que posseeixin una font d'energia interna de la que depengui la seguretat dels pacients, hauran d'estar provistos d'un mitjà que permeti determinar l'estat de la font d'energia.

²Veure apèndix A per més informació sobre la biocompatibilitat.

3. Els productes hauran de fabricar-se i dissenyar-se de manera que es minimitzin els riscos de creació de camps electromagnètics que poguessin afectar al funcionament d'altres productes o equips situats en el seu entorn habitual.

1.4 Estat de l'art

L'estat de l'art de la tecnologia de transport per a transplants és per regla general poc adelantada i el sistema de conservació acaba essent una nevera amb aigua i gel, on en cas de monitoritzar-se la temperatura, s'utilitza un termòmetre convencional que mesura la temperatura del medi i no de l'òrgan en si.

1.5 Organització de la memòria

Aquesta memòria està organitzada en 12 capítols, les principals aportacions dels següents capítols són:

Capítol 2: Mesurar la temperatura. Es mostra el sistema utilitzat per a mesurar la temperatura i se'n realitza un estudi de la sensibilitat.

Capítol 3: Arquitectura del sistema. Es detalla l'estructura dels aparells transmissor i receptor. A partir dels seus corresponents diagrames de blocs i mostrant finalment l'esquema elèctric. S'explica també el sistema d'alimentació així com les eines utilitzades per a programar el dispositiu transmissor.

Capítol 4: Sistema de comunicació. Es proposa el format en la transmissió de dades i el protocol de transmissió utilitzat.

Capítol 5: Firmware. S'explica amb detall el programa que conté el microcontrolador del dispositiu transmissor i es detallen els fitxers que el conformen amb les diferents funcions. Es documenta també l'eina utilitzada per el seu desenvolupament.

Capítol 6: Software del PC. S'analitza el software de recepció i se'n detallen les seves parts principals.

Capítol 7: Encapsulat es documenten els diferents materials utilitzats per a l'encapsulament així com les seves característiques. Es mostra el procés d'encapsulat de dos dispositius.

Capítol 8: Test i verificació conté tota la informació referent a tests realitzats de l'aplicació. Permetrà garantir que el sistema funciona correctament.

Capítol 9: Valoració de costos. Es realitza un estudi dels preus dels components i com varia el preu del dispositiu transmissor en funció del nombre d'unitats fabricades.

Capítol 10: Experimentació. Es mostren els diferents experiments portats a terme mitjançant l'aplicació presentada.

Capítol 11: Conclusions. Es realitza un anàlisi final del treball portat a terme.

Capítol 12: Treballs futurs. Es donen idees per a la continuació del projecte.

Capítol 2

Mesurar la temperatura

La temperatura és un paràmetre termodinàmic de l'estat d'un sistema que caracteritza la calor o transferència d'energia tèrmica entre aquest sistema i altres. Des d'un punt de vista microscòpic, és una mesura estadística de l'energia cinètica associada al moviment aleatori de les partícules que componen el sistema. Multitud de propietats fisicoquímiques dels materials o les substàncies depenen de la temperatura, com per exemple el seu estat, la densitat, la solubilitat o la conductivitat elèctrica.

En aquest capítol es tractarà com obtenir el valor tèrmic a partir de paràmetres elèctrics.

2.1 Termistor NTC

La paraula *termistor* és una contracció de les paraules *termal* i *resistor*. Així un termistor és un component electrònic que manifesta un gran canvi en la resistència amb una variació de la temperatura. Els termistors poden tenir un valor de resistència amb coeficient de temperatura positiu (dispositius PTC) o negatiu (dispositius NTC). Per tant un termistor NTC (*Negative Temperature Coefficient*) és una resistència variable el valor de la qual va decreixent a mesura que augmenta la temperatura. Estan constituïts per un cos semiconductor amb un coeficient de temperatura elevat, és a dir, la seva conductivitat augmenta molt ràpidament amb la temperatura. Per a la seva fabricació s'utilitzen òxids semiconductors de níquel, zinc, cobalt, ...

Per millorar la sensibilitat del sistema envers la temperatura real de l'òrgan, es considera utilitzar unes sondes de temperatura amb agulla miocàrdica distribuïdes per Genesee BioMedical, Inc. amb referència 2123 [1], que són en realitat termistors NTC amb un encapsulat metal·lic amb forma d'agulla que possibilita la seva inserció

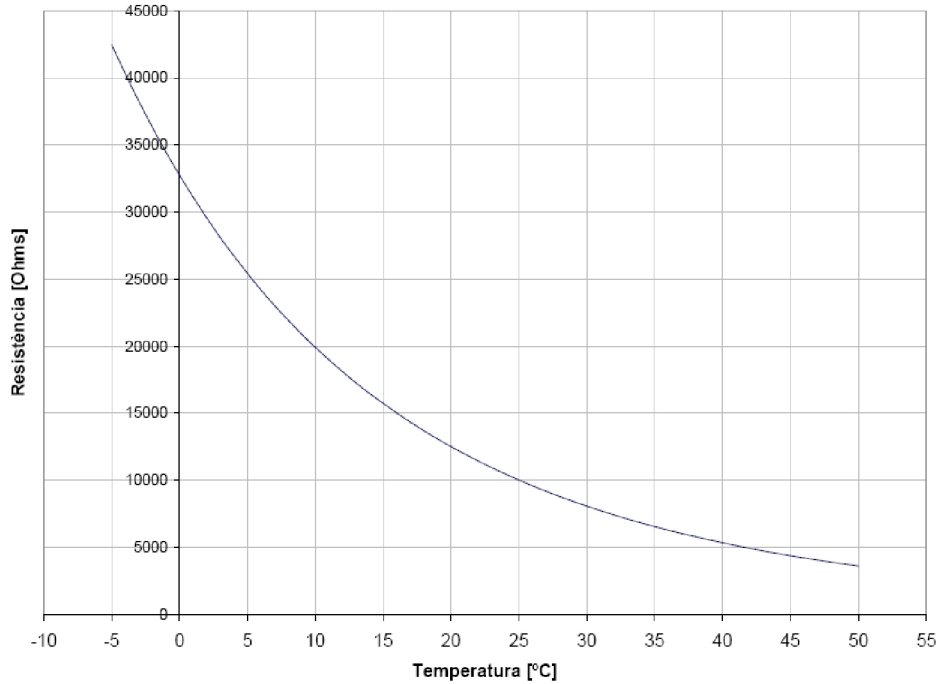


Figura 2.1: Corba característica del termistor NTC de Genesse Biomedical, referència 2123.

en òrgans sense ocasionar excessius desperfectes. La seva precisió és de $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ a 25°C . En la figura 2.1 es representa la seva corba característica.

S'observa que la relació entra la temperatura i la resistència no és lineal sinó exponencial, i que a 25°C la resistència és de $10\text{K}\Omega$.

2.2 Adquisició de la temperatura

Per a l'adquisició de temperatura es fa ús del clàssic divisor de tensió. Veure figura 2.2. Mitjançant el qual a partir d'una resistència coneguda (R_{tc}) amb una tolerància petita (en el circuit proposat de 0.1%) es troba fàcilment el valor de resistència que presenta el termistor NTC mitjançant l'equació (2.1)

$$R = \frac{(V_{ti} - V_{to}) \cdot 22K}{V_{to}} \quad (2.1)$$

Per operar utilitzant un microprocessador, és necessari convertir els valors de tensió (analògics) mitjançant un convertidor analògic digital (ADC). Per això, es multiplexa el senyal d'entrada del convertidor alternant la tensió en els punt V_{ti} i V_{to} .

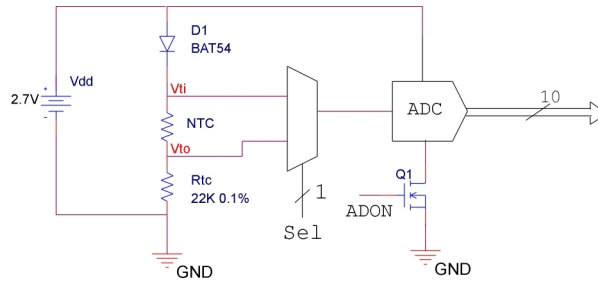


Figura 2.2: Circuit d'adquisició de temperatura.

Rang de temperatura	Sensibilitat [LSB/°C]	Error [°C/LSB]
De 0 a 5°C	12.65	0.0790
De 45 a 50°C	5.1	0.1961

Taula 2.1: Error i sensibilitat del sistema en els rangs de temperatures indicats, per a una resistència R_{tc} de $22K\Omega$ i un conversor AD de 10 bits.

Finalment es col·loca el diode per assegurar treballar sempre dins el fons d'escala.

Cal assegurar-se que l'error comès pel conversor sigui inferior a $\pm 0.2^\circ\text{C}$ (error que presenta el termistor). L'error en un ADC s'expressa com $\pm \frac{1}{2}\text{LSB}$. Es pretén que en el rang de temperatures de treball, es tingui una màxima sensibilitat o resolució (expressada en $\text{LSB}/^\circ\text{C}$) i per tant mínim error ($^\circ\text{C}/\text{LSB}$). És a dir, que la variació de temperatura representi una màxima excursió de tensió en el punt V_{to} . Aquesta sensibilitat en el divisor de tensió ve determinada per el valor de la resistència R_{tc} . No obstant això, es vol al mateix temps que l'error comès per el sistema en la resta de rang de temperatures de treball del termistor (es considera el rang de 0 a 50°C) sigui igualment inferior a l'error d'aquest. En la gràfica de la figura 2.3 es representa l'error comès per l'ADC (de 10 bits) en els rangs de temperatures inferior i superior en funció del valor escollit per la resistència R_{tc} . El valor de R_{tc} que dona un mínim error en el rang de 0 a 5°C i està just per sota de l'error màxim en el rang de 45 a 50°C , és $22K\Omega$. En la taula 2.1 s'indiquen els valors d'error i sensibilitat obtinguts amb aquest valor de resistència.

És interessant notar que la corba característica del termistor, figura 2.1, té una major variació de la resistència en el rang de temperatures inferior. I per tant una millor sensibilitat en aquest rang. Si observem de la gràfica 2.4 (corba de LSBs punt V_{to} en funció de la resistència NTC), la sensibilitat del divisor, expressada en LSB/Ω , utilitzant una resistència R_{tc} de valor $22K\Omega$, es comprova que aquest mostra un pendent més elevat en els valors de resistència NTC petits, que es corresponen al rang de temperatures elevades. Per tant, tenim que la sensibilitat del divisor (millor en valors de resistència baixos, temperatura elevada) compensa, en certa

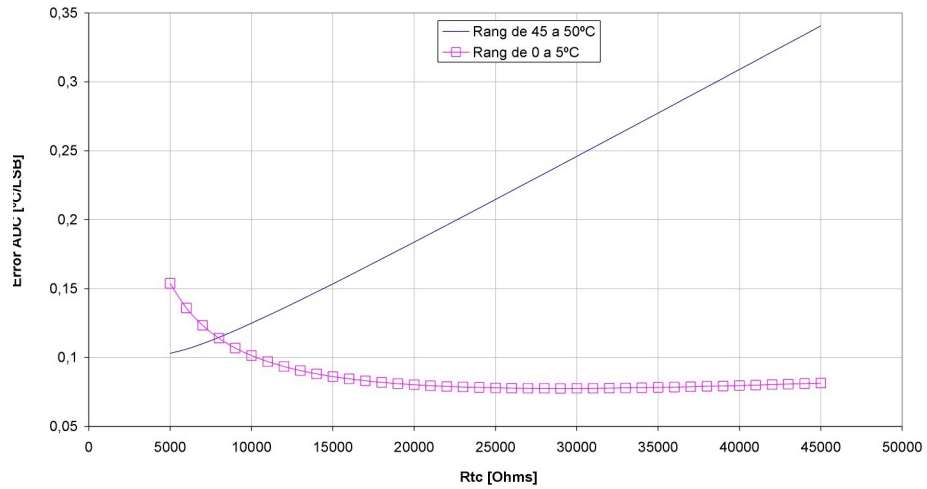


Figura 2.3: Càlcul de l'error en funció de la resistència R_{tc} .

Rang de temperatura	Resistència termistor NTC [Ω]	Sensibilitat [LSB/Ω]	Error [Ω/LSB]
De 0 a 5°C	de 32740 a 25441 Ω	0.00866	115.387
De 45 a 50°C	de 6530 a 5326 Ω	0.03333	29.996

Taula 2.2: Error i sensibilitat del divisor en els rangs de temperatures indicats, per a una resistència R_{tc} de $22\text{K}\Omega$ i un convertidor AD de 10 bits.

mesura, a la sensibilitat mostrada per la corba característica del termistor (millor en temperatures baixes). Donant finalment una sensibilitat en el sistema, expressada en $\text{LSB}/^{\circ}\text{C}$, més homogènia en tot el rang, linealitat de la corba de LSBs en funció de la temperatura de la figura 2.4.

La taula 2.2 mostra els valors de sensibilitat del divisor en els rangs inferior i superior, utilitzant una resistència R_{tc} de $22\text{K}\Omega$ i un convertidor AD de 10 bits.

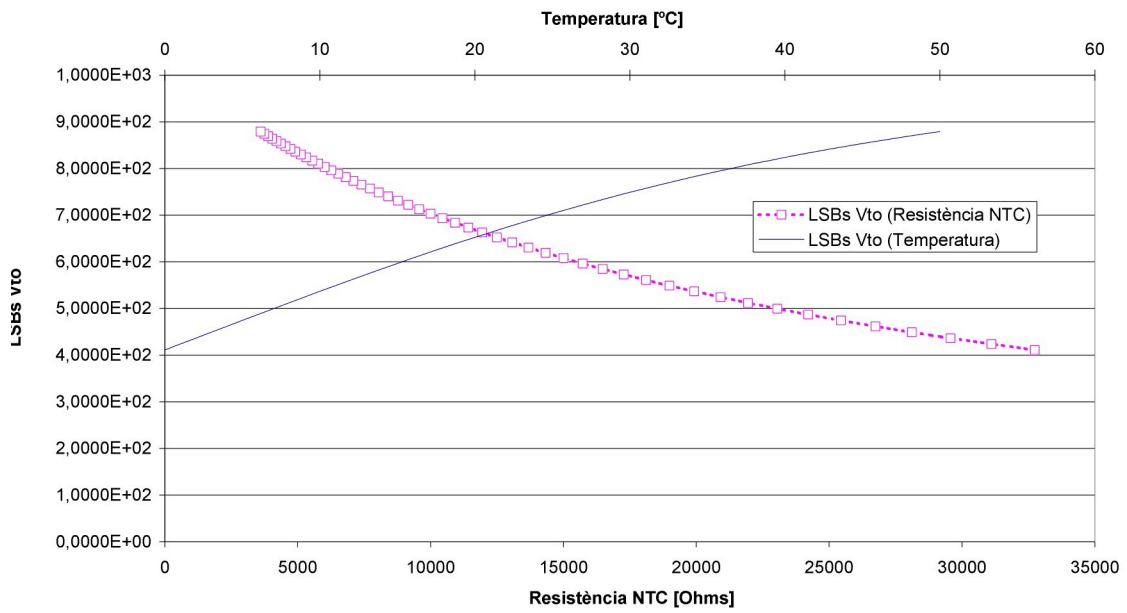


Figura 2.4: Corbes de la sensibilitat del sistema expressada en LSB/ Ω i LSB/ $^{\circ}\text{C}$ utilitzant una resistència R_{tc} de 22K Ω .

Capítol 3

Arquitectura del sistema

El sistema inclou un dispositiu transmissor i un receptor comunicats per radio freqüència i un ordinador o PDA per processar les dades provinents del receptor. En aquest capítol s'analitzarà amb detall l'arquitectura dels aparells transmissor i receptor i se'n mostrarà la seva implementació.

3.1 Transmissor

El sistema transmissor, s'encarrega periòdicament d'adquirir el valor elèctric de temperatura, mitjançant el model de la figura 2.2. Un cop realitzada la conversió AD dels punts d'interés, es processa mínimament per a generar una trama de dades que serà transmesa a un modulador de radio freqüència. L'arquitectura d'un sistema amb els elements necessaris per a portar a terme aquesta tasca pot ser la que es mostra en la figura 3.1. Es proposa la utilització d'un microprocessador per a la gestió del sistema: Interacció amb l'usuari, a través del mòdul d'encesa, selecció del canal del multiplexor, activació o desactivació del conversor AD, generació de la trama de transmissió i finalment transmissió d'aquesta al modulador de radio freqüència que prèviament haurà estat habilitat. Així la comunicació entre els sistemes transmissor i receptor serà unidireccional. El transmissor únicament pot transmetre i el receptor rebre.

3.1.1 Microcontrolador

Microchip Technology Inc. té en la seva llista de productes un conjunt de dispositiu de radio freqüència, entre ells microcontroladors amb transmissors. La família de microcontroladors rPIC i en concret el xip rPIC12F675, es tracta d'un mi-

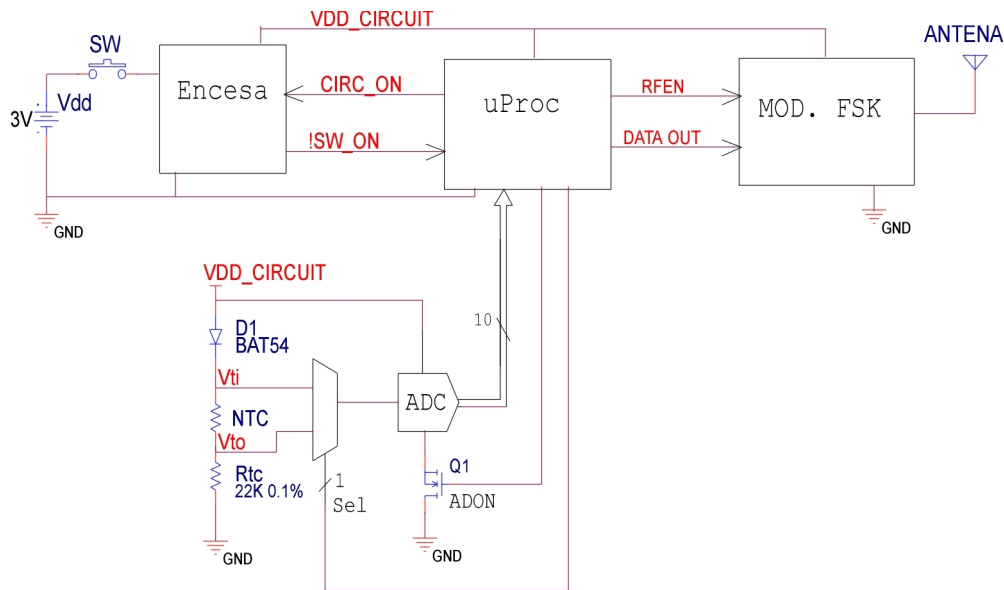


Figura 3.1: Arquitectura del sistema transmissor.

Dispositiu	Freqüència	Modulació
rfPIC12F675K	290-350 MHz	ASK/FSK
rfPIC12F675F	380-450 MHz	ASK/FSK
rfPIC12F675H	850-930 MHz	ASK/FSK

Taula 3.1: Versions del xip rfPIC12F675.

crocontrolador amb un transmissor de ASK/FSK encastat que es troba dins les característiques de baix consum i cost demanades. Es tracta d'una arquitectura RISC amb un oscil·lador intern de 4 MHz i 6 pins utilitzables per E/S. Conté 1024 x 14 *words* de memòria de programa Flash, 128 x 8 *bytes* de memòria de dades EEPROM i 64x8 bytes de memòria de dades SRAM. El xip en qüestió disposa a més d'un convertor AD de 10 bits i 4 canals. El rang de tensió d'operació és de 2.0 a 5.5V amb un consum de 500 μ A funcionant l'oscil·lador intern de 4 MHz, mentre que en el mode SLEEP amb el *watchdog* activat el consum és de 0.6 μ A. Existeixen diferents versions en les quals varia la freqüència de transmissió, s'especifiquen en la taula 3.1.

3.1.2 Esquema elèctric

En la figura 3.2 es mostra l'esquema elèctric del sistema transmissor. El bloc *encesa* es detalla en la figura 3.3. El circuit d'encesca és tal que en curtcircuitat-se el pulsador

Potència de sortida (dBm)	Volts pin PS	Resistència Rfp (Ω)
9	1.6	obert
2	0.8	100k
-4	0.4	47k
-12	0.2	22k
-70	0.1	curtcircuit

Taula 3.2: Potència del mòdul transmissor segons la resistència Rfp

o bé quan la línia *reed* tingui el valor lògic 1, circuli corrent a través del PMOS M1 que alimentarà el circuit. Per altra banda, mentre el pulsador està curtcircuitat, la línia *kill_sign* canvia a baixa i es genera la interrupció en el PIC¹.

La modulació escollida és FSK, per això la línia *Dout* (esquemàtic de la figura 3.2) connecta el pin de sortida de dades del μ C, pin 0 (GPIO0), amb l'entrada de dades en el modulador per a modulació FSK, DATAFSK. Quan el pin DATAFSK és alt (té el valor lògic 1), el pin FSKout és obert i la capacitat Crf1 no afecta a la freqüència. Quan el pin DATAFSK passa al nivell lògic 0, FSKout es curtcircuita a massa i Crf1 queda en paral·lel amb Crf2. La suma dels dos condensadors, fa baixar la freqüència d'oscil·lació. Més informació sobre el modulador FSK a [2]. La combinació de les capacitats Crf1 i Crf2 de valor 1 nF i 33 pF respectivament i un cristall de freqüència 13.56 MHz, resulta en una freqüència central de 433.92 MHz i desviació de 25 KHz. Aquesta és una de les freqüències més utilitzades per aplicacions de control remot no llicenciades.

La potència de sortida del transmissor es pot ajustar des de +9 dBm a -70 dBm variant el voltatge en el pin PS. El pin PS té una font de 8 μ A, el voltatge es pot configurar amb una resistència del pin PS a massa (Rfp). La taula 3.2 mostra la potència obtinguda a la sortida del transmissor amb diverses configuracions de la resistència Rfp.

El pin RFEN controla l'operació del transmissor. Quan RFEN té el valor lògic 1, l'oscil·lador de cristall arrenca. Quan RFEN té el valor lògic 0, el transmissor entra en un mode *stand by* de molt baix consum.

Després de diferents aproximacions amb antenes sobre PCB [3], s'arriba a la solució en que el propi cable de l'agulla de temperatura actui alhora d'antena. Això no impossibilita el sensat (conversió AD) per la pròpia seqüencialitat del sistema. En un instant es sensa, i en el següent es transmet. A més permet reduir de manera considerable la dimensió del propi dispositiu. La bobina LAnt1 és un *RF choke*, serveix per pol·laritzar el port ANT amb sortida de tipus col·lector obert. Operant

¹Més informació sobre el firmware del termosense en el capítol 5

amb la màxima potència de sortida del transmissor, s'aconsegueix transmetre a camp obert a una distància de 15 metres.

3.1.3 Alimentació

El circuit dissenyat té un consum en mode *standby* de $373\mu\text{A}$. Quan el mòdul transmissor està funcionant (el pin RFEN té el valor 1 lògic), el consum és de 12mA . Suposant un període de 15 segons, amb transmissió i retransmissió de 49.15 ms i 50 ms respectivament (veure figura 3.4), s'obté un consum mig de $450\mu\text{A}$.

S'escull una bateria de tipus pila, de 20 mm de diàmetre, de liti fabricada per Panasonic. Model BR2032 [7] i [6]. El model en qüestió té un voltatge nominal de 3 volts i una capacitat nominal de 190 mAh. Per el consum mig calculat ens proporcionaria una autonomia aproximada de 424 hores (17 dies i 14 hores). La taula 3.3 mostra l'autonomia de la bateria escollida variant la duració del període de transmissió. En el cas d'escollir un període per segon, és a dir, mesurar la temperatura 60 vegades per minut, la bateria dura més de 5 dies.

Període [s]	Consum mig [mA]	Autonomia [dies]
60	0.3922	20.18
30	0.4114	19.24
15	0.4499	17.59
7.5	0.5267	15.03
4	0.6612	11.97
2	0.9494	8.33
1	1.5258	5.18

Taula 3.3: Autonomia de la bateria BR2032 de panasonic per diferents períodes de transmissió.

El factor que limita en l'elecció de la bateria, és el current polsat de 12 mA. Les piles amb un valor més gran de màxima descàrrega tenen una major autonomia. En el cas que ens ocupa, la tensió de bateria baixa 400 mV durant els polsos de 50 ms degut a l'augment en la caiguda de tensió a la resistència de sortida de la pila.

3.1.4 Layout

En la figura 3.5 es mostra, amb escala 3:1, el layout de l'esquematic del transmissor (figures 3.2 i 3.3). El circuit d'encesa es disposa en la cara inferior de la PCB. El pusaldor utilitzat és magnètic, per això es col·loca en un cantó. La resta de

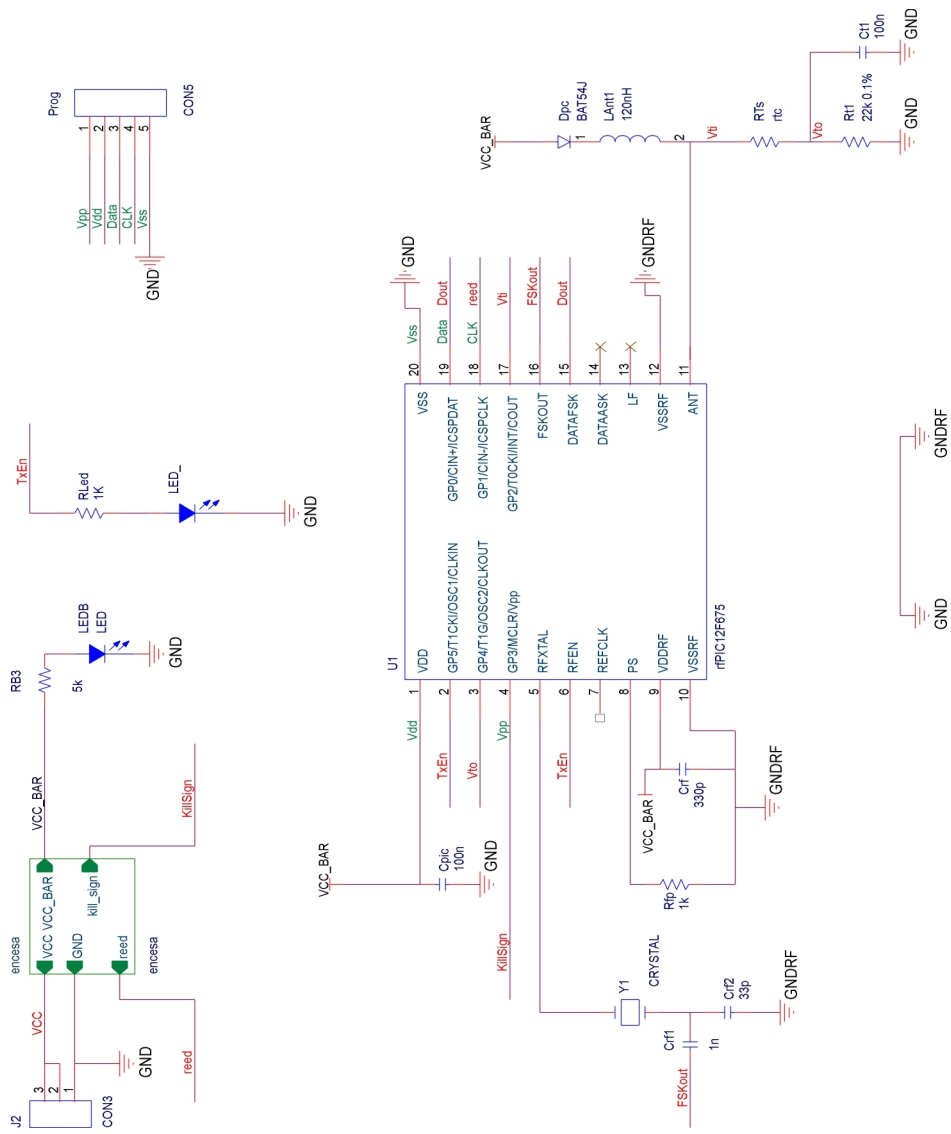


Figura 3.2: Esquema elèctric del sistema transmissor.

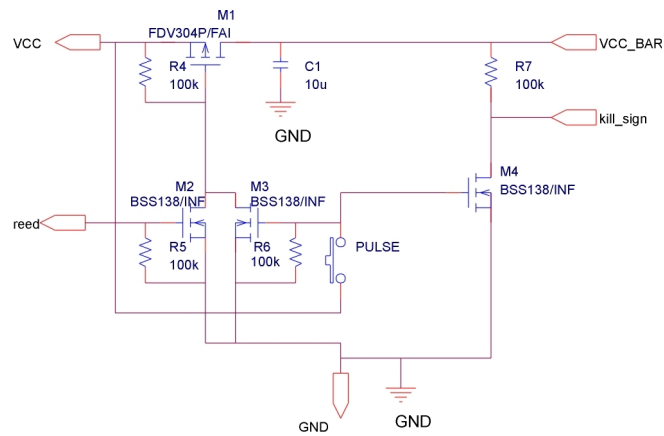


Figura 3.3: Esquema elèctric del mòdul de control d'encesa del sistema transmissor.

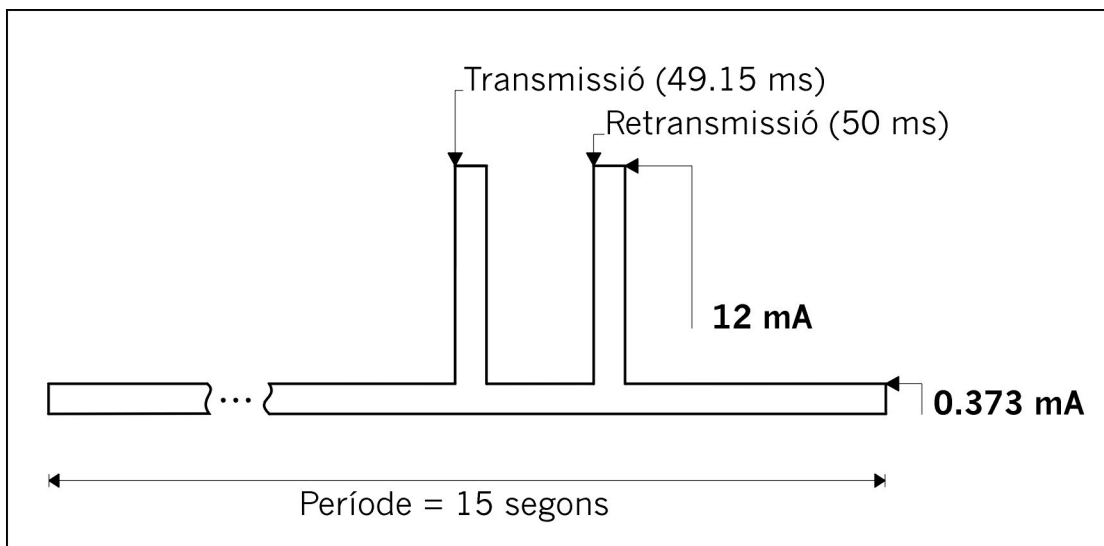


Figura 3.4: Diagrama del consum.

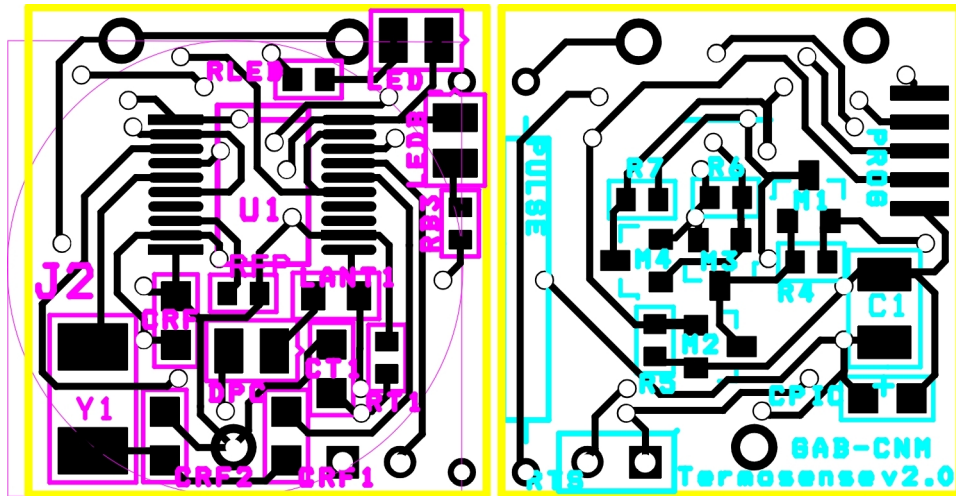


Figura 3.5: Layout del circuit dels circuits de les figura 3.2 i 3.3. Escala 3:1. Cara superior a l'esquerra i inferior a la dreta.

components es col·loquen a la cara superior exceptuant el connector per a la programació del microcontrolador (més sobre el sistema de programació de la PROM en l'apartat 3.1.5).

El tamany del layout resultant és 2.17 cm de llarg per 2.04 cm d'ample. Es fabrica sobre PCB de 0.8 mm de gruix.

En la figura 3.6 es mostra el dispositiu Termosense sense la bateria i amb el socket de programació.

3.1.5 Programació de la PROM

La programació es porta a terme amb dues línies per clock i dades i tres línies per alimentació, massa i tensió de programació (V_{pp}). El connector de la programació és el component CON5 de l'esquemàtic de la figura 3.2. El *footprint* del qual es pot veure en el layout de la figura 3.5 amb l'etiqueta PROG. La separació (pas) entre les pistes del connector és de 1.27 mm.

Per a la programació cal soldar un socket de 1.27 mm de pas. Un cop programat el firmware es dessolda el socket. El programador utilitzat és el GALEP-4 de Conitec Datasystems, Inc. i el seu software GALEP32. La figura 3.7 mostra el programador i la connexió amb el dispositiu transmissor.

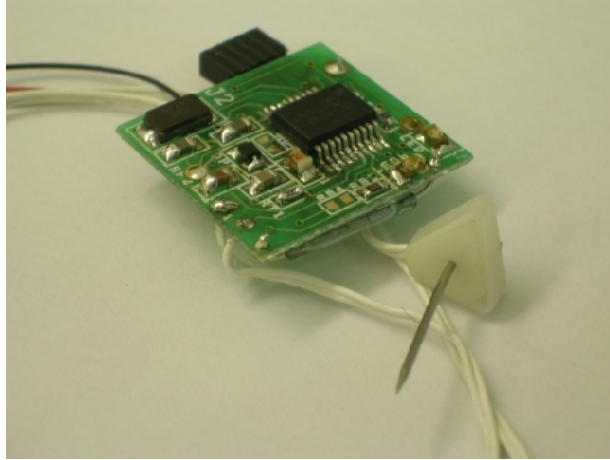


Figura 3.6: Fotografia del Termosense.



Figura 3.7: Programació del Termosense.

3.2 Receptor

El receptor ha de rebre el senyal electromagnètic, demodular-lo per obtenir el senyal elèctric i transmetre'l l'ordinador o PDA. Un cop demodulat el senyal FSK, en el cas d'utilitzar un ordinador per a processar les dades, el receptor ha de convertir els nivells lògics TTL/CMOS a RS232.

3.2.1 Demodulació

El demodulador utilitzat és un receptor UHF FM de Radiometrix Inc. [8] (figura 3.8) que treballa a la freqüència central de 433.92 MHz. De l'esquemàtic del circuit de Radiometrix (figura 3.9) s'observa que el valor digital de les dades de sortida sobta després de comparar la sortida analògica AF amb el valor mig de la mateixa utilitzant un circuit RC. Caldrà tenir present en la programació del protocol el temps que es necessita per a carregar la capacitat ($\tau=RC$) abans del qual no es té un valor mig correcte.

Per les característiques del circuit de Radiometrix i alliberar l'ordinador o PDA de feina innecessària, previ a la conversió de nivells lògics, cal interpretar si el senyal rebut conté portadora. De ser així es transmet el senyal a l'ordinador. En cas contrari es desestima. S'utilitza per aquest propòsit un comparador i lògica booleana OR. L'arquitectura del receptor es mostra en la figura 3.10. Quan la línia *Icarrier* tingui el valor 1 lògic per tant, quan no hi hagi portadora, es forçarà el valor lògic 1 a la sortida de la porta OR. Aquest és justament l'estat d'inectivitat de la comunicació sèrie². La resistència R pot ser un potenciòmetre que cal ajustar per fer treballar el comparador convenientment segons els nivells de tensió obtinguts en el port CD (*Carrier Detect*) del Radiometrix i obtenir el nivell lògic corresponent. Posteriorment es filtra el senyal d'alta freqüència que hagi pogut generar la porta lògica. Finalment, la conversió de nivells lògics es realitza amb el xip MAX232 fabricat per Maxim Integrated Products, Inc.

3.2.2 Esquema elèctric i *Layout*

L'esquema elèctric del receptor pot ser el que es mostra en la figura 3.11. En l'esquemàtic hi ha el component del demodulador de Radiometrix de freqüència 869.85 MHz. Aquest té dos pins més que la versió de 433.92 MHz. Els pins 3 i 4. El primer és un altre pin de massa i el segon un enable. El CD³ és el pin 5 i la sortida

²Més sobre l'estàndard RS232 en l'apartat 4.1

³El manual l'anomena RSSI *Received Signal Strength Indicator*.



Figura 3.8: Mòdul de recepció UHF FM de Radiometrix.

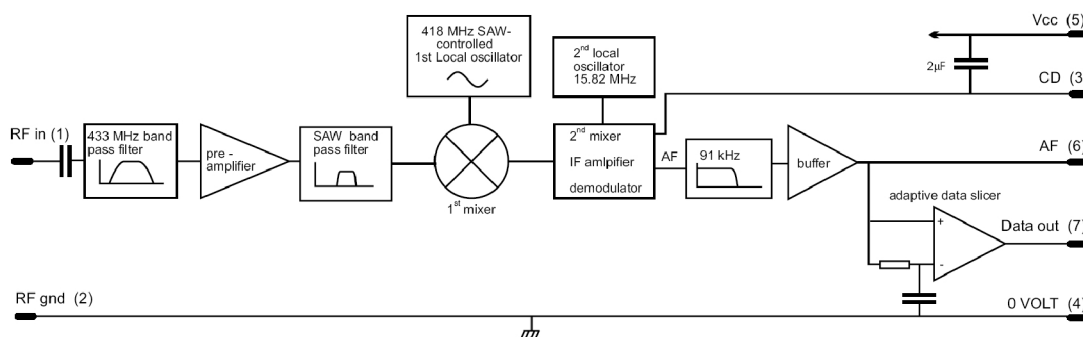


Figura 3.9: Esquema elèctric del mòdul de recepció UHF FM de Radiometrix

de dades digital el pin 9. El disseny és compatible amb la versió de 433.92 MHz. La bobina L1 és un *RF Choke*. Veure el *Layout* implementat en la figura 3.12.

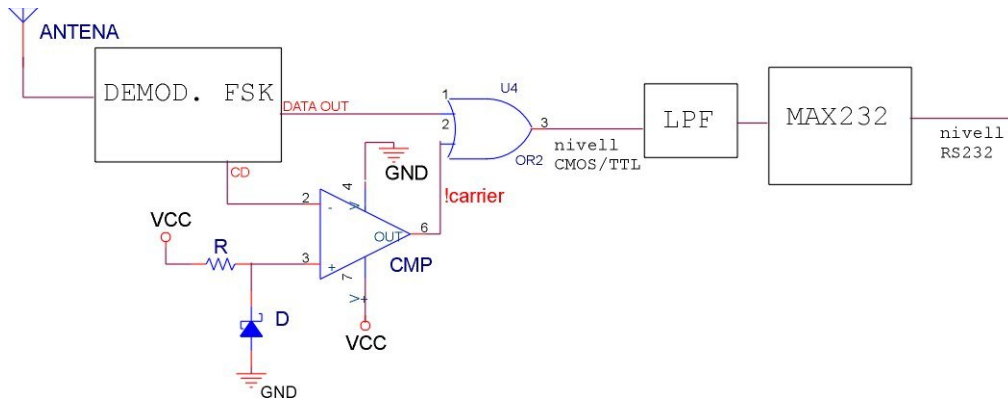


Figura 3.10: Arquitectura del receptor.

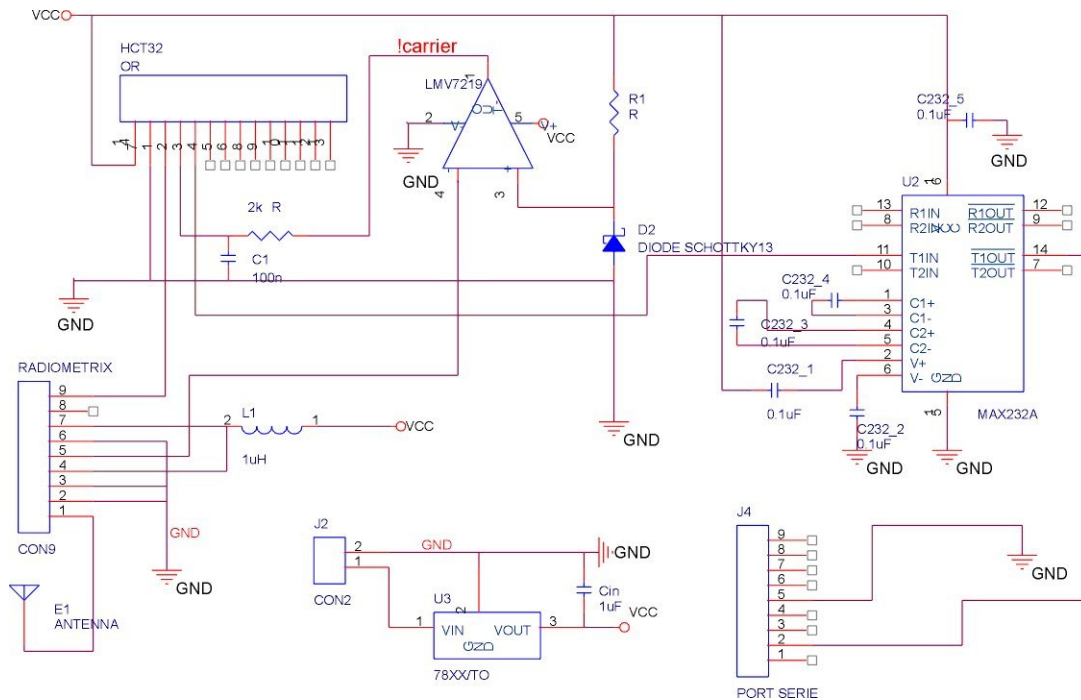


Figura 3.11: Esquema elèctric del circuit receptor per a la demodulació i adaptació de nivells lògics.

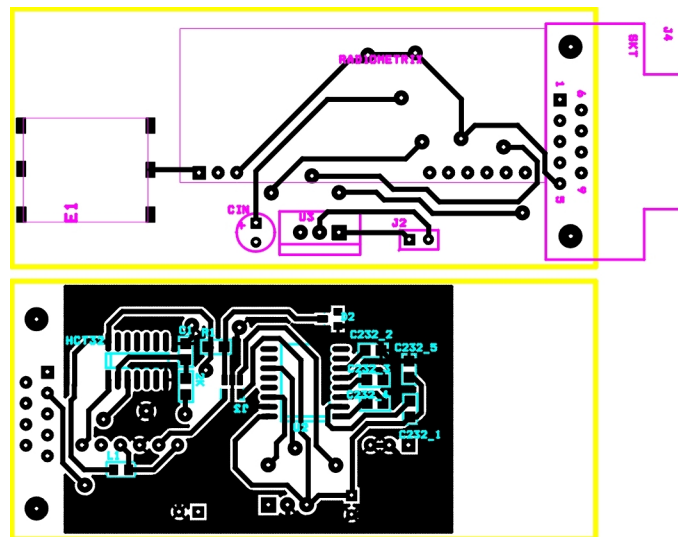


Figura 3.12: Layout del circuit de la figura 3.11. Escala 1:1. Cares superior i inferior de dalt a baix.

Capítol 4

Sistema de comunicació

La comunicació entre el dispositiu transmissor i el receptor es porta a terme amb una comunicació sèrie modulada amb FSK de freqüència central de 433.92MHz. En aquest capítol es repassarà breument el funcionament de l'estàndard RS232 per després tractar tot el referent al protocol de comunicació.

4.1 Estàndard RS232

La comunicació tal i com està definida en l'estàndard RS232 és una comunicació sèrie i assíncrona. Sèrie significa que la informació es transmet bit a bit. Assíncrona ens indica que la informació no és enviada en *slots* de temps predefinitos. Així la transferència de dades pot començar en un temps qualsevol, essent feina del receptor detectar quan un missatge comença i acaba.

La informació forma paquets de dades conjuntament amb els bits de control. El tamany de cadascun d'aquests paquets és variable. La longitud de la informació pot ocupar entre 5 i 8 bits. La resta de bits són de sincronització i control d'error. Cal que tant el transmissor com el receptor utilitzin el mateix nombre de bits i configuració del paquet de dades.

Els bits de dades s'envien amb una freqüència predefinida, el *baud rate*. Tant el transmissor com el receptor han d'ésser programats amb la mateixa freqüència de bit.

Amb RS232, el valor de tensió de la línia pot tenir dos estats. El que representa el valor lògic 1 i el que representa el valor lògic 0.

Bit de *start*: Per la asincronitat del protocol, cada paquet de dades és encapçalat amb un bit d'atenció. Aquest s'identifica amb el nivell de tensió del 0 lògic.

Aquest és fàcilment reconeixible ja que la línia, en estat de inactivitat (*idle*) es manté amb el valor lògic 1.

Bits de dades: Immediatament després del bit de *start* segueixen els bits de dades. El bit de menys pes, és el primer en ser enviat.

Bit de paritat: Per detectar errors, és possible afegir un bit extra al paquet de dades que es tractarà automàticament per la UART del receptor (ordinador/PDA). El transmissor calcula el valor del bit depenent de la informació a enviar. El receptor realitza el mateix càlcul per calcular si el bit de paritat es correspon. Aquest bit pot ser tal que faci el paquet de dades tenir un valor parell de 1's lògics o imparell.

Bit de *stop*: Una forma de controlar la sincronització és mitjançant el bit de *stop*. Aquest sempre té el valor 1 lògic. Si el receptor rep un valor diferent quan li toca rebre el bit de *stop*, sap que hi ha un error de sincronització. El dispositiu llavors intenta resincronitzar-se amb els nous bits entrants. El bit de *stop* pot tenir diferents longituds, les més utilitzades són 1, 1.5 o 2 bits.

Segons l'estàndar RS232, el senyal en els pins pot tenir dos nivells de tensió equivalents als valors 1 i 0 lògics. El valor 1 lògic s'identifica amb un valor negatiu de tensió (entre -5 i -15V), mentre el 0 lògic utilitza un valor positiu (entre +5 i +15V). El MAX232 és el xip encarregat de la conversió de nivells CMOS/TTL a RS232.

En la figura 4.1 es veu en el canal 1 el senyal sortint del rPIC, el valor tensió del nivell lògic 1 és 2.5 V. En el canal 2 hi ha el senyal que rep l'ordinador després de fer la conversió de nivells. El nivell de tensió del valor 1 lògic és -8V i +8V per el 0 lògic.

4.2 Protocol

El protocol en un sistema de comunicació, és el conjunt de normes en la representació de les dades i el seu format (identificació, control d'error, ...) que regeixen la comunicació. Aquest haurà d'ésser adoptat per a totes les entitats dins el propi sistema de comunicació.

4.2.1 Format de dades i trama

El microcontrolador utilitzat no disposa de UART, per això les rutines de transmissió de dades a programar hauran d'implementar les normes de l'estàndar RS232

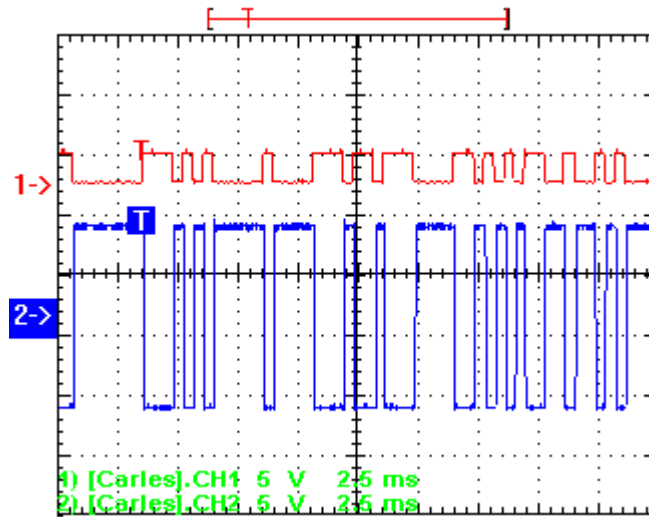


Figura 4.1: Nivells de tensió senyal del transmissor (canal 1) i del receptor (canal 2).

(vistes en l'apartat 4.1).

S'obta per utilitzar una freqüència de bit (*baud rate*) de 2400 Hz, amb control de paritat tipus parell, 7 bits de dades, 1 bit de *start* i 1 de *stop* per a cada paquet de dades, formant un total de 10 bits.

El conjunt de paquets de dades transmesos en un missatge reben el nom de trama de comunicació¹. Tal i com mostra la figura 4.2, en la trama el dispositiu transmissor envia l'identificador de protocol Termosense (valor 0x41)², seguit d'un identificador del dispositiu (21 bits), 1 bit indicant si la trama és una repetició (quan el 7è bit de les dades d'informació del cinquè paquet és 1, indica que és una repetició, 0 en cas contrari). Segueixen els valors de tensió sensats (20 bits) i finalment 7 bits més de control d'error CRC. Cadascun d'aquests 7 bits és el càlcul de paritat parell dels 10 bits corresponents a aquella posició en cada paquet de dades. Es forma un total de 10 paquets de dades i per tant 100 bits. A freqüència 2400Hz es tarda 41 ms en la seva transmissió. La taula 4.1 recull els camps de la trama de dades així com el nombre de bits per cadascun d'ells i el nombre de paquets que representen.

Per les característiques del demodulador FSK, apartat 3.2.1, es col·loca al davant de la trama a transmetre, una seqüència de bits per facilitar l'estabilització del càlcul del valor mig en el circuit receptor. Entrada negativa del comparador del demodulador, pin 7 (Data Out), que dona els nivells lògics del senyal, figura 3.9. La seqüència de bits en qüestió és el valor 0x55, que representa la màxima alternança

¹També és conegut com a PDU (*Protocol Data Unit*).

²Notació per expressar un valor en el sistema de representació hexadecimal

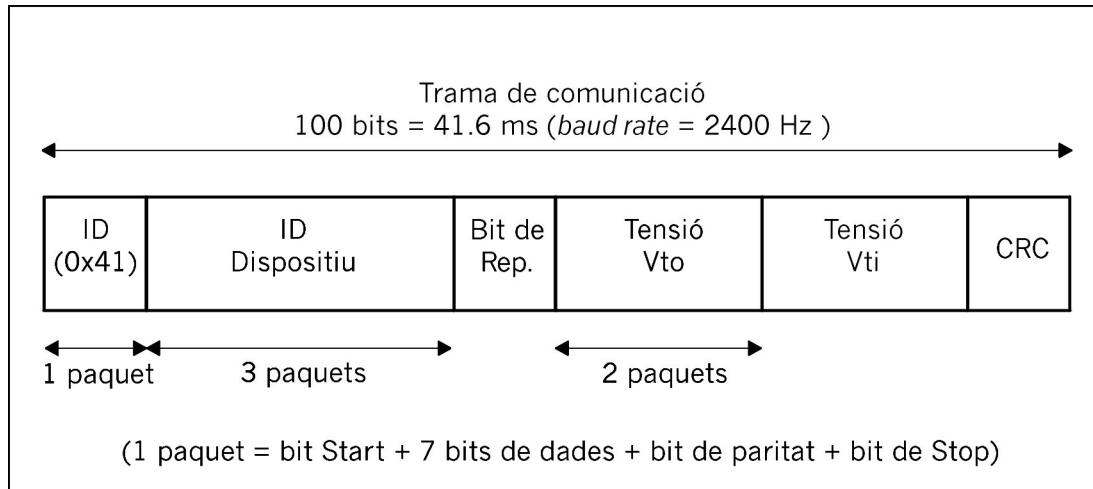


Figura 4.2: Format de la trama de comunicació.

Camps	Nombre de bits	Nombre de paquets
ID Termosense	7	1
ID Dispositiu	21	3
Bit repetició	1	1
Tensió Vto	10	2
Tensió Vti	10	2
CRC	7	1

Taula 4.1: Trama de dades.

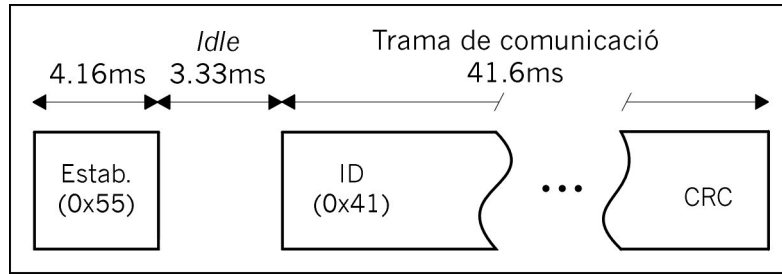


Figura 4.3: Format de la trama de comunicació amb estabilització de receptor.

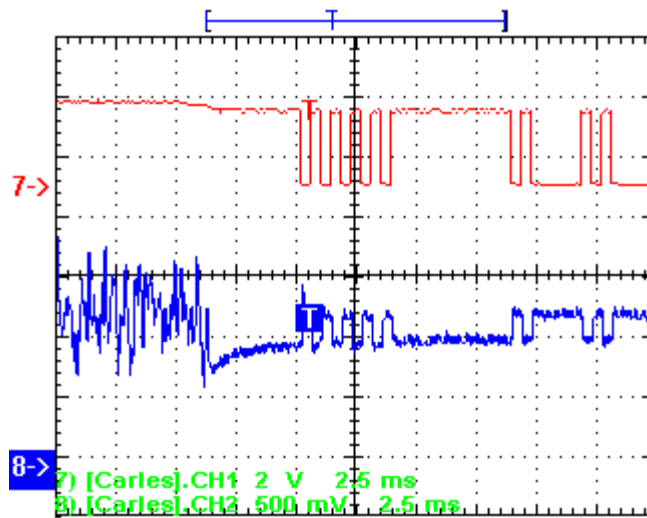


Figura 4.4: Estabilització del receptor.

entre 1's i 0's. Seguidament es deixa el valor 1 lògic durant el temps de transmissió d'un byte, aproximadament 3.33 ms. Així s'assegura que la UART del PC/PDA s'enganxi amb el bit de *start* del primer paquet de la trama. La trama de dades de la figura 4.2 queda com es mostra en la figura 4.3. En la figura 4.4 es mostra una captura de l'oscil·loscopi en el que es veu la seqüència de bits que transmet el transmissor, canal 1. El primer 0 és el bit de *start* seguit per la seqüència 0x55. S'observa també el byte d'espera i l'inici de la trama de transmissió. El canal 2, mostra la sortida analògica (*AF*) del demodulador.

4.2.2 Sistema d'anticol·lisió

Per tractar-se d'un sistema de comunicació unidireccional cal prendre mesures per minimitzar les pèrdues per col·lisions. Suposant el cas de tenir dos dispositius encesos al mateix instant de temps, amb una mateixa freqüència de transmissió, poden

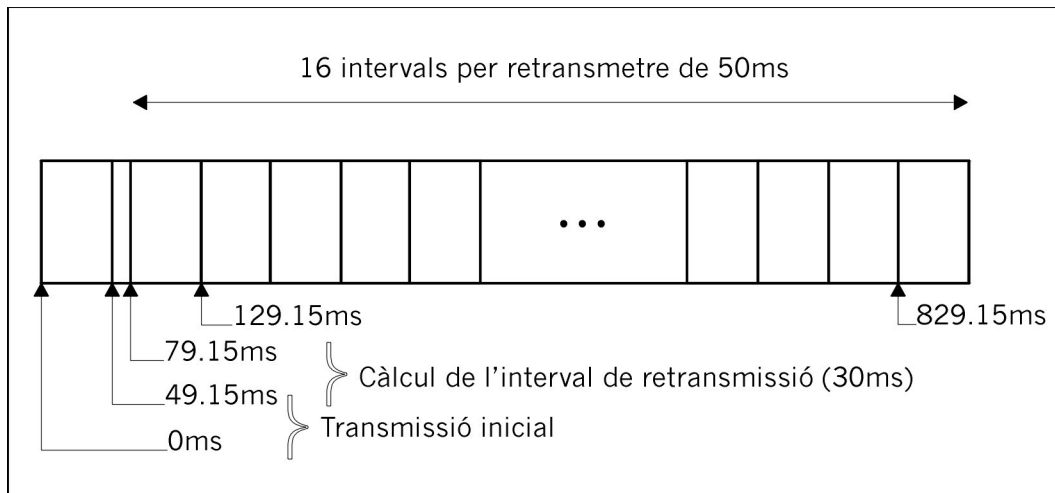


Figura 4.5: Sistema d'anticol·lisió.

col·lisionar indefinidament. Per això s'implementa un protocol de retransmissió similar al funcionament del mètode ALOHA.

Cada trama de dades és retransmesa al cap d'un temps aleatori i després de variar el 7è bit del cinquè paquet que indica si la trama en qüestió és una retransmissió (valor 0x40). Caldrà canviar també el valor de paritat del paquet en qüestió i recalculer el byte de CRC (10è paquet).

Per calcular el temps aleatori, es realitzen 4 conversions mitjançant l'ADC del pin GP0 del rfPIC, prèviament configurat com a port d'entrada. De cadascuna de les 4 conversions es guarda el bit de menys pes. Així per tenir aleatorietat cal que com a mínim el senyal entrant per el pin 0 provinent del modulador de FSK, tingui un nivell de soroll de l'ordre de 1LSB, 2.7mV en un conversor de 10 bits. Dels 4 bits s'obté el valor entre 0 i 15. Seguidament es divideix el temps en 16 intervals de 50 ms (temps de transmissió de trama més el temps d'estabilització). La retransmissió es realitza en un dels 16 intervals segons el valor calculat. Així podrem tenir una retransmissió al cap de 30 ms, just després del temps necessari per a realitzar les 4 conversions, o bé fins al 16è interval, al cap de 780 ms. Veure figura 4.5.

Capturant amb l'oscil·loscopi el pin 0 (GP0) del PIC en l'instant de transmissió, es pot observar el que es mostra en la figura 4.6. Primerament tenim la transmissió, seguit de les 4 conversions AD i finalment la retransmissió. En aquesta ocasió just després del càlcul de l'instant de temps.

La figura 4.7 sensant el mateix port del dispositiu, es pot veure en diferents instants de temps, el moment en que es transmet la trama inicial i els intervals de temps utilitzats per a les diferents retransmissions. Es mostra sobre-impresa l'última

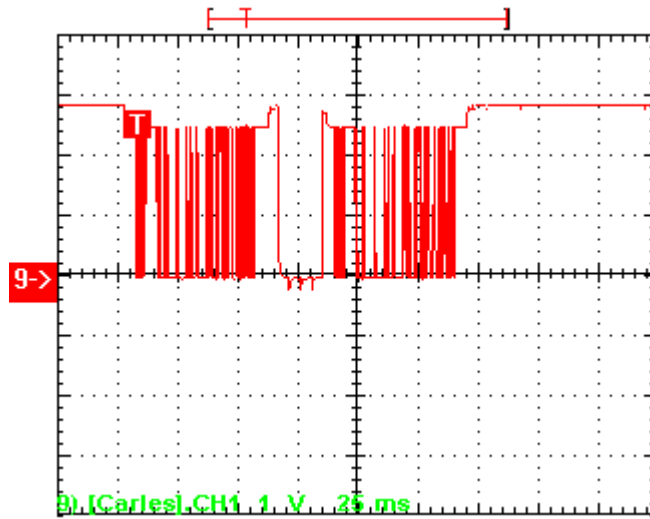


Figura 4.6: Transmissió, conversió AD i retransmissió.

parella trama original i trama retransmesa generada.

El receptor descarta el paquet retransmès en cas d'haver rebut anteriorment una trama amb la mateixa informació i el bit indicador de trama repetida igual a 0. Per identificar si la trama rebuda amb antel·lació conté la mateixa informació es compara el CRC de la trama actual (després de fer l'operació OR exclusiva amb 0x40) amb el CRC de la trama anterior.

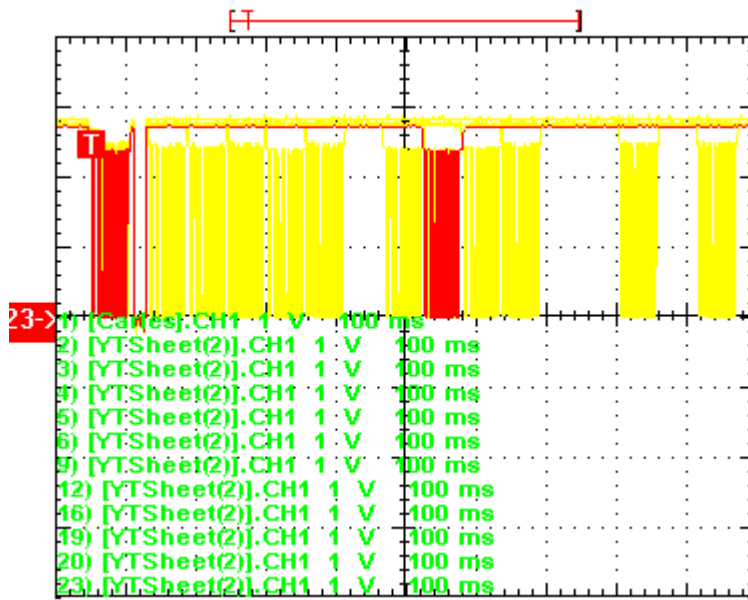


Figura 4.7: Temps de retransmissió de trames.

Capítol 5

Firmware

El firmware proporciona el conjunt d'instruccions que gestionen l'electrònica en el dispositiu. Ens proporcionarà a més la interfície entre l'usuari i el sistema, per això és necessària una programació acurada per tenir en tot moment el dispositiu controlat. En aquest capítol s'analitza el firmware, començant amb una definició a alt nivell mitjançant un diagrama de flux i augmentant progressivament el refinament per acabar definint tots els detalls.

5.1 Programa

La circuiteria POR (Power-on reset) interna del microcontrolador manté el xip en reset mentre Vdd no hagi arribat a un nivell suficientment elevat per un correcte funcionament. Assolit aquest nivell de tensió, el comptador de programa (PC) té el valor 0x000h, adreça en la que comença l'execució del programa. Una primera aproximació de les tasques a portar a terme i la seva seqüencialitat es mostren en el diagrama de la figura 5.1.

Primerament cal configurar el μ Controlador per què el sistema funcioni apropiadament. D'entre les tasques principals hi trobem: configuració dels pins, deshabilitar el comparador, configurar el convertidor A/D, inicialitzar variables del sistema, configurar i habilitar les interrupcions. Seguidament s'entra en un llaç del qual no es surt fins que es genera la interrupció en el pin 3, línia *KillSign*, que assigna a la condició *Stop* el valor de cert. Dins aquest llaç principal es realitza periòdicament la conversió A/D dels punts d'interés V_{ti} i V_{to} , es genera la trama amb la informació a transmetre¹ i es realitza tot seguit la transmissió de la trama preparada. Després es calcula l'instant per a la retransmissió, es modifica la trama a transmetre i es transmet novament (retransmissió). En el punt *Esperar desconexió*, es baixa la

¹Tota la informació respecte la trama a transmetre a l'apartat 4.2.1

línia *reed* a nivell 0 lògic (0V) i s'espera que l'usuari alliberi el pulsador per què finalitzi l'execució.

Tot seguit es revisaran les diferents etapes amb detall.

5.1.1 Configuració del microcontrolador

Bits de configuració

Hi ha una sèrie de bits que es troben mapejats a l'adreça 0x2007 de l'espai de memòria de programa. L'adreça en qüestió està més enllà de l'espai de memòria d'usuari. Pertany a l'espai de memòria especial de configuració (0x2000h - 0x3FFFh) i pot ser accedit únicament durant la programació. S'utilitza la directiva de l'assemblador MPASM, `_Config`.

La configuració és la següent:

- ♣ Habilitar la protecció de la memòria de dades.
- ♣ Habilitar la protecció de la memòria de programa.

Si no s'habiliten els bits de protecció de memòria, es permet rellegir la memòria de dades i programa un cop programa el μ C.

- ♣ Habilitar el Power-up Timer.
- ♣ Habilitar el Watchdog Timer.

Havent habilitat el *Watchdog Timer* (WDT), i el valor del registre *OPTION_REG* que s'inicialitza per defecte amb el *prescaler* assignat al WDT amb la taxa 1:128, es generarà una reset cada 2.3 s. La instrucció *CLRWDT* reinicialitza el WDT i el *prescaler*, si és assignat al WDT, i el prevé d'exhaurir-se i generar un RESET al dispositiu. El WDT servirà com s'explica en l'aparatat 5.1.8, per a despertar el μ C de la instrucció SLEEP.

- ♣ Deshabilitar la circuiteria de detecció *Brown-out*.
- ♣ Configurar el pin GP3/ \overline{MCLR} com a E/S digital. \overline{MCLR} internament connectat a Vdd.
- ♣ Seleccionar l'oscil·lador intern de 4MHz, sense clock de sortida. Els pins GP4/OSC2/CLKOUT i GP5/OSC1/CLKIN es configuren com E/S.

Per més informació, veure apartat 10.1 de la documentació de Microchip [2].

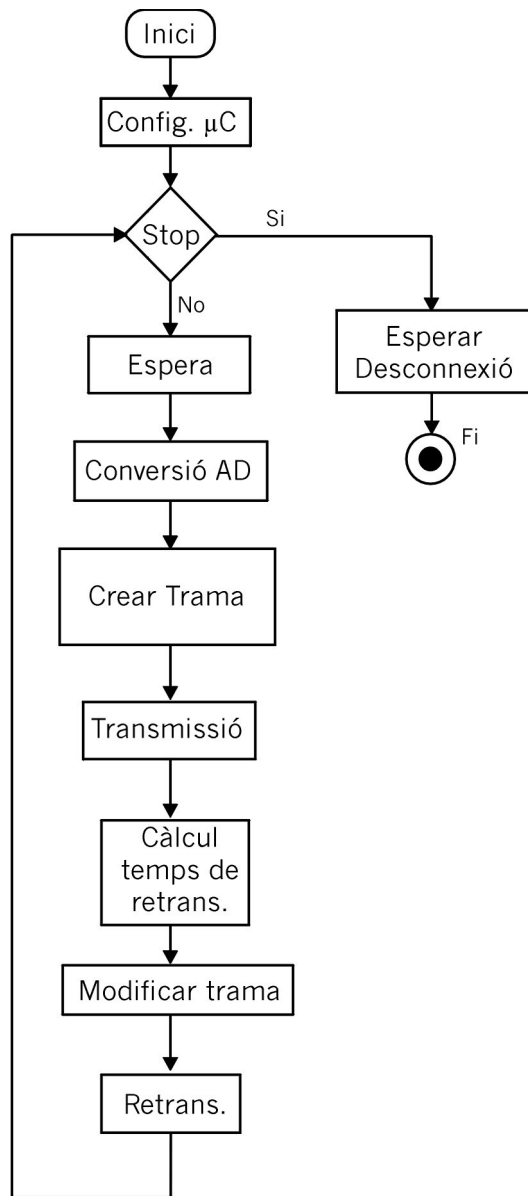


Figura 5.1: Diagrama de flux del firmware.

Configuració dels ports - macro *GPIOstartup*

GPIO és un port de 6 bits bidireccional. El registre TRISIO és el corresponent a la direcció de dades dels pins.

- ♣ Configurar els pins GP2, GP3 i GP4 d'entrada i GP0, GP1 i GP5 de sortida (Reg. TRISIO).
- ♣ Inicialitzar el registre GPIO per tal de tenir el valor 1 lògic en el pin GP0 i 0 en la resta de pins de sortida.

Deshabilitar el comparador - macro *CMPstartup*

Els dispositius rfPIC12F675 tenen un comparador analògic. Es poden configurar les entrades del comparador en els pins GP0 i GP1 i la sortida a GP2. Per l'aplicació que es presenta, no es requereix aquest comparador. S'escull l'opció en que es connecten les dues entrades a massa i la sortida queda desconnectada. Mode de mínim consum.

- ♣ Registre CMCON, bits CM2:CM0 = 111

Configuració del mòdul conversor A/D - macro *ADCstartup*

El rfPIC12F675 té quatre entrades analògiques, multiplexades a un circuit de *sample and hold*. La sortida del *sample and hold* està connectada a l'entrada del conversor. El conversor retorna un resultat 10 bits utilitzant dos registres. La referència de tensió utilitzada per la conversió és seleccionable per software.

Cal primerament configurar els pins GP2 i GP3, d'entrada analògica.

- ♣ Registre ANSEL, bits ANS<3:0> = 1100

Sel·leccionar el clock de conversió tal que sigui $F_{osc}/8$ per assegurar que el temps mínim de conversió sigui de $1.6 \mu s$. Exactament per a una freqüència de 4MHz, $8 \cdot T_{osc}$ és de $2 \mu s$.

- ♣ Registre ANSEL, bits ADCS<2:0> = 001

Configurar la sortida de la conversió per tenir el resultat justificat a la dreta. El bit de més pes (MSB) és el bit 10 (bit 2 del byte *ADRESH*). El byte de menys pes es troba en la variable *ADRESL*).

- ♣ Registre ADCON0, bit ADFM = 1

S'indica també que la referència utilitzada en la conversió sigui Vdd.

♣ Registre ADCON0, bit VCFG = 0

Inicialitzar variables - macros *VARstartup*, *MSGstartup* i *SLEEPstartup*

El programa empra *flags* per conèixer l'estat de l'execució. Bits 0 i 1 de la variable *varInit*. Aquests controlen que s'hagi arrencat apropiadament o bé si el programa està en procés de finalitzar. S'inicialitzen els dos bits a zero. A més es carrega de la memòria de dades EEPROM, el valor de l'identificador a transmetre (es desa a les variables *Msg_ID2*, *Msg_ID3* i *Msg_ID4*) i el temps d'espera entre transmissions (a la variable *cntSleep*).

♠ La macro *READ_EEPROM*, rep per paràmetres l'adreça de la memòria EEPROM i l'adreça de la variable a la memòria RAM. Aquesta còpia el valor del byte en la posició de la memòria EEPROM a la posició de la memòria RAM indicades.

L'adreça absoluta 0x2100 és un *mapeig* a l'adreça 0x0000 de la memòria de dades EEPROM.

S'implementa un programa per canviar el valor de la memòria de dades sense necessitat de recompilar el firmware².

Inicialitzar les interrupcions - macro *INTstartup*

Es pretén detectar el canvi d'estat en la línia *KillSign* pin GP3 del μ C. Una de les fonts d'interrupció és per canvi en el port GPIO.

Per això cal:

- ♣ Habilitar el bit GPIE del registre INTCON (Interrupt control register).
- ♣ Habilitar el bit IOC3 del registre IOC (Interrupt-On-Change GPIO register). La resta de bits es deixen a 0.
- ♣ Habilitar les interrupcions. Registre INTCON, bit GIE=1.

Alliberar el pulsador - macro *MCUstartup*

Fins aquest punt, el senyal de *reed*³ està a baixa, 0V. L'alimentació és deguda a que l'usuari manté el pulsador curtcircuitat. Es genera una espera de 2.41 s durant la

²Veure apartat 5.4

³Veure esquemàtic 3.2 i 3.3.

que el pulsador ha de mantenir-se pres, en finalitzar, es canvia el valor del pin GP1 (línia *reed*) al valor 1 lògic. I es genera tot seguit la seqüència de dades (alternança de valor 1 i 0 lògic amb freqüència de bit de 43.86 Hz) en el pin connectat al diode LED (*LEDB*) que es traduirà a una seqüència lluminosa per informar a l'usuari que pot allibera el pulsador. Es tracta d'un *polling* en el pin GP3 (senyal *KillSign*). Mentre aquest no prengui el valor 1 lògic el programa no avança. Finalment, en alliberar l'usuari el pulsador, es configura el flag referent a la inicialització amb el valor 1 (en accedir per primera vegada a la interrupció). Bit 0 (*P_init*) de *varInit*.

Per un correcte funcionament, en detectar-se que la línia *KillSign* pren el valor 1 lògic, cal esperar un temps per a permetre a l'usuari allunyar l'iman del pulsador magnètic (macro *Degauss_reed*) abans no s'entri en el llaç principal del programa.

5.1.2 Conversió Analògica Digital

La conversió A/D es realitza en la macro *ADconv*. Els punts de sensat a convertir són: *Vti*, connectat al pin GP2 (canal 3 de l'ADC) i *Vto*, connectat al pin GP4 (canal 4 de l'ADC). Cal en primer lloc sel·leccionar el canal (Registre *ADCON0*, bits *CHS0:CHS1*).

♡ Les macros *ADC_SEL_CH2* i *ADC_SEL_CH3* realitzen la sel·lecció dels canals 2 i 3 respectivament.

Seguidament s'encén el mòdul de conversió AD. A partir d'aquest punt inicia la càrrega de la capacitat de mostreig (*C_HOLD*).

♡ Les macros *ADC_ON* i *ADC_OFF* per encendre i apagar el mòdul de conversió AD respectivament.

Quan la capacitat *C_HOLD* té el valor final s'inicia la conversió. Aquesta inicia en assignar el valor 1 al bit *GO/DONE* del registre *ADCON0*. Es destina un temps suficient de 4.8 ms per a la càrrega de *C_HOLD*. La conversió finalitza quan el mateix bit canvia a valor 0. Es realitza un *polling* de l'estat d'aquest bit per saber quan acaba la conversió.

♡ La funció *WaitAD* detecta la finalització de la conversió i còpia els valors dels registres *ADRESH* i *ADRESL* a les variables *ADH* i *ADL*.

En el cas d'haver convertit el valor de tensió *Vti* s'assigna a 1 el bit 0 de la variable *AVG_CH*. Se l'hi assigna el valor 0 en cas d'haver convertit *Vto*. El bit en qüestió indica si les variables *ADH* i *ADL* contenen el valor de *Vti* i *Vto*.

♡ Les macros *sel_avg_Vti* i *sel_avg_Vto* identifiquen quin pin s'ha convertit.

Aquest procés es repeteix 128 vegades (valor de la constant *cntMean*). Acumulant el resultat de 10 bits en les variables *VtiH*, *VtiM* i *VtiL* (per la tensió *Vti*) i *VtoH*, *VtoM* i *VtoL* (per la tensió *Vto*). A on H, M i L identifiquen els bytes de més pes a menys pes. Finalment per a realitzar la mitjana es divideix el resultat entre 128 desplaçant el resultat 7 vegades (valor de la constant *cntDiv*) a l'esquerra. En acabar queda la mitjana en les variables *VtiM* i *VtiL* per *Vti* i *VtoM* i *VtoL* per *Vto*.

♡ La funció *Add_Avg* realitza l'acumulació. Comprova el bit 0 de la variable *AVG_CH* per saber en quines variables deixar el resultat (*Vti* o *Vto*).

♡ La funció *Average_acc* realitza la divisió.

5.1.3 Creació de la trama

Es destina l'espai de memòria de dades que va de l'adreça 0x34 a 0x3D per a emmagatzemar els bytes a enviar.

♡ La macro *MAKE_MESSAGE* compona el missatge.

La macro en qüestió, té disponibles la mitjana dels valors de tensió en els punts *Vti* i *Vto* i compona la trama a transmetre. Cada paquet de dades a enviar té 8 bits (7 per a dades i 1 de CRC). Es deixa els bits de *start* i *stop* a càrrec del mòdul de transmissió. Tenint els valors de tensió en *VtoM*, *VtoL* i *VtiM* i *VtiL* respectivament per els 10 bits de *Vto* i *Vti*, es desplacen els valors dels bytes per generar espai per el bit de paritat. Seguidament se'n calcula el valor per a cada camp.

S'utilitza de les funcions:

♡ Funció *ShiftData*. En realitzar la crida, el registre *W* ha de contenir el valor del byte alt. Aquesta desplaça els bits del byte alt i el seu successor.

♡ *CalcEvenParity*. En realitzar la crida, el registre *W* ha de contenir el valor del byte a calcular el bit de paritat parell.

L'últim byte a transmetre, veure taula 4.1 és el byte de CRC.

♡ La funció *CalcCRC* realitza el càlcul del CRC de les dades que van de l'adreça 0x34 a 0x3C. Deixa el resulta en la variable *Msg_CRC* adreça 0x3D.

5.1.4 Modul de transmissió

Aquest recull les dades provinents del mòdul que genera el missatge i les transmet amb el *baud rate* de 2400 Hz.

♡ La funció *SendMessage* realitza el recorregut en les dades a transmetre. Va col·locant en la variable TxReg el byte a transmetre. Seguidament realitza la crida a la funció *SendRS*

♡ La funció *SendRS* realitza la transmissió del byte que hi ha en l'adreça TxReg. Afegeix en el byte els bits de *start* i *stop*.

La crida a la funció *SendMessage* va precedida i precedeix a les macros:

♡ *PREPARE_TRANSMISSION*. Encén el transmissor, transmet un byte d'estabilització, valor 0x55 (macro *STABILIZING_TRANSMITER*) i espera el temps de transmissió d'un byte, 3.33 ms (macro *wait_byte*).

♡ *STOP_TRANSMISSION*. Apaga el transmissor.

5.1.5 Càlcul del temps de retransmissió

Com s'explica en l'apartat 4.2.2, el sistema d'anticol·lisió es basa en retransmetre les dades anteriorment transmeses en un interval de temps aleatori. Per a calcular l'instant de temps de la retransmissió, es realitzen 4 adquisicions amb l'ADC del pin GP0, que prèviament s'ha configurat com a pin d'entrada.

La nova trama a enviar, conté la mateixa informació que la enviada just anteriorment, però el bit de retransmissió canviat a valor 1. Bit 7 de la variable *Msg.repeat* del 5è paquet a transmetre. El 8è bit de la variable, també es canvia a 1 (bit de paritat). Després cal recalculat el CRC de la trama (10è byte).

♡ La funció *RandomWait* realitza el càlcul del temps inicial de la retransmissió, modifica la trama a enviar i la transmet utilitzant el mateix mòdul de transmissió explicat anteriorment.

5.1.6 Programació de la interrupció

Quan es serveix una interrupció el μ C fa el següent:

- ♠ El bit GIE es posa a 0 per deshabilitar interrupcions futures.
- ♠ Es carrega a la pila l'adreça de retorn.
- ♠ El PC és carregat amb l'adreça 0x0004.

La rutina de servei a la interrupció es troba a l'adreça 0x0004. Com s'ha explicat, saltarà la interrupció en produir-se un canvi en l'estat de la línia *KillSign*, pin GP3. En accedir-hi per primera vegada, assigna el valor 1 al bit 1 (*P_stop*) de la variable *varInit*. Quan el programa principal detecta el canvi en el valor d'aquest bit, salta al mòdul *Finalització de l'execució* (diagrama de la figura 5.1). Aquest comprova si el valor del pin GP3 continua valguent 0, per tant, si el pulsador es manté pres. De ser així finalitza l'execució del programa. En cas contrari assigna el valor 0 al bit *P_stop* i continua amb l'execució del programa⁴.

5.1.7 Esperar desconexió

En detectar-se que el bit *P_stop* de la variable *varInit* té el valor 1, es realitza la crida a la funció *MCUshutdown*. Aquesta encén el led de la pista *TxEn* (pin GP5) i el manté així durant 2.38 segons. Moment en que torna a comprovar si la línia es manté a alta. De ser així, indica a l'usuari que es moment d'alliberar el pulsador apagant el led, seguidament abaixa el nivell de tensió del pin GP1, i espera la descàrrega de la capacitat C1 (esquema elèctric figura 3.3).

5.1.8 Espera entre transmissions

El darrer mòdul, serveix per configurar la freqüència en la transmissió de trames. Com s'explica en 5.1.1, la macro *SLEEPstartup* ha obtingut en l'etapa de configuració el valor d'espera entre retransmissions. Serveix per reduir el nombre de trames transmeses i al mateix temps el consum. Per això s'implementa un bucle a la instrucció SLEEP. Aquesta deixa el μC en un consum mínim. El dispositiu es despertarà en desbordar-se el *Watchdog Timer*, configurat en l'etapa 5.1.1, al cap de 2.3 s. Segons el *prescaler* 1:128. O bé per interrupció de canvi en el port GPIO (cas que l'usuari premi el pulsador). És important tenir en compte que mentre la instrucció SLEEP és executada, es realitza el *pre-fetch* de la següent instrucció (PC+1). Així, si el motiu de despertar és la interrupció per canvi en el pin GP3, primerament executa la instrucció just després de la instrucció SLEEP i després salta a l'adreça d'interrupció 0x0004. Per què això no succeeixi, s'obta per col·locar la instrucció NOP rera la instrucció SLEEP.

El temps d'espera (en segons) entre transmissions, segueix aproximadament l'equació 5.1 per valors de $cntSleep \geq 1$.

$$T[s] = 2.25 + (cntSleep - 1) \cdot 3.15 \quad (5.1)$$

⁴Més sobre la seqüència de finalització en l'apartat 5.1.7

5.2 Llistat de fitxers

En la taula 5.1 es detalla el llistat de fitxers que forma el *firmware*, amb les seves macros i subrutines així com una breu definició de la seva funcionalitat.

AD_macros.inc	
ADC_ON	Connectar el mòdul ADC.
ADC_OFF	Desconnectar el mòdul ADC.
ADC_SEL_CH0	Escollir el canal 0 del conversor.
ADC_SEL_CH1	Escollir el canal 1 del conversor.
ADC_SEL_CH2	Escollir el canal 2 del conversor.
ADC_SEL_CH3	Escollir el canal 3 del conversor.
ADCstartup	Inicialitzar el mòdul ADC.
ADconv	Converteix i afegeix a la suma per a la mitja els canals 2 i 3.
RandomCalculate	Calcula el valor aleatori de 4 bits. Desa el resultat en la variable varRandom.
ADSubs.inc	
WaitAD	Realitza el polling de la conversió AD. En acabar, desa el resultat en les variables ADH i ADL.
RandomWait	Implementa l'espera de 16 intervals de 50 ms. Retransmet en l'interval indicat per la variable varRandom.
AvgMacros.inc	
sel_avg_Vto	Indica que les variables ADH i ADL contenen la última conversió AD de Vto.
sel_avg_Vti	Indica que les variables ADH i ADL contenen la última conversió AD de Vti.
Reset_AVG	Reinicialitza els valors de les variables que realitzen l'acumulació per a la mitja. Variables VtoH, VtoM i VtoL per Vto i VtiH, VtiM i VtiL per Vti.
AvgSubs.inc	
Add_Avg	Realitza la suma de ADH i ADL amb els acumuladors segons l'indicat per les macros sel_avg_Vto o sel_avg_Vti.
Average_acc	Computa la mitja. Desplaça a la dreta els acumuladors de Vto i Vti el nombre de vegades indicat per la variable cntDiv.

GenMacros.inc	
sel_bank_0	Sel·lecció del banc 0 de memòria.
sel_bank_1	Sel·lecció del banc 1 de memòria.
OPTIONstartup	Inicialització del registre OPTION.
GPIOstartup	Inicialització dels registres TRISIO i GPIO.
GPIO_inputCH0	Configurar el pin GP0 d'entrada analògica.
GPIO_outputCH0	Configurar el pin GP0 de sortida digital.
CMPstartup	Configurar el comparador.
INTstartup	Configurar i habilitar les interrupcions.
INTdisable	Deshabilitar les interrupcions.
VARstartup	Inicialitzar les variables d'estat del programa.
MCUstartup	Informa a l'usuari del moment d'alliberar el pulsador. Polling sobre el pin GP3.
noop_wait	Realitza 3 crides a la funció NoopWait passant-li per paràmetre en cada ocasió un dels 3 valors rebuts.
noop_wait_1	Realitza una crida a la funció NoopWait passant-li per paràmetre el valor rebut.
wait_byte	Implementa una espera del temps de transmissió d'un byte (3.33 ms).
wait_trantime	Implementa una espera del temps total de transmissió d'una trama (45 ms).
Degauss_reed	Implementa una espera per permetre a l'usuari allunyar l'iman del contactor magnètic.
SLEEPstartup	Obté de la memòria EEPROM la informació d'espera entre transmissions.
GenSubs.inc	
NoopWaitFlag	Implementa una espera en funció del valor en el registre W.
MCUshutdown	Manté el led encès durant 2.38 segons. Després, de mantenir-se el contactor pres, crida la funció HALTeval.
HALTeval	Comprovació final. Si l'usuari manté el pulsador pres, abaixa la línia reed que manté l'alimentació encesa i apaga el led per informar a l'usuari que pot alliberar el pulsador.

NoopWait	Implementa una espera en funció del valor de la variable NoWait.
MsgMacros.inc	
MAKE_MESSAGE DO_REPEAT_MESSAGE	prepara els paquets de dades per a ser enviats. Modifica els paquets de dades que cal per a la retransmissió.
STABILIZING_TRANSMITER	Realitza la transmissió del paquet d'estabilització, valor 0x55.
PREPARE_TRANSMISSION	Encén el transmissor, crida les macros STABILIZING_TRANSMITER i wait_byte.
STOP_TRANSMISSION MSGstartup	Apaga el transmissor. Obté de la memòria EEPROM, el valor de l'identificador a transmetre.
READ_EEPROM	Llegeix de la memòria EEPROM la posició relativa indicada per el paràmetre EEPROM_POS i la deixa en l'adreça.
MsgSubs.inc	
SendMessage	Realitza la transmissor de la trama de dades. Realitza la crida a la funció SendRS.
CalcCRC	Calcula el valor de CRC de la trama a enviar i el guarda en la variable Msg_CRC.
CalcEvenParity	Calcula el bit de paritat dels 7 bits de menys pes del registre W. Desa el resultat en el 8è bit.
ShiftData	En la informació que ocupa 2 bytes (tensions Vto i Vti abans de ser tranmeses), genera espai en el 8è bit del byte de menys pes shiftant a l'esquerra primerament el byte l'adreça del qual conté el registre W (byte alt) i escrivint tot seguit en el seu bit 0 el valor del bit 7 del byte de l'adreça següent (byte baix).
Rs_232.inc	
SendRS	Realitza la transmissió del byte que es troba en la variable TxReg. Amb baudrate de 2400Hz, bit de start i bit de stop.
temp.asm	
Inici del programa i programació de la interrupció.	
temp.inc	
Definició de constants i variables.	

5.3 Eina de suport per el desenvolupament

El firmware ha estat escrit amb l'entorn de desenvolupament MPLAB IDE software proporcionat per Microchip Tech. Inc. que conté integrats l'assemblador MPASM i el muntador d'objectes MPLINK.

5.4 Software per actualitzar dades EEPROM

L'assemblador MPASM i el muntador MPLINK generen un fitxer objecte de format hexadecimal per microprocessadors de 8 bits.

El fitxer objecte Hexadecimal és una forma de representar un fitxer objecte binari amb ASCII. Permetent així poder mostrar-lo en un suport no binari. Aquest format és utilitzat per programadors de PROM tal com el GALEP-4 de Conitec (veure apartat 3.1.5).

Per tant, després de compilar i enllaçar el firmware, en resulta un fitxer ascii amb extensió *hex* que representa el fitxer objecte binari. La taula 5.2 mostra el format de les parts inicial i final del fitxer Hexadecimal. Aquest està format per registres, cadascun dels quals conté els camps mostrats per la taula 5.3: el tipus de registre, el nombre de bytes del camp de dades, l'adreça de memòria en la que col·locar el primer byte de dades, les dades i finalment el *checksum*. El valor del *checksum* és el byte menys significant del complement a dos de la suma de tots els bytes de dades que el precedeixen, excluint el propi byte de *checksum* i els dos punts de començament de línia.⁵

En la memòria de dades EEPROM (adreça absoluta 0x2100), es guarda el valor de l'identificador de dispositiu (3 bytes) i el temps entre transmissions (1 byte). Per posar un exemple, s'escull com identificador el nombre decimal 556031 que amb hexadecimal és correspon a 0x87BFF. En concordança amb el protocol de transmissió, el valor que es pretén escriure a la memòria EEPROM és la representació del nombre en la que en cada byte hi ha 7 bits de dades i un bit de paritat. Per això desplaçant convenientment els 3 bytes de l'identificador per a deixar espai (en el 8è bit de cada byte) al bit de paritat, el valor hexadecimal anterior esdevé 0x2177FF. L'identificador de dispositiu, per tant, i com es veu en la taula 4.1, pot tenir un

⁵Especificació del format objecte Hexadecimal de Intel a [5]

```

:020000040000FA
:020000001528C1
:08000800A0000308A100640040
:100010008516C2180F28421C0F28C21485120B1017
:1000200021088300A00E200E0900FF2383169000F4
...
:10060000BE00A921FF30BE00A921C30BDC2A0800CF
:02400E000C3E66
:0842000021007700FF0005001A
:00000001FF

```

Taula 5.2: Format del fitxer objecte Hexadecimal.

Marca de registre ':'	Nombre de bytes	Posició d'inici	Tipus de registre	Dades	Checksum
1 byte	1 byte	2 bytes	1 byte	n bytes	1 byte

Taula 5.3: Format de registre genèric del fitxer objecte Hexadecimal.

màxim de 21 bits. Permetent un màxim de 2097152 de dispositius. Suficient per el nostre propòsit.

En la taula 5.2 hi ha part del codi compilat i enllaçat amb el valor de l'identificador de l'exemple anterior. En la penúltima línia s'observa en primer lloc i després dels dos punts el valor 08 que indica que el nombre de dades tipus byte, seguit de la posició d'inici 0x4200, el tipus de registre 00 significa que és un registre de dades i tot seguit tenim les paraules de 16 bits 0x2100, 0x7700 i 0xFF00 per l'identificador i 0x0500 per el temps entre transmissions. El byte 0x1A és el *checksum*. La posició d'inici 0x4200 es correspon a l'adreça 0x2100 (inici de la memòria EEPROM) indicada en el programa assemblador amb la directiva del compilador ORG. Encara que en el primer cas es referencia a la posició del byte, i en el segon de la paraula.

Es pretén desenvolupar un programa que en primer lloc interpreti el format Hexadecimal i que a partir de la ruta del fitxer objecte, del valor decimal de l'identificador i del retràs temporal, calculi el valor de l'identificador amb representació de byte de 7 bits de dades i 1 de paritat i ho escrigui tot plegat al seu lloc.

S'utilitza la programació orientada a objectes de C++. S'implementa la classe HexFile que interactua amb el fitxer Hexadecimal: permet llegir i escriure registres, calcular *checksums* i substituir informació entre altre coses. La classe en qüestió hereda de la classe GlbFile, la qual té una única funció que permet realitzar la conversió del valor ASCII a enter, indispensable quan es pretén entre altres coses calcular el *checksum*. La seva signatura és `int GlbFile::axtoi(char *hexStg)`

La classe HexFile té la següent definició

```
#include "GlbFile.h"

class HexFile : public GlbFile{
private:
FILE * pfile;
long foffset;
// data keeps ASCII hex data in dec format
struct data {
int reclen;
int offset[2];
int rectyp;
unsigned char *info;
int chksum;
} record;

public:
HexFile(); // constructor
~HexFile(); // destructor
bool GetRecord();
bool PutRecord();
void File2stdout();
bool OpenFile(char *); // open file for input as hex-file
void Rewind();
void Close();
void SetPos(long posOrig, int Orig);
int GetReclen();
int * GetOffset();
int GetRectyp();
unsigned char * GetInfo();
int GetChksum();
void CalcChksum(unsigned char *);
void ChangeData(int, char *, int);
int Offset2int();
};
```

La funció *main* realitza la interfície entre l'usuari i la classe HexFile. Mostra el menú de la taula 5.4 i es manté a l'espera de l'opció escollida per l'usuari per l'entrada estàndard.


```
Select 0: File name
Select 1: ID
Select 2: Enter ID Fields
Select 3: Mem. Position
Select 4: Set sleep time
Select 5: Print to file
Press 'h' to show this menu
Press 'x' to exit
```

Taula 5.4: Menú del programa per a l'actualització del fitxer Hexadecimal.

La funcionalitat de cada opció és la següent:

- ◇ La opció 0 serveix per indicar la ruta del fitxer Hexadecimal.
- ◇ La opció 1 per introduir l'identificador en format decimal. La funció `void ComputeIDfields(int,int *)` realitza la conversió al format de 7 bits de dades i un de paritat per byte.
- ◇ La opció 2 per introduir l'identificador directament amb el format de 7 bits de dades i un de paritat per byte.
- ◇ La opció 3 per introduir l'adreça absoluta de memòria de la EEPROM. S'introdueix el valor hexadecimal (sense el prefix '0x') en el cas que ens pertoca 2100. Per defecte ja està escollit aquest valor.
- ◇ La opció 4 per introduir el valor de temps d'espera entre transmissions. Valor decimal més gran que 0.
- ◇ La opció 5 per escriure els canvis en el fitxer.

El programa compilat i enlleçat s'anomena IDupdate.

Capítol 6

Software del PC

En aquest capítol s'analitza l'estructura del programa d'ordinador encarregat de rebre i interpretar la informació provinent del receptor. El llenguatge de programació utilitzat és el Visual Basic de Microsoft, en la seva versió 6.0.

6.1 Diagrama de flux

La figura 6.1 mostra el diagrama de flux de les tasques a realitzar per el software en les etapes de recepció i processament. A mesura que van arribant les dades en el port sèrie, amb el format de l'estàndard RS232, primerament es comprova que la trama ha estat rebuda sense error i que no coincideix amb la trama anterior, es desestima en cas contrari. Posteriorment es processen les dades i s'obté la informació de l'identificador del dispositiu i els valors de tensió en els punts V_{to} i V_{ti} . Seguidament es realitza el càlcul del valor de la resistència NTC (equació 2.1) i d'ella s'obté el valor de temperatura. Finalment es mostra tot plegat en la pantalla de l'ordinador o PDA, o bé es desen en un fitxer per a un anàlisi posterior.

6.2 Programa

Les tasques a portar a terme per el programa de recepció, diagrama figura 6.1, es poden classificar en quatre parts principals que interactuen entre elles, de les quals es desprenen les classes següents:

Classe ClsComm encarregada de la comunicació. Rep les dades provinents de la UART i les processa en busca d'una trama vàlida.

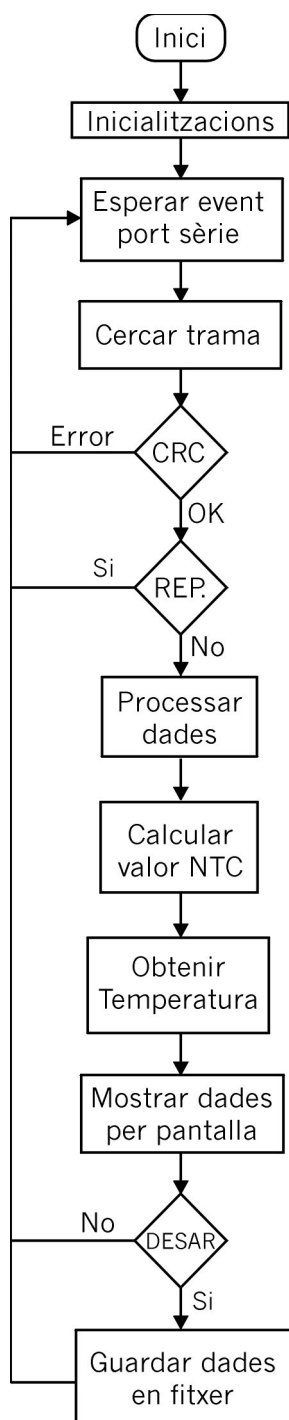


Figura 6.1: Diagrama de flux del software en les etapes de recepció i procés.

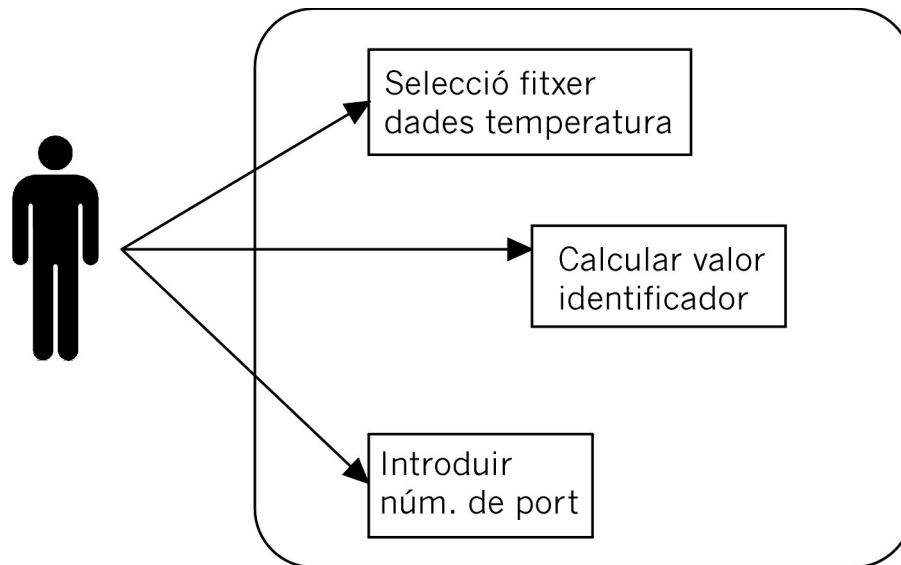


Figura 6.2: Diagrama de les possibilitats inicials del formulari principal.

Classe ClsData rep la trama obtinguda per ClsComm. Obté l'identificador i els valors de tensió. Realitza el càlcul de la resistència NTC, i amb la seva corba característica obté el valor de temperatura.

Classe Form és la classe primària (en el programa rep el nom de FrmMain). Encarregada de l'interfície amb l'usuari. Recull les seves peticions i mostra els resultats obtinguts per ClsData. Gestiona els objectes de la resta de classes. FrmMain únicament pot mostrar la informació d'un únic dispositiu. Per visualitzar informació d'altres dispositius pot crear nous objectes de tipus form (en el programa reben el nom de FrmSec).

Classe ClsFile escriu els resultats a memòria si es precisa.

L'usuari interactua amb el formulari principal, classe FrmMain. A través del seu *front-end*, veure diagrama figura 6.2, pot inicialment seleccionar el fitxer amb les dades de la corba característica del termistor (relació entre resistència i temperatura) o bé, introduir el número de port en el que hi ha connectat el receptor en l'ordinador, o finalment prémer el botó *calcID* que donat un número entre 0 i 2097151 (identificador) el desglossa amb tres bytes, cadascun d'ells amb el bit de paritat. La figura 6.3, mostra la pantalla principal del software de recepció. El formulari està ordenat en 3 grups d'elements principals, de dreta a esquerra, *Port*, *Controls* i *Device*.

En introduir el número de port i prémer el botó *Open port*, veure digrama de la figura 6.4, s'habiliten la resta de botons del programa i es crea i s'inicialitza

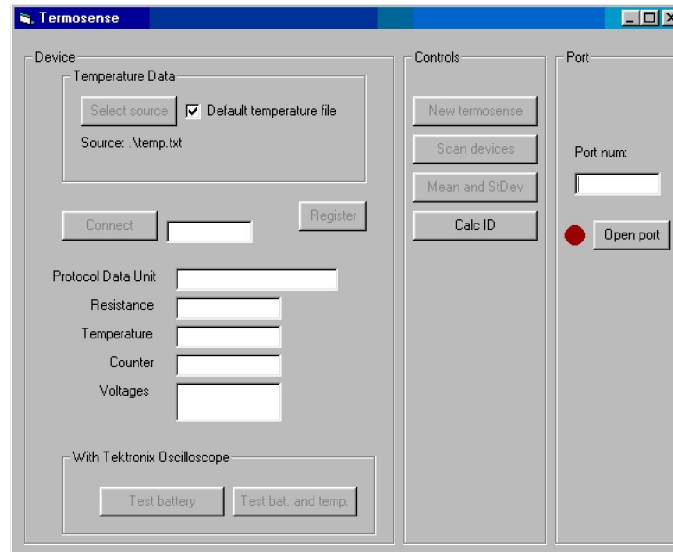


Figura 6.3: Formulari principal.

l'objecte de la classe `ClsComm` així com el control de port sèrie `MsComm`.

Els botons habilitats són:

Botó Scan devices en el grup *Controls*, serveix per mostrar tots els dispositius que estan dins l'àrea d'acció de l'antena receptora.

Botó Mean and StDev en el grup *Controls*, que en ser pres, es visualitza la pantalla de la figura 6.5. Permet enregistrar el valor de temperatura i resistència, d'un o dos dispositius diferents, i calcular la mitjana i desviació estàndard dels valors de resistència obtinguts. És d'utilitat per a desenvolupar alguns dels tests sobre la precisió del capítol 8.

Botó Connect dins el grup *Device*, serveix per a connectar-se a el dispositiu introduït en la caixa de text del costat i mostrar la seva informació cada vegada que arriba una nova trama que li pertany. En prémer *Connect*, es crea un nou objecte de la classe `ClsData`, a la que se li associa l'identificador de dispositiu i el fitxer amb les dades de temperatura indicat en el subgrup *Temperature Data*. La seva activació, provoca que s'habilitin els botons *Register*, per guardar les dades rebudes, i els *Test battery* i *Test bat. and temp.* del subgrup *With Tektronix Oscilloscope* per establir comunicació amb l'oscil·loscopi Tektronix via un segon port sèrie i obtenir els valors de tensió que si enregistren. Utilitzats únicament per aplicacions de test.

Botó New Termosense del grup *Controls*, mostra una nou formulari de la classe `FrmSec` amb el *front-end* igual a la del grup *Device* de la pantalla principal,

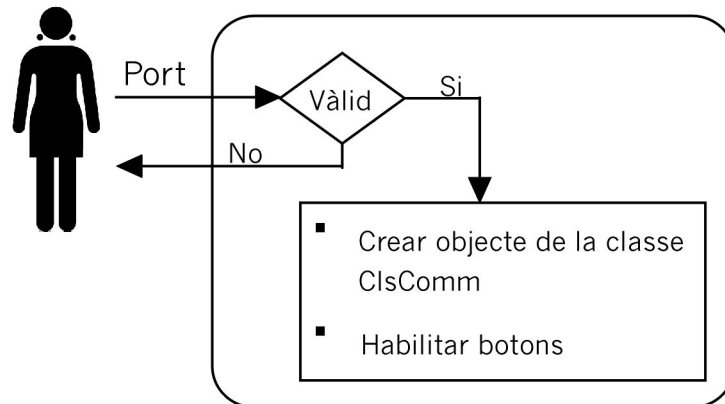


Figura 6.4: Diagrama de les accions a realitzar en introduir el número de port.

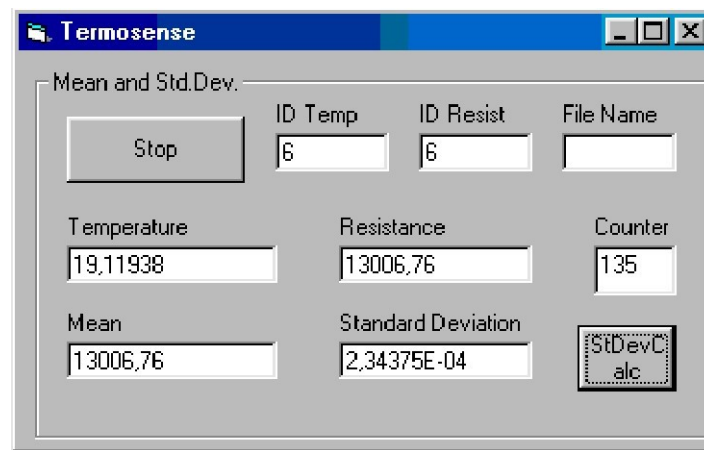


Figura 6.5: Càlcul de la mitjana i desviació estàndard del programa de recepció.

sense els botons de comunicació amb l'oscil·loscopi, que permet visualitzar i enregistrar dades d'un nou dispositiu.

La figura 6.6 mostra el programa en execució, amb *scan* de dispositius actiu i mostra com es visualitzen les dades dels dispositius seleccionats.

La classe FrmMain, després d'incialitzar el control de port sèrie MsComm i l'objecte de la classe ClsComm, està a l'espera de l'event generat per MsComm en rebre dades, event *OnComm*. Es genera la seqüència mostrada en el diagrama de la figura 6.7, en la que interactua la classe FrmMain amb la resta de classes per a processar, visualitzar i enregistra, si cal, les dades.

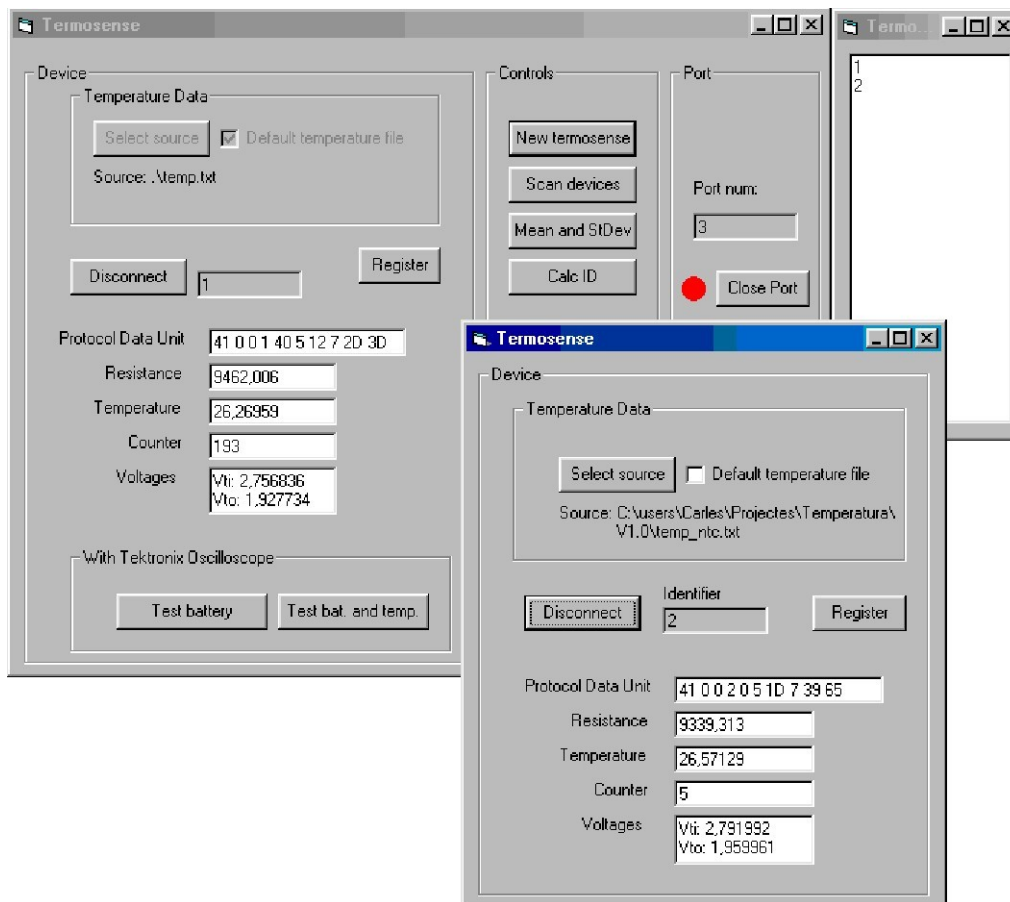


Figura 6.6: Programa de recepci3.

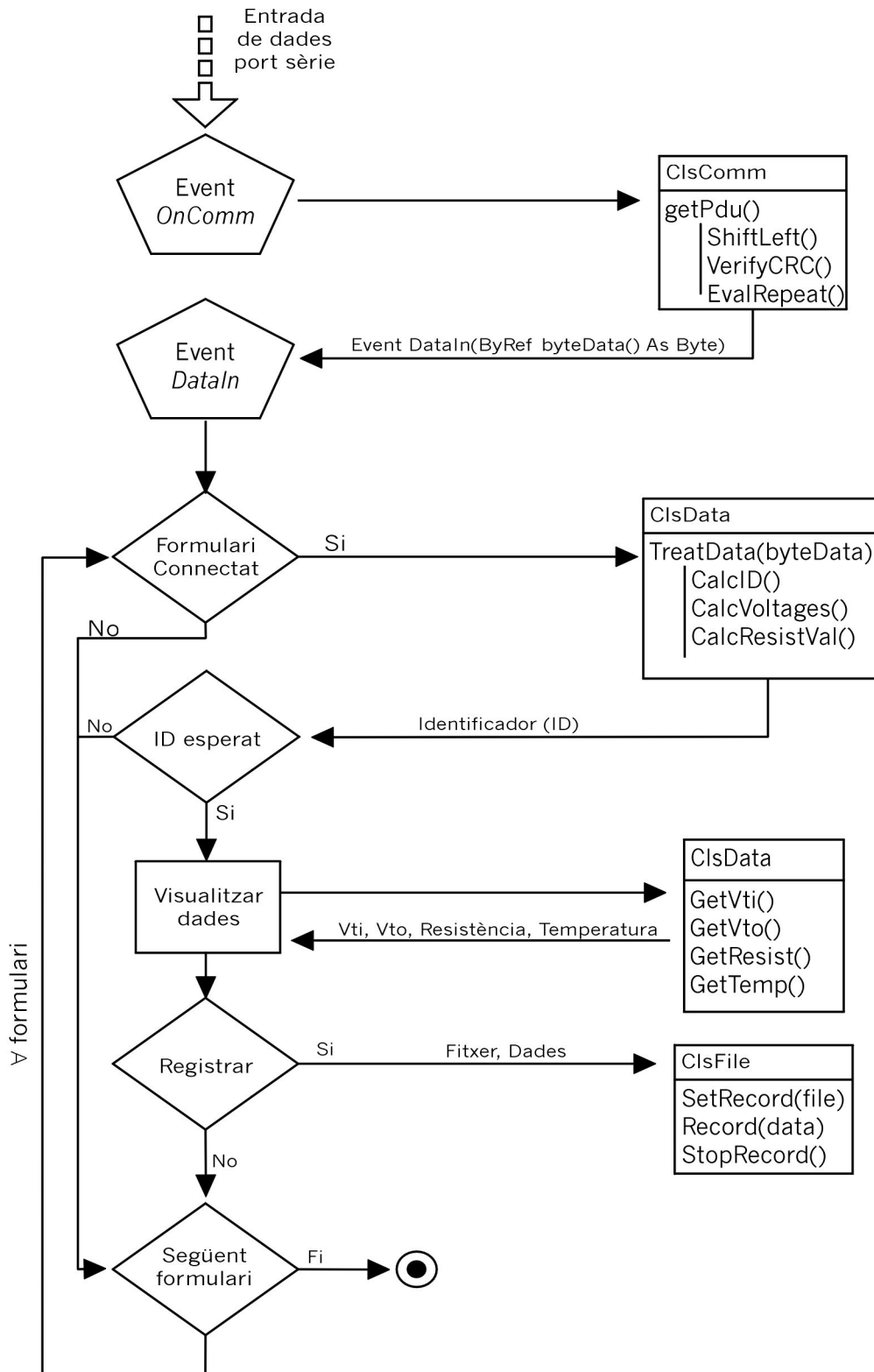


Figura 6.7: Interacció entre els objectes de les diferents classes.

6.2.1 Classe ClsComm

Quan es genera un event en el control de port sèrie MsComm, és tractat per la classe mare FrmMain, que transmet tot seguit les dades rebudes a l'objecte de la classe ClsComm. Aquesta classe retorna d'entre les dades, la primera trama amb capçalera de protocol Termosense, CRC correcte i no repetida.

La classe ClsComm té la següent definició:

```
Private ObjSerial As Object
Private byteCRC As Byte
Private byteData(0 To 9) As Byte
Private bolCrcOK As Boolean
Private bolCrcOKold As Boolean
Private ObjComm As Object
Private Const intNelems As Integer = 10

Public Event DataIn(ByRef byteData() As Byte)

Public Function getPort() As Integer
Public Function StartComm() As Integer
Public Function StopComm() As Integer
Public Function GetStat() As Boolean
Public Function inBufferCount() As Integer
Public Sub Initialize(ByRef inObjSerial As Object, inPort As Integer, _
    inSettings As String, inRThreshold As Integer, _
    inInputLen As Integer, inInputMode As Integer)
Public Sub Output(inStr_ As String)
Public Sub getPDU()
Private Sub ShiftLeft()
Private Function VerifyCRC() As Boolean
Private Function EvalRepeat() As Boolean
```

6.2.2 Classe ClsData

S'encarrega de processar les dades que proporciona la classe ClsComm. Per obtenir-ne la informació del dispositiu, valor de les tensions en els nodes sensats, realitza el càlcul del valor de resistència del termistor i la temperatura associada mitjançant el fitxer amb la relació entre temperatura i resistència indicat. Té les funcions per a calcular la desviació estàndard dels valors de resistència rebuts. Cada objecte de la classe ClsData, processa únicament si l'identificador de la trama és el mateix

que l'objecte té associat en la variable *lngID*. La funció *UpdateID(inlngID as Long)* permet associar un nou identificador a l'objecte.

La classe *ClsData* té la següent definició:

```
Private sngResist As Single
Private sngTemp As Single
Private sngVti As Single
Private sngVto As Single
Private bolResistOK As Boolean
Private byteData() As Byte
Private intTempData() As Single
Private intTemp() As Long
Private lngID As Long
Private sngR() As Single
Private intNelem As Integer
Private intElemTemp As Integer
Private intCnt As Integer

Public Function TreatData(arrPacket() As Byte) As Boolean
Public Function CalcID(arrPacket() As Byte) As Long
Public Function GetResist(ByRef valRet As Single) As Boolean
Public Function calc_StdDev(dblMean As Double) As Single
Public Sub GetTemp(ByRef valRet As Single)
Public Sub GetVti(ByRef valRet As Single)
Public Sub GetVto(ByRef valRet As Single)
Public Sub UpdateID(inlngID As Long)
Public Sub LoadTempArray(ByRef filePath As String)
Public Sub AddrVal_StdDev(sngVal As Single)
Public Sub Init_StdDev()
Public Sub GetIDFields(lngID As Long, fields() As Byte)

' Returns the word formed by concatenating two bytes.
Private Function MakeWord(ByVal LoByte As Byte, _
                        ByVal HiByte As Byte) As Long
' Returns the word formed by concatenating three bytes.
Private Function MakeWordID(ByVal LoID As Byte, _
                        ByVal MeID As Byte, ByVal HiID As Byte) As Long
Private Sub Class_Initialize()
Private Sub CalcVoltages()
Private Sub ShiftRight(ByRef VtM As Byte, ByRef VtL As Byte)
Private Sub CalcResistVal()
```

```
Private Sub CalcTemp()
```

6.2.3 Classe ClsFile

Enregistra les dades transmises a l'objecte a través de la funció *Record*, en el fitxer passat per paràmetre a la funció *SetRecord*.

La classe ClsFile té la següent definició:

```
Dim Filenum As Integer
Dim bolActive As Boolean

Public Function isActive() As Boolean
Public Sub SetRecord(FileName As String)
Public Sub StopRecord()
Public Sub Record(strData As String)
Private Sub regFileOpen()
Private Sub regFileClosed()
Private Sub Class_Initialize()
```

Capítol 7

Encapsulat

D'acord amb les especificacions inicials del sistema, el seu àmbit de treball serà majoritàriament en medis aquosos i per tant conductius de corrent elèctric. Ja sigui submergit en aigua o sang. Per això cal evitar el curtcircuit elèctric mitjançant l'encapsulament. En aquest capítol es fa referència a l'encapsulat, tant pel que fa a materials utilitzats com al procediment.

7.1 Materials i procediment

Durant el seu funcionament, les bateries de liti generen gasos. Per això cal que l'encapsulat, a més de ser impermeable i no conductor, no sigui excessivament rígid. S'opta per utilitzar un elastòmer per a l'encapsulat per les característiques més favorables d'elasticitat que presenta en vers l'*epoxy*.

Es realitzen proves amb dos elastòmers de silicona diferents. La silicona MED-4210 fabricada per Nusil [9], [10] i [11] i la Sylgard 184 fabricada per Dow Corning [12]. En ambdós casos es proporciona un *kit* de dos components líquids, el producte base i l'agent curador. En mesclar-se la base i el curador amb proporció de pes 10:1, augmenta la viscositat de la barreja. La curació es porta a terme a temperatures que van des dels rangs de 25 a 150°C, amb una duració que serà de 24 hores en el primer cas i 15 minuts en el segon. Una diferència a tenir present entre els dos productes, és que l'elastòmer de Nusil és apta per ser utilitzat en aplicacions biomèdiques. És un producte amb biocompatibilitat de curta durada¹. Encara que la Sylgard 184 té una baixa toxicitat, no s'esmenta la seva biocompatibilitat en la documentació del producte. Això caldrà tenir-ho present si aquest és un factor indispensable en la homologació del producte per a transplants. Per a la

¹Es desaconsella utilitzar-l'ho en implants a persones en un període més llarg de 29 dies.

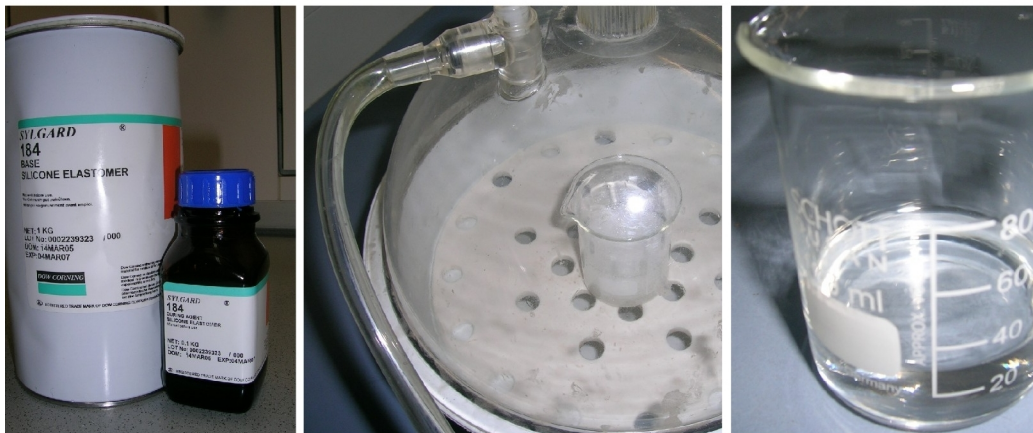


Figura 7.1: Fotografia de l'elastòmer utilitzat, el procés de buit i la barreja de la base amb l'agent curador sense aire.

resta d'aplicacions, així com assajos clínics amb animals es podrà utilitzar la Dow Corning.

En realitzar-se la barreja de la base amb l'agent curador, s'introdueix una gran quantitat de bombolles d'aire. Per això cal extreure'n l'aire fent-li el buit a la mescla. La silicona MED-4210 té una viscositat molt més gran que la Sylgard 184. Per a una mateixa quantitat de producte, el procés de buit pot durar fins a 2 hores en el cas de la silicona de Nusil, mentre que amb la Dow Corning el procés s'allarga poc més de 15 minuts. Aquest factor és decisiu en l'elecció de l'elastòmer Sylgard 184 de Dow Corning en front al de Nusil per aplicacions en les que no es requereixi l'esmentada biocompatibilitat. Les imatges de la figura 7.1 mostren d'esquerra a dreta, l'elastòmer de Dow Corning, el procés de buit i la barreja sense aire després de realitzar-ne el buit.

Per a encapsular els dispositius Termosense, cal preparar una estructura que ens permeti abocar silicona líquida al damunt del dispositiu, i que un cop curada permeti retirar el conjunt. Per això s'implementa mitjançant policarbonat l'estructura consistent amb una base de 3 mm de gruix que es mostra en la figura 7.2 i diferents peces també de policarbonat de 3 mm de gruix (figura 7.3) per a delimitar-ne el volum. Utilitzant 4 peces s'obté un gruix de 12 mm, suficient per encapsular el dispositiu. La base permet crear fins a quatre recintes, el que suposaria utilitzar 12 peces. La figura 7.4 mostra l'estructura per encapsular dos dispositius.

La baixa viscositat de la barreja creada amb el producte Sylgard 184, obliga a establir un protocol especial per a l'encapsulat. Primerament s'aboca la barreja en el recinte preparat, i es deixa curar durant 15 minuts a la temperatura de 65°C. S'aconsegueix així fer guanyar suficient viscositat per què en col·locar el dispositiu

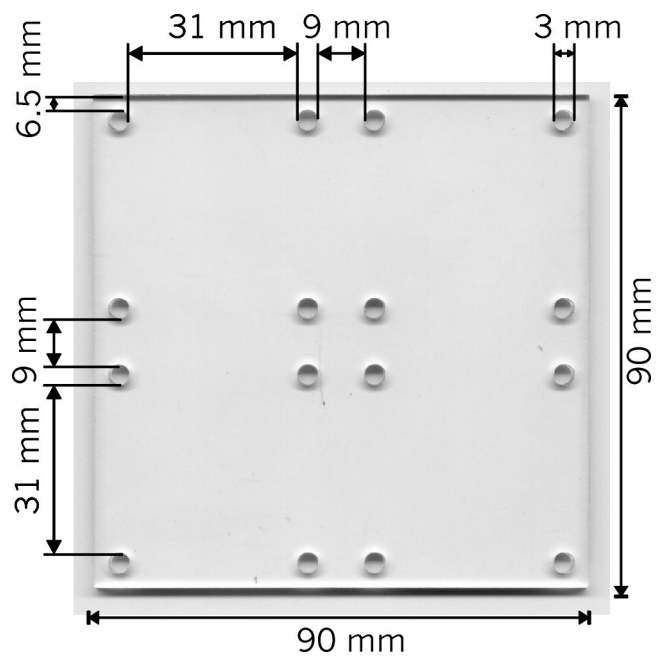


Figura 7.2: Base de policarbonat per a l'encapsulament.

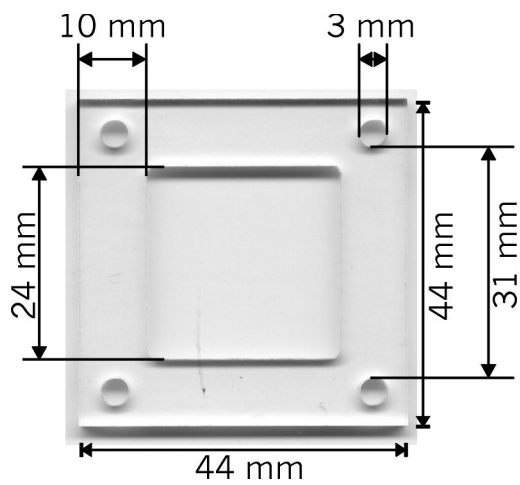


Figura 7.3: Peça delimitadora de policarbonat de 3 mm de gruix per a l'encapsulament.

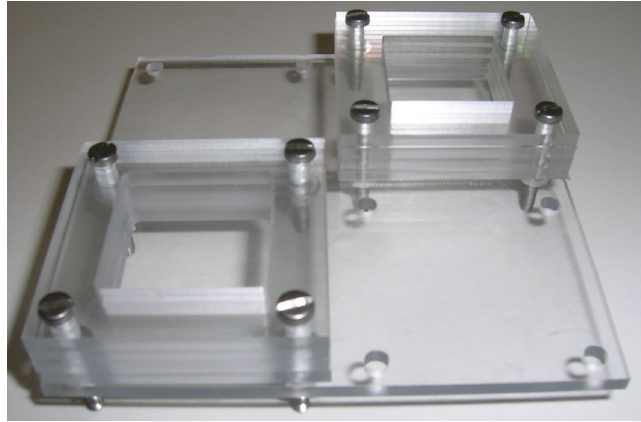


Figura 7.4: Estructura per a l'encapsulament de dos dispositius.

al damunt, aquest no toqui a la base de l'estructura i quedi per tant, envoltat de silicona per tots els costats. Després de col·locar els dispositius, s'aboca la resta de silicona necessària, tenint cura que el dispositiu no es giri i toqui amb cap cantó a la paret del recinte i es torna a posar al forn durant 3 hores a 50°C. La figura 7.5 mostra amb fotografies el procés explicat. Per encapsular 2 dispositius, amb la silicona Sylgard 184, és suficient amb una proporció de 15 grams per la base i 1.5 grams per el curador. Amb la silicona MED-4210, les quantitats són 18 grams per la base i 1.8 grams per el curador.

La figura 7.6 mostra els resultats del procés.

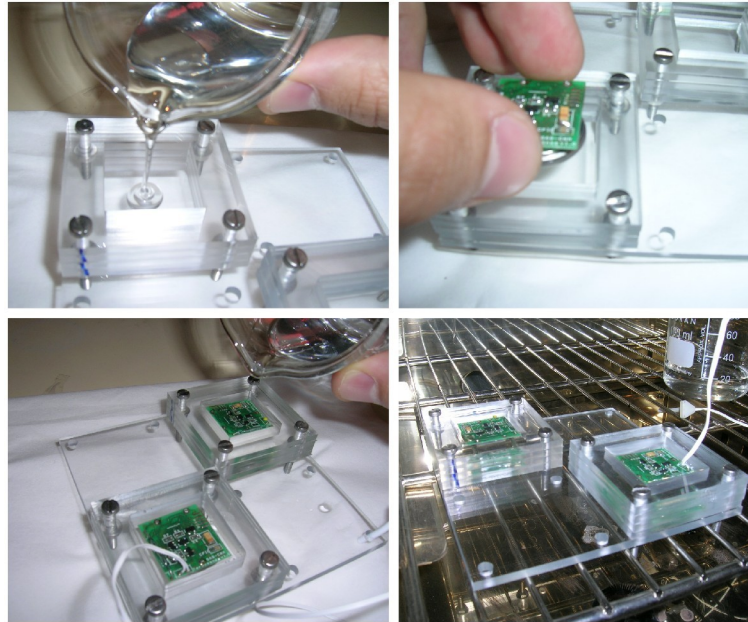


Figura 7.5: Procés d'encapsulat.

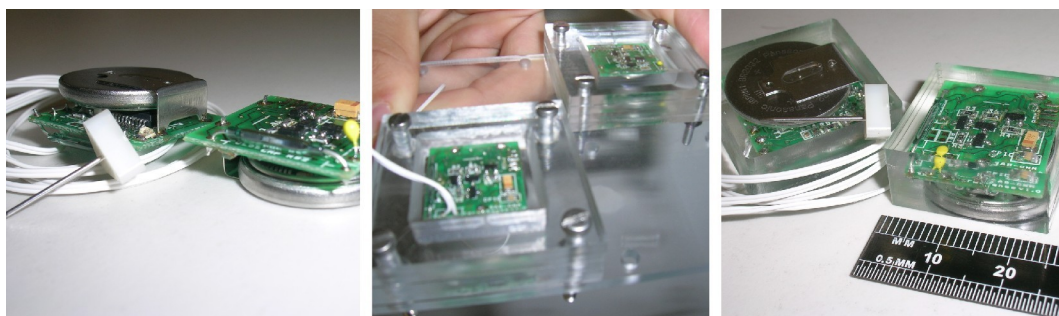


Figura 7.6: Abans, durant i després de l'encapsulament (d'esquerra a dreta).

Capítol 8

Test i verificació

En el desenvolupament de tot producte, la part de test té una gran importància perquè verifica que el dispositiu funciona de manera correcta en les condicions de treball marcades. En aquest capítol s'exposen els tests realitzats que permeten garantir que el producte té el comportament esperat.

8.1 Anàlisis

Per focalitzar cadascun dels aspectes crítics del sistema i treure la influència d'altres factors, es separa la verificació en diferents parts, donant lloc als diferents anàlisis. Finalment es verifica tot el conjunt.

El aspectes crítics del sistema són:

- Precisió en el sensat de resistència a temperatura ambient.
- Efecte de la variació de temperatura en el sensat de resistència.
- Funcionament de l'alimentació del sistema a baixes temperatures.
- Efecte de l'encapsulat en el funcionament de la bateria.
- Validar l'encapsulat.
- Verificar corba característica del termistor.
- Funcionament del *firmware* sota un ús inapropiat i/o mal intencionat.

Punt corba característica [°C]	Resistència mesurada	Mitjana obtinguda	Desviació estàndard obtinguda	Error mig [Ω]	Error mig [°C]
50.57	3285	3278.80	14.53	6.2	0.04
34.54	6655	6668.35	14.19	13.35	0.04
25.38	9837	9822.63	0.00	14.37	0.03
19.21	12954	12999.13	18.41	45.13	0.08
16.07	14958	15005.33	0.00	47.23	0.07
8.11	21829	21861.29	0.00	32	0.03
4.2	26481	26489.56	10.63	8	0.01
-0.10	32923	32913.39	0.00	9.61	0
-1.76	35875	35828.57	30.27	46.43	0

Taula 8.1: Avaluació de la precisió del sistema a temperatura ambient sense l'agulla de temperatura.

8.1.1 Precisió en el sensat de resistència a temperatura ambient

Per avaluar la precisió del sistema a temperatura ambient sense l'agulla de temperatura, es mesuren resistències de valor conegut d'entre el total de valors resistius de la corba característica del termistor. Es repeteix la mesura un total de 100 vegades i se'n calcula la mitja i desviació estàndard que permetran obtenir l'error mig expressat en ohms i graus centígrads. La taula 8.1 mostra els resultats. S'observa en el pitjor cas, que el sistema és 4 vegades més precís que el termistor de Genesee BioMedical (amb error de $\pm 0.2^\circ\text{C}$).

Les mesures de resistència preses com a referència en el test, han estat realitzades amb el producte Solartron de Ametek Inc.

8.1.2 Efecte de la variació de temperatura en el sensat de resistència

Es pretén estudiar l'efecte de la disminució de temperatura en l'electrònica del sistema transmissor. Es pren la mateixa resistència del test anterior, de valor 12954 Ω (als 25°C). Es tracta d'una resistència SMD de la marca Multicomp amb coeficient tèrmic de 200 ppm/°C. A la temperatura de 2°C té un valor òhmic de 12912.55 Ω . Es realitzen 1741 mesures amb un temps aproximat entre mesures de 5 segons i s'obtenen els resultats mostrats en la gràfica de la figura 8.1. La mitjana i desviació estàndard obtinguts són 12895.71 i 17.42 respectivament, que es corresponen a un

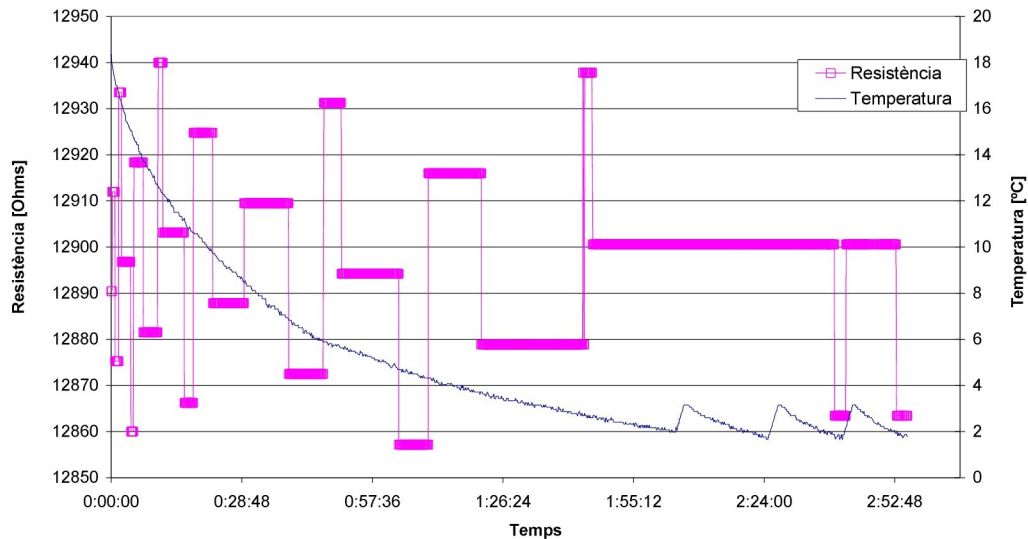


Figura 8.1: Sensat de resistència amb decrement de temperatura.

error mig de 16.84Ω i 0.03°C (prenent la corba de calibració del termistor). L'error mig representa el 0.13% de la mesura real i la desviació el 0.135% de l'error mig. Es verifica novament la millora en la precisió del sistema respecte la del termistor.

8.1.3 Funcionament de l'alimentació del sistema a baixes temperatures

Cal assegurar que en sotmetre el dispositiu transmissor a baixes temperatures, el nivell de tensió es manté suficientment elevat per poder aguantar les baixades de tensió de 400mV provocades per els polsos de descàrrega de 12mA (veure apartat 3.1.3). Per això es deixa un dispositiu funcionant, amb un temps aproximat entre transmissions de 18 segons, i s'enregistra la descàrrega de la seva bateria.

En la gràfica de la figura 8.2 es mostren les corbes de temperatura i de tensió de bateria en els polsos de màxima descàrrega en que el nivell de tensió és més baix. La descàrrega és molt plana, tal i com confirma la seva documentació [7], i no és fins el 20è dia que la tensió baixa dels 2 volts. S'observa entre els dies 9 i 10 que l'augment de temperatura comporta un increment de tensió de fins a 170mV. Es demostra doncs, que La influència de la temperatura al dispositiu transmissor no és crítica, a l'entorn dels 0°C .

No s'analitza l'efecte a temperatures elevades (a l'entorn dels 50°C) ja que la documentació [7] especifica un increment de tensió.

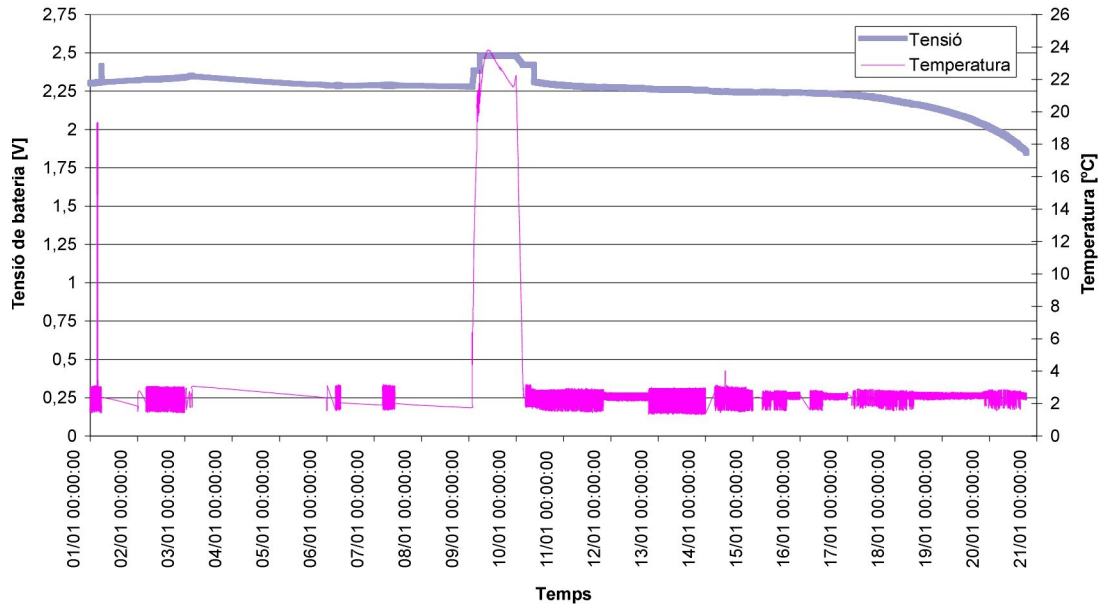


Figura 8.2: Test funcionament bateria a baixes temperatures.

8.1.4 Efecte de l'encapsulat en el funcionament de la bateria

Per avaluar aquest efecte, es prenen tres bateries, dues de les quals s'encapsulen amb un elastòmer de Nusil, referència MED-4210 [9], [10] i [11]. Veure fotografia de la figura 8.3. Per situar-nos en el pitjor cas, se'ls provoca una descàrrega constant d'aproximadament 12mA, i s'enregistra en cada una d'elles la tensió de bateria. Es representen els resultats en la gràfica de la figura 8.4. Comparant els tres resultats, queda clar que la silicona no té cap influència en la descàrrega de la bateria.

8.1.5 Validar l'encapsulat

Es deixa el dispositiu funcionant sota aigua durant aproximadament 24 hores, en unes condicions similars a les definides per els requeriments. Es comprova que la silicona és completament impermeable i es valida així el procés d'encapsulat. La figura 8.5 recull els resultats.

8.1.6 Verificar corba característica del termistor

Cal comprovar que la corba de característica es correspon al termistor utilitzat, i al mateix temps verificar el sistema globalment. Per això amb l'ajuda d'una cam-

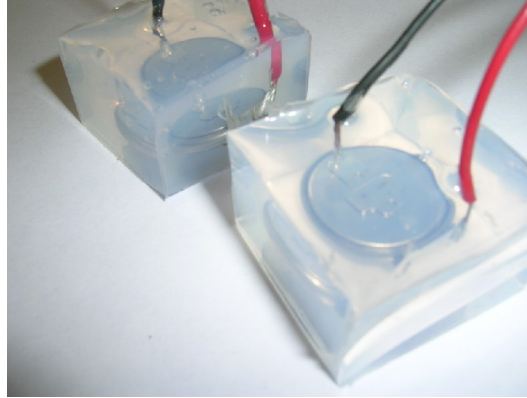


Figura 8.3: Bateries encapsulades.

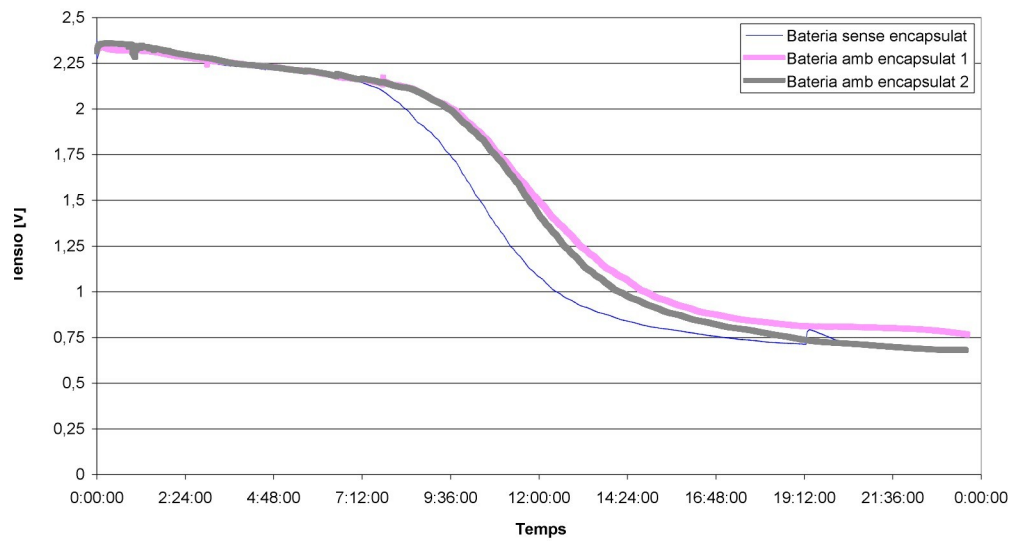


Figura 8.4: Test encapsulat bateries.

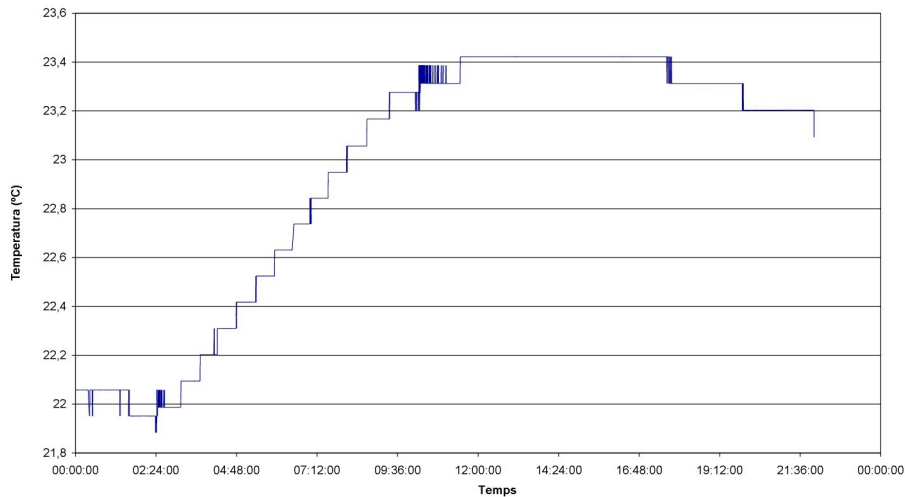


Figura 8.5: Enregistrament de temperatura d'un dispositiu submergit en aigua.

bra climàtica i un termòmetre homologat per la comunitat europea, fabricat per Hanna Instruments [13], amb una precisió de $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$, es realitza un escombrat de temperatures des de -5 a $+50^{\circ}\text{C}$ i s'enregistren els valors de temperatura obtinguts per el termòmetre i el Termosense. Les gràfiques que en resulten es mostren en les figures 8.6, 8.7 i 8.8. La gràfica de la figura 8.9 mostra la diferència entre els valors de temperatura obtinguts amb el termòmetre i el Termosense. La màxima diferència és de gairebé 0.4°C . Pot ser deguda a l'acumulació d'errors dels dos sensors, o possiblement a un error humà, pel fet d'haver hagut d'anar anotant manualment el valor tèrmic donat per el termòmetre. El valor mig de la diferència és 0.14°C .

8.1.7 Funcionament del firmware sota un ús inapropiat i/o mal intencionat

Encara que aquest anàlisi no dona un resultat numèric com els anteriors, s'han buscat les flaqueces en el firmware del dispositiu transmissor per assegurar-ne un comportament controlable en tot moment. Cal evitar que el dispositiu pugui entrar en un estat incontrolat, en el que per exemple, no s'hagin habilitat les interrupcions i per tant no hi hagi manera de ser aturat. Com podria succeir si un usuari no seguís el protocol establert d'encesa i apagat.

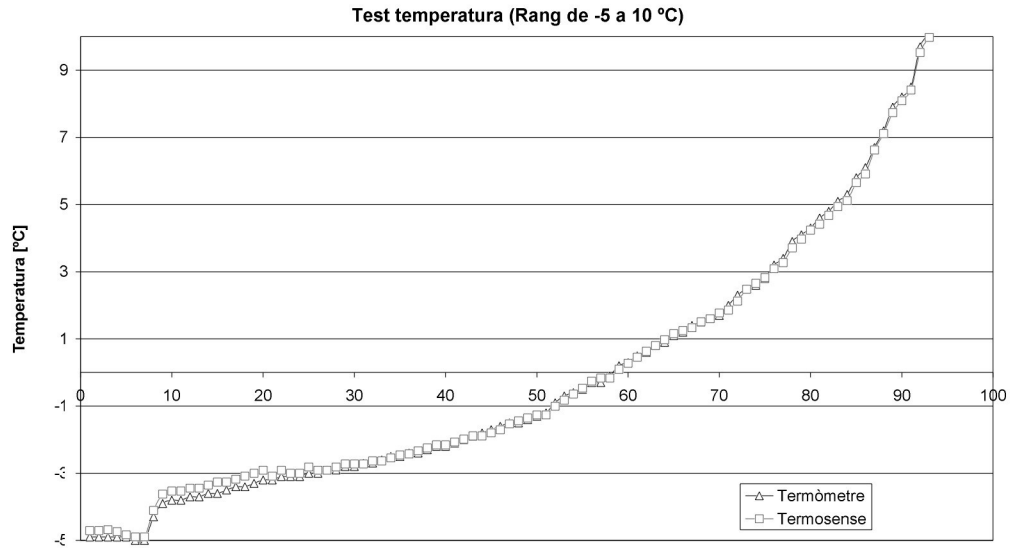


Figura 8.6: Test temperatura, rang de -5 a 10 °C.

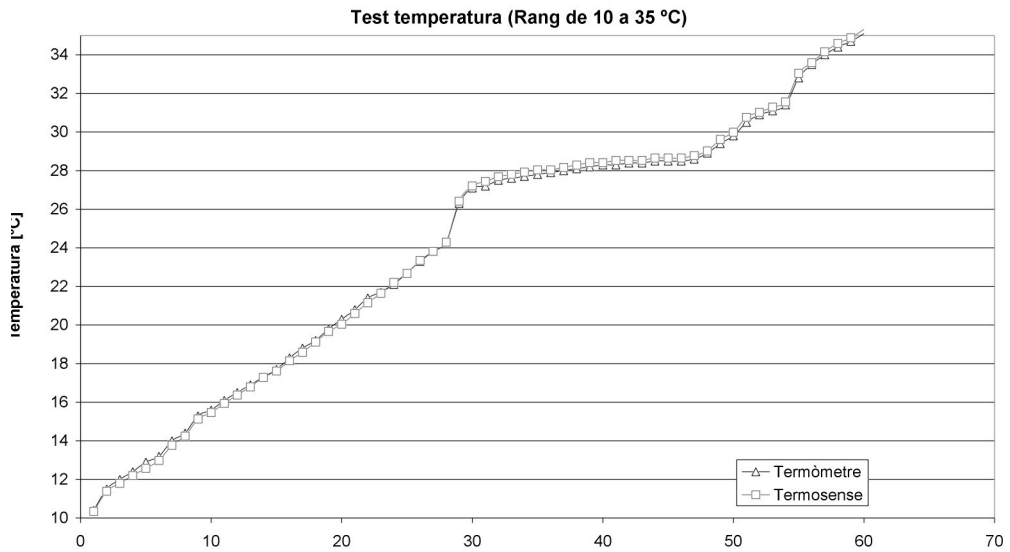


Figura 8.7: Test temperatura, rang de 10 a 35 °C.

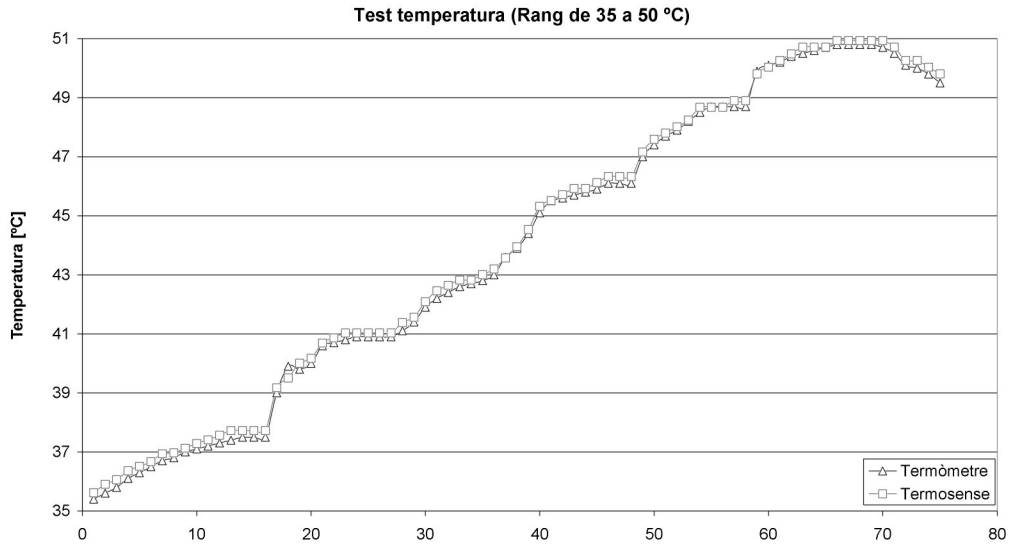


Figura 8.8: Test temperatura, rang de 35 a 50 °C.

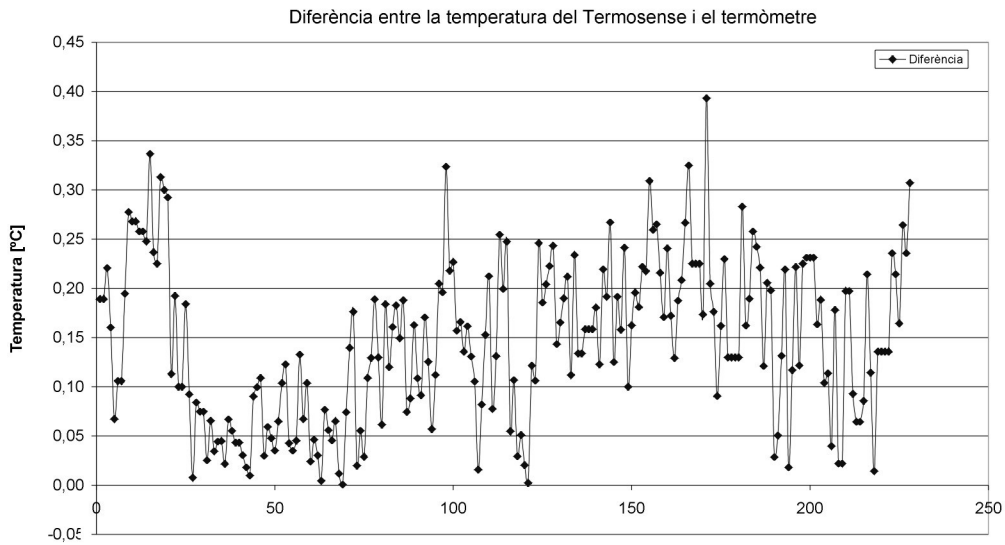


Figura 8.9: Diferència entre les temperatures del termòmetre i el Termosense.

Capítol 9

Valoració de costs

En aquest capítol es presenta un estudi de costs del producte. L'estudi es centra en el preu del dispositiu transmissor.

La taula 9.1, mostra els components que formen el dispositiu transmissor, amb informació referent al distribuïdor, la seva referència del producte i la quantitat d'elements d'aquell mateix component que conté el dispositiu. Mostra també el preu unitari del component en funció de comprar-ne 10, 50, 500 o 1000 unitats i el preu conjunt, consistent en multiplicar en cada cas el preu del component per el nombre d'elements que conté el dispositiu. Finalment indica la suma total dels components del dispositiu. En la taula hi manca un únic component. Aquest és el termistor. La taula 9.2 recull els preus de dos termistors diferents. L'un és l'agulla de Genesee BioMedical i l'altre un termistor de Betatherm sense encapsulat metàl·lic que li dongui forma d'agulla. Aquest segon no permetria clavar-se en el material i quedaria cobert per la silicona en el procés d'encapsulat. Es mostren a més per poder comparar preus.

Cada dispositiu a més està format per la seva corresponent placa de circuit imprès (PCB). En la seva fabricació es cobren 154 € per gastos de preparació, on bàsicament es cobren les màscares per a la foto-litografia. La taula 9.3 recull els preus de fabricació de cada PCB en funció de si es fabriquen 10, 50, 500 o 1000 unitats i els mateixos preus afegint-hi la proporció dels 154 €).

La quantitat de silicona utilitzada per encapsular un mateix dispositiu varia en funció de si s'utilitza la silicona Sylgard 184 de Dow Corning o bé la silicona biocompatible de Nusil model MED-4210, més espessa que la primera. En el cas de la Dow Corning s'utilitza aproximadament 16.5 grams per encapsular 2 dispositius, per 20 grams en el cas de la Nusil. Un 20% més aproximadament. Tenint en compte que 5.5 Kg. de la Sylgard 184 tenen un preu de 549.52 € i que 505 gr. de la silicona MED-4210 de Nusil costen 53 €, això significa que encapsular un dispositiu amb

la silicona biocompatible de Nusil val 1.049 € i 0.82 € en cas d'utilitzar la Sylgard 184.

A partir d'aquí, es calcula el cost unitari que representa un dispositiu per aplicació biomèdica i per tant biocompatible utilitzant la silicona de Nusil i el termistor consistent amb l'agulla de temperatura de Genesee BioMedical. Es mostra en la taula 9.4, en funció igualment del nombre de productes fabricats. Es mostra juntament amb un dispositiu no biocompatible i el termistor de Betatherm. En el dispositiu biocompatible, fabricar 1000 unitats resulta en obtenir un producte un 56.67% més barat respecte l'obtingut de fabricar-ne 10 unitats. En el cas del dispositiu no biocompatible, aquest percentatge augmenta al 69.24%.

La figura 9.1 mostra una gràfica amb la contribució de les diferents parts del producte en els preus mostrats en la taula 9.4. S'observa clarament que el que encareix més el producte és el termistor de Genesee BioMedical. En aquest estudi no es tenen en compte els costos d'embalatge i esterilització, que juntament amb el transport poden encarir el producte final un màxim de 10 €. Així el producte biomèdic final costaria al voltant dels 36 € en cas de fabricar-se'n 1000 unitats. Aquest no és un preu desmesurat quan es tracta de productes sanitaris.

Component	Quant.	Distrib.	Ref.	Preu unitari [€]			Preu conjunt [€]		
				10	50	1000	10	50	1000
FDV304P	1	Farnell	995850	0.57	0.49	0.32	0.57	0.49	0.32
BSS138	3	Farnell		0.31	0.134	0.05	0.93	0.402	0.255
REED	1	Farnell	4332362	0.49	0.44	0.32	0.49	0.44	0.32
LED 0805 SMD	1	Farnell	8529906	0.492	0.412	0.238	0.492	0.412	0.238
LED 0805 SMD	1	Farnell	8529930	0.222	0.193	0.128	0.222	0.193	0.128
BAT54J	1	Farnell	9801502	0.22	0.146	0.065	0.22	0.146	0.065
R 0603 100K	4	Farnell		0.002	0.002	0.002	0.008	0.008	0.008
R 0603 1K	2	Farnell		0.006	0.006	0.006	0.012	0.012	0.012
R 0603 5K	1	Farnell		0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006
R 0603 22K 0.1%	1	Farnell		0.97	0.76	0.53	0.97	0.76	0.53
L 0805 100nH	1	Farnell		0.745	0.745	0.46	0.745	0.745	0.46
C 10 μ F	1	Farnell		0.305	0.305	0.257	0.305	0.305	0.257
C 0805 100nF	2	Farnell		0.079	0.06	0.048	0.158	0.12	0.096
C 0805 1nF	1	Farnell		0.079	0.06	0.048	0.079	0.06	0.048
C 0805 330pF	1	Farnell		0.079	0.06	0.048	0.079	0.06	0.048
C 0805 33pF	1	Farnell		0.079	0.06	0.048	0.079	0.06	0.048
XTAL 13.56MHz	1	DigiKey	300-8092-1-ND	0.79	0.7	0.61	0.79	0.7	0.61
RFPIC12F675F	1	DigiKey		3.24	1.88	1.75	3.24	1.88	1.75
BR2032 3V	1	RS	597-396	2.66	2.45	2.32	2.66	2.45	2.32
Suma total [€]							12.052	9.249	7.923
									7.414

Taula 9.1: Preus dels components.

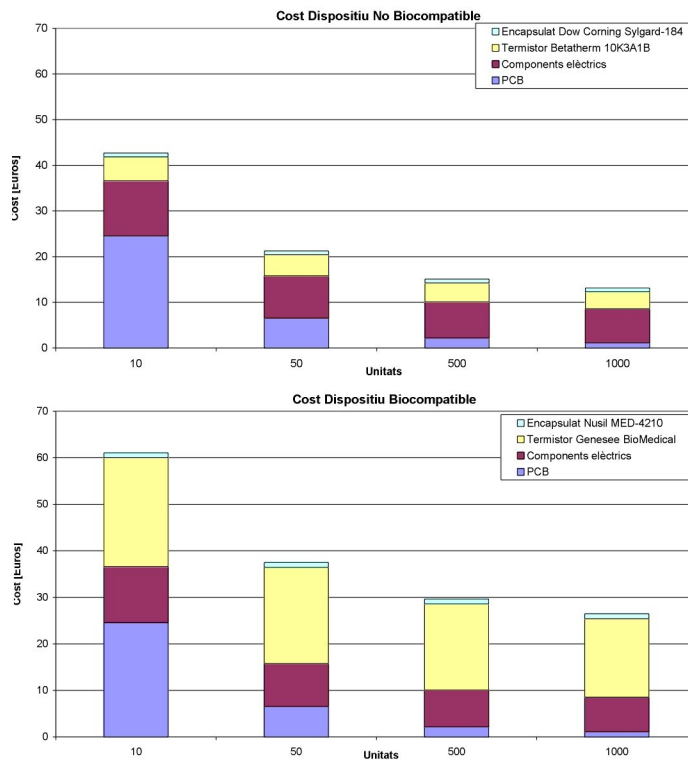


Figura 9.1: Contribució de les diferents parts del producte en el preu unitari final, en funció del nombre d'unitats fabricades.

Component	Quant.	Distrib.	Ref.	Preu unitari [€]			
				10	50	500	1000
NTC Betatherm	1	Farnell	9707204	5.25	4.63	4.14	3.74
NTC Gen. BioMed.	1			23.4	20.63	18.48	16.84

Taula 9.2: Preus dels termistors

Component	Quant.	fab.	Preu unitari [€]			
			10	50	500	1000
PCB	1	2CI	9.17	3.48	1.88	1
PCB + la proporció de 154 €	1	2CI	24.57	6.56	2.188	1.154

Taula 9.3: Preus fabricació placa de circuit imprès

Component	Quant.	Preu unitari [€]			
		10	50	500	1000
Dispositiu no biocompatible	1	42.69	21.26	15.07	13.13
Dispositiu biocompatible	1	61.07	37.64	29.64	26.46

Taula 9.4: Preus fabricació dispositiu transmissor

Capítol 10

Experimentació

En aquest capítol es mostra l'experimentació portada a terme amb el producte.

10.1 Monitoritzar comportament animal

En col·laboració amb el departament de Ciència Animal i dels Aliments de la facultat de veterinària de la Universitat Autònoma de Barcelona es pretén fer ús del sistema presentat per estudiar sobre el procés digestiu de les vaques. Concretament es vol avaluar el deteriorament en el procés metabòlic que es dona dins el rumen¹ de l'animal, com a conseqüència de la ingesta de grans dosis d'aigua. Per això es mesura, en una primera fase de l'estudi:

- Temperatura de dins el rumen de la vaca.
- Temperatura de l'aigua que pren l'animal.
- Temperatura de la llet extreta de la vaca.
- Temperatura ambient.

En una segona fase de l'estudi, es relacionaran aquestes gràfiques de temperatura amb mesures de PH.

Les probes s'han portat a terme amb animals preparats per a investigació que disposen d'una cànula que permet treballar dins el rumen (veure figura 10.1). En aquesta cànula hi queden subjectes els dispositius interns de la vaca.

¹Primer estómac de les vaques i altres remugants.



Figura 10.1: Introducció del dispositiu transmissor dins el rumen de la vaca.

El principal problema tècnic ha estat la forta atenuació del senyal transmès pels dispositius interns. El sistema no ha estat desenvolupat per a treballar en entorns d'alta atenuació com és el volum de 200 litres de matèria en el que es troben submergits els transmissors. En una aplicació específica caldria reduir la freqüència de transmissió a la centena de hertz. El problema es resol momentàniament separant l'antena del termistor per poder allargar-la fins a la sortida de la cànula. La resta de transmissors (aigua, ambient i llet) funcionen correctament. En les gràfiques 10.2 i 10.3 es mostren les variacions de temperatura dels sensors de llet i rumen.

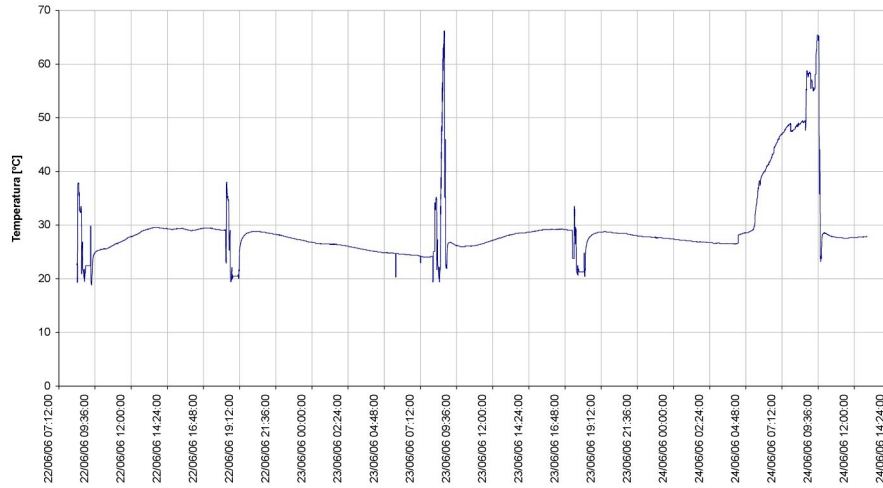


Figura 10.2: Gràfica de la mesura de temperatura de la llet.

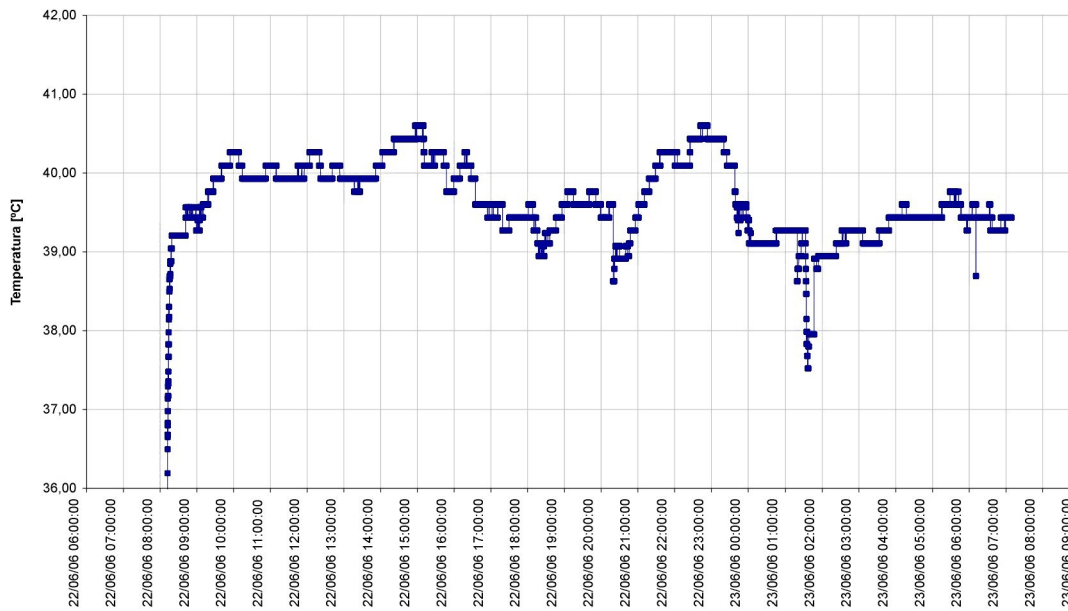


Figura 10.3: Gràfica de la mesura de temperatura del rumen.

Capítol 11

Conclusions

Aquest projecte m'ha ajudat a entendre amb què consisteix la feina de l'enginyer i, al mateix temps, prendre nota de les etapes que involucren el desenvolupament de tot producte.

Desenvolupar un producte amb ànim de fer-lo comercialitzable engloba una quantitat de processos que disten, en bona manera, del simple art del disseny electrònic. Faig referència sobretot a la complexitat que comporta que el prototip pugui esdevinir producte com un ens acabat i llest per vendre's.

Un cop el prototip és acabat, segueixen les tasques de verificació i refinament. Ha canviat en mi la concepció de la paraula verificar i la considero una part fonamental del propi disseny. Consisteix en demostrar que el producte té el comportament esperat en les diferents situacions de treball. He intentat verificar focalitzant primer en les diferents parts i finalment valorant tot el conjunt. Refinar en canvi, considero que majoritàriament afecta a qüestions d'ús i amb poca transcendència real en el funcionament de l'aparell però necessari al mateix temps per evitar errors deguts a una manipulació errònia. Refinar converteix la feina en sumament minuciosa i detallista. Ha estat necessari refinar les diferents parts de software, principalment el software de recepció, per tenir controlades totes les opcions disponibles per l'usuari. Pel que fa al firmware, el refinament ha consistit en assegurar-ne l'estabilitat sota un ús inadequat.

Tant important o més que els factors anteriors, és la capacitat de comunicació. Això significa preparar documentació detallada del producte incloent funcionament, arquitectura, components utilitzats, avaluació de costos, tests i documentació completa del firmware i software¹. Aquesta, assegurarà la continuïtat del projecte i permetrà posteriorment homologar el producte. Aquesta etapa m'ha servit per re-

¹Documentació a la que es pretén en part donar abast en aquesta memòria

flexionar sobre tota la tasca portada a terme i aprendre el referent a la legislació aplicable a productes electrònics i sanitaris de les característiques del presentat i l'aplicació de la marca CE.

D'entre els diferents entrebancs que m'he trobat, vull destacar la dificultat que comporta en certs casos la interpretació de la documentació tècnica. Sovint excessivament crítica. Com el fet que la documentació de Microchip no fa excessiva incidència en que el pin de sortida de dades modulades amb FSK cap a l'antena és de col·lector obert. Altres dificultats han estat contactar amb els proveïdors europeus de les agulles de temperatura de Genesee BioMedical, si bé no he tingut cap problema per obtenir informació més acurada del propi producte contactant amb el manager de producció de la pròpia empresa.

Pensant amb el treball portat a terme em venen al cap, amb caire de conclusió, moltes reflexions positives. És indubtable que l'entorn de treball del Centre Nacional de Microelectrònica facilita, enormement, els coneixements i aspectes tècnics pel gran nivell formatiu que tenen la totalitat dels enginyers que hi treballen. Tot i això ha estat necessari familiaritzar-me amb l'eina de disseny de PCB de Cadence, aprendre el funcionament de la fresa per crear els motlles de policarbonat per a l'encapsulat i finalment rebre una introducció ràpida en els protocols de funcionament d'un laboratori químic, ja sigui per realitzar l'atac químic al coure de les plaques de circuit imprès dels primers prototips o bé preparar la silicona per a l'encapsulament.

És també molt destacable, fent ja referència a qüestions menys acadèmiques, haver format part d'un grup de treball i observar-ne el seu funcionament i haver rebut sempre plena entesa entre les parts més de caire comercial i les financeres.

Crec finalment que es pot estar satisfet del resultat obtingut i considero que s'ha complert de manera satisfactòria amb els objectius inicialment marcats.

Capítol 12

Treballs futurs

Si el producte Termosense pretén ser industrialitzat, cal automatitzar-ne el procés de programació i verificació. La programació inclou l'actualització de les dades de memòria EEPROM (identificador i temps entre transmissions). L'aplicació en qüestió consistiria en dues parts. La part de software d'ordinador i la part de programació i verificació del dispositiu.

El software hauria de modificar convenientment el fitxer Hex per actualitzar-ne la informació de dispositiu i temps entre transmissions. Seguidament transmetria la informació per a la programació a la part de programació i verificació. Aquesta contindria com element principal un microcontrolador amb la funcionalitat de programar el dispositiu Termosense amb la informació provinent de l'ordinador i realitzar-ne un posterior test. La comunicació entre el software de l'ordinador i la placa de programació podria ser per exemple via RS232. El test es tractaria de connectar varies resistències de valor conegut i comprovar que tant la mitjana com la desviació estàndard estan dins els marges desitjats. Tot automàticament. Un cop acabat, caldria retirar el dispositiu programat i verificat, desoldar el socket de programació, afegir-li el termistor NTC i disposar-lo per ser encapsulat.

És necessari també portar a terme un estudi de l'eficiència de transmissió del dispositiu. Cal avaluar, utilitzant una cambra anacòica la variació de l'eficiència en funció de la longitud de l'antena (cable de l'agulla).

Per altre banda, previ a la fabricació del producte, cal realitzar les proves de compatibilitat electromagnètica i preparar tota la documentació necessària per el marcat CE¹. Cal també contactar amb una empresa d'empaquetat, per a l'esterilització i embalatge (*blister*).

¹Més informació en l'estudi legislatiu de l'apartat 1.3

Bibliografia

- [1] Genesee BioMedical, **Myocardial Needle Temperature Probes** Directions for Use
- [2] Microchip Tech. Inc. **rfPIC12F675K/675F/675H Data Sheet**
- [3] Myron Loewen, Microchip Tech. Inc. **Designing Loop Antennas for the rfPIC12F675**
- [4] Jan van Niekerk, Microchip Tech. Inc. **Matching Small Loop Antennas to rfPIC Devices**
- [5] Intel, **Hexadecimal Object File Format Specification** Revision A, 1/6/88
- [6] Panasonic, **Lithium Handbook** Poly-carbonmonofluoride (BR Series) and Manganeses Dioxide (CR Series). Coin Cell Tab Configurations. August 2003
- [7] Panasonic, **Lithium Handbook** Poly-carbonmonofluoride Lithium Coin Batteries: Individual Specifications. February 2002
- [8] Radiometrix, **UHF FM Data Transmitter and Receiver Modules** Issue 2, November 2004
- [9] Nusil, **Material Safety Data Sheet MED-4210 PART A**
- [10] Nusil, **Material Safety Data Sheet MED-4210 PART B**
- [11] Nusil, **Standard Material Certification, MED-4210 Silicone Elastomer**
- [12] Dow Corning, **Information About High Technology Silicone Materials, SYLGARD 184 Silicone Elastomer**
- [13] Hanna Instruments, **Checktemp-1 Specifications**

Apèndix A

Biocompatibilitat

La biocompatibilitat d'un material artificial en el cos, comporta un conjunt de processos d'extrema complexitat, involucrant una gran quantitat d'àrees de coneixement (medicina, ciència de materials, biotecnologia, ...). Quan el material és deixat en el teixit, comença immediatament una successió de fase metabòliques en la superfície. Pocs mil·lisegons després de realitzar-se l'implant, una biocapa consistent d'aigua, proteïnes i altres biomolècules, es forma en la superfície de l'implant. Conseqüentment, cèl·lules del teixit que l'envolta migren a l'àrea que volta l'implant degut a l'estimulació provocada per un grup de components proteïnics amb funcionalitat de comunicació intra-cel·lular, semblant a la de les hormones, que reben per nom *cytokines*. La interacció entre la superfície de l'implant i les cèl·lules es porta a terme a través d'aquesta biocapa.

Les propietats químiques i topogràfiques de la superfície de l'implant tenen molta influència en les propietats de la biocapa i aquesta influència cal ser entesa i controlada per optimitzar la biocompatibilitat. Tenint present que els rangs de tamany de les proteïnes i cèl·lules és des de nano- a micrometres, aquestes són les longituds d'escala importants per el problema. D'igual importància són les propietats de les cèl·lules, per exemple la seva habilitat per comunicar-se a través de senyals moleculars. Durant la cicatrització del teixit, nombrosa bioactivitat de senyals moleculars en controla la formació i algunes proteïnes tenen la capacitat d'estimular-la a l'entorn de l'implant. Tots aquests mecanismes contribueixen a la resposta del teixit a l'implant i a la influència que el cos accepti l'implant o no.