



Design of a conductivity meter for fluids

A Degree Thesis

Submitted to the Faculty of the

**Escola Tècnica d'Enginyeria de Telecomunicació de
Barcelona**

Universitat Politècnica de Catalunya

by

Arnau Janer i Serramià

In partial fulfilment

of the requirements for the degree in

Electronic Systems ENGINEERING

Advisor: Miguel J. Garcia Hernandez

Barcelona, June 2017

Abstract

This work relates de process of analysis and creation of a conductimeter for fluids. The conductivity is a physical magnitude present on any material, this magnitude provides some revelant information about its composition. On fluids is really usefull to know it's conductivity in order to analyse it.

To be able to measure this magnitude we will have to interact with the fluid. We will have to be care not to alter it. The main alterations that we can cause or we have to take into account are the electrolysis, and its dependence with the temperature. Given these factors, we have evaluated the most appropriate methods of measurement and which are the best electrodes to use.

After all the evaluation, the work puts into test the election of electrodes and the metedology of measure by performing an independent device, designing and programming the sensor logic. The work concludes with the measurement of the sensor error and also with the realiztation of an encapsulation for the sensor.

Resum

El treball en qüestió relata el procés d'anàlisi i creació d'un conductímetre per a fluids. La conductivitat és una magnitud física que tot material presenta i que ens aporta informació rellevant sobre la seva composició, la qual és una mesura molt útil per a l'anàlisi de fluids.

Per tal de poder mesurar aquesta magnitud haurem d'interactuar amb el fluid procurant alterar-lo el mínim possible. Les principals alteracions que podem provocar o hem de tenir en compte són l'electròlisi o la dependència de la conductivitat amb la temperatura. Tenint en compte aquests factors s'ha valorat quin és el mètode de mesura més adequat, així com els elèctrodes que millor s'hi adaptin.

Després de les valoracions corresponents, el treball posa a prova les eleccions d'elèctrodes i les metodologies de mesura mitjançant la realització d'un aparell independent, amb el disseny i la programació de la lògica del sensor. Finalment, el treball conclou amb la mesura de l'error d'aquest i amb la realització d'un encapsulat per al sensor.

Resumen

El trabajo en question relata el proceso de análisis i creación de un conductímetro para fluidos. La conductividad es una magnitud física que todo material presenta que nos aporta información relevante sobre su composición, la cual es una medida muy útil para el análisis de fluidos.

Para poder medir esta magnitud necesitaremos interactuar con el fluido, procurando alterarlo al mínimo posible. Las principales alteraciones que podemos provocar o tenemos que tener en cuenta són la electrólisis o la dependencia de la conductividad con la temperatura. Teniendo en cuenta estos factores se ha valorado cual método de medida és el más adecuado, así como los electrodos que mejor se adapten.

Despues de las valoraciones correspondientes, el trabajo pone a prueba la elección de los electrodos i las metodologias mediante la realizando de un aparato independiente, con diseño y programando la lógica del sensor. El trabajo concluye con la medida del error de este con la realización de un encapsulado para el sensor.

Agraïments

En primer lloc agrair el treball dut a terme pel Dr. Miguel J. García, tutor del projecte i qui n'ha realitzat tot el seguiment. Agrair-li tot l'ajut durant la realització, i la facilitat i interès a introduir-me a utilitzar les eines i el material de la universitat.

Per altra banda també agrair l'ajut prestat pel personal del laboratori del Grup de Sensors i Sistemes (GSS) de la UPC. D'aquest Grup cal destacar el suport prestat pel doctorand Oliver Millán Blasco que, juntament amb el Dr. García, ha realitzat el seguiment del treball i ha col·laborat tant en la realització de la PCB com en la posada en marxa i programació del microcontrolador. Donar les gràcies no únicament per l'ajuda rebuda sinó també pel temps dedicat i, especialment, per la transmissió de coneixements per part dels dos.

Historial de revisions i registre d'aprovació

Revisió	Data	Propòsit
0	7/6/2017	Creació del document
1	12/6/2017	Revisió del document
2	19/6/2017	Correcció del document
3	28/6/2017	Revisió i aprovació del document

Llista de distribució del document

Nom	Correu electrònic
Arnau Janer i Serramià	arnaujs@gmail.com
Miguel J. Garcia Hernandez	miguel.j.garcia@upc.edu
Oliver Millan Blasco	olivermillan953@hotmail.com

Escrit per:		Revisat per	
Data	7/6/2017	Data	28/6/2017
Nom	Arnau Janer i Serramià	Nom	Miguel J. Garcia Hernandez
Posició	Autor del projecte	Posició	Supervisor del projecte

0. Índex

0. Índex	6
0.1 Llistat de figures	7
0.2 Llistat de taules	8
1. Introducció	9
2. Marc Teòric	10
2.1 Definició de conductivitat	14
2.2 Constant de cel·la K	14
3. Cas Particular	15
3.1 Emissió d'electrons	16
3.2 Electròlisi	17
3.3 Dependència amb la temperatura	18
3.4 Consideracions i tècniques de mesura	19
4. Model matemàtic	20
4.1 Caracterització del sistema	21
4.2 Caracterització de la sonda	21
5. Marc pràctic	22
5.1 Anàlisi experimental del sistema	25
5.2 Valoració i elecció dels elèctrodes	26
5.3 Valoració de les tècniques de mesura	27
5.3.1 Càrrega i descàrrega d'un condensador	28
5.3.2 Amplificador amb guany variable	28
5.3.3 Divisors de tensió	29
6. Muntatge físic i funcional	30
6.1 Elecció dels components	31
6.2 Realització física	32
6.2.1 Realització del circuit imprès	34
6.2.2 Realització de la carcassa	35
6.3 Cost del sistema	36
7. Teoria de funcionament	37
7.1 Sensor de conductivitat	39
7.2 Selecció de la resistència de mesura	41
7.3 Filtratge de les mesures	42
7.4 Enggada i apagada del sistema	43
7.5 Lectura del sensor de temperatura i compensació de la conductivitat	44
8. Resultat final	46
9. Conclusions	50
10. Referències	51
11. Annexes	52
11.1 Annex 1 - Realització electrònica del sensor	52
11.1.1 Esquema complet	52
11.1.2 Esquema amb KiCad i <i>layout</i> del sensor	52
11.1.3 Llistat de components	54
11.2 Annex 2 - Codi del microcontrolador	54
11.3 Annex 3 - Fitxers de disseny de la carcassa	76

0.1 Llistat de figures

- Fig 0. Diagrama de Gantt de la planificació del treball - p13
- Fig 1. Exemple de dues plaques enfrontades com a elèctrodes T3 - p15
- Fig 2. Variació de la conductivitat en funció de diferents concentracions de solut a 18°C - p17
- Fig 3. Ambdues imatges representen un fluid exposat a un camp elèctric de dreta a esquerra. El de dalt estimulat amb un senyal continu, i el de baix amb un d'altern. - p18
- Fig 4. a) Circuit equivalent del sistema mesurat amb un parell d'elèctrodes. b) Circuit equivalent de solucions salines quan els dos elèctrodes són iguals. - p21
- Fig 5. Cilindre - p23
- Fig 6. Cilindres concèntrics - p23
- Fig 7. Cilindres paral·lels - p24
- Fig 8. Diagrama d'elèctrodes en una canonada - p25
- Fig 9. A l'esquerra un producte comercial, i a la dreta un esquema genèric del sistema - p25
- Fig 10. Primers models experimentals d'elèctrodes - p26
- Fig 11. Cap de mesura realitzat amb impressió 3D - p27
- Fig 12. A l'esquerra l'esquema del circuit equivalent, i a la dreta les corbes de càrrega i descàrrega del condensador - p29
- Fig 13. Esquema del mètode de mesura per amplificador de guany variable - p29
- Fig 14. Proposta de circuit per al mètode d'amplificador amb guany variable - p30
- Fig 15. Esquema del mètode de mesura per divisors de tensió - p30
- Fig 16. Diagrama del sistema complet - p31
- Fig 17. Imatge del microcontrolador al prototip - p32
- Fig 18. Imatge del regulador al prototip - p33
- Fig 19. Esquema del sensor complet - p34
- Fig 20. Layout del sistema - p35
- Fig 21. Placa de circuit imprès amb tots els components - p36
- Fig 22. Resultat final de la carcassa - p36
- Fig 23. Cap de mesura - p37
- Fig 24. Les 3 peces de la carcassa i l'encaix entre elles. De color verd el cap de mesura i els tres botons - p37
- Fig 25. A l'esquerra (i de color blau) tensió mesurada als extrems dels elèctrodes, i a la dreta (en vermell) el mateix senyal al terminal positiu del condensador. - p39
- Fig 26. A l'esquerra el model per calcular la constant de temps. A la dreta la càrrega de la tensió en els terminals del condensador per a una tensió de senyal quadrada a 50 kHz - p39
- Fig 27. Procediment d'adquisició d'una única mostra al flanc positiu, activada per la interrupció de flanc de pujada - p41
- Fig 28. A l'esquerra els resultats esperats per a qualsevol resistència, i a la dreta la derivada normalitzada dels resultats esperats - p41
- Fig 29. Mateixa representació que la imatge anterior, però per a cada valor de les resistències seleccionades. - p42
- Fig 30. Diagrama del mecanisme de filtratge - p43
- Fig 31. Variació de la resistència en funció de la temperatura proporcionada pel fabricant - p44
- Fig 32. Aproximació matemàtica de la resistència en funció de la temperatura en el rang de temperatures de treball - p45
- Fig 33. Seqüència de selecció de pantalles del sensor - p46
- Fig 34. Seqüència de mesura de la conductivitat i retenció del valor - p46
- Fig 35. Seqüència de canvi del valor del paràmetre de coeficient de la temperatura p46
- Fig 36. Error relatiu de mesures amb resistències fixes - p47

- Fig 31. Error relatiu del sistema complet, mesurant diferents dissolucions. - p48

0.2 Llistat de Taules

- T1 - WP #1 - p10
- T2 - WP #2 - p10
- T3 - WP #3 - p11
- T4 - WP #4 - p11
- T5 - WP #5 - p11
- T6 - WP #6 - p11
- T7 - WP #7 - p12
- T8 - WP #10 - p12
- T9 - WP #8 - p12
- T10 - WP #9 - p12
- T11 - Conductivitat de diferents materials a 20°C T11 - WP #1 - p15
- T12 - Rang òptim de conductivitat per cada valor de la constant de cel·la [17] - p15
- T13 - Proporcions de solut per assolir una determinada conductivitat a 25 °C - p17
- T14 - Factors per convertir la conductivitat específica de l'aigua a valors relatius de 25°C - p20

1 . Introducció

La conductivitat és una magnitud física que ens permet determinar com un element permet el pas de corrent. Usualment quan parlem de conductímetres, ens referim a aparells que mesuren la conductivitat de líquids, ja que aquesta propietat, especialment en els fluids, ens pot proporcionar molta informació sobre aquest. Aquests conductímetres tenen diverses aplicacions, com poden ser el monitoreig de circuits d'aigua, la determinació de substàncies, els fluids o el control del nivell de salinitat de l'aigua del mar, entre altres aplicacions.

En aquest treball, realitzat com a Treball de Final del Grau en Enginyeria de Sistemes Electrònics, s'ha dissenyat i implementat un dispositiu per a la mesura de conductivitat elèctrica en solucions salines. L'objectiu del treball ha estat la realització d'un mesurador independent capaç de mesurar i indicar la conductivitat sense haver de necessitar cap altre aparell i/o instrument. El treball, a part d'exposar el funcionament d'aquest i com s'ha realitzat, també exposa les diferents idees i propostes que han sorgit en la realització d'un conductímetre.

El treball inicialment va ser pensat per tal d'utilitzar aquest sensor en canonades d'entorns industrials per tal d'adquirir informació adicional del què succeeix dins la canonada. Tot i que finalment l'objectiu del treball ha estat realitzar un mesurador independent els requeriments s'han mantingut entre els dos donant com a objectiu la creació d'un mesurador independent amb un rang capaç de mesurar una conductivitat des dels 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ fins als 60 mS/cm . Tota l'explicació dels objectius està descrita a l'apartat cinquè: *Marc pràctic*.

El treball està dividit en vuit parts; la primera, la segona i la tercera contenen tota la informació teòrica requerida en la mesura de la conductivitat elèctrica en solucions electrolítiques. Així com les consideracions teòriques a tenir en compte al realitzar la mesura, com són l'electròlisi o l'efecte de la temperatura. A més també es modelen i valoren els principals elèctrodes que podem trobar al mercat.

La quarta part presenta l'abast del projecte, i a partir d'aquest es valoren les diferents tècniques de mesura, així com els elèctrodes a utilitzar mentre es realitza una breu descripció de les proves realitzades.

La cinquena i sisena parts descriuen la implementació de totes les parts del sensor, començant per l'elecció dels components, passant per la realització de la placa de circuit imprès fins a la realització de la carcassa en què s'inclouran la resta de les parts. Aquestes parts, a més, descriuen detalladament el funcionament de cada mòdul del sensor per entendre'n la realització de la mesura.

Finalment el treball acaba amb una valoració del sistema complet, que s'ha realitzat mitjançant un seguit d'experiments per tal de determinar-ne la precisió. A més també es presenten unes conclusions que acaben de valorar el resultat i on es proposen solucions per tal de millorar-ne el resultat.

El document a més inclou un apartat d'annexos on s'han afegit alguns dissenys realitzats i exposats en el treball. A més també s'inclou tot el codi que s'ha realitzat per programar el microcontrolador.

1.1 Pla de treball

Per tal de poder realitzar el treball ajustant-nos al temps requerit, s'ha treballat sota una planificació inicial estructurada mitjançant un diagrama de Gantt. La planificació presentada al treball no es correspon amb l'original, ja que aquesta s'ha anat modificant durant el transcurs del treball, modificacions que conclouen en les tasques i diagrames presentats a continuació:

Tasques a realitzar:

- Modelat física de la conductivitat
- Aproximació del circuit d'adquisició
- Disseny del prototip
- Compensació de la temperatura
- Sistema de comunicació amb l'usuari.
- Disseny electrònic final
- Disseny de la carcassa
- Ajustament final
- Caracterització dels resultats

Per a cadascuna d'aquestes tasques s'ha realitzat una fitxa independent:

T1 - WP #1

Projecte: Modelat física de la conductivitat	WP ref: #1	
Constituent principal: Model matemàtic	Sheet 1 of 10	
Breu descripció: Per tal de poder muntar el dispositiu primer requerim conèixer com ha de ser la mesura. En aquest cas buscarem quina és la impedància de l'aigua i com els elèctres interactuen amb aquesta.	Planned start date: 8/2/2017 Planned end date: 6/3/2017	
	Start event: End event:	
Tasca interna T1: Preparació de les mesures de diferent conductivitat	Entregables: Model matemàtic	Duració: Setmanes 2,3 i 4
Tasca interna T2: Mesurar el seu comportament		
Internal task T3: Analitzar i elaborar un model físic.		

T2 - WP #2

Projecte: Aproximació del circuit d'adquisició	WP ref: #2	
Constituent principal: Disseny i simulació	Sheet 2 of 10	
Breu descripció: Disseny i validació del circuit per tal de mesurar la conductivitat en els fluids.	Planned start date: 7/3/2017 Planned end date: 14/3/2017	
	Start event: Model físic End event: Esquemàtic	
Tasca interna T1: Disseny del circuit Tasca interna T2: Validació del resultat	Entregables: Esquemàtic	Duració: Setmanes 5 i 6

T - WP #3

Projecte: Disseny del prototip	WP ref: #3	
Constituent principal: Prototip hardware	Sheet 3 of 10	
Breu descripció: Muntar el circuit, i redisenyar-lo si s'escau	Planned start date: 27/3/2017 Planned end date: 4/4/2017	
	Start event: Esquemàtic End event: Prototip	
Tasca interna T1: Disseny de la placa de circuit i muntar-la.	Entregables: Prototip	Duració: Setmana 7
Tasca interna T2: Programar-li si es necessari.		

T4 - WP #4

Projecte: Compensació de la temperatura	WP ref: #4	
Constituent principal: Model matemàtic	Sheet 4 of 10	
Breu descripció: Un cop el prototip ha estat realitzat, es necessari evaluar-lo com varia en diferents temperatures. Un cop el seu comportament ha estat analitzat, és necessari dissenyar tota la circuiteria corresponent a aquest.	Planned start date: 5/3/2017 Planned end date: 12/4/2017	
	Start event: Prototip End event: Model de la dependència amb la temperatura	
Tasca interna T1: Mesura sota diferents temperatures	Entregables: Modelat de la temperatura	Duració: Setmana 8
Tasca interna T2: Analitzar i elaborar un model físic.		

T5 - WP #5

Projecte: Sistema de comunicació	WP ref: #5	
Constituent principal: Disseny	Sheet 5 of 10	
Breu descripció: Un cop el sistema és operatiu, és necessari analitzar quin sistema de comunicació és la millor opció i incorporar-la en el sistema. Ja sigui un protocol USB o una pantalla tipus LCD.	Planned start date: 5/3/2017 Planned end date: 12/4/2017	
	Start event: Esquemàtic End event:	
Tasca interna T1: Analitzar les necessitats del producte i seleccionar quina és la millor opció.	Entregables: Esquemàtic de la comunicació	Duració: Setmana 8
Tasca interna T2: Incorporar-ho al disseny.		

T6 - WP #6

Projecte: Disseny electrònic final	WP ref: #6	
Constituent principal: Disseny	Sheet 6 of 10	
Breu descripció: Amb totes les parts seleccionades, redisenyem tot el circuit per tal d'integrar tots els subsistemes.	Planned start date: 12/4/2017 Planned end date: 26/4/2017	
	Start event: End event:	
Tasca interna T1: Ajuntar tots els dissenys en un únic esquema i en una única realització física.	Entregables: Esquema i disseny complet	Duració: Setmana 9 i 10

T7 - WP #7

Projecte: Disseny de la carcassa	WP ref: #7	
Constituent principal: Disseny mecànic	Sheet 7 of 10	
Breu descripció: Disseny i construcció de la carcassa on s'ubicarà tota l'electrònica del sistema	Planned start date: 12/4/2017 Planned end date: 10/5/2017	
	Start event: End event:	
Tasca interna T1: Disseny i muntatge	Entregables: Carcassa	Duració: Setmana 9, 10, 11 i 12

T8 - WP #10

Projecte: Muntatge electrònic i prova de funcionament	WP ref: #10	
Constituent principal: Muntatge	Sheet 10 of 10	
Breu descripció: Muntatge de tots els components a la placa PCB i provar que tot funcioni correctament.	Planned start date: 26/4/2017 Planned end date: 10/5/2017	
	Start event: End event:	
Tasca interna T1: Muntatge i verificació.	Entregables: Part electrònica física	Duració: Setmana 11 i 12

T9 - WP #8

Projecte: Ajustament final	WP ref: #8	
Constituent principal: Integració i software	Sheet 8 of 10	
Breu descripció: Ajuntar totes les peçes i fer-les separar mitjançant un programa per fer-lo completament funcional. En aquest punt totes les parts funcionen per separat. En aquest punt haurem de contemplar si es necessari redissenyar alguna part per a millorar els errors si existeixen.	Planned start date: 10/5/2017 Planned end date: 31/5/2017	
	Start event: End event:	
Tasca interna T1: Muntatge i posada a punt.	Entregables: Final sensor	Duració: Setmana 13, 14, 15 i 16

T10 - WP #9

Projecte: Documentació	WP ref: #9	
Constituent principal: Documentació	Sheet 9 of 10	
Breu descripció: Documentació de tota la feina consistent en recopilar la informació escriure la memòria final i preparar la presentació.	Planned start date: 15/2/2017 Planned end date: 1/6/2017	
	Start event: End event:	
	Entregables: Memòria i presentació	Duració: Totes

Confeccionant el seu corresponent diagrama Gantt:

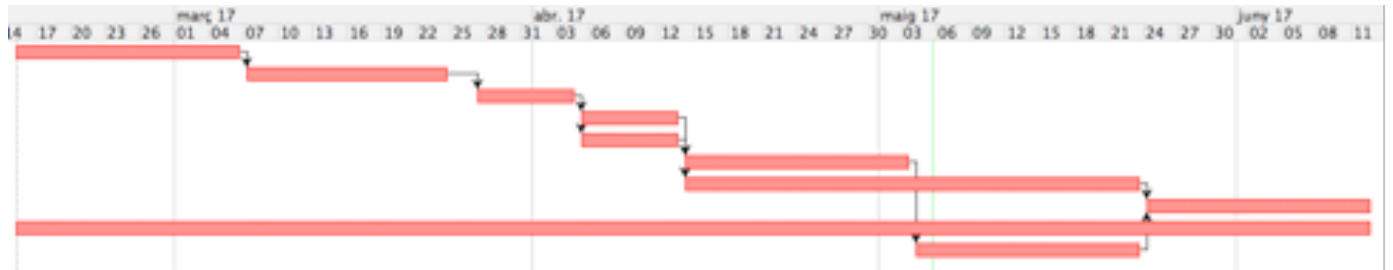


Fig 0. Diagrama de Gantt de la planificació del treball

2 . Marc teòric

2.1 Definició de conductivitat

La conductivitat és la mesura de la capacitat d'un material de permetre el pas de corrent elèctric. D'aquesta manera s'entén la conductivitat com el recíproc de la resistivitat. La conductivitat d'un material depèn de la seva estructura atòmica i molecular, i per tant a partir d'una anàlisi d'aquest paràmetre, podem esbrinar de manera indirecta diferents factors de la mostra en qüestió. Per exemple, els metalls són bons conductors al tenir una estructura molecular amb molts electrons amb lligams febles, i per tant una alta conductivitat.

La conductivitat elèctrica, expressada amb el símbol σ i amb unitats de S/m (Siemens per metre) és la inversa de la resistivitat. I es defineix com la densitat de corrent (J) respecte del camp elèctric (E). [1]

$$J = \sigma E$$

Assumint que la conductivitat depèn del material o mostra, també podem definir la *conductivitat específica* d'un material. Essent aquella que ens aportarà informació sobre el material en qüestió. Aquesta conductivitat específica es defineix sobre un cub d'1cm de costat. I per tant es pot definir la conductància, és a dir, la inversa de la resistència, en funció de la conductivitat:

$$G = \sigma \frac{A}{d}$$

G = Conductància [S]

σ = Conductivitat [s/cm]

A = Àrea [cm²]

d = Distància [cm]

La conductivitat, al ser el recíproc de la resistivitat, es pot calcular a partir de la mesura de la resistència del material.

$$\sigma = \frac{d}{AR}$$

A partir de la mesura de la conductivitat, podem classificar els materials en qüestió en conductors o aïllants. Tenint una alta conductivitat els primers, i una de baixa els segons. Tot i així també ens podem trobar amb solucions que són aïllants, tot i que al contenir electròlits (ions a la solució) esdevenen conductores en funció de les propietats i quantitats d'aquests, les quals es denominen solucions d'electròlits. Per exemple:

T11 - Conductivitat de diferents materials a 20°C

Material	σ [Sm^{-1}] a 20°C
Alumini	$3,78 \cdot 10^7$
Vidre	$1 \cdot 10^{-11}$
Aigua de mar	0,05
Aigua potable	$2 \cdot 10^{-4}$

2.2 Constant de cel·la K

Tot i que la conductivitat específica d'un material depèn únicament del material, la manera amb la qual realitzem la mesura en pot variar molt el resultat. Per aquesta raó es defineix la constant de cel·la, denotada amb una K.

Aquesta constant és la relació entre la superfície dels elèctrodes i la seva distància (d/A), que ens dona informació rellevant sobre com s'ha realitzat la mesura. Factor de gran importància que a més té relació directa amb la mesura de la conductivitat. Per exemple, en el cas de mostres de molt baixa conductivitat ens convindrà reduir aquest factor, per exemple reduint la distància entre els elèctrodes o plaques. D'aquesta manera reduïrem la resistència i serà més senzill i precís mesurar-ne la conductivitat. El mateix passa per a mostres molt conductores. [2]

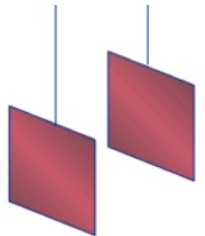


Fig 1. Exemple de dues plaques enfrontades com a elèctrodes

Degut a això en el mercat existeixen sondes de diferents constants de cel·la per a mesures de més o menys conductivitat, per exemple:

T12 - Rang òptim de conductivitat per cada valor de la constant de cel·la [17]

Constant de cel·la (K)	Rang òptim de conductivitat ($\mu\text{S/cm}$)
0,1	De 0,5 a 400
1	De 10 a 2000
10	De 1000 a 200000

3 . Cas particular

En el nostre cas les mostres a analitzar es corresponen a solucions aquoses, que generalment seran d'aigua, és a dir H₂O. Per tant les mesures correspondran a mostres de solucions d'electròlits. És a dir les mostres d'H₂O pures no són conductives, però al contenir electròlits aquestes esdevenen conductores, ja que els ions introduïts per als electròlits es mouen lliurement pel fluid. S'entén llavors que el corrent no es desplaça mitjançant el moviment d'electrons sinó per mitjà del d'electròlits.

Com a exemple més evident podem trobar l'aigua de mar; com bé sabem, conté grans quantitats d'electròlits. Aquests provoquen que el líquid no sigui potable i conseqüentment tingui un alt nivell de conductivitat, no com l'aigua que utilitzem normalment per ser consumida. Com a exemple d'electròlit que podem afegir a l'aigua és comú utilitzar la sal comuna, és a dir, NaCl.

Aquesta dissolució (H₂O + NaCl) té com a propietat que la conductivitat és proporcional a la quantitat de NaCl per quantitat de dissolvent, fins a arribar al punt de saturació de l'aigua. Tot i així, en determinats casos, la conductivitat no augmenta de manera progressiva amb la concentració, sinó que a determinat nivell de concentració la conductivitat disminueix dràsticament, és el cas de l'àcid sulfúric o bé de l'àcid nítric. [3]

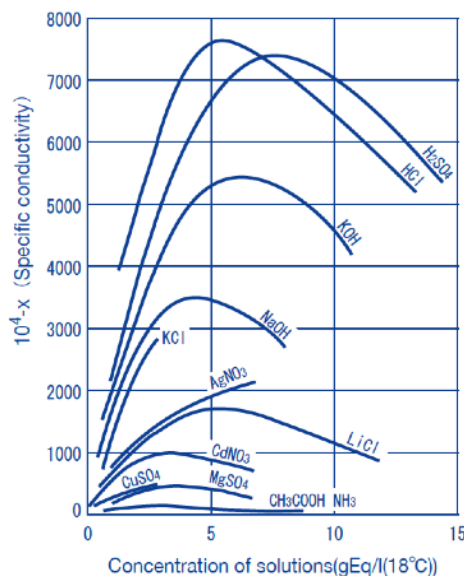


Fig 2. Variació de la conductivitat en funció de diferents concentracions de solut a 18°C.

Per tal de quantificar la quantitat d'electròlits que hi ha en el líquid, sovint s'utilitza la mesura de TDS (Total Dissolved Solids), és a dir, el contingut de sòlids dissolts totals expressats en ppm (parts per milió), en la següent equivalència (1 ppm = 1 mg per litre).

En la següent taula es pot veure amb més precisió com varia la conductivitat en funció dels sòlids dissolts, l'element factor descrit a la taula fa referència a la relació de les magnituds de conductivitat en $\mu\text{S}/\text{cm}$ i les ppm: [4]

T13 - Proporcions de solut per assolir una determinada conductivitat a 25 °C

Conductivitat a 25°C	TDS KCl		TDS NaCl	
	Valor (ppm)	Factor	Valor (ppm)	Factor
23 µS	11,6	0,5043	10,7	0,4652
84 µS	40,38	0,4807	38,04	0,4529
447 µS	225,6	0,5047	215,5	0,4822
1413 µS	744,7	527	702,1	0,4969
1500 µS	757,1	0,5047	737,1	0,4914
2070 µS	1045	0,5048	1041	0,5029
2764 µS	1382	0,5	1414,8	0,5119
8974 µS	5101	0,5685	4487	0,5
12,880 µS	7447	0,5782	7230	0,5613
15,000 µS	8759	0,5839	8532	0,5688
80 mS	52,168	0,6521	48,384	0,6048

3.1 Emissió d'electrons

En el nostre cas, com a requeriments, haurem de mesurar la conductivitat d'una mostra aquosa que no tindrem controlada de manera constant. Així que hi poden haver diferents factors que la poden alterar. Per exemple, si una càrrega de la mostra, en un moment determinat, té una certa energia i és capaç de vèncer la barrera de potencial que la manté lligada al conductor, aquesta l'abandonarà. Això provocarà una alteració en la mostra a l'haver-hi menys càrregues, augmentant per tant la resistència i disminuint la conductància de la mostra.

Existeixen diferents mecanismes per als quals es produeix una emissió de càrregues, factors que hem de tenir en compte per tal de realitzar una mesura el més acurada possible. Aquests factors principals són:

- Il·luminació de fotons d'alta energia
- Escalfament de la solució
- Bombardeig d'electrons i/o de ions d'alta energia
- Imposició d'un camp elèctric molt potent

D'aquests mètodes se'n destaca l'escalfament de la solució. Aquesta emissió d'electrons causada per la temperatura ambiental provocarà una conseqüent variació de la conductivitat de la mostra. Per aquest motiu al realitzar la mesura, haurem de tenir en compte la seva temperatura i

compensar el resultat per donar el valor de la conductivitat a una temperatura fixada, de manera estàndard, a 25 °C.

3.2 Electròlisi

Per tal de poder realitzar la mesura de la conductivitat, de manera directa o indirecta, s'haurà d'injectar un cert corrent a la mostra aquosa en qüestió. Això produeix consegüentment un procés d'electròlisi; s'entén aquest procés com la separació dels elements de la mostra per un camp elèctric.

Aquest fenomen constitueix fonamentalment un procés d'oxidació-reducció que no s'esdevé de manera espontània. És a dir, un conjunt de transformacions que impliquen un augment d'energia lliure al sistema, en el nostre cas, causat per una excitació externa.

Visualment és molt senzill observar el fenomen d'electròlisi, ja que apareixen bombolles de gasos en els elèctrodes: En el cas d'aigua amb sal, apareixen bombolles d'hidrogen al càtode i d'oxigen a l'ànode. [5]

Per tal de minimitzar aquest procés, cal estimular la mostra amb un senyal altern, de manera que tots els productes generats en el semicicle positiu es compensaran en el negatiu. Mantenant així la mostra intacta de pertorbacions.

De manera gràfica es pot visualitzar amb la següent figura:

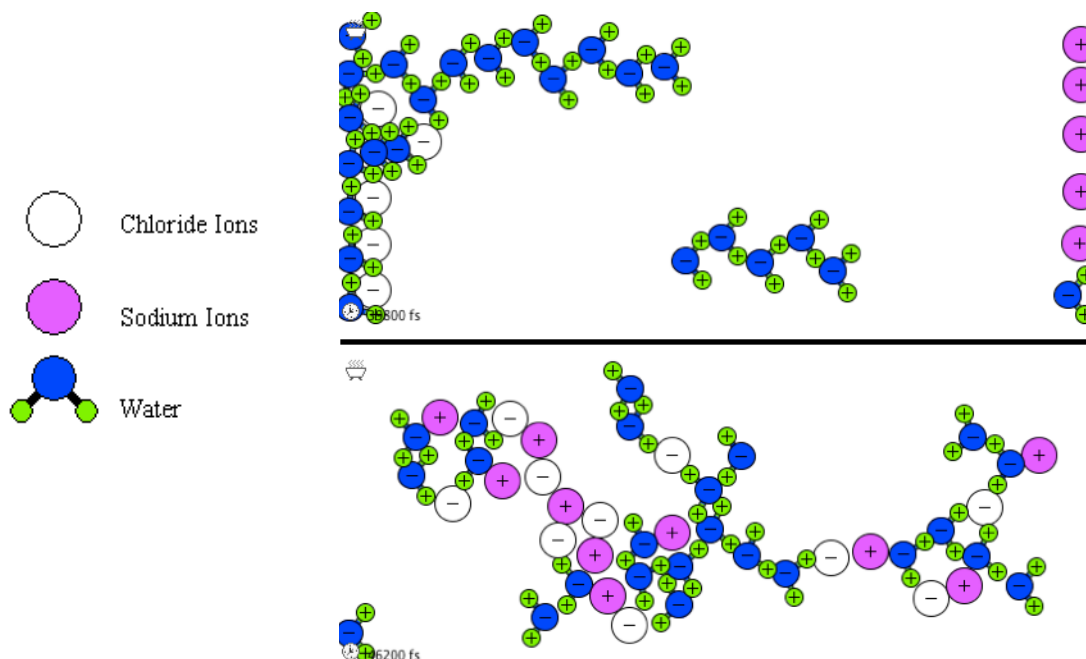


Fig 3. Ambdues imatges representen un fluid exposat a un camp elèctric de dreta a esquerra. El de dalt estimulat amb un senyal continu, i el de baix amb un d'altern.

Es veu com en contínua clarament es modifica l'estructura molecular, variant així les possibles mesures que s'hi puguin fer. Mentre que en alterna la mostra es veu només lleugerament alterada.

Segons estudis, per tal d'evitar el fenomen d'electròlisi, la mesura s'haurà de realitzar a una freqüència superior a 1 kHz. Si s'estimula amb un senyal quadrat el fenomen d'afectació varia lleugerament i s'estima que per a freqüències superiors a 3 kHz no s'altera la mesura. [6]

3.3 Dependència amb la temperatura

Altrament, la conductivitat no es manté constant en tot el rang de temperatures, sinó que varia en funció d'aquesta. Per aquest motiu, sempre expressem la conductivitat d'un material rectificada a 25 °C, tot i que la mesura s'hagi produït en una altra temperatura.

Tot i així aquesta variació de la temperatura no és constant per a totes les dissolucions, sinó que en funció de la dissolució varia. Aquesta variació sovint no és lineal i en dificulta el càlcul de la conductivitat a 25°.

Per tal d'estimar el valor del paràmetre a 25°C, es defineix un coeficient de temperatura de la conductivitat: [7]

$$\alpha_{\theta,25} = \frac{1}{\gamma_{25}} \left(\frac{\gamma_{\theta} - \gamma_{25}}{\theta - 25} \right)$$

On - α és el coeficient de temperatura
- γ és la temperatura a θ o a 25 °C

Que després el podem corregir de la següent manera:

$$\gamma_{25} = \frac{\gamma_{\theta}}{1 + (\alpha / 100)(\theta - 25)}$$

A partir d'aquest mètode aconseguirem una correcció lineal de la mesura.

Aquest mètode resulta molt útil per a temperatures properes als 25 °C, però si ens allunyem d'aquí la correcció es queda curta, i haurem de modificar-ne el factor. [8]

Posant per exemple l'aigua amb sal, el factor de correcció usual acostuma a ser del 2,1%, ara bé segons les mesures realitzades per Wetzel i Likens l'any 1990, aquest factor només es manté aproximadament entre els 17 °C i els 26 °C, tal com es mostra a la següent taula.

T14 - Factors per convertir la conductivitat específica de l'aigua a valors relatius de 25°C

°C	Factor de conversió	°C	Factor de conversió	°C	Factor de conversió
3	1,62	13	1,27	23	1,04
4	1,58	14	1,24	24	1,02
5	1,54	15	1,21	25	1
6	1,50	16	1,19	26	0,98
7	1,46	17	1,16	27	0,97
8	1,42	18	1,14	28	0,95
9	1,39	19	1,12	29	0,93
10	1,36	20	1,10	30	0,92
11	1,33	21	1,08	31	0,9
12	1,30	22	1,06	32	0,89

3.4 Consideracions i tècniques de mesura

Així doncs, a l'hora de realitzar un mesurador de conductivitat de fluids electrolítics, haurem de considerar els aspectes mencionats anteriorment. És evident que ens trobarem en casos, en concret l'elecció de la constant de cel·la, en els quals convindria ajustar-los a cada rang però que no podrem. Per tant, en aquest cas haurem de fixar la constant de cel·la K en un punt intermedi que ens permeti mesurar tot el rang de valors amb prou precisió.

Per altra banda ens haurem d'assegurar d'injectar un corrent altern amb un valor de contínua nul i a una freqüència suficient per evitar els possibles efectes d'electròlisi que aquesta pugui generar.

Finalment, haurem de tenir en compte de manera constant la temperatura de la dissolució, per poder normalitzar el resultat a una temperatura fixa de 25°C.

4. Model matemàtic

4.1 Caracterització del sistema

Un cop havent definit les mostres en qüestió, es requerirà un element el qual pugui excitar la mostra. S'utilitzarà un parell d'elèctrodes els quals mitjançant una diferència de potencial entre els dos provocaran un corrent de ions en la mostra. Aquesta conseqüència provocarà que des del punt de vista dels elèctrodes tinguem una càrrega amb una certa impedància.

Per això definim les mostres en qüestió com a sistemes d'elèctrodes i electròlits; aquests sovint poden ser modelats amb circuits d'elements concentrats (lumped-element circuits) [9], és a dir, modelar un model físic amb components de circuits elèctrics. En el nostre cas, el circuit equivalent de la solució amb un parell d'elèctrodes és la següent [10]:

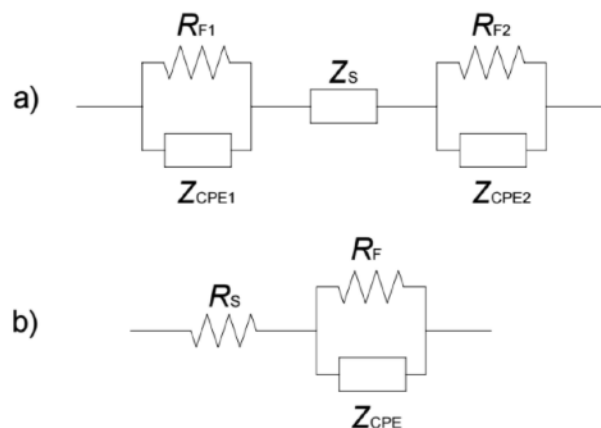


Fig 4.

- a) Circuit equivalent del sistema mesurat amb un parell d'elèctrodes.
 b) Circuit equivalent de solucions salines quan els dos elèctrodes són iguals.

$$Z_{CPE} = \frac{1}{As^\alpha}$$

On Z_s és la impedància de la solució, R_f és la resistència farídica de l'elèctrode, i la Z_{cpe} és la constant de fase que modela els elèctrodes [11]. Aquest model modela qualsevol solució amb qualsevol electròlits, ara bé, en les mostres salines, la impedància Z_s és real i equival a R_s , com es mostra a l'apartat b de la imatge. En el cas que els dos elèctrodes siguin exactament iguals, els podem agrupar amb una única R_f i una Z_{cpe} .

A partir d'aquesta anàlisi de les mostres en qüestió, s'observa com l'únic element que ens és important i que ens aporta informació de la solució és la resistència R_s . Per això haurem de procurar que el pes dels elements que conformen la sonda sigui el mínim possible respecte de la impedància de la solució. I intentar reduir al màxim la dependència d'aquests elèctrodes en el moment de la mesura, per així poder obtenir un resultat el més fidel possible.

4.2 Caracterització de la sonda

A partir dels elements del sistema amb els quals treballarem, cal dimensionar-los i preveure quins valors tindrà cada element del nostre model. D'aquesta manera podrem estimar com es comportaran aquests i quin resultat esperarem obtenir. Evidentment, cada composició d'elèctrodes variarà tant els components que la modelen (Z_{cpe} i R_f) com la resistència que hi haurà entre els dos, tot i analitzar la mateixa dissolució.

Per tal d'analitzar quins models són els més vàlids per a aquesta mesura, s'ha analitzat els diferents models de sondes que existeixen comercialment. Observem que principalment n'hi ha de tres tipologies diferents, les primeres, que consisteixen en dues plaques metàl·liques enfrontades i que conformen un cub entre les dues. Les que consisteixen en dos cilindres del mateix radi i separats una determinada distància. I finalment dos cilindres concèntrics.

Per tal de poder estimar quin valor de conductivitat mesurarem amb aquestes sondes, hem de realitzar-ne una anàlisi electromagnètica. Les anàlisis realitzades a continuació s'han centrat únicament en l'estimació de la resistència que aquests elèctrodes perceben entre el parell de terminals. S'ha decidit no incloure l'anàlisi de la capacitat induïda entre els dos, ja que el càlcul és força similar i seria repetitiu. Tot i així el valor de la capacitat es calcula i es té en compte en futurs apartats.

Plaques enfrontades

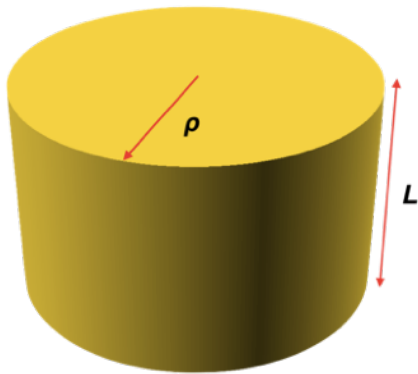
El primer cas de les dues plaques enfrontades és el que resulta més fàcil, ja que en podem esbrinar la conductivitat a partir de la definició de resistivitat:

$$R \approx \frac{1}{\sigma} \frac{d}{A}$$

Al tenir les dues plaques enfrontades, es pot deduir que aproximadament l'únic conductor que permetrà el pas de corrent és l'espai entre els dos elèctrodes en qüestió. Diem aproximadament ja que alguns ions que no són exactament entre els dos elèctrodes també permetran el pas de corrent, i provocarà que la resistència aparent dels elèctrodes sigui lleugerament inferior a la d'aquesta estimació. Aquest factor no inclòs en l'anàlisi el considerarem prou menyspreable respecte a la resta, ja que l'afectació que produirà serà mínima.

Cilindres concèntrics

Ara bé el cas dels dos conductors concèntrics resulta més complicat, ja que l'anàlisi de la resistència que hi ha entre els dos cilindres deriva de la densitat de corrent d'un cilindre com el de la figura. Per començar, analitzem la càrrega que s'acumula en un cilindre qualsevol. [12]



$$Q = \oint_{Cyl} D_s dS = D_s \int_{lateral} dS + 0 \int_{superior} dS + \int_{inferior} dS = D_s \int_{z=0}^L \int_{\phi=0}^{2\pi} \rho d\phi dz = D_s 2\pi\rho L$$

Fig 5. Cilindre

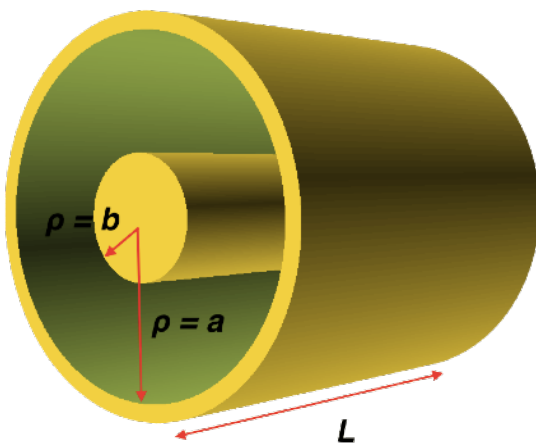
A partir d'aquesta càrrega obtinguda, podem obtenir la densitat de corrent en el cilindre. Aquesta es pot expressar en termes de densitat de càrrega ρ_L i de la longitud d'aquest cilindre en qüestió. Termes que són factors útils en el nostre cas perquè ens ajuden a dimensionar, en tant que paràmetres físics, com haurà de ser la sonda que nosaltres utilitzarem.

$$Q = \rho_L L$$

$$D_\rho = \frac{\rho_L}{2\pi\rho L}$$

$$D_s = D_\rho = \frac{Q}{2\pi\rho L}$$

En el cas en qüestió, en què tractem amb dos conductors concèntrics, només ens cal avaluar, en cada punt entre els dos cilindres, la densitat de càrrega per tal d'obtenir així la resistència que hi haurà entre els dos:



$$R = \int_a^b D d\rho = \int_a^b \frac{\rho_L}{2\pi\rho L} d\rho = \frac{\rho_L}{2\pi L} \ln \frac{b}{a} = \frac{\ln \frac{b}{a}}{2\sigma\pi L}$$

Fig 6. Cilindres concèntrics

Cilindres paral·lels

L'últim cas es resol d'una manera semblant al dels cilindres concèntrics. A partir de l'anàlisi de la densitat de corrent en un cilindre, podem saber com es comporten entre ells si aquests són paral·lels. Per començar a entendre el sistema, valorem que si la distància entre els dos cilindres és suficientment gran respecte al radi d'aquests, els podem considerar dues línies de càrrega paral·leles entre si.

Tenint la mateixa densitat de corrent que la calculada anteriorment:

$$D_{\rho} = \frac{\rho_L}{2\pi\rho L}$$

Considerant que el potencial que se'ls aplicarà als dos serà igual i oposat, també podem realitzar el mateix raonament des del punt de vista de la densitat de corrent, com es mostra a continuació:

$$V = V_1 - V_2$$

$$D_{\rho} = D_{\rho_1} + D_{\rho_2} = \frac{\rho_L}{\pi\rho L}$$

Finalment per obtenir-ne la resistència haurem de considerar aquesta densitat per a cada punt entre els conductors:

$$R = \int_r^{D-r} D d\rho = \int_r^{D-r} \frac{\rho_L}{\pi\rho L} d\rho = \frac{\rho_L}{\pi\rho L} \ln \frac{D-r}{r}$$

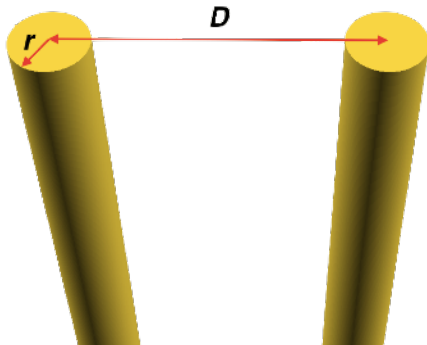


Fig 7. Cilindres paral·lels

Tenint en compte la consideració inicial d'entendre els dos cilindres com a línies de càrrega, aquest resultat únicament serà vàlid si la distància entre els dos és suficientment gran per menysprear el radi del cilindre, és a dir, $D \gg r$. D'aquesta manera la resistència aparent per a aquest parell d'elèctrodes és la següent:

$$R = \frac{\rho_L}{\pi L} \ln \frac{D}{d} = \frac{\ln \frac{D}{r}}{\pi\rho L}$$

5. Marc pràctic

Els mesuradors de conductivitat són eines comunes utilitzades dins l'entorn industrial, ja que existeixen processos en els quals és important o bé imprescindible mesurar o controlar el nivell de salinitat en líquids. Usualment aquest tipus de sensors són utilitzats com a complements d'altres sensors i/o sistemes, com poden ser els mesuradors de cabal electromagnètics, entre d'altres.

En un inici el projecte va començar amb diferents objectius o aplicacions del sensor. Com a proposta es volia utilitzar el sensor en canonades industrials per tal de determinar la conductivitat de l'aigua o fluid que hi circula, o fins i tot la quantitat d'aigua que hi ha dins. Tal com es mostra en l'esquema següent:

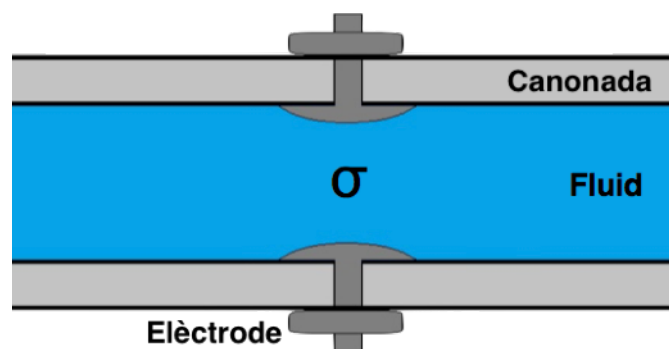


Fig 8. Diagrama d'elèctrodes en una canonada

Per altra banda, i com a diferent aplicació, també es va considerar interessant la realització d'un sensor independent de forma similar a la d'un llapis amb el qual poder mesurar la conductivitat únicament submergeint-ne el capçal a l'aigua. Com un element portable capaç de ser utilitzat en diferents aplicacions.

Aquest dispositiu independent hauria d'incorporar un microcontrolador, una pantalla petita i piles. Tal com la majoria d'aparells comercials que actualment existeixen al mercat, i per tant segueixen el diagrama que es mostra a continuació:

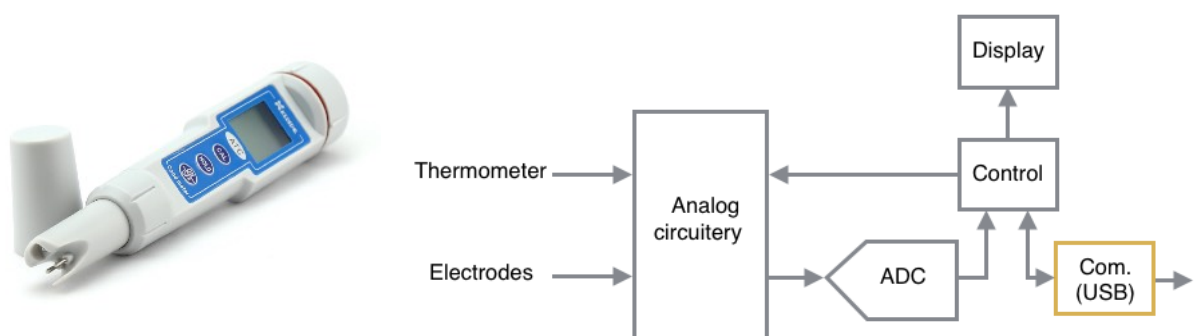


Fig 9. A l'esquerra un producte comercial, i a la dreta un esquema genèric del sistema

Finalment també es va proposar poder imitar un dels sensors de conductivitat que es col·loquen a animals marins per tal de poder realitzar-ne estudis de comportament i seguiment.

Com s'observa en tots tres casos bàsicament les principals diferències són els mètodes de bolcatge de dades, ja sigui per un protocol de comunicació estàndard (el primer) una pantalla que ens indiqui els valors (segon) o una memòria (tercer). Per tant, s'ha valorat i buscat un sistema de mesura que pugui ser encabit en qualsevol d'aquests objectius. Intentant trobar un mecanisme de mesura el més senzill i versàtil possible amb un rang de valors el més gran possible. Per això s'ha començat analitzant el sistema i valorant diferents possibles sistemes de mesura els quals com a usuaris puguem utilitzar.

S'ha valorat, tot i que sigui ambiciós, que un rang útil per realitzar un mesurador de conductivitat vagi des dels 20 μS fins als 60 mS , ja que aquests extrems cobriren pràcticament tot el rang de conductivitats que podem trobar en l'aigua de manera natural, des de l'aigua de mar fins a l'aigua destil·lada.

5.1 Anàlisi experimental del sistema

Tot i el modelatge matemàtic del sistema, vam valorar que seria convenient posar a prova el model amb la finalitat d'observar-ne el comportament.

En un inici, es va intentar provar de realitzar la mesura únicament amb dos elèctrodes circulars submergits en la solució. Intentant recrear uns possibles elèctrodes situats als extrems d'una canonada d'aigua.

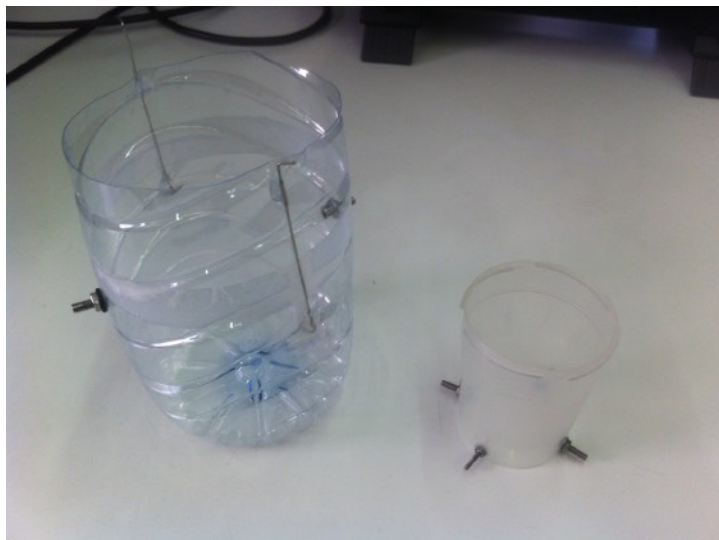


Fig 10. Primers models experimentals d'elèctrodes

Mitjançant aquesta mesura es va poder observar el gran efecte capacitiu que aporten els cables dels elèctrodes, arribant a la conclusió que si es vol reduir o minimitzar-ne l'efecte s'haurà d'escurçar tant com sigui possible la distància d'aquests cables o bé treballar a una freqüència prou alta per poder-ne reduir al màxim els seus efectes.

Altrament, com a resultat de les mesures, obtenim resultats molt distants per als dos tipus d'elèctrodes de diàmetres i dimensions diferents. Obtenint gairebé un resultat el doble de gran per als elèctrodes de diàmetre inferior amb el mateix fluid.

Després d'haver realitzat i provat aquestes dues anàlisis, descartem la mesura de la conductivitat mitjançant el parell d'elèctrodes a cada extrem d'una canonada, ja que el resultat variaria molt en funció de cada canonada, elèctrodes i posició. Per aquesta raó es va valorar quina de les tres tipologies d'elèctrodes analitzades prèviament era la millor per al nostre cas.

5.2 Valoració i elecció dels elèctrodes

A primera vista sembla evident que els elèctrodes més precisos per realitzar la mesura eren les dues plaques enfrontades, ja que els conductímetres d'alta gamma són els que utilitzen. Ara bé, tot i que aquestes plaques enfrontades són molt útils per a un determinat rang de conductivitat, en el nostre cas, en què volem mesurar un rang molt ampli, aquests elèctrodes perden part dels avantatges sobre els altres.

En el cas dels cilindres concèntrics, són difícils de construir i no són pas més precisos que els cilindres paral·lels. Ara bé, tot i la dificultat, aquests resulten útils en fluids en què hi ha impureses, ja que la seva estructura dificulta que puguin passar entre elèctrode i elèctrode. I encara menys que s'hi quedin enganxades.

Finalment l'últim model d'elèctrodes, els cilindres paral·lels, és el que ha estat escollit. Aquest resulta útil en el gran rang de mesures en què nosaltres ens mourem, i a més resulta molt senzill de realitzar o bé de modificar.

Per tal de realitzar aquest cap de mesura s'ha confeccionat un model senzill amb impressió 3D, i amb el qual podem mesurar les solucions salines.



Fig 11. Cap de mesura realitzat amb impressió 3D

Gràcies als càlculs prèviament descrits, podem estimar el valor que haurem d'obtenir amb aquest cap de mesura que conté dos elèctrodes d'1 mm de diàmetre, 10 mm de llargada i una separació de 10 mm.

Segons les condicions fixades inicialment hem de ser capaços de mesurar dins el rang de $\sigma_{\max} = 60 \text{ mS/cm}$ als $\sigma_{\min} = 20 \mu\text{S/cm}$; per tant, esperem mesurar resistències dins el següent rang de valors, entre el màxim i el mínim:

$$R_{\sigma_{\max}} = \frac{\ln \frac{D}{r}}{\pi \sigma L} \Big|_{\sigma=\sigma_{\max}} = 12 \Omega$$

$$R_{\sigma_{\min}} = \frac{\ln \frac{D}{r}}{\pi \sigma L} \Big|_{\sigma=\sigma_{\min}} = 36 k\Omega$$

Experimentalment hem obtingut els següents valors: $R_{\sigma_{\max}} = 17 \Omega$ i $R_{\sigma_{\min}} = 72 k\Omega$, valors que s'aproximen molt a l'esperat, sobretot per a conductivitat alta. Creiem que en el cas de la baixa conductivitat, no s'aproxima tant al valor esperat per la dificultat d'aconseguir mostres de tan baixa salinitat. Per tant atribuïm a aquesta desviació de la $R_{\sigma_{\min}}$ a una falta de rigor en la mesura. Tot i així ens és útil per validar els càlculs i per tant poder tenir una idea del rang de valors en què ens mourem.

Un cop havent calculat la resistència aparent entre els terminals, resulta útil també analitzar-ne la capacitat induïda entre els dos. Aquest valor que caracteritza les sondes és molt important, ja que un gran pes d'aquesta capacitat pot provocar una gran desviació en el resultat. La capacitat entre els dos serà de:

$$C \approx \frac{\pi \epsilon}{\ln \frac{D}{d}}$$

Com és d'esperar, la permitivitat no es manté constant per a qualsevol tipus d'aigua, cobrint un rang de $\epsilon = 81\epsilon_0$, i de $\epsilon = 30\epsilon_0$ per a aigua de salinitat mitjana (a 20°C)[16]. Aquesta conductivitat comprèn uns valors com a màxim de $C_{\max} \approx 100 pF$ i un mínim d'aproximadament $C_{\min} \approx 360 pF$. Observem que el valor crític, i per al qual haurem de dimensionar el sistema, serà per al cas de la conductivitat més alta, ja que ens comportarà una major capacitat.

5.3 Valoració de les tècniques de mesura

Per tal de poder realitzar la mesura dins del rang de mesura s'han valorat els mètodes descrits a continuació, tot tenint en compte les consideracions descrites prèviament a l'analitzar mostres electrolítiques.

5.3.1 Càrrega i descàrrega d'un condensador

Atenent que es tracta de mesurar una resistència amb una tensió alterna, es proposa un mètode de mesura consistent en l'anàlisi de la càrrega i descàrrega d'un condensador a través de la resistència aparent en terminals de l'elèctrode.

Amb aquest mètode, si excitem aquest sistema amb un senyal polsat, per a cada cicle, el condensador es carregarà i descarregarà constantment. Aquesta càrrega serà més o menys ràpida en funció de la resistència que mesurarà l'elèctrode. De manera que mesurant el temps que

el condensador triga a assolir un determinat nivell, podem esbrinar quina és la impedància que detecta l'elèctrode i per tant en podem mesurar la conductivitat.

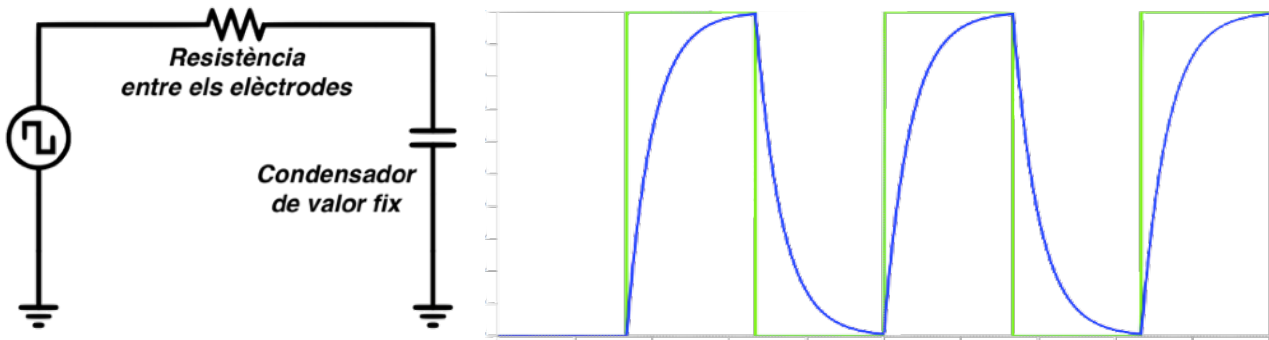


Fig 12. A l'esquerra l'esquema del circuit equivalent, i a la dreta les corbes de càrrega i descàrrega del condensador

Mitjançant aquest mètode, i mesurant la tensió al condensador en diferents temps fixats, es pot esbrinar quina és la resistència que s'està mesurant. La corba de càrrega resultant és exponencial, i com a tal, s'han de mesurar amb molta precisió els valors de tensió en uns temps molt concrets, ja que una petita variació d'aquesta lectura provoca una desviació molt elevada del resultat esperat.

5.3.2 Amplificador amb guany variable

Aquest segon mètode, consisteix a generar un senyal i amplificar-lo. La mesura d'aquest mètode recau en el fet que l'amplificació d'aquesta etapa dependrà de la resistència entre els elèctrodes. Un dels avantatges que presenta aquest mètode és que permet injectar un senyal qualsevol entre els elèctrodes, podent ser un senyal sinusoidal, triangular, quadrat...

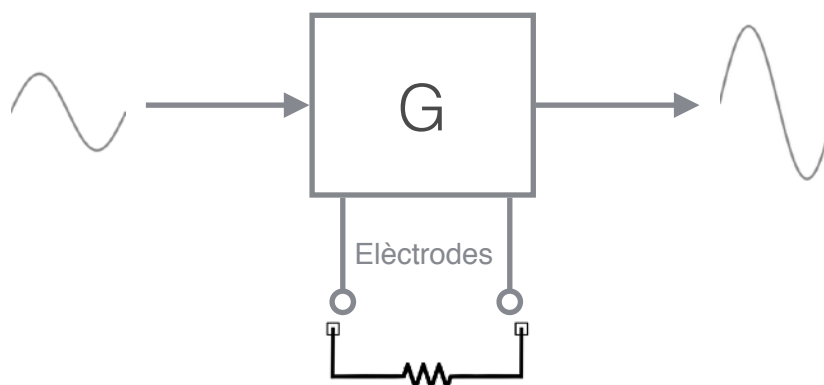


Fig 13. Esquema del mètode de mesura per amplificador de guany variable

Aquest mètode de mesura es pot realitzar fàcilment utilitzant amplificadors operacionals, per exemple amb el circuit descrit a la següent imatge. Per utilitzar aquest sistema és important no introduir cap tipus de component continu que pugui generar efectes d'electròlisi en la mostra.

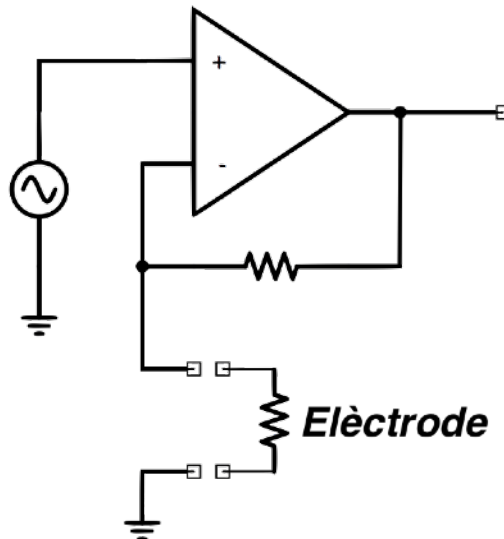


Fig 14. Proposta de circuit per al mètode d'amplificador amb guany variable

5.3.3 Divisors de tensió

De la mateixa manera que un parell de resistències connectades en sèrie i alimentades per una font de tensió divideixen la tensió entre elles en un valor intermedi determinat per al valor de les dues. Si d'una d'aquestes en coneixem el valor, en podrem calcular l'altra. D'aquesta manera únicament amb una resistència i un generador de senyal podem conèixer el valor de la resistència entre els elèctrodes.

Aquest mètode ens permet mesurar de manera molt senzilla el valor de la resistència, en la freqüència que més ens convingui en cada moment. Tot i així, el rang de valors mesurables és força reduït si només utilitzem una única resistència. Per tal d'incrementar aquest rang cal disposar-ne de tantes com rangs es vulguin tenir.

El mètode escollit ha estat aquest últim, ja que hem considerat que amb aquest podíem aconseguir realitzar mesures a diferents freqüències amb força facilitat. Per altra banda, per poder cobrir tot el rang de valors s'han escollit diferents resistències de valor conegut donant com a resultat el següent circuit:

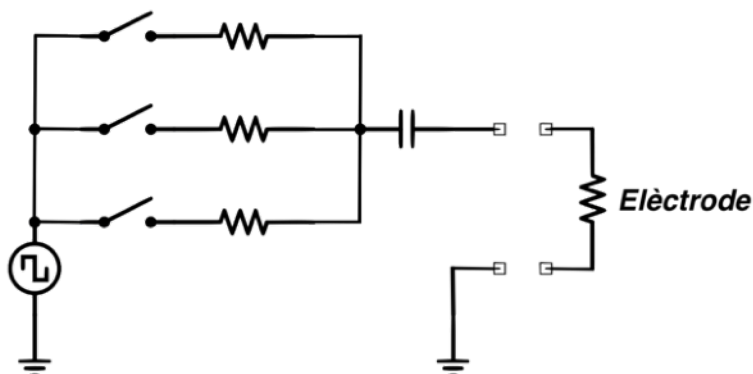


Fig 15. Esquema del mètode de mesura per divisors de tensió

6. Muntatge físic i funcional

Havent escollit el mètode de mesura, com és evident, cal posar-lo a la pràctica. Per tal de poder-lo provar amb la millor comoditat es vol realitzar un mesurador independent. Tal com s'ha descrit anteriorment, aquest mesurarà la conductivitat del fluid quan el cap de mesura se submergeixi.

Per tal de poder-lo realitzar, ens cal una anàlisi de les diferents parts que aquest aparell necessita. Per fer servir el sistema en qüestió, utilitzarem un microcontrolador capaç de generar el senyal altern i quadrat, i a més, un convertidor analògic a digital prou ràpid amb el qual podrem mesurar la resposta que provoca el fluid. Per aquesta raó, aquest convertidor requerirà de suficient exactitud i velocitat per cobrir el rang de valors proposat amb suficient precisió.

Atenent que es tractarà d'un mesurador independent, el sistema requerirà algun tipus d'indicador capaç de mostrar a l'usuari el resultat de la mesura. Per tal de realitzar-ho, s'utilitzarà una pantalla de tipus LCD per mostrar-ne els resultats, així com botons per poder-hi interactuar.

A més per tal de confeccionar un mesurador independent, aquest haurà de ser alimentat mitjançant bateries o bé piles. En el cas que aquesta darrera sigui l'opció, el sistema requerirà d'algun tipus de regulador lineal o un convertidor DC/DC. Gràcies a aquests podrem aconseguir de la manera més estable possible la tensió d'alimentació. Cal remarcar la importància d'aquest punt, ja que si l'alimentació no és prou estable la mesura variarà depenent de les condicions externes al sistema. Com per exemple l'estat de descàrrega de les bateries i/o piles.

Degut al fet que el resultat de la conductivitat depèn fortament de la temperatura, haurem d'incloure-hi un sensor per tal de sensar-la i així poder compensar la desviació en la mesura de la conductivitat.

Atenent a totes aquestes parts necessàries per al sistema, el diagrama complet serà el següent:

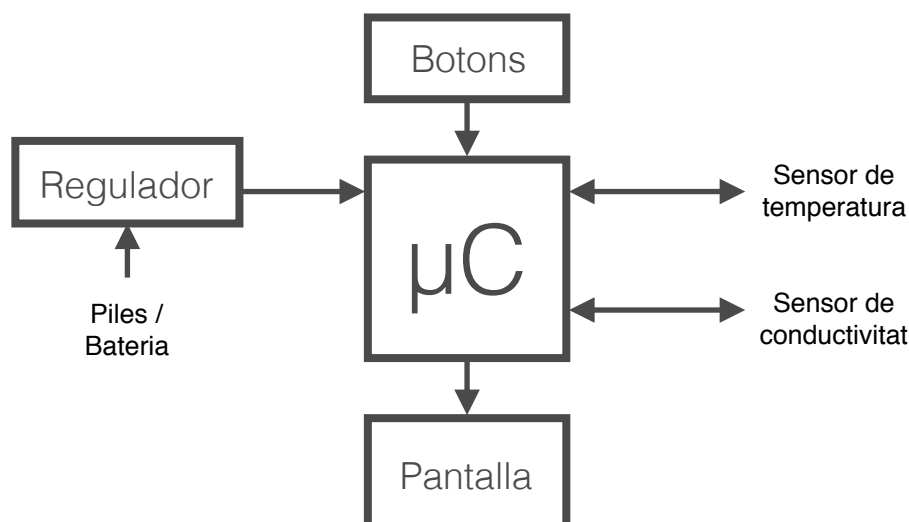


Fig 16. Diagrama del sistema complet

6.1 Elecció dels components

El principal factor que s'ha fixat per tal d'escollir els components que més s'adeqüin al sistema, és el de l'eficiència energètica. Ja que estem parlant que muntarem un sistema independent capaç de mesurar la conductivitat, el sistema haurà d'optimitzar al màxim la bateria amb un consum mínim per tal de romandre el màxim temps possible en funcionament.

Per aquestes raons s'han escollit els següents components com a elements del sistema.

Microcontrolador

Per aquesta raó energètica, s'ha escollit com a microcontrolador un controlador de Microchip de la gamma 24F, família de 16 bits i de baix consum. Gamma de la qual es destaca el mode sleep de molt baix consum, que redueix el seu consum aproximadament de 20nA, en estat de repòs.

El controlador escollit en concret ha estat el *PIC24FJ128GA704*, aquest ens ofereix un convertor ADC de 12 bits de resolució que pot realitzar fins a 200.000 mostres per segon. Suficient per als nostres requeriments, a més de contenir totes les connexions necessàries ja sigui per activar la mesura o bé per comunicar-se amb la pantalla.

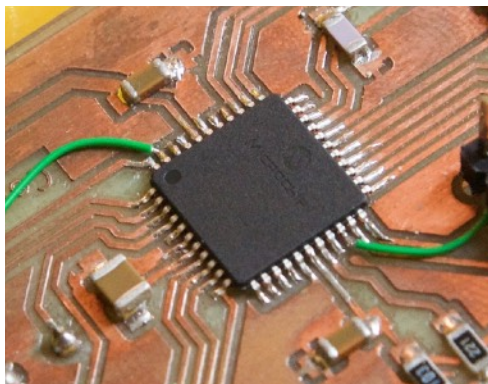


Fig 17. Imatge del microcontrolador al prototip

Regulador

Pel que fa a l'alimentació, s'ha optat per utilitzar un parell de piles AAA, que ens proporcionaran energia suficient per alimentar el sistema. Com a regulador, i per tal d'aconseguir la tensió d'alimentació de 3,3 V, s'ha utilitzat un convertor de corrent continu a corrent continu del tipus charge pump, en concret el *TPS60212*. Aquesta tipologia de convertors tot i ser menys eficients, eviten utilitzar bobines que encareixin el sistema.

Aquest tipus de regulador ens permet optimitzar les piles al màxim i obtenir fins a un 80% més d'energia que amb un regulador lineal. Ja que aquests tipus de convertors poden mantenir la

mateixa tensió de sortida per a un rang molt gran de tensions d'entrada, és a dir la tensió de les dues piles. Aquest valor mínim en concret pot arribar fins als 1,8 V, tensió que ens podem trobar quan les dues piles ja gairebé són al límit de la descàrrega. Amb aquest valor de descàrrega el microcontrolador no podria funcionar, però és suficient perquè aquest convertidor pugui continuar operant.

Aquest controlador, a més també compta amb un senyal d'activació per fer-lo funcionar en dos modes diferents, el mode SNOOZE i l'ON. La diferència entre aquests dos estats és el corrent màxim que pot subministrar, ja que en ambdós estats continua amb els 3.3 V de sortida. Tot i així en mode SNOOZE com a màxim pot subministrar 2 mA, mentre que quan no ho està pot arribar a subministrar fins a 50 mA.

Aquest component té un autoconsum, en mode SNOOZE, inferior als 2 μ A, més petit que l'autodescàrrega de la majoria de piles. Fet que ens serà molt útil per aturar tot el sistema quan aquest detecti un llarg període d'inactivitat. Ajudant així a reduir força el consum total del sistema.

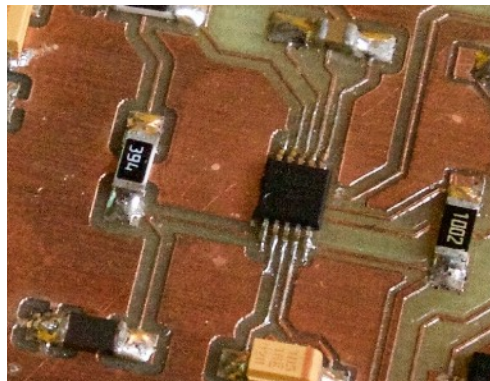


Fig 18. Imatge del regulador al prototip

Pantalla LCD

Per poder mostrar els valors del sensor, s'ha escollit una pantalla LCD de tipus 16x2 (és a dir, dues files de 16 caràcters) amb retroil·luminació per tal que es pugui veure en entorns foscos o amb poca llum. S'ha escollit el model *EADOGM162E-A* per les seves petites dimensions i el seu poc gruix. El protocol de comunicació amb aquesta pantalla serà mitjançant el protocol SPI, que el fa perfecte per al nostre cas.

Sensor de temperatura

Per tal de tenir controlada la temperatura del líquid en tot moment, s'ha escollit un termistor de coeficient negatiu, el qual podrem submergir en el fluid.

Incorporació completa

Finalment havent completat l'elecció dels components, s'ha confeccionat el següent esquema complet, on es poden veure com s'interconnecten les diferents parts del sistema descrites anteriorment:

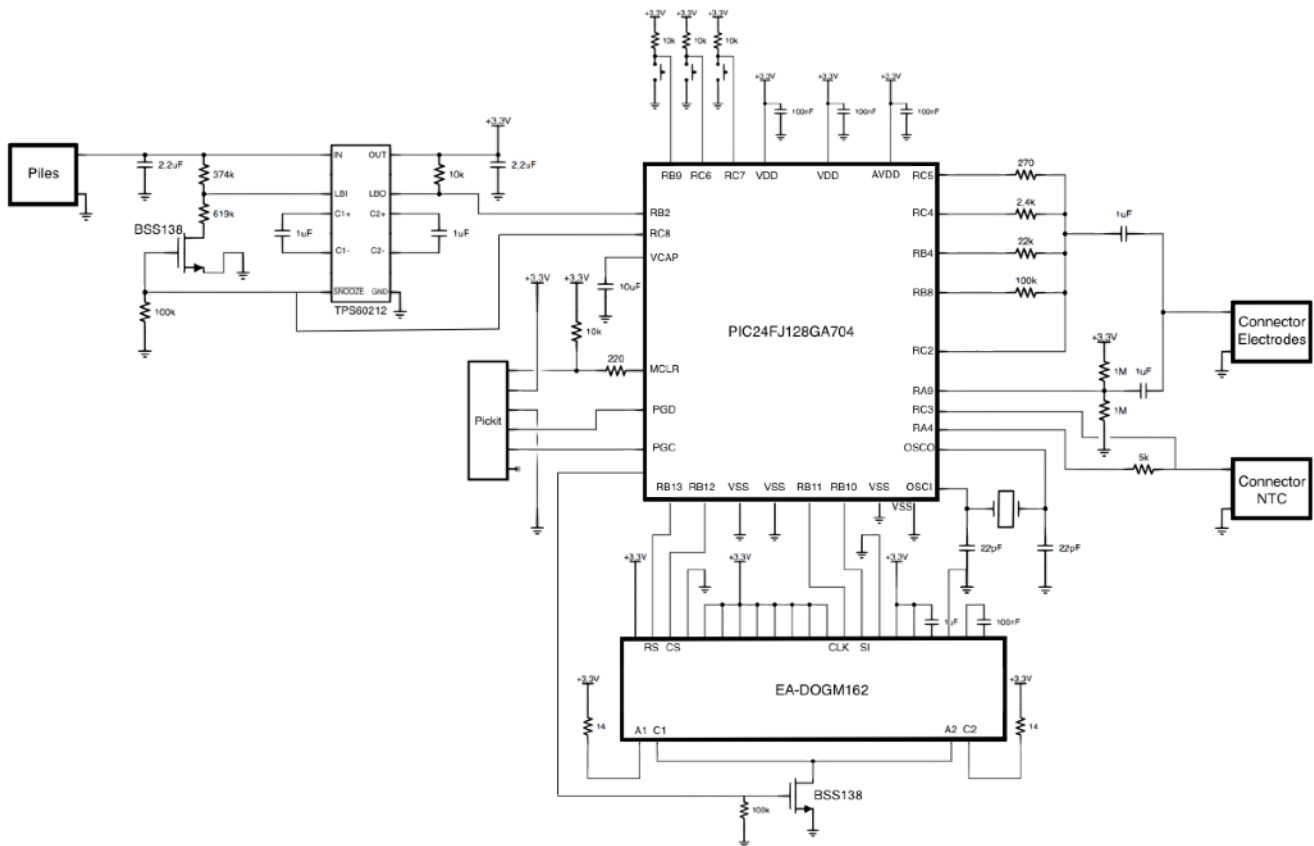


Fig 19. Esquema del sensor complet

Com s'observa, a més de mesurar la tensió de l'elèctrode s'ha afegit un segon punt de mesura amb un nivell de contínua de $V_{CC}/2$. D'aquesta manera es pot realitzar la mesura del nivell de tensió tant en el període positiu com en el negatiu, augmentant així la precisió del sistema.

6.2 Realització física

Amb la intenció de realitzar un sensor independent, s'ha ideat el sensor de forma allargada, similar a un bolígraf amb un parell d'elèctrodes i un sensor de temperatura a un extrem. De manera que per poder-lo utilitzar només calgui submergir-ne la punta amb els sensors i esperar que es realitzi la mesura.

6.2.1 Realització del circuit imprès

Per tal d'ajuntar tots els components s'ha realitzat una placa de circuit imprès. Aquesta placa s'ha imprès a la mateixa universitat utilitzant una màquina del tipus CNC. S'ha procurat que l'espaiat entre components no sigui molt petit ja que sinó el procés de soldar-ho hagués estat força més difícil i costós. Tot i així s'ha intentat reduir al màxim l'espai perquè el conjunt no fos excessivament gros (Vegeu Annex 1 - 11.1.2 Esquema amb KiCad i layout del sensor)

El disseny de la placa s'ha fet per ordinador utilitzant el software de programari lliure KiCad, que ens ha permès dissenyar tant l'esquema com el layout.

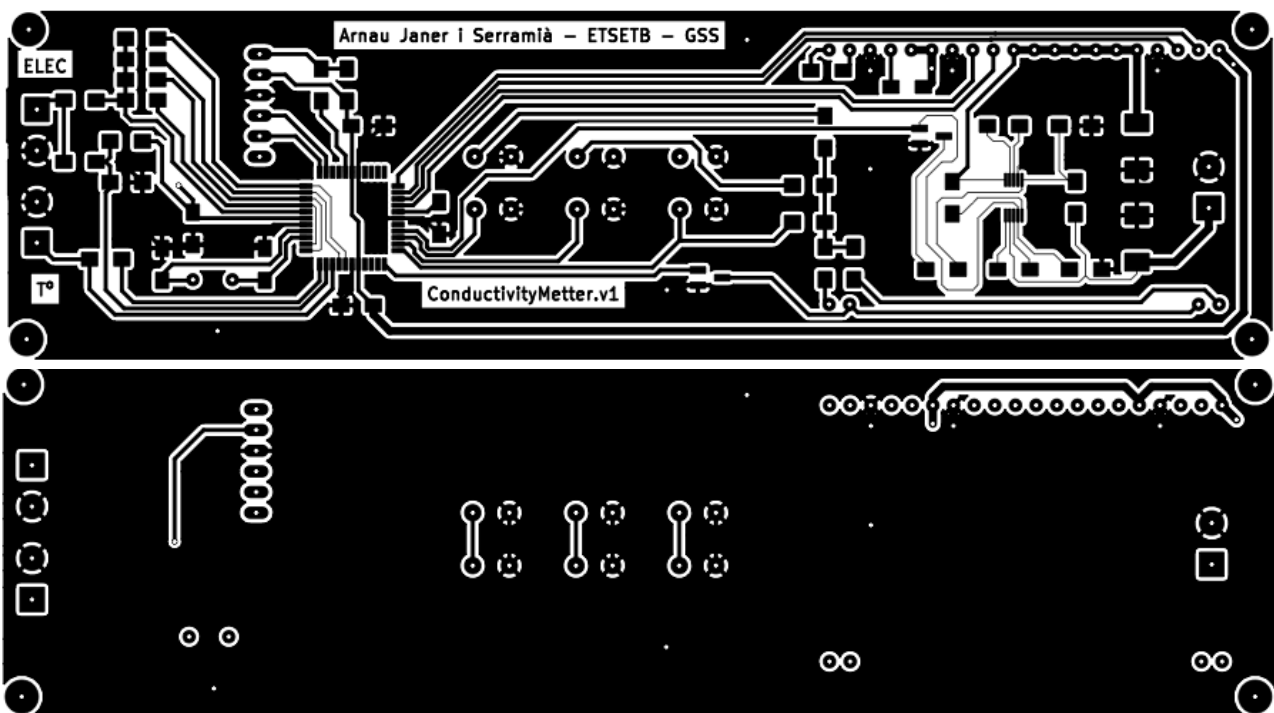


Fig 20. Layout del sistema

Com es pot observar en el disseny, hi ha més connexions que les descrites en l'esquema presentat prèviament. Aquestes connexions no descrites s'han afegit per tal de poder sensar, si s'escau, més tensions que poden influir en la correcta mesura del sensor. D'aquesta manera aprofitem al màxim possible els pins del microcontrolador deixant-ne el mínim en desús. Exemple d'això són les connexions d'entrada del sensor, a part de connectar aquests terminals als pins generadors del senyal quadrat, també s'han de connectar a un pin analògic. Aquest serà capaç de detectar si aquesta tensió és exactament la d'alimentació, o per contra una de lleugerament inferior. Informació rellevant ja que una alteració d'aquesta també pot provocar una alteració en el resultat de la lectura.

Com es pot observar en la següent figura els resultats han estat prou bons. I les pistes, fins i tot les més petites, susceptibles que no s'imprimissin bé, han quedat en molt bon estat. Aquestes

pistes en concret són les del component *TPS60212*, que té l'encapsulat més petit de tot el sistema.

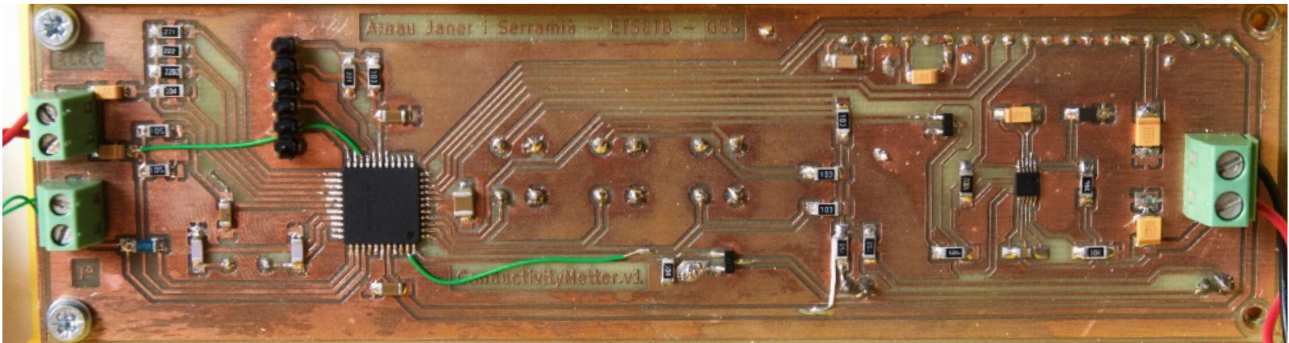


Fig 21. Placa de circuit imprès amb tots els components

6.2.2 Realització de la carcassa

Com a sensor independent que pugui anar amunt i avall, s'ha realitzat la següent capsa per tal de poder-la moure i així tot el sistema complet estigui compacte. El principal objectiu amb què s'ha realitzat aquesta carcassa és que pugui ser submergida en un líquid sense malmetre'n l'interior. (Vegeu Annex 3 - Fitxers de disseny de la carcassa)

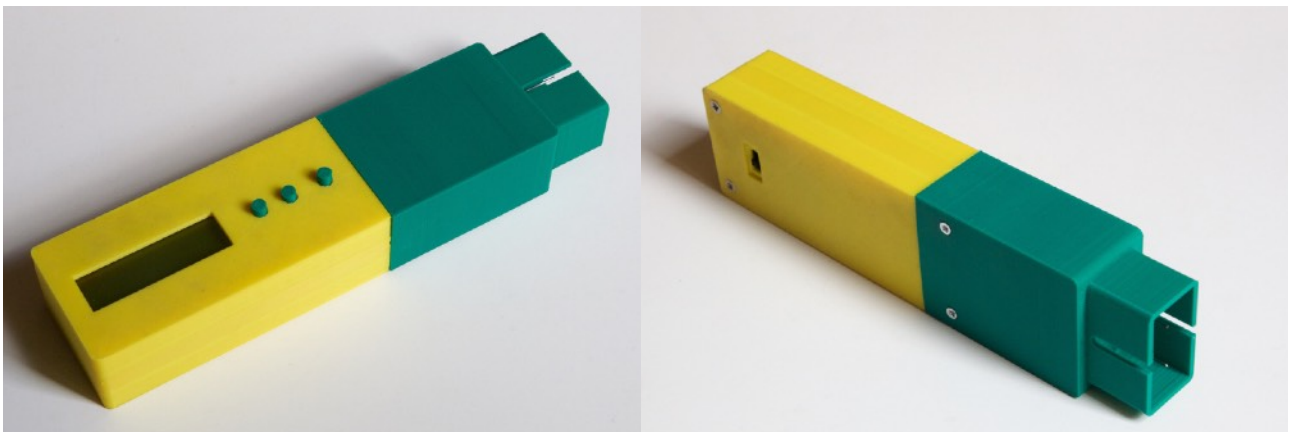


Fig 22. Resultat final de la carcassa

Dit això, la capsa haurà de ser suficientment estanca per evitar que l'aigua pugui malmetre l'electrònica interior. Amb una utilització correcta del sensor, mai no s'hauria de submergir més que el cap de mesura mateix. Tot i així i per seguretat, hem de procurar que la capsa sigui el més estanca possible. Per a millorar la estanqueïtat del sistema a part de realitzar el capçal amb una peça diferenciada s'han segellat les obertures tant del sensor de temperatura com els elèctrodes amb cola calenta tal i com es mostra a la imatge següent.

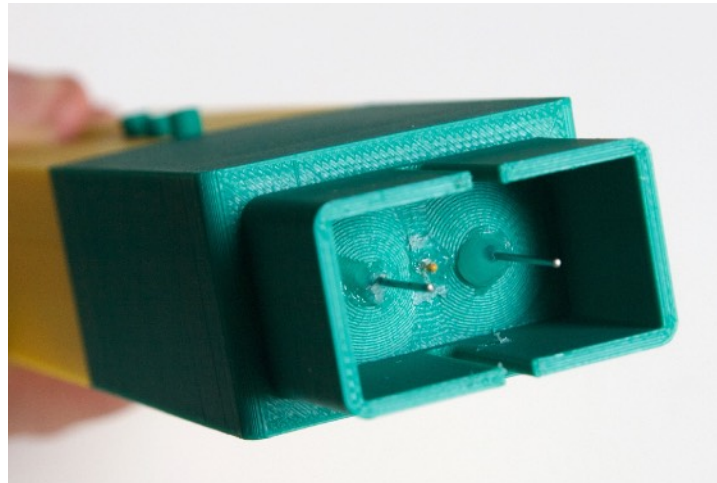


Fig 23. Cap de mesura

Aquesta carcassa s'ha realitzat íntegrament amb impressió 3D, amb tres parts diferents. La superior, amb els forats de la pantalla i els botons. La inferior, amb espai per al portapiles i els forats per poder-la enganxar amb la part superior. Finalment la part del cap de mesura que cobreix part de les altres dues peces, protegint aquestes de la possible entrada d'aigua i alhora retenint-les perquè no se separin.

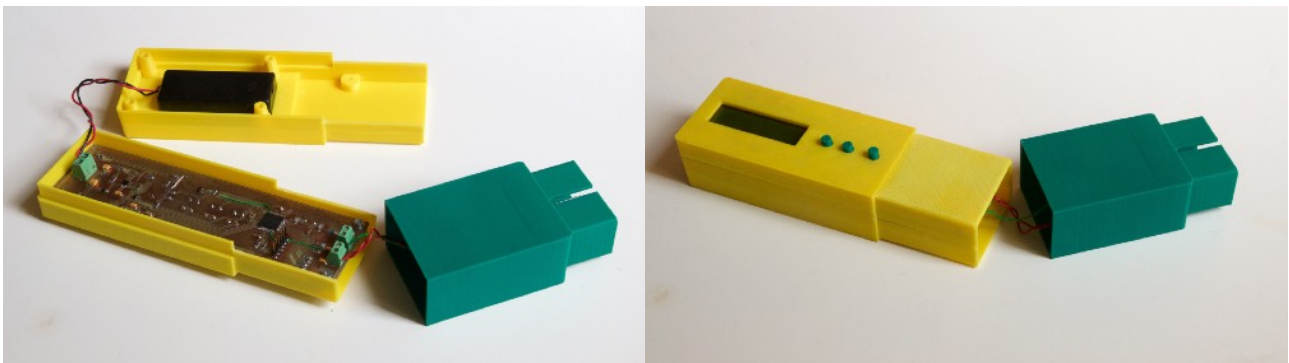


Fig 24. Les 3 peces de la carcassa i l'encaix entre elles. De color verd el cap de mesura i els tres botons

6.3 Cost del sistema

Tot i que el sensor s'ha realitzat com a treball de final de grau, els materials i les hores dedicades, tant en la recerca de funcionament com en la realització, tenen un cost important de tenir en compte per tal de quantificar el sistema.

A continuació es llisten tots els components amb el seu cost per tenir una idea aproximada del cost total:

Realització de la placa PCB de prototip:	30,00 €
Microcontrolador PIC24FJ128GA704	2,01 €
Conversor DC/DC TPS60212	1,54 €

Pantalla EADOGM162E-A	15,58 €
Retroalimentació per a la pantalla	4,98 €
Resta de components electrònics	4,00€ (aprox)
Suport per a les dues piles AAA	1,63 €
Realització de les 3 peces amb impressió3D	3,00€ (aprox)

Això representa un cost parcial, ja que es refereix únicament als materials: 62,74 €. Per altra banda també s'ha d'incloure a aquest cost la dedicació invertida en el projecte per part de l'autor. Aquest cost immaterial es pot quantificar amb la quantitat d'hores invertides. Comptant que el projecte es va iniciar a mitjan febrer i ha tingut una durada fins a finals de juny, amb una dedicació mitjana d'aproximadament 25 hores setmanals, resulta un total de 450 hores, que es poden desglossar en recerca, disseny, muntatge físic i programació.

(La Llista completa de components es troba a l'Annex 1 - 11.1.3 Llistat de components)

7. Teoria de funcionament

7.1 Sensor de conductivitat

Per tal de poder mesurar amb precisió la conductivitat de l'aigua, la mesura s'ha realitzat estimulant el fluid mitjançant un senyal quadrat de 50 kHz. Aquesta freqüència s'ha escollit per evitar qualsevol tipus d'electròlisi a l'aigua, i així també disminuir al màxim els possibles efectes capacitius que puguin presentar els elèctrodes i els cables d'aquests.

Segons el circuit proposat, les ones que obtenim en els dos terminals de mesura són les següents:

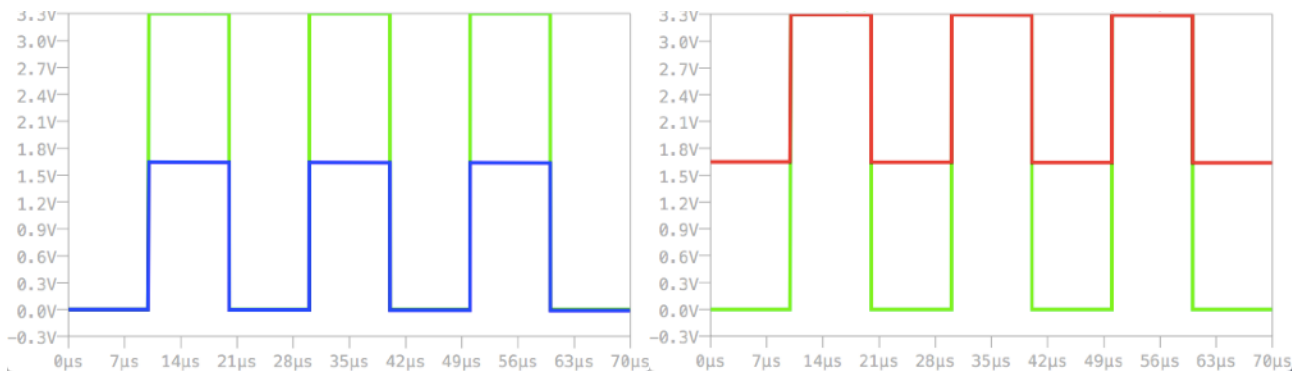


Fig 25. A l'esquerra (i de color blau) tensió mesurada als extrems dels elèctrodes, i a la dreta (en vermell) el mateix senyal al terminal positiu del condensador.

Com s'observa, el resultat obtingut no s'assembla a l'esperat, ja que el nivell de contínua en terminals dels elèctrodes no és nul com s'espera. Això és degut al fet que existeix un efecte transitori fins que no es carrega el condensador i s'arriba al règim permanent. Per aquesta raó, sempre que generem els senyals d'estimulació, haurem d'esperar que passi aquest règim transitori per poder començar la mesura. Que tindrà una durada més llarga per a les resistències grans i per contra més curta en les petites.

Per tal d'esbrinar quant poder començar la mesura, ens serà molt útil poder conèixer exactament quant durarà aquest temps transitori, ja que no podrem realitzar mesures repetitives, i per tant analitzables, fins que no superem aquesta etapa. Analitzant el circuit, podem obtenir la constant de temps d'aquest, que es tracta d'un RC:

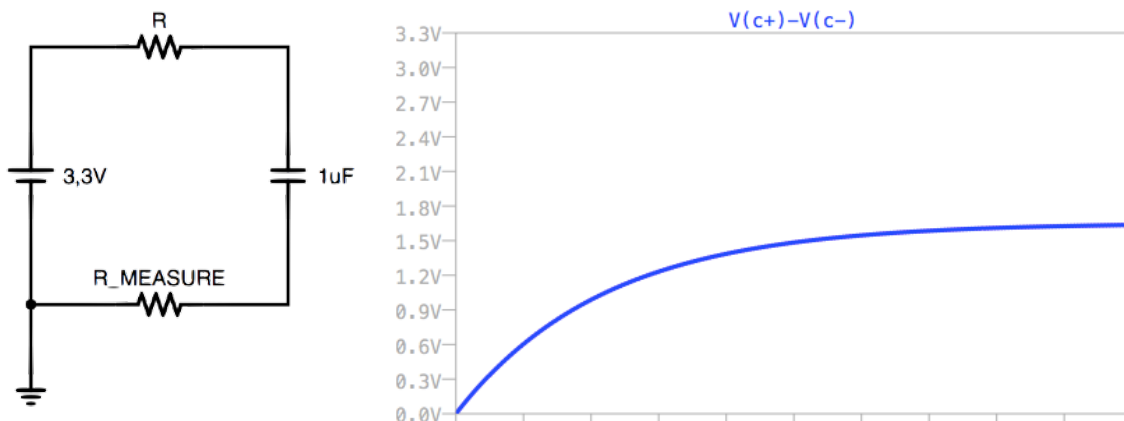


Fig 26. A l'esquerra el model per calcular la constant de temps. A la dreta la càrrega de la tensió en els terminals del condensador per a una tensió de senyal quadrada a 50 kHz

Analitzant el circuit trobem que $\tau = RC = (R + R_{MEAS})C$

Podent preveure aquest temps, esperarem sempre un mínim de 5τ per començar a realitzar les mesures. Valor que variarà tant en funció de la resistència a mesurar com en funció de la resistència injectora de corrent representativa del rang de la mesura. Temps que per tant no coneixerem prèviament.

D'aquesta manera, tot i que no exactament, un cop sabem ja el temps que haurem d'esperar entre la generació del senyal i la mesura, només ens faltarà saber com generar i mesurar el senyal. Per generar el senyal quadrat s'ha fet mitjançant el mòdul comptador intern del mateix controlador (*CAPTURE/COMPARE/PWM/ TIMER MODULES (MCCP)*). Atenent que el valor de la conductivitat el trobarem en l'amplitud de la tensió entre terminals a l'elèctrode, n'haurem de mesurar l'amplitud mitjançant el mòdul conversor analògic a digital (*12-BIT A/D CONVERTER WITH THRESHOLD DETECT*).

La mesura del valor de tensió s'ha de realitzar en cada flanc del senyal quadrat que estimula l'elèctrode. Perquè la mesura sigui vàlida, el mostreig ha de ser suficientment ràpid perquè el flanc no varii durant l'adquisició. Això ens comporta que el conversor ha d'operar com a mínim a una freqüència doble a la del PWM, és a dir a 100 kHz. A partir d'aquest requeriment s'ha escollit l'oscil·lador del sistema, i per tant la freqüència a la qual treballarà el microcontrolador. S'ha intentat ajustar a la mínima freqüència possible per disminuir-ne el consum.

Per tant el sistema requerirà completar el temps de mostreig en cada nivell de tensió (positiu i negatiu) del senyal quadrat. Per tal de fer-ho, i obtenir sempre el valor més acurat possible al de la tensió i amb la mínima variació entre una mostra i una altra, el procés de mostreig sempre comença just en el moment en què es produeix el flanc previ al nivell de tensió.

Per a aquesta mateixa raó de precisió s'ha escollit utilitzar un oscil·lador extern. El microcontrolador en qüestió compta amb oscil·ladors interns que permeten també treballar a la freqüència en què ho fa el nostre. Tot i així aquests són molt dependents dels factors externs com poden ser la temperatura o la humitat, que són els principals factors als quals se sotmetrà el sensor. Per tal d'aconseguir que el sistema tingui una freqüència d'oscil·lació el més estable possible, i per tant poder tenir més precisió sobre els moments exactes en què es realitza la mesura, s'ha optat per l'oscil·lador extern.

El temps d'adquisició es fixa per al mòdul ADC i sempre és el mateix. D'aquesta manera aconseguim que el resultat varii el mínim entre dues mostres diferents. Aquest temps és exactament de 31 períodes del rellotge intern del mòdul conversor analògic a digital (ADC). Aquest mòdul opera amb un període el doble del rellotge del sistema, és a dir $T_{ADC} = 2T_{CYC}$. Per tant el temps d'adquisició és de $T_{SAMPLE} = 31 * T_{ADC} = 7,75 \mu s$. Lleugerament inferior al temps de cada flanc del PWM ($T_{FLANC} = (50 \text{ kHz})^{-1} / 2 = 10 \mu s$), cosa que només ens permetrà realitzar una única mostra per flanc, però amb un temps de mostreig suficientment gran per tenir una mostra representativa del valor de tensió.

(La implementació d'aquest procés es troba en l'Annex 2 - Codi del microcontrolador, en els fitxers *SIG_GENc.c* i *ADCc.c*)

Aquest procés es pot veure en la següent figura:

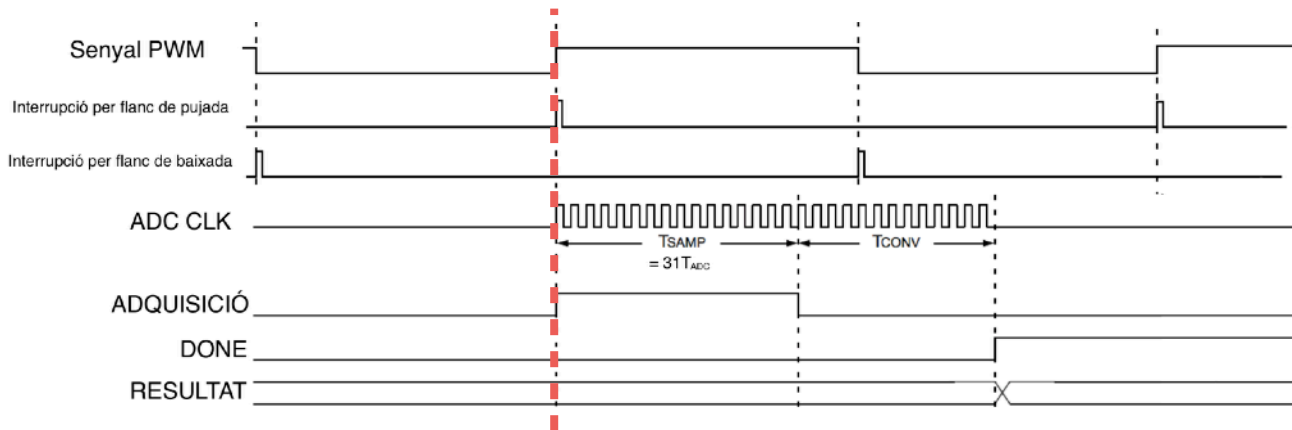


Fig 27. Procediment d'adquisició d'una única mostra al flanc positiu, activada per la interrupció de flanc de pujada

7.2 Selecció de la resistència de mesura

Com podem veure a l'esquema, el sistema compta amb quatre resistències per poder realitzar la mesura. Ara bé, el sistema ha de ser capaç de determinar quina d'aquestes quatre és la més indicada per a cada mostra. Per determinar quina d'aquestes resistències és la més adequada, primer ens cal analitzar quin resultat esperem obtenir en funció de la relació entre les resistències.

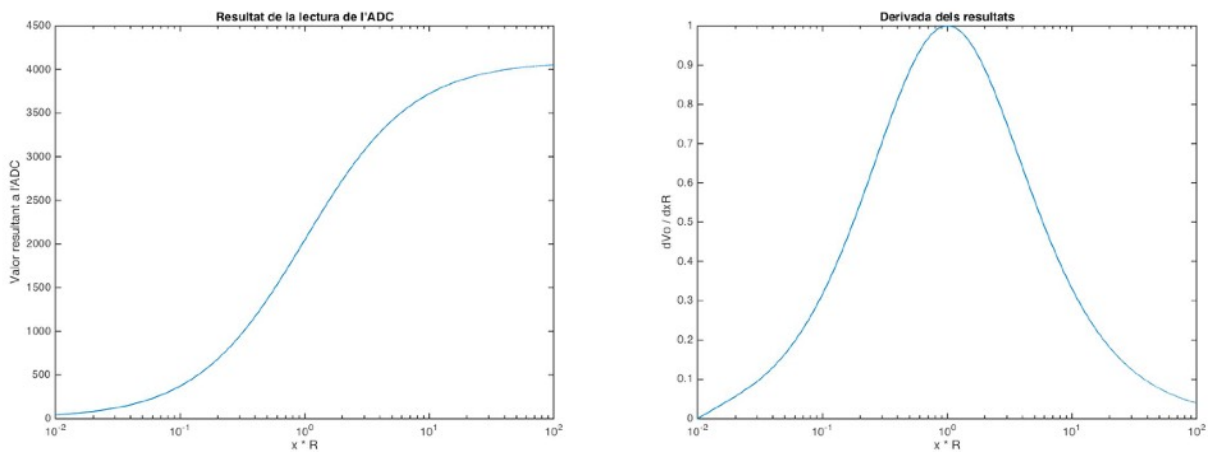


Fig 28. A l'esquerra els resultats esperats per a qualsevol resistència, i a la dreta la derivada normalitzada dels resultats esperats

Com observem a la primera figura, el lloc on tenim més pendent i on volem treballar és al punt central, quan l'elèctrode mesura el mateix valor de resistència que la que l'estimula. En aquest punt és on podem detectar amb més precisió una petita variació de la resistència i on l'error comès per a la quantificació serà menor. Amb la derivada (figura de la dreta) es pot observar més clarament com anem perdent precisió a l'allunyar-nos d'aquesta resistència.

La solució per intentar tenir una millor precisió en tot el rang de resistències és utilitzar més d'una resistència per cobrir tot el rang previst, aproximadament de 10 Ω a 100 kΩ. Per això s'han escollit les resistències de 270 Ω, 2,4 kΩ, 22 kΩ i 100 kΩ. Si superposem el gràfic anterior per a cada una d'aquestes resistències obtenim el següent:

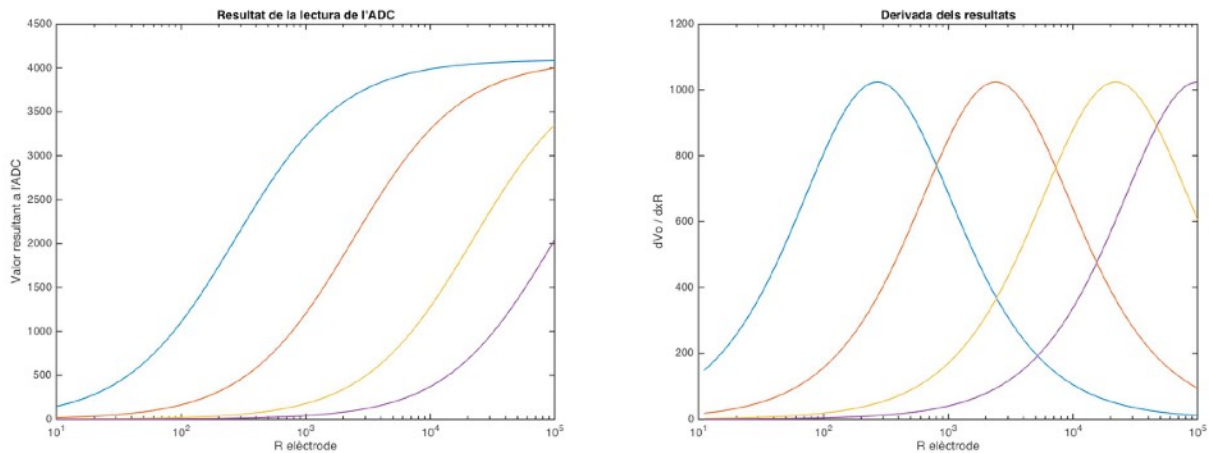


Fig 29. Mateixa representació que la imatge anterior, però per a cada valor de les resistències seleccionades.

D'aquesta manera aconseguim tenir una precisió més estable per a tot el rang de valors. A més també veiem que el rang que cobreix la resistència de 100 kΩ és força petit i haurém de valorar si resulta útil fer-la servir, ja que aquesta comporta un temps transitori per carregar el condensador força més gran que no pas les altres.

El sistema, per tal d'escollir quina és la millor resistència per a cada valor d'elèctrode, primer realitza mesures utilitzant la primera resistència, fins a tenir-ne suficients per poder fer una mitjana i minimitzar l'efecte de les adquisicions amb valors erronis. Després realitza el mateix procés per a cada una de les altres resistències. Un cop havent provat cada una de les resistències s'escollirà aquella amb la qual s'hagi aconseguit una millor resolució, és a dir, aquella que hagi proporcionat un resultat més proper a la meitat de l'escala, és a dir un valor més proper a $4095/2 = 2047,5$.

7.3 Filtratge de les mesures

Encara que realitzem la mesura sempre al mateix instant, i teòricament el resultat ha de ser sempre el mateix, existeixen interferències, sigui internes o externes, que interfereixen en la mesura i donen com a resultat lectures errònies o bé distants a les anteriors.

Per tal de minimitzar aquest efecte, utilitzem un *buffer* on es van guardant les diferents mostres per a després fer-ne la mitjana. A més, gràcies a aquest filtre, després d'haver-lo omplert, podem discriminar les mostres que disten molt del valor mitjà i no incloure-les al *buffer*.

De manera cronològica, el que fem primer és omplir el *buffer* amb les primeres mostres que recollim. Després en calculem la mitjana, i anem sobreescrivint al *buffer* els nous valors sempre que no distin suficientment del valor de la mitjana.

D'aquesta manera, podem aconseguir que si moltes de les mostres consecutivament s'allunyen del valor mitjà, probablement la mostra a analitzar haurà canviat i el sistema tornarà a començar el procés valorant quin fons d'escala és el més adequat, que en el nostre sistema es correspon amb la resistència més adient per realitzar la mesura.

(La implementació del filtratge es troba en l'Annex 2 - Codi del microcontrolador, en el fitxer *MEAS.c*)

Per fer aquesta qüestió més entenedora es presenta el següent esquema que resumeix el text:

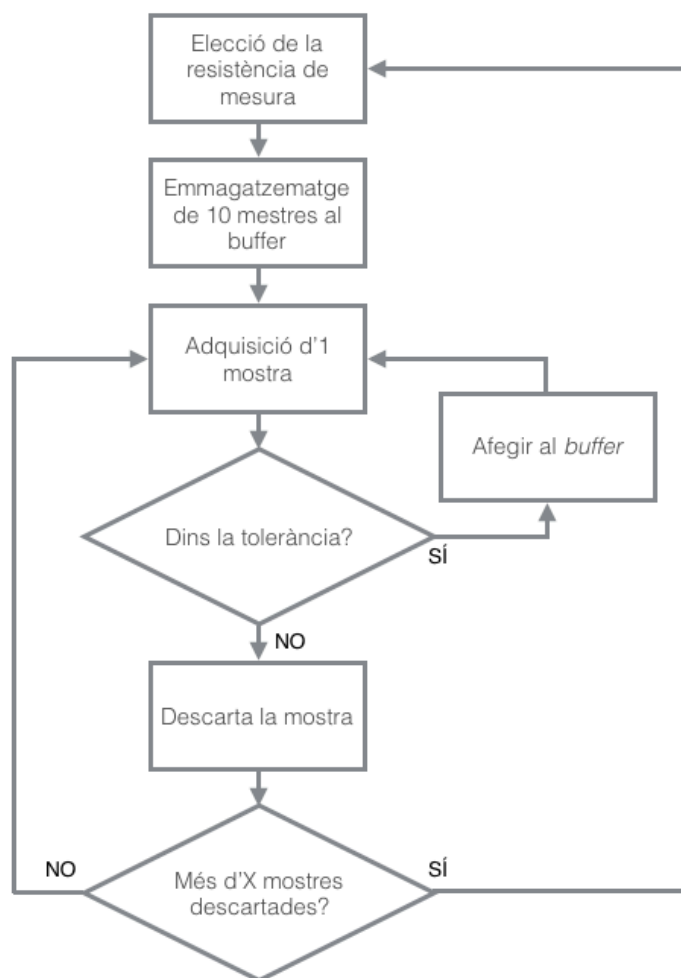


Fig 30. Diagrama del mecanisme de filtratge

7.4 Engendada i apagada del sistema

Com ja s'ha anat comentant durant el treball, tot i que les piles compten amb un interruptor d'encesa o d'apagada, el sistema, per tal d'estalviar energia, quan porti molta estona sense rebre

cap tipus d'interacció, és a dir no es premin els botons, aquest es posa de manera automàtica en mode dormir (SLEEP).

Quan entra en aquest mode, el microcontrolador apaga tots els ports i també l'oscil·lador extern. En aquest moment el microcontrolador treballa amb una freqüència molt inferior a la de treball amb un consum mínim. Aquesta posada en mode SLEEP, ahora fa apagar el regulador de tensió que també passa a un molt baix consum. En aquest moment el sistema estarà consumint molt menys que en funcionament per tal d'estalviar energia, tot i que l'ideal seria que aquest romangués apagat.

Per tal de poder continuar utilitzant el sensor un cop havent-se posat en mode sleep, el sistema requerirà un mecanisme d'encesa. Aquest es durà a terme quan qualssevol dels tres botons sigui pressionat. Quan això succeeix, el que primer fa el microcontrolador és activar el regulador de tensió per tal de suportar el corrent que necessitarà per començar a funcionar, i seguidament comença a activar la resta de mòduls. Finalment, el controlador engega la retroalimentació de la pantalla, que és la part del sistema que té un consum més elevat.

7.5 Lectura del sensor de temperatura i compensació de la conductivitat

Degut al fet que el sensor de temperatura es tracta d'un termistor de coeficient negatiu, amb una resistència de 5 k Ω als 25 °C, s'ha decidit estimular-lo amb un senyal quadrat i mesurar-hi la intensitat mitjançant una resistència de 5 k Ω en sèrie.

A través del senyal generat, i el valor de tensió en terminals del termistor en podem determinar la resistència. Per tal de conèixer a quina temperatura equival cada valor de resistència s'ha realitzat una aproximació polinòmica a través de les dades proporcionades pel fabricant [14]. Aquestes dades representades són representades al gràfic següent:

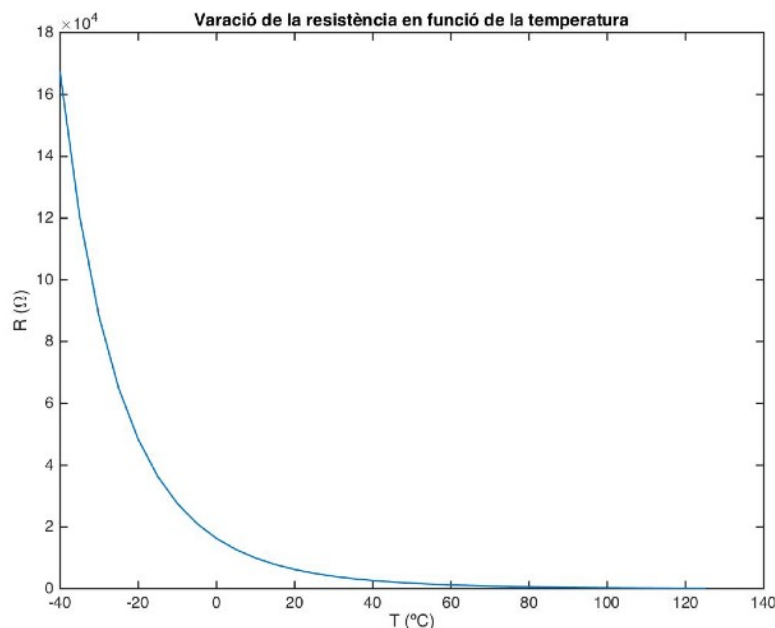


Fig 31. Variació de la resistència en funció de la temperatura proporcionada pel fabricant

En el següent gràfic es pot observar la corba proporcionada pel fabricant i la nostra aproximació dins el rang en què s'ha considerat que es pot trobar el fluid. El rang escollit ha estat des dels 0°C fins als 40°C, creient que aquestes temperatures cobriran la major part dels fluids que mesurem.

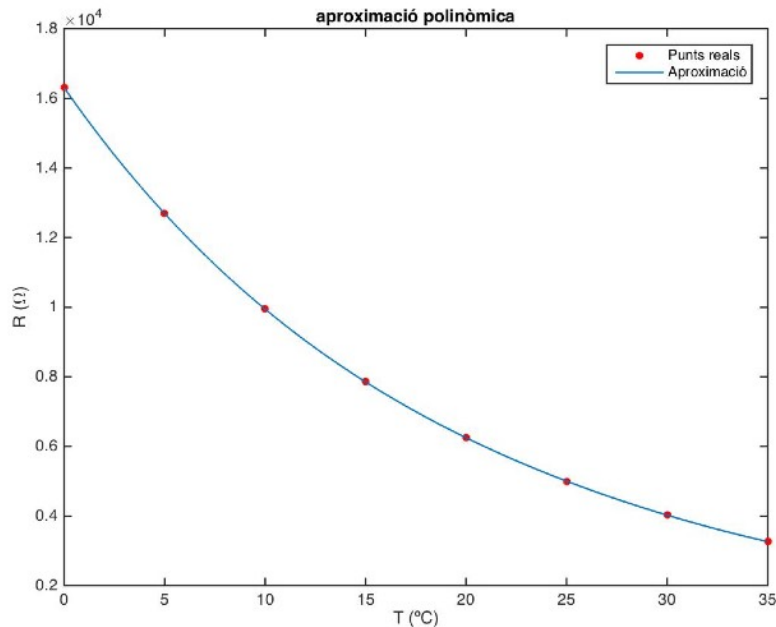


Fig 32. Aproximació matemàtica de la resistència en funció de la temperatura en el rang de temperatures de treball

Tot i aquests càlculs, hem de tenir en compte l'autoescalfament del termistor. Factor que podrà desviar molt la mesura. Per tal d'evitar-ho, només farem circular corrent durant el temps que duri la mesura. És a dir el temps que trigui el convertidor analògic a digital a realitzar la mesura. Que més o menys seran uns $100 T_{\text{CLK}}$ (12,5 μs) tirant a l'engròs. Amb un temps tan petit valorem que la variació d'autoescalfament serà tan petita que no caldrà que la compensem. D'aquesta manera, a més reduïrem, tot i que molt poc, el consum del sistema.

Per compensar la desviació de la mesura de la conductivitat en funció de la temperatura, s'ha optat per una compensació lineal com fan la majoria d'aparells comercials que existeixen al mercat. El valor de desviació escollit per a aquesta compensació és de 2,1%, que equival a un augment de temperatura d'un grau centígrad que requerirà multiplicar el resultat per un valor de (1-0,021), per tal d'assolir el valor de la conductivitat normalitzada a 25°C.

(La implementació de la lectura de la temperatura es troba en l'Annex 2 - Codi del microcontrolador, en el fitxer *MEAS.c*)

8. Resultat final

Interacció amb l'usuari

Finalment, com a resultat hem obtingut un mesurador en forma de llapis, que disposa d'una pantalla tipus LCD per comunicar-se amb l'usuari i un total de tres botons amb els quals l'usuari pot interactuar amb aquest.

Com a interfície gràfica, la pantalla té tres pantalles diferenciades, una en la qual es mostra la conductivitat (corregida a 25 °C), una altra pantalla en què es mostra la temperatura del líquid i finalment l'última per seleccionar i modificar els paràmetres del sensor.



Fig 33. Seqüència de selecció de pantalles del sensor

Aquestes tres pantalles poden ser seleccionades mitjançant els dos botons més propers a la pantalla. El tercer botó fa la funció de retenir la mostra (*hold*) mantenint-la en pantalla i no actualitzant-la, i quan està a la pantalla de paràmetres fa la funció de selecció; amb aquest darrer botó podem escollir el paràmetre a modificar i canviar-ne el valor amb les fletxes, tal com es mostra a la següent seqüència d'imatges.

Procés de realització de la mesura i retenció de la mostra

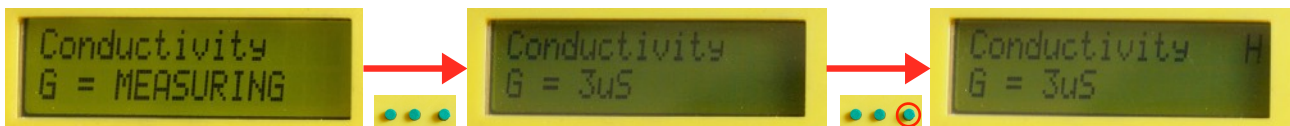


Fig 34. Seqüència de mesura de la conductivitat i retenció del valor

Com a paràmetres són modificables el coeficient de compensació de la temperatura, la brillantor de la pantalla, i el temps d'inactivitat fins que el sistema no s'apaga. Per tal de seleccionar quin és el paràmetre que volem modificar, ho farem amb els dos botons més propers a la pantalla i el seleccionarem amb el tercer. Un cop escollit el paràmetre a modificar en variarem el valor mitjançant els botons superiors. Finalment només caldrà prémer un darrer cop el tercer botó per sortir de la configuració de paràmetres.

Esquemàticament es pot seguir aquest procediment mitjançant les següents imatges:

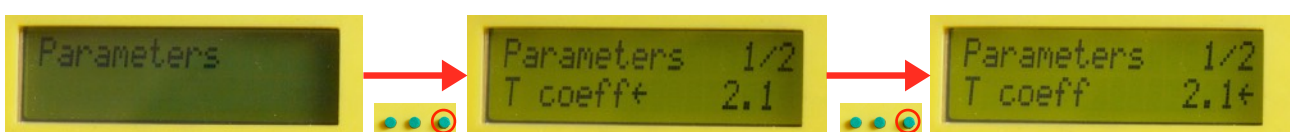


Fig 35. Seqüència de canvi del valor del parametre de coeficient de la temperatura

Validació dels resultats

Per tal de validar com funciona de bé el conductímetre s'han realitzat dos experiments, per mesurar-ne l'error. El primer experiment s'ha realitzat per poder quantificar l'error del sensor al realitzar la mesura, i el segon s'ha fet amb el sistema complet i en un assaig de funcionament per validar l'error total del sistema contemplant tant el sensor pròpiament i l'error introduït pels elèctrodes.

Per tal de poder mesurar l'error de la conductivitat comès pel sensor sense els elèctrodes, s'han utilitzat resistències fixes per simular la conductivitat entre elèctrodes. D'aquesta manera podem simular exactament l'error que el sistema pugui cometre en aquesta mesura. S'han mesurat les resistències amb un multímetre comercial (Fluke 170) amb quatre bits de resolució i una precisió de 0,9% i una resolució de 0,1 Ω [15].

Els resultats obtinguts es mostren en el següent gràfic:

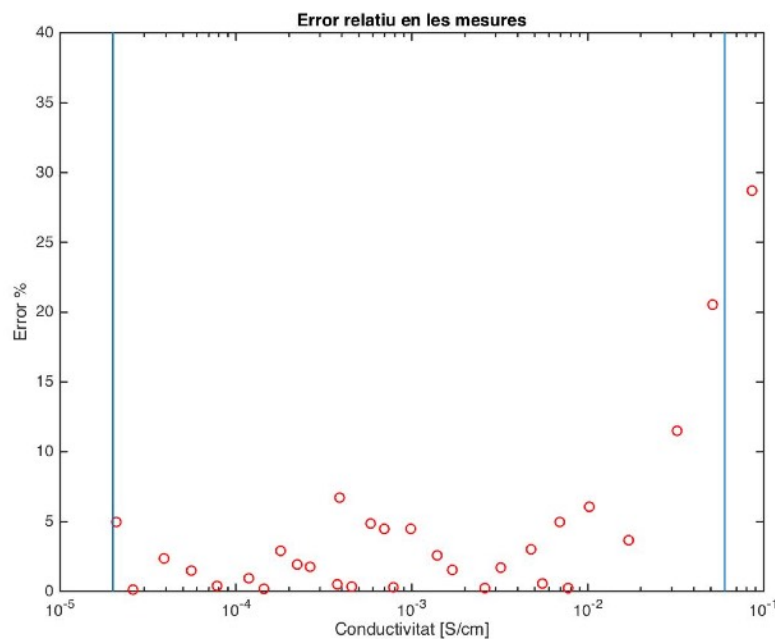


Fig 36. Error relatiu de mesures amb resistències fixes

En blau podem observar l'interval de conductivitat fixat a l'inici com a rang de l'aparell de mesura (dels 20 μ S/cm als 60 mS/cm).

Com podem observar en el gràfic es veu clarament que en els valors d'alta conductivitat, l'error incrementa dràsticament cada cop que mesurem més i més conductivitat. Això es degut al fet que el fons d'escala ja no és l'adequat i es queda curt per a la mesura que es realitza. Tal com s'explica en l'apartat 7.2 (Selecció de la resistència de mesura), en el cas que es volgués minimitzar aquest error, només caldria augmentar les diferents resistències que exciten l'elèctrode.

Per altra banda a través de l'error es pot apreciar un augment significatiu de l'error en els punts que equidisten entre els dos rangs de mesura. Aquests valors equidistants equivalen a la mitjana geomètrica entre les dues resistències de fons d'escala, per tant aquests punts on l'error és màxim equivalen a resistències amb els següents valors:

$$\sqrt{270 * 2400} = 800\Omega$$

$$\sqrt{2400 * 22000} = 7266\Omega$$

$$\sqrt{22000 * 100000} = 46904\Omega$$

Tot i que es pot apreciar aquest canvi d'interval en el gràfic d'error, considerem que l'error es manté prou constant, corroborant que els rangs han estat correctament seleccionats.

Per tal de mesurar l'error del sistema complet, s'han preparat cinc dissolucions d'aigua barrejant sal comuna (NaCl) per així obtenir diferents líquids amb diferents conductivitats.

Per obtenir més d'una solució amb diferents conductivitats, s'ha preparat una dissolució de $60mS/cm$, i s'ha anat disolvent amb aigua destilada en pots separats per aconseguir diferents proporcions.

La mesura s'ha realitzat tant amb el conductímetre comercial del qual la universitat en té accés com amb el realitzat en el treball. Daquesta manera s'ha pogut calcular l'error del sistema en conjunt, tant el de la xarxa de resistències, els elèctrodes i el de la desviació de la temperatura. El resultat ha estat el següent:

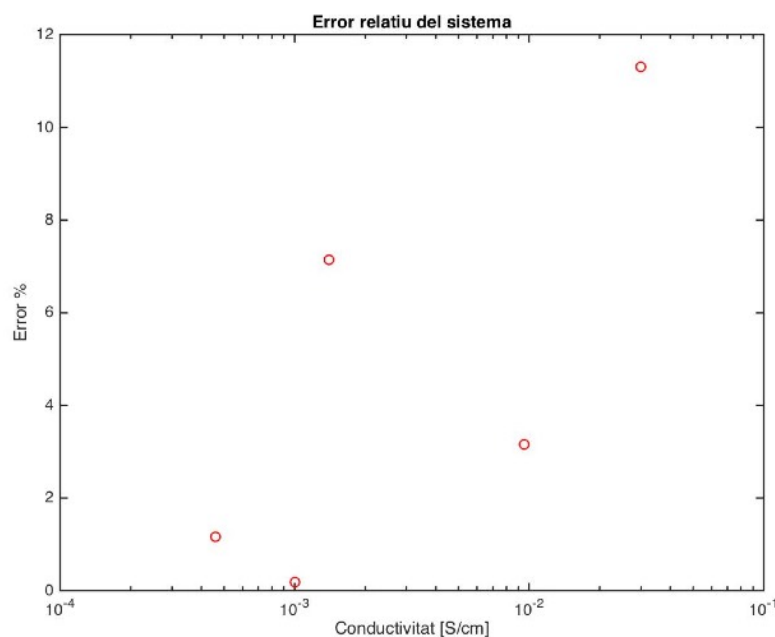


Fig 37. Error relatiu del sistema complet, mesurant diferents dissolucions.

Als resultats observem un lleuger augment en l'error global del sistema, conseqüència directa de sumar la resta d'errors que fins ara no havíem tingut en compte. De la mateixa manera que veiem en el càlcul de l'error amb resistències fixes, en aquest cas passa el mateix l'error augmenta a mesura que la conductivitat és més elevada. Com s'ha esmentat amb anterioritat, aquest error en el rang de l'alta conductivitat és degut a la falta de resolució.

9. Conclusions

S'ha dissenyat i implementat un dispositiu de mesura de la conductivitat elèctrica. Dispositiu autònom i independent amb un parell de cilindres paral·lels com a elèctrodes. El dispositiu és capaç de mesurar conductivitats des dels 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ als 60 mS/cm . Amb una incertesa màxima variant en funció del rang de mesura, però propera al 5%.

El disseny i implementació del sistema té en compte tant el disseny de l'electrònica, amb l'etapa de potència de les piles, una pantalla i el sensor, com també la realització de la carcassa del dispositiu, per tal que sigui un aparell útil i protegit de factors externs, com pot ser l'aigua.

El dispositiu compta amb un total de quatre rangs de mesura i amb un mecanisme d'autoselecció del rang més adequat. A més es constata la facilitat d'incrementar aquest nombre de rangs, i per tant, reduir-ne considerablement la incertesa i augmentar la resolució.

En un principi es volia que el dispositiu resultant en estat de repòs (SLEEP) tingués un consum mínim. Això no ha estat possible i finalment s'ha optat per incloure l'interruptor de les piles a la mateixa carcassa per desconectar el sistema completament. Això ha estat degut a l'elecció dels components com la pantalla, i a un disseny del prototip que no ha tingut en compte aquest factor. Amb una millor selecció dels components i amb un millor disseny de l'electrònica es pot aconseguir reduir suficientment el consum per arribar a prescindir de l'interruptor.

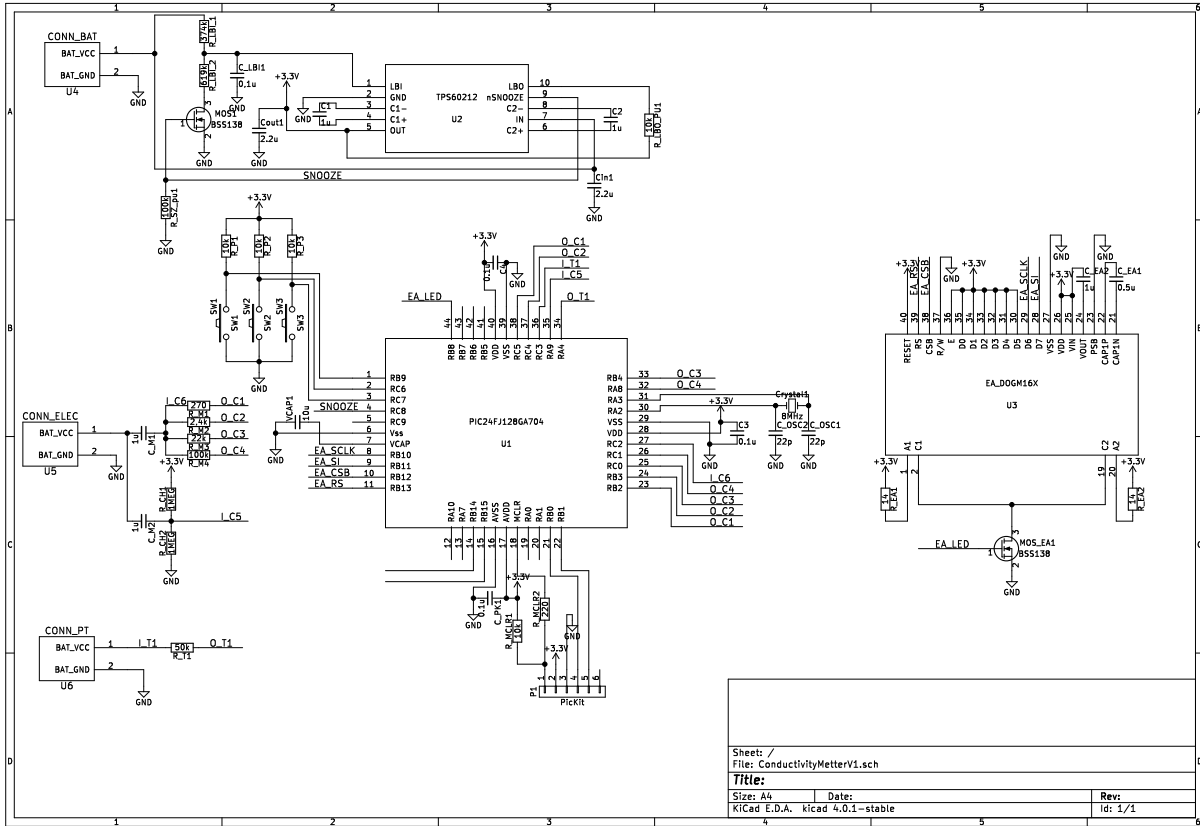
Pel que fa al prototip, aquest s'ha realitzat amb moltes més funcionalitats que les requerides per al sensor, per tal de poder provar el sistema de diverses maneres diferents. Es creu que ara, havent-ne fet l'anàlisi, es pot reduir considerablement les dimensions del sistema. A més de la mida, per tal de facilitar la lectura, s'ha dissenyat el prototip perquè requereixi un temps força llarg fins a obtenir una primera lectura vàlida. Temps necessari perquè el sistema superi el temps transitori causat pels condensadors de desacoblament que eviten l'electròlisi del fluid sota mesura. Aquest temps podria ser dràsticament reduït solament disminuint aquests condensadors, ja que s'ha escollit un valor força més elevat al necessari.

El treball demostra com pot ser de senzill realitzar aquesta mesura dins un rang molt petit. Per exemple, si en un futur es volgués mesurar la conductivitat únicament d'aigua marina, només caldria seleccionar la resistència més adequada seguida d'un condensador i dels elèctrodes. Estimulant la resistència amb un senyal quadrat a suficient freqüència i mesurant el valor de la tensió entre elèctrodes en podem deduir la conductivitat.

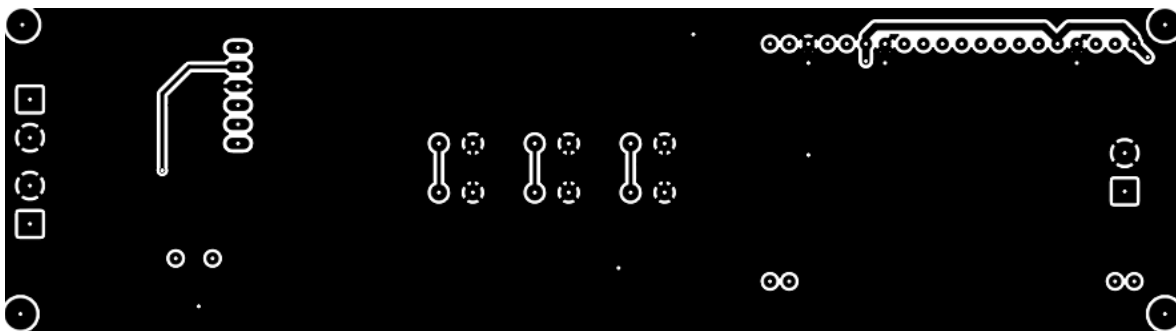
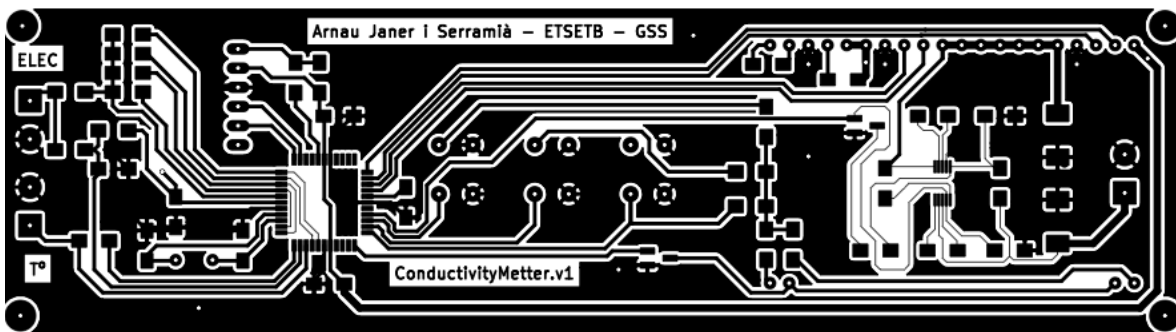
10 - Referències

- [1] https://ca.wikipedia.org/wiki/Conductivitat_el%C3%A8ctrica
- [2] <https://www.coleparmer.com/tech-article/conductivity>
- [3] N.Kameyama - Denkikagaku no Riron Oyobi Ouyou Part I (Theory and Applications of Electrochemistry Part I) P31. 1963 (Maruzen Pub.)
- [4] <https://www.pce-instruments.com/deutsch/slot/4/download/514815/conductimetro-8361-az.pdf>
- [5] <http://www.octiva.net/projects/ppm/>
- [6] http://www.drcaideronlabs.com/Aparatos/Conductivimetro/Construir_un_Conductivimetro/Construccion.htm
- [7] http://www.omega.com/green/pdf/CONDUCTIVITY_REF.pdf
- [8] https://www.saiglobal.com/PDFTemp/Previews/OSH/ISO/990624_1537/T014838E.PDF
- [9] L.A. Geddes, "Historical evolution of circuits models for the electrode-electrolyte interface," Ann. Biomed. Eng., Vol. 25 (1997), pp. 1-14.
- [10] L.A. Geddes, R. Roeder, "Measurement of the direct-current (Faradic) resistance of the electrode-electrolyte interface for commonly used electrode materials," Ann. Biomed. Eng., Vol. 29 (2001), pp. 181-186.
- [11] J. Ross Macdonald, Impedance spectroscopy, Wiley, New York, 1988.
- [12] Ondas electromagnéticas y sistemas radiantes, Edward C. Jordan & Keith G. Balmain, 1973 pg72
- [13] Introduction to Electrodynamics, David J. Griffiths & Reed College
- [14] NTCLE305 - Datasheet <https://www.vishay.com/docs/29076/ntcle305.pdf>
- [15] <http://www.fluke.com/fluke/eses/Multimetros-Digitales/Fluke-170.htm?PID=56027>
- [16] UIT-R P.527-3 - CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DE LA SUPERFICIE DE LA TIERRA (1978-1982-1990-1992)
- [17] <https://www.coleparmer.com/tech-article/conductivity>

Layout



S'adjunta el layout utilitzat per la placa PCB amb les dimensions reals (156,21x43,18)



156,21 mm

43,18 mm

11.1.3 Llistat de components

- PIC24FJ128GA704
- TPS60212
- EADOGM162E-A
- Suport per a dues piles AAA
- BSS138 x2
- Oscil·lador de quars de 8MHz

La resta de components descrits a continuació tenen tots un encapsulat SMD 1208

- Condensadors:
 - 10 μ F x1
 - 1 μ F x5
 - 0,5 μ F x1
 - 22 pF x2
 - 100 pF x2
- Resistències
 - 1 M Ω x1
 - 619 k Ω x1
 - 100 k Ω x2
 - 50 k Ω x1
 - 10 k Ω x5
 - 22 k Ω x1
 - 2,4 k Ω x1
 - 270 Ω x1
 - 14 Ω x1

11.2 Annex 2 - Codi del microcontrolador

S'adjunten tots els fitxers creats per tal de programar el microcontrolador del sistema:

Fitxer *CMv3.c*

```
/*  
 * File:   CMv3_main.c  
 * Author: arnau.janer  
 *  
 * Created on 22 de mayo de 2017, 12:18  
 */
```

```
#include "xc.h"  
#include <p24FJ128GA704.h>  
#include "Config_bits.h"  
  
#define FCY 8000000  
#include <libpic30.h>
```

```

#define MAIN_FILE

#include "PwMc.h"
#include "LCD_SPIc.h"
#include "SIG_GENc.h"
#include "ADCC.h"
#include "MEAS.h"
#include "BUTTONS.h"

#define ENTER_SLEEP 300

int bright = 1;
int contrast = 1;

void init_All (void){
    disableInterrupts();
    TRISC = 0xFFFF;
    TRISB = 0xFFFF;
    TRISCbits.TRISC8 = 0;
    PORTCbits.RC8 = 1;

    CCP2_init();
    set_PWM(bright*10);

    CCP3_init();
    ADC_init();

    initInterrupts();

    init_buttons();

    eaDogM_Initialize();
    eaDogM_DisplayOn();
    enableInterrupts();
}

void enter_sleep(void){
    eaDogM_WriteCommand(EADOGM_CMD_DISPLAY_OFF);

    TRISC = 0xFFFF;
    TRISCbits.TRISC8 = 0;
    TRISB = 0xFFFF;
    TRISA = 0xFFFF;

    AD1CON1bits.ADON = 0;           //ADC OFF
    CCP3CON1Lbits.CCPON = 0;       //SIG_GEN OFF
    CCP2CON1Lbits.CCPON = 0;       //PWM_LCD OFF
    SPI1CON1bits.SPIEN = 0;        //SPI OFF
    PORTBbits.RB8 = 0;

    Sleep();
}

void parameters(void){
    eaDogM_WriteString("Parameters",0,0);
    eaDogM_WriteString(" ",1,0);

    while(enter >= 1){
        switch (mode_param) {
            case 0:
                cursor = T_compensation;
                eaDogM_WriteString("Parameters 1/2",0,0);
                eaDogM_WriteString("T coeff",1,0);
                eaDogM_WriteCommand((EADOGM_CMD_DDRAM_ADDR + (1 * EADOGM_COLSPAN) + 7));
                eaDogM_WriteChr(0b00001000);
                eaDogM_WriteString(" ",1,8);
                eaDogM_WriteCommand((EADOGM_CMD_DDRAM_ADDR + (1 * EADOGM_COLSPAN) + 12));
                eaDogM_WriteChr(T_compensation/10+'0');
                eaDogM_WriteChr('.');
                eaDogM_WriteChr(T_compensation%10+'0');
                eaDogM_WriteString(" ",1,15);
                while(enter == 2 && counter < ENTER_SLEEP){
                    eaDogM_WriteString("Parameters 1/2",0,0);
                    eaDogM_WriteString("T coeff",1,0);
                    eaDogM_WriteCommand((EADOGM_CMD_DDRAM_ADDR + (1 * EADOGM_COLSPAN) + 12));
                    eaDogM_WriteChr(cursor/10+'0');
                    eaDogM_WriteChr('.');
                }
            }
        }
    }
}

```

```

        eaDogM_WriteChr(cursor*10+'0');
        eaDogM_WriteCommand((EADOGM_CMD_DDRAM_ADDR + (1 * EADOGM_COLSPAN) + 15));
        eaDogM_WriteChr(0b00001000);
        __delay_ms(50);
        BTN_DEBOUNCE = 0;
        counter++;
    }
    T_compensation = cursor;
    counter++;
    break;

case 1:
    cursor = bright;
    eaDogM_WriteString("Parameters 2/2",0,0);
    eaDogM_WriteString("Bright",1,0);
    eaDogM_WriteCommand((EADOGM_CMD_DDRAM_ADDR + (1 * EADOGM_COLSPAN) + 6));
    eaDogM_WriteChr(0b00001000);
    eaDogM_WriteString(" ",1,7);
    eaDogM_WriteCommand((EADOGM_CMD_DDRAM_ADDR + (1 * EADOGM_COLSPAN) + 13));
    eaDogM_WriteChr(bright+'0');
    eaDogM_WriteChr('0');
    eaDogM_WriteString(" ",1,15);
    while(enter == 2 && counter < ENTER_SLEEP){
        eaDogM_WriteString("Parameters 2/2",0,0);
        eaDogM_WriteString("Bright",1,0);
        eaDogM_WriteCommand((EADOGM_CMD_DDRAM_ADDR + (1 * EADOGM_COLSPAN) + 13));
        eaDogM_WriteChr(cursor+'0');
        eaDogM_WriteChr('0');
        eaDogM_WriteCommand((EADOGM_CMD_DDRAM_ADDR + (1 * EADOGM_COLSPAN) + 15));
        eaDogM_WriteChr(0b00001000);
        set_PWM(cursor*10);
        __delay_ms(50);
        BTN_DEBOUNCE = 0;
        counter++;
    }
    bright = cursor;
    counter++;
    break;
}
BTN_DEBOUNCE = 0;

//Coeff temp
//Bright
//Contrast
//Sleep time
//Reset settings
    counter++;
}
mode_param = 0;
__delay_ms(50);
counter++;
}

int main(void) {

    init_All();

    unsigned long R;
    unsigned long t;
    float C;
    int c = 0;

    START:

    // CONDUCTIVITAT //
    while(mode_global == 0 && counter < ENTER_SLEEP){
        c = 0;
        eaDogM_WriteString("Conductivity",0,0);
        eaDogM_WriteString("G = MEASURING",1,0);
        init_MEAS(0);
        eaDogM_WriteString(" ",1,0);
        eaDogM_WriteString(" ",0,0);
        R = 1;
        counter = 100;

        hold = 0;
        while(R != 0 && mode_global == 0 && counter < ENTER_SLEEP && c < 5){
            if (hold == 0){

```

```

        eaDogM_WriteString("Conductivity   ",0,0);
        R = get_R();

        if (R == 1) { c++; }
        else { c = 0; }

        C = cal_cond( R , 0.257 );
    }else{
        eaDogM_WriteString("Conductivity   H",0,0);
        __delay_ms(100);
    }
    eaDogM_WriteString("G = ", 1, 0);
    if (C != 0 && R != 1){ print_COND(C, 1, 4); }
    counter += 5;
}
}
BTN_DEBOUNCE = 0;

// TEMPERATURA //
while(mode_global == 1 && counter < ENTER_SLEEP){
    eaDogM_WriteString("Temperature   ",0,0);
    eaDogM_WriteString("T = ",1,0);
    t = cal_temp();

    print_TEMP(t, 1, 4);

    counter++;
    __delay_ms(50);
}
BTN_DEBOUNCE = 0;

// PARÀMETRES //
while(mode_global == 2 && counter < ENTER_SLEEP){
    parameters();
}
BTN_DEBOUNCE = 0;

// CALIBRACIÓ //
while(mode_global == 3 && counter < ENTER_SLEEP){
    eaDogM_WriteString("Calibration   ",0,0);
    eaDogM_WriteString("   ",1,0);

    __delay_ms(50);
    counter++;
}
BTN_DEBOUNCE = 0;

while(counter >= ENTER_SLEEP){
    enter_sleep();
}
BTN_DEBOUNCE = 0;

goto START;
return 0;
}

```

Fitxer Config_bits.h

```

// PIC24FJ128GA704 Configuration Bit Settings
// 'C' source line config statements

// FSEC
#pragma config BWRP = OFF           // Boot Segment Write-Protect bit (Boot Segment may be
written)
#pragma config BSS = DISABLED      // Boot Segment Code-Protect Level bits (No Protection
(other than BWRP))
#pragma config BSEN = OFF          // Boot Segment Control bit (No Boot Segment)
#pragma config GWRP = OFF         // General Segment Write-Protect bit (General Segment may be
written)
#pragma config GSS = DISABLED      // General Segment Code-Protect Level bits (No Protection
(other than GWRP))
#pragma config CWRP = OFF         // Configuration Segment Write-Protect bit (Configuration
Segment may be written)

```

```

#pragma config CSS = DISABLED // Configuration Segment Code-Protect Level bits (No
Protection (other than CWRP))
#pragma config AIVTDIS = OFF // Alternate Interrupt Vector Table bit (Disabled AIVT)

// FBSLIM
#pragma config BSLIM = 0x1FFF // Boot Segment Flash Page Address Limit bits (Boot Segment
Flash page address limit)

// FSIGN

// FOSCSEL
#pragma config FNOOSC = PRI // Oscillator Source Selection (Primary Oscillator (XT, HS,
EC))
#pragma config PLLMODE = DISABLED // PLL Mode Selection (No PLL used; PLEN bit is not
available)
#pragma config IESO = OFF // Two-speed Oscillator Start-up Enable bit (Start up with
user-selected oscillator source)

// FOSC
#pragma config POSCMD = XT // Primary Oscillator Mode Select bits (XT Crystal
Oscillator Mode)
#pragma config OSCIOFCN = OFF // OSC2 Pin Function bit (OSC2 is clock output)
#pragma config SOSSEL = OFF // SOSC Power Selection Configuration bits (SOSC is used in
crystal (SOSCI/SOSCO) mode)
#pragma config PLLSS = PLL_PRI // PLL Secondary Selection Configuration bit (PLL is fed by
the Primary oscillator)
#pragma config IOL1WAY = ON // Peripheral pin select configuration bit (Allow only one
reconfiguration)
#pragma config FCKSM = CSDCMD // Clock Switching Mode bits (Both Clock switching and Fail-
safe Clock Monitor are disabled)

// FWDT
#pragma config WDTPS = PS32768 // Watchdog Timer Postscaler bits (1:32,768)
#pragma config FWPSA = PR128 // Watchdog Timer Prescaler bit (1:128)
#pragma config FWDTEN = ON // Watchdog Timer Enable bits (WDT Enabled)
#pragma config WINDIS = OFF // Watchdog Timer Window Enable bit (Watchdog Timer in Non-
Window mode)
#pragma config WDTWIN = WIN25 // Watchdog Timer Window Select bits (WDT Window is 25% of
WDT period)
#pragma config WDTMUX = WDTCLK // WDT MUX Source Select bits (WDT clock source is
determined by the WDTCLK Configuration bits)
#pragma config WDTCLK = LPRC // WDT Clock Source Select bits (WDT uses LPRC)

// FPOR
#pragma config BOREN = ON // Brown Out Enable bit (Brown Out Enable Bit)
#pragma config LPCFG = OFF // Low power regulator control (No Retention Sleep)
#pragma config DNVPEN = ENABLE // Downside Voltage Protection Enable bit (Downside
protection enabled using ZPBOR when BOR is inactive)

// FICD
#pragma config ICS = PGD1 // ICD Communication Channel Select bits (Communicate on
PGEC1 and PGED1)
#pragma config JTAGEN = ON // JTAG Enable bit (JTAG is enabled)

// FDEVOPT1
#pragma config ALTCMPI = DISABLE // Alternate Comparator Input Enable bit (C1INC, C2INC, and
C3INC are on their standard pin locations)
#pragma config TMPRPIN = OFF // Tamper Pin Enable bit (TMPRN pin function is disabled)
#pragma config SOSCHP = ON // SOSC High Power Enable bit (valid only when SOSSEL = 1
(Enable SOSC high power mode (default)))
#pragma config ALTI2C1 = ALTI2CEN // Alternate I2C pin Location (SDA1 and SCL1 on RB9 and RB8)

```

Fitxer LCD_SPIc.h

```

/*
 * File:
 * Author:
 * Comments:
 * Revision history:
 */

#ifndef _LCD_SPIc_H_
#define _LCD_SPIc_H_

```

```

#define CONFIG_SLAVE_ENABLE() TRISBbits.TRISB12 = 0
#define SLAVE_ENABLE()        _LATB12 = 0 //low true assertion
#define SLAVE_DISABLE()       _LATB12 = 1

#define CONFIG_RS()           TRISBbits.TRISB13 = 0
#define RS_HIGH()             PORTBbits.RB13 = 1
#define RS_LOW()              PORTBbits.RB13 = 0

//EA-DOG - INIT
#define EADOGM_INIT_BIAS_SET 0x14
#define EADOGM_INIT_POWER_CONTROL 0x55
#define EADOGM_INIT_FOLLOWER_CONTROL 0x6D
#define EADOGM_INIT_CONTRAST_SET 0x78
#define EADOGM_INIT_FS1 0x39
#define EADOGM_INIT_FS2 0x38
#define EADOGM_INIT_CLEAR_DISPLAY 0x01
#define EADOGM_INIT_ENTRY_MODE 0x06
#define EADOGM_COLSPAN 40 // suggested that this be 40 on model 162

#define EADOGM_CMD_CLR 1
#define EADOGM_CMD_CURSOR_ON 0b00001111
#define EADOGM_CMD_CURSOR_OFF 0b00001100
#define EADOGM_CMD_DISPLAY_ON 0b00001100
#define EADOGM_CMD_DISPLAY_OFF 0b00001000
#define EADOGM_CMD_DDRAM_ADDR 0b10000000
#define EADOGM_CMD_CGRAM_ADDR 0b01000000
#define EADOGM_CMD_SELECT_R0 0b00011000
#define EADOGM_CMD_SELECT_R1 0b00010000
#define EADOGM_CMD_SET_TABLE2 0b00101010

#define EADMCMDCONTRAST 0b0111000

void configSPI1(void);
int SPI1_out(int u16_c);
void eaDogM_WriteChr(char value);
void eaDogM_WriteCommand(int cmd);
#define eaDogM_SetContrast(c) eaDogM_WriteCommand(EADMCMDCONTRAST + (c & 0b00001111));
void eaDogM_DoubleHeight(int row);

#define eaDogM_DoubleHeightOff() eaDogM_WriteCommand(0b00101000)
#define eaDogM_Cls() eaDogM_WriteCommand(EADOGM_CMD_CLR)
#define eaDogM_CursorOn() eaDogM_WriteCommand(EADOGM_CMD_CURSOR_ON)
#define eaDogM_CursorOff() eaDogM_WriteCommand(EADOGM_CMD_CURSOR_OFF)
#define eaDogM_DisplayOn() eaDogM_WriteCommand(EADOGM_CMD_DISPLAY_ON)
#define eaDogM_DisplayOff() eaDogM_WriteCommand(EADOGM_CMD_DISPLAY_OFF)

void eaDogM_SetPos(int r, int c);
void eaDogM_ClearRow(int r);
void eaDogM_WriteString(char *a, int row, int start_col);
void eaDogM_Initialize(void);
void eaDogM_WriteIntAtPos(int i, int r, int c);

void print_COND(unsigned long C, int r, int c);
void print_TEMP(unsigned long T, int r, int c);

#endif

```

Fitxer LCD_SPIc.c

```

/*
 * File:   LCD_SPI.c
 * Author: arnau.janer
 *
 * Created on 15 de mayo de 2017, 12:37
 *
 *
 * Available Functions:
 * -----
 *   eaDogM_Cls();                // clears the screen, homes cursor
 *   eaDogM_ClearRow(row);        // clears a row (v1.11)
 *   eaDogM_CursorOn();           // turns on the cursor
 *   eaDogM_CursorOff();          // turns of the cursor
 *   eaDogM_DisplayOn();          // turns on display with cursor off
 *   eaDogM_DisplayOff();         // turns off display
 *   eaDogM_SetPos(row, col);     // sets position row:0-1, col:0-15
 *   eaDogM_WriteChr(byte);       // writes a single chr to the display
 *   eaDogM_WriteString(char str); // writes a string to the display
 *
 *                               // note: add this line after device selection
 *                               // to do this: eaDogM_WriteString("Constant")
 *                               // #device PASS_STRINGS=IN_RAM
 *
 *   // writes a 2 digit integer at row,col set flag = 1 to disable interrupts
 *   eaDogM_WriteIntAtPos(row,col,int[,flag])
 *
 *   // writes a string at row,col set flag = 1 to disable interrupts
 *   eaDogM_WriteStringAtPos(row,col,char str[,flag])
 *
 *   eaDogM_SetContrast(c);       // set contrast 0 to 15
 *   eaDogM_DoubleHeight(row);    // turn on double height, row = 0 or 1
 *   eaDogM_DoubleHeightOff();    // turn off double height
 * -----
 */

#define FCY 8000000
#define _XTAL_FREQ 8000000
#include <libpic30.h>

#include <xc.h>
#include "xc.h"

#include <p24FJ128GA704.h>
#include <stdio.h>
#include "LCD_SPIc.h"

void configSPI1(void){

    IFS0bits.SPI1IF = 0;           // flag iq
    IEC0bits.SPI1IE = 0;          // iq deshabilitada

    IFS0bits.SPI1TXIF = 0;
    IEC0bits.SPI1TXIE = 0;

    SPI1CON1bits.SPIEN = 0;       //Deshabilito SPI

    SPI1STATLbits.SPIROV = 0;

    SPI1BRGLbits.BRG = 16;        //CLK_div

    SPI1CON1bits.DISSCK = 0;      // Habilito clock intern SPI
    SPI1CON1bits.DISSDO = 0;      // SDO controlat por el modul
    SPI1CON1bits.MODE16 = 0;      // Trames de 8 bits
    SPI1CON1bits.SMP = 0;         // UART configurada en mode simple
    SPI1CON1bits.CKE = 0;         // Lectura de les dades per flanc ascendent
    SPI1CON1bits.CKP = 1;         // Clock inactivo a 0, activo a 1
    SPI1CON1bits.MSTEN = 1;       // Master

    _RP11R = 7;                  // CONFIG_SD01_TO_RP(11);           //use RP6 for SDO
    TRISBbits.TRISB11 = 0;       //Ensure that analog is disabled

```

```

    _RP10R = 8;           // CONFIG_SCK10UT_TO_RP(10);           //use RP7 for SCLK
    TRISBbits.TRISB10 = 0; //Ensure that analog is disabled

    CONFIG_SLAVE_ENABLE();
    SLAVE_DISABLE();

    SPI1CON1bits.SPIEN = 1; // Habilito SPI1
    SPI1BUFL = 0x00;       // Buffer de dades Tx

    IFS0bits.SPI1IF = 0;   // flag d'interruptio
    IEC0bits.SPI1IE = 1;  // Habilito la interrupcio

    IFS0bits.SPI1TXIF = 0;
    IEC0bits.SPI1TXIE = 1;
}

int SPI1_out(int u16_c) {
    IFS0bits.SPI1TXIF = 0; //clear interrupt flag since we are about to write new value
    SPI1BUFL = u16_c;

    __delay_us(100);
    return(SPI1BUFL);
}

void eaDogM_WriteChr(char value)
{
    RS_HIGH();
    SLAVE_ENABLE();
    SPI1_out(value);
    SLAVE_DISABLE();
    //__delay_ms(1);
}

void eaDogM_WriteCommand(int cmd)
{
    RS_LOW();
    SLAVE_ENABLE();
    SPI1_out(cmd);
    SLAVE_DISABLE();
    __delay_ms(1);
}

// only tested on 3 line display at the moment,
// thus no constants defined. when fully tested, I will define them
void eaDogM_DoubleHeight(int row) // row 0 or 1
{
    eaDogM_WriteCommand(EADOGM_CMD_SET_TABLE2); // set instruction table 2
    if (row == 0) {
        eaDogM_WriteCommand(EADOGM_CMD_SELECT_R0); // select row 0
    }
    if (row == 1) {
        eaDogM_WriteCommand(EADOGM_CMD_SELECT_R1); // select row 1
    }
    eaDogM_WriteCommand(0b00101100); // turns on double line mode
    // and set instruction table back to 0
}

void eaDogM_SetPos(int r, int c)
{
    int cmdPos;
    cmdPos = EADOGM_CMD_DDRAM_ADDR + (r * EADOGM_COLSPAN) + c;
    eaDogM_WriteCommand(cmdPos);
}

void eaDogM_ClearRow(int r)
{
    int i;
    eaDogM_SetPos(r,0);
    for(i=0; i<EADOGM_COLSPAN; i++) {
        eaDogM_WriteChr(0x00);
    }
}

void eaDogM_WriteString(char *a, int row, int start_col)
{
    int i;

```

```

    for(i = 0; i < (EADOGM_COLSPAN-start_col); i++){
        eaDogM_SetPos(row, start_col+i);
        eaDogM_WriteChr(a[i]);
        if(a[i+1] == '\0'){
            i = EADOGM_COLSPAN;
        }
    }
}

void eaDogM_Initialize(void)
{
    configSPI1();

    CONFIG_SLAVE_ENABLE();
    CONFIG_RS();
    SLAVE_DISABLE();
    RS_HIGH();

    __delay_ms(200);

    eaDogM_WriteCommand(EADOGM_INIT_FS1);
    eaDogM_WriteCommand(EADOGM_INIT_BIAS_SET);
    eaDogM_WriteCommand(EADOGM_INIT_POWER_CONTROL);
    eaDogM_WriteCommand(EADOGM_INIT_FOLLOWER_CONTROL);
    eaDogM_WriteCommand(EADOGM_INIT_CONTRAST_SET);
    eaDogM_WriteCommand(EADOGM_INIT_FS2);
    eaDogM_WriteCommand(EADOGM_INIT_CLEAR_DISPLAY);
    eaDogM_WriteCommand(EADOGM_INIT_ENTRY_MODE);
}

void eaDogM_WriteIntAtPos(int i, int r, int c)
{
    eaDogM_WriteCommand((EADOGM_CMD_DDRAM_ADDR + (r * EADOGM_COLSPAN) + c));

    eaDogM_WriteChr(i/1000+'0');
    i = i%1000;
    eaDogM_WriteChr(i/100+'0');
    i = i%100;
    eaDogM_WriteChr(i/10+'0');
    eaDogM_WriteChr(i%10+'0');
}

void print_COND(unsigned long C, int r, int c){
    //C en microsiemens!!!
    eaDogM_WriteCommand((EADOGM_CMD_DDRAM_ADDR + (r * EADOGM_COLSPAN) + c));

    unsigned long a = C;

    if (C >= 1000){
        a = C/1000;
        a = a%1000;
        if(a/100 != 0){eaDogM_WriteChr(a/100+'0');}
        a = a%100;

        if(a/10 != 0){eaDogM_WriteChr(a/10+'0');}
        eaDogM_WriteChr(a%10+'0');
        eaDogM_WriteChr('.');
        a = C%1000;
        eaDogM_WriteChr(a/100+'0');
        //a = a%100;
        //eaDogM_WriteChr(a/10+'0');
        eaDogM_WriteChr('m');
        eaDogM_WriteChr('S');
    }else{
        if(a/100 != 0){eaDogM_WriteChr(a/100+'0');}
        a = a%100;
        if(a/10 != 0){eaDogM_WriteChr(a/10+'0');}
        eaDogM_WriteChr(a%10+'0');
        eaDogM_WriteChr('u');
        eaDogM_WriteChr('S');
    }
    eaDogM_WriteChr(' ');
    eaDogM_WriteChr(' ');
}

```

```
void print_TEMP(unsigned long T, int r, int c){
    eaDogM_WriteCommand((EADOGM_CMD_DDRAM_ADDR + (r * EADOGM_COLSPAN) + c));

    unsigned long a;

    a = T;
    a = a%1000;
    if(a/100 != 0){eaDogM_WriteChr(a/100+'0');}
    a = a%100;

    eaDogM_WriteChr(a/10+'0');
    eaDogM_WriteChr('.');
    eaDogM_WriteChr(a%10+'0');
    eaDogM_WriteChr(0b11011111);
    eaDogM_WriteString("C",1,9);
}
```

Fitxer PWMc.h

```
#ifndef _PWMc_H_
#define _PWMc_H_

void CCP2_init(void);
void set_PWM(int v);

#endif
```

Fitxer PWMc.c

```
/*
 * File: PWM.c
 * Author: arnau.janer
 *
 * Created on 22 de mayo de 2017, 10:26
 */

#include <p24FJ128GA704.h>
#include "PWMc.h"

void CCP2_init(void){
    _RP8R = 16;
    TRISBbits.TRISB8 = 1;

    // Set M CCP operating mode
    CCP2CON1Lbits.CCSEL = 0; // Set M CCP operating mode (OC mode)
    CCP2CON1Lbits.MOD = 0b0101; // Set mode (Buffered Dual-Compare/PWM mode)

    //Configure M CCP Timebase
    CCP2CON1Lbits.TMR32 = 0; // Set timebase width (16-bit)
    CCP2CON1Lbits.TMRSYNC = 0; // Set timebase synchronization (Synchronized)
    CCP2CON1Lbits.CLKSEL = 0b000; // Set the clock source (Tcy)
    CCP2CON1Lbits.TMRPS = 0b00; // Set the clock pre-scaler (1:1)
    CCP2CON1Hbits.TRIGEN = 0; // Set Sync/Triggered mode (Synchronous)
    CCP2CON1Hbits.SYNC = 0b00000; // Select Sync/Trigger source (Self-synch)

    //Configure M CCP output for PwM signal
    CCP2CON2Hbits.OCAEN = 1; // Enable desired output signals (OC1A)
    CCP2CON3Hbits.OUTM = 0b000; // Set advanced output modes (Standard output)
    CCP2CON3Hbits.POLACE = 0; // Configure output polarity (Active High)
    CCP2TMR1 = 0x0000; // Initialize timer prior to enable module.
    CCP2PRL = 0xFFFF; // Configure timebase period
    CCP2RA = 0x0000; // Set the rising edge compare value
    CCP2RB = 0x8000; // Set the falling edge compare value
    CCP2CON1Lbits.CCPON = 1; // Turn on M CCP module

    TRISBbits.TRISB8 = 0;
}
```

```
void set_PWM(int v){           //Valor del 0 al 100!!!  
    CCP2RB = (65535/100)*v;  
}
```

Fitxer BUTTONS.h

```

/*
 * File:
 * Author:
 * Comments:
 * Revision history:
 */

#ifndef _BUTTONS_H_
#define _BUTTONS_H_

#ifdef MAIN_FILE
    int mode_global = 0;
    int counter = 0;
    int enter = 0;
    int mode_param = 0;
    int cursor;
    char BTN_DEBOUNCE = 0;
    char hold = 0;
    unsigned long T_compensation = 21;    //Representa un 2,1%
#else
    extern int mode_global;
    extern int counter;
    extern int enter;
    extern int mode_param;
    extern int cursor;
    extern char BTN_DEBOUNCE;
    extern char hold;
    extern unsigned long T_compensation;
#endif

void init_buttons(void);
void sleep_awake(void);

#endif

```

Fitxer BUTTONS.c

```

/*
 * File:  BUTTONS.c
 * Author: arnau.janer
 *
 * Created on 7 de junio de 2017, 10:37
 */

#include <p24FJ128GA704.h>
#define FCY 8000000
#include <libpic30.h>

#include "BUTTONS.h"
#include "ADCC.h"
#include "SIG_GENc.h"
#include "PWMc.h"
#include "LCD_SPIc.h"

#define NUM_MODES 4
#define NUM_PARAM 2

void init_buttons(void){
    IEC0bits.INT0IE = 1;    //Activo les interrupcions
    IEC1bits.INT1IE = 1;
    IEC1bits.INT2IE = 1;
    INTCON2bits.INT0EP = 1;    //Interrupcions per flanc descendent
    INTCON2bits.INT1EP = 1;
    INTCON2bits.INT2EP = 1;

    RPINR0bits.INT1R = 22;    //INT1 al RP22
    RPINR1bits.INT2R = 23;    //INT2 al RP23
}

```

```

void __attribute__((__interrupt__,no_auto_psv)) _INT0Interrupt(void){
    if (BTN_DEBOUNCE == 0 && enter == 0){
        mode_global--;
        if (mode_global < 0){mode_global = (NUM_MODES-1);}
    }
    if (BTN_DEBOUNCE == 0 && enter == 1){
        mode_param--;
        if (mode_param < 0){mode_param = (NUM_PARAM-1);}
    }
    if (BTN_DEBOUNCE == 0 && enter == 2){
        cursor--;
    }

    BTN_DEBOUNCE = 1;

    sleep_awake();
    counter = 0;
    IFS0bits.INT0IF = 0;
}

void __attribute__((__interrupt__,no_auto_psv)) _INT1Interrupt(void){
    if (BTN_DEBOUNCE == 0 && enter == 0){
        mode_global++;
        mode_global = mode_global%NUM_MODES;
    }
    if (BTN_DEBOUNCE == 0 && enter == 1){
        mode_param++;
        mode_param = mode_param%NUM_PARAM;
    }
    if (BTN_DEBOUNCE == 0 && enter == 2){
        cursor++;
    }
    BTN_DEBOUNCE = 1;

    sleep_awake();
    counter = 0;
    IFS1bits.INT1IF = 0;
}

void __attribute__((__interrupt__,no_auto_psv)) _INT2Interrupt(void){
    sleep_awake();
    counter = 0;
    if(mode_global == 2){
        enter++;
        enter = enter % 3;
    }else if (mode_global == 0){
        if (hold == 1){hold = 0;}
        else {hold = 1;}
        __delay_ms(50); //Simple debounce
    }
    IFS1bits.INT2IF = 0;
}

void sleep_awake(void){
    if(_SLEEP == 1){
        PORTBbits.RB8 = 1;
        __delay_ms(10);

        AD1CON1bits.ADON = 1; //ADC OFF
        CCP3CON1Lbits.CCPON = 1; //SIG_GEN OFF
        CCP2CON1Lbits.CCPON = 1; //PWM_LCD OFF
        SPI1CON1bits.SPIEN = 1; //SPI OFF

        __delay_ms(10);

        ADC_init();
        eaDogM_Initialize();
        eaDogM_DisplayOn();

        __delay_ms(10);
    }
}

```

Fitxer SIG_GENc.h

```

/*
 * File:
 * Author:
 * Comments:
 * Revision history:
 */

#ifndef _SIG_GENc_H_
#define _SIG_GENc_H_

#define enableInterrupts() INTCON2bits.GIE = 1
#define disableInterrupts() INTCON2bits.GIE = 0

void CCP3_init(void);
void initInterrupts(void);
void out_PWM(char in);

#endif

```

Fitxer SIG_GENc.c

```

/*
 * File: PWM.c
 * Author: arnau.janer
 *
 * Created on 22 de mayo de 2017, 10:26
 */

#include <p24FJ128GA704.h>
#include "SIG_GENc.h"

#define FCY 8000000
#include <libpic30.h>

void CCP3_init(void){
    _RP2R = 18;
    TRISBbits.TRISB2 = 1;

    // Set M CCP operating mode
    CCP3CON1Lbits.CCSEL = 0; // Set M CCP operating mode (OC mode)
    CCP3CON1Lbits.MOD = 0b0101; // Set mode (Buffered Dual-Compare/PWM mode)
    //CCP3CON1Lbits.MOD = 0b0001; // Output High on Compare (16 bit), Single Edge mode

    //Configure M CCP Timebase
    CCP3CON1Lbits.TMR32 = 0; // Set timebase width (16-bit)
    CCP3CON1Lbits.TMRSYNC = 0; // Set timebase synchronization (Synchronized)
    CCP3CON1Lbits.CLKSEL = 0b000; // Set the clock source (Tcy)
    CCP3CON1Lbits.TMRPS = 0b00; // Set the clock pre-scaler (1:1)
    CCP3CON1Hbits.TRIGEN = 0; // Set Sync/Triggered mode (Synchronous)
    CCP3CON1Hbits.SYNC = 0b00000; // Select Sync/Trigger source (Self-sync)

    //Configure M CCP output for PWM signal
    CCP3CON2Hbits.OCAEN = 1; // Enable desired output signals (OC1A)
    CCP3CON3Hbits.OUTM = 0b000; // Set advanced output modes (Standard output)
    CCP3CON3Hbits.POLACE = 0; // Configure output polarity (Active High)
    CCP3TMR1 = 0x0000; // Initialize timer prior to enable module.
    CCP3PRL = 0x0050; // Configure timebase period -> 50kHz
    CCP3RA = 0x0000; // Set the rising edge compare value
    CCP3RB = 0x0028; // Set the falling edge compare value -> Duty 50%
    CCP3CON1Lbits.CCPON = 1; // Turn on M CCP module

    TRISBbits.TRISB2 = 0;
}

void initInterrupts(void)
{

```

```

INTCON1bits.NSTDIS = 0;
IEC2bits.CCT3IE = 1;
IEC5bits.CCP3IE = 1;
}

void out_PWM(char in){

    TRISBbits.TRISB2 = 1;
    TRISBbits.TRISB3 = 1;
    TRISCbits.TRISC0 = 1;
    TRISCbits.TRISC1 = 1;

    _RP2R = 0;
    _RP3R = 0;
    _RP16R = 0;
    _RP17R = 0;

    switch(in){
        case 1:
            CCP3CON1Lbits.CCPON = 1;
            _RP21R = 18;
            _RP20R = 0;
            _RP16R = 0;
            _RP17R = 0;

            TRISCbits.TRISC5 = 0;
            TRISCbits.TRISC4 = 1;
            TRISCbits.TRISC0 = 1;
            TRISCbits.TRISC1 = 1;
            break;

        case 2:
            CCP3CON1Lbits.CCPON = 1;
            _RP21R = 0;
            _RP20R = 18;
            _RP16R = 0;
            _RP17R = 0;

            TRISCbits.TRISC5 = 1;
            TRISCbits.TRISC4 = 0;
            TRISCbits.TRISC0 = 1;
            TRISCbits.TRISC1 = 1;
            break;

        case 3:
            CCP3CON1Lbits.CCPON = 1;
            _RP21R = 0;
            _RP20R = 0;
            _RP16R = 18;
            _RP17R = 0;

            TRISCbits.TRISC5 = 1;
            TRISCbits.TRISC4 = 1;
            TRISCbits.TRISC0 = 0;
            TRISCbits.TRISC1 = 1;
            break;

        case 4:
            CCP3CON1Lbits.CCPON = 1;
            _RP21R = 0;
            _RP20R = 0;
            _RP16R = 0;
            _RP17R = 18;

            TRISCbits.TRISC5 = 1;
            TRISCbits.TRISC4 = 1;
            TRISCbits.TRISC0 = 1;
            TRISCbits.TRISC1 = 0;
            break;

        default:
            CCP3CON1Lbits.CCPON = 0;
            TRISCbits.TRISC5 = 1;
            TRISCbits.TRISC4 = 1;
            TRISCbits.TRISC0 = 1;
            TRISCbits.TRISC1 = 1;
            break;
    }
}

```

```
}  
  __delay_ms(50);  
}
```

Fitxer ADCc.h

```

/*
 * File:
 * Author:
 * Comments:
 * Revision history:
 */

#ifndef _ADCC_H_
#define _ADCC_H_

void ADC_init(void);
int get_value_h(void);
int get_value_l(void);
void sel_input(char in);
int get_temp(void);

#endif

```

Fitxer ADCc.c

```

/*
 * File: ADC.c
 * Author: arnau.janer
 *
 * Created on 23 de mayo de 2017, 12:40
 */

#include <p24FJ128GA704.h>
#include "ADCc.h"

#define FCY 8000000
#include <libpic30.h>

int measure = 0, done = 1;

void __attribute__((__interrupt__,no_auto_psv)) _CCP3Interrupt(void){ //OUT set to 1
    if (measure == 1){
        //PORTBbits.RB5 = 1;
        AD1CON1bits.SAMP = 1;
        done = 0;
        measure = 2;
    }else if (measure == 2){
        measure = 0;
        done = 1;
    }

    IFS5bits.CCP3IF = 0;
}

void __attribute__((__interrupt__,no_auto_psv)) _CCT3Interrupt(void){ //OUT set to 0
    if (measure == 3){
        AD1CON1bits.SAMP = 1;
        done = 0;
        measure = 4;
    }else if (measure == 4){
        measure = 0;
        done = 1;
    }
    IFS2bits.CCT3IF = 0;
}

void __attribute__((__interrupt__,no_auto_psv)) _ADC1Interrupt(void)
{
    //eaDogM_WriteString("IQ",0,14);
    PORTBbits.RB5 = 0;
    IFS0bits.AD1IF = 0;
}

void ADC_init(void){

```

```

ANSAbits.ANSA1 = 1;           //Configure port pins as analog inputs
TRISAbits.TRISA1 = 1;

AD1CON2bits.PVCFG = 0b00;    // AVDD -> Positive Voltage Reference
AD1CHSbits.CH0NA = 0b000;    // AVSS -> Channel 0 Negative Input
AD1CHSbits.CH0SA = 0b00001;  // AN1 -> Channel 0 Positive Input
AD1CON3bits.ADCS = 0x00;     // A/D conversion clock as Tcy
AD1CON1bits.SSRC = 0b0111;   // Auto-Convert mode
//AD1CON3bits.SAMC = 0b00000; // Configure sample time = 1Tad
AD1CON3bits.SAMC = 0b11111;  // Auto-Sample Time = 31TAD
// N'hi hauria d'haver suficient, sinó s'haurà de reduir

AD1CON1bits.MODE12 = 1;
AD1CSSH = 0;                 // No inputs are scanned.
AD1CSSL = 0;                 // No inputs are scanned.
AD1CON1bits.FORM = 0b00;     // Data format -> Absolute decimal result, unsigned, right justified

IEC0bits.AD1IE = 1;         // Enable A/D conversion interrupt
AD1CON2bits.SMPI = 0b000000;
AD1CON1bits.ADON = 1;

TRISBbits.TRISB5 = 0;

//ALL ANALOG AS INPUTS
TRISBbits.TRISB2 = 1;       //1      //0_C1
TRISBbits.TRISB3 = 1;       //2      //0_C2
TRISBbits.TRISB4 = 1;       //3      //0_C3 NOT Available!!!
TRISAbits.TRISA8 = 1;       //4      //0_C4 NOT Available!!!
TRISAbits.TRISA1 = 1;       //5      //I_C5
TRISCbits.TRISC2 = 1;       //6      //I_C6
TRISCbits.TRISC3 = 1;       //7      //I_T1

ANSBbits.ANSB2 = 1;         //0_C1
ANSBbits.ANSB3 = 1;         //0_C2
ANSAbits.ANSA1 = 1;         //I_C5
ANSCbits.ANSC2 = 1;         //I_C6
ANSCbits.ANSC3 = 1;         //I_T1

TRISAbits.TRISA4 = 0;       //0_T1

//ANSBbits*/
}

int get_value_l(void){
    __delay_ms(15);
    while(!done);
    measure = 1;              // Measure high
    while(!(done && AD1CON1bits.DONE)); // conversion done?
    return ADC1BUF0;         // yes then get ADC value
    __delay_ms(15);
}

int get_value_h(void){
    __delay_ms(15*2);
    while(!done);
    measure = 3;              // Measure low
    while(!(done && AD1CON1bits.DONE)); // conversion done?
    return ADC1BUF0;         // yes then get ADC value
    __delay_ms(15);
}

void sel_input(char in){
    switch(in){
        case 1:
            AD1CHSbits.CH0SA = 4;
            break;

        case 2:
            AD1CHSbits.CH0SA = 5;
            break;

        case 3:
    
```

```

        break;

    case 4:
        break;

    case 5:
        AD1CHSbits.CH0SA = 1;
        break;

    case 6:
        AD1CHSbits.CH0SA = 12;
        break;

    case 7: //I_T1
        AD1CHSbits.CH0SA = 13;
        break;

    default:
        break;
}
}

int get_temp(void){
    int value;
    IEC0bits.AD1IE = 0;           // Disable A/D conversion interrupt

    sel_input(7);
    PORTAbits.RA4 = 1;
    //__delay_ms(1);
    AD1CON1bits.SAMP = 1;
    while(AD1CON1bits.DONE == 0);
    //__delay_ms(1);
    PORTAbits.RA4 = 0;
    value = ADC1BUF0;

    done = 1;
    measure = 0;

    IEC0bits.AD1IE = 1;         // Enable A/D conversion interrupt

    return value;
}

```

Fitxer MEAS.h

```

#ifndef _MEAS_H_
#define _MEAS_H_

unsigned long cal_A(char input);
unsigned long cal_R(unsigned long a, unsigned long cal);
long buff(long in, char to_on, char stat_on);
void clear_buff(void);
unsigned char cal_range(int meas);
unsigned long get_R();
void init_MEAS();
float cal_cond(unsigned long R, float k);
unsigned long cal_temp();

#endif

```

Fitxer MEAS.c

```

/*
 * File: MEAS.c
 * Author: arnau.janer

```

```

*
* Created on 6 de junio de 2017, 10:12
*/

#include "SIG_GENc.h"
#include "ADCC.h"
#include "BUTTONS.h"

//Buffer constants
#define BUFF_SIZE 10
#define TOL 0.30 //Tolerance to be included on the buffer
#define RESET_MEASURE 40 //Number of distant measurements to restart buffer

const long CAL_FACTORS[3] = { 295 , 2241 , 73080 };
unsigned long last_val = 0;

//unsigned long T_compensation = 21;

unsigned long cal_A(char input){
    int a1,a2, out;
    sel_input(input);
    a2 = get_value_h();
    a1 = get_value_l();

    if ( a2 == a1){
        out = last_val;
    }else{
        out = a2-a1;
    }

    return (a2-a1);
}

unsigned long cal_R(unsigned long a, unsigned long cal){
    a = cal*a/(4095-a);
    return a;
}

unsigned int a[BUFF_SIZE];
unsigned char i_buff;

unsigned char stat = 1;
unsigned char count = 0;

unsigned int range;

long buff(long in, char tol_on, char stat_on){
    unsigned char j;
    long val;

    if (stat == 0){

        if((in != 0) && (in > last_val*(1-TOL)) && (in < last_val*(1+TOL))){ //Only add new value
            if it's inside a tolerance margin
                a[i_buff] = in;
                i_buff++;
                i_buff = i_buff%BUFF_SIZE;
                count = 0;
            }else if(tol_on == 1){
                count++;
            }else if(in !=0){
                a[i_buff] = in;
                i_buff++;
                i_buff = i_buff%BUFF_SIZE;
            }
        }else if (in != 0){
            a[i_buff] = in;
            i_buff++;
            i_buff = i_buff%BUFF_SIZE;
        }

        if (count > RESET_MEASURE){ //If x measurements are out of tolerance reset buffer
            for(j = 0; j < BUFF_SIZE; j++){
                a[j] = 0;
            }
        }
    }
}

```

```

    count = 0;
}

val = 0;
stat = 0;
for(j = 0; j < BUFF_SIZE; j++){
    val = val + a[j];

    if(a[j] == 0){
        stat = 1;
    }
}
if(stat == 1 && stat_on)           //Wait till buffer is full
    val = 0;

last_val = val/BUFF_SIZE;
return last_val;
}

void clear_buff(void){
    int j;
    for(j = 0; j < BUFF_SIZE; j++){
        a[j] = 0;
    }
    stat = 1;
}

unsigned char cal_range(int meas, int mode){
    long val[3];
    int j;
    char min=0;
    unsigned int x[BUFF_SIZE], y[BUFF_SIZE], z[BUFF_SIZE];

    //RANG 1
    clear_buff();
    out_PWM(1);

    for(j = 0; (j < meas && mode == mode_global); j++){
        val[1] = cal_A(6);
        val[1] = buff(val[1],1,0);
    }
    val[1] = val[1]-2047;
    if(val[1] < 0){val[1] = -val[1];}

    for(j = 0; j < BUFF_SIZE; j++) {x[j]=a[j];}
    clear_buff();

    //RANG 2
    out_PWM(2);
    for(j = 0; (j < meas && mode == mode_global); j++){
        val[2] = cal_A(6);
        val[2] = buff(val[2],1,0);
    }

    val[2] = val[2]-2047;
    if(val[2] < 0){val[2] = -val[2];}

    for(j = 0; j < BUFF_SIZE; j++) {y[j]=a[j];}
    clear_buff();

    //RANG 3
    /*out_PWM(3);
    for(j = 0; (j < meas && mode == mode_global); j++){
        val[3] = cal_A(6);
        val[3] = buff(val[3],1,0);
    }

    val[3] = val[3]-2047;
    if(val[3] < 0){val[3] = -val[3];}
    */

    for(j = 0; j < BUFF_SIZE; j++) {z[j]=a[j];}
    clear_buff();
}

```

```

if(val[1]<val[2] && val[1]<val[3]){
    min = 1;
    for(j = 0; j < BUFF_SIZE; j++) {a[j]=x[j];}
    last_val = val[1];
    out_PWM(1);
}
else if(val[2]<val[1] && val[2]<val[3]){
    min = 2;
    for(j = 0; j < BUFF_SIZE; j++) {a[j]=y[j];}
    last_val = val[2];
    out_PWM(2);
}
else if(val[3]<val[1] && val[3]<val[2]){
    min = 3;
    for(j = 0; j < BUFF_SIZE; j++) {a[j]=z[j];}
    last_val = val[3];
    out_PWM(3);
}
i_buff -= 1;

range = min;
return min;
}

int c_R;
unsigned long get_R(){
    unsigned long val, last_val;
    int i;

    val = 0;
    while(val == 0 && i <= BUFF_SIZE*4){
        val = cal_A(6);
        val = buff(val,1,1);
        i++;
        //prevent possible infinite loop!!!
    }

    for(i = 0; i<10 ; i++){
        if(val != 0){
            last_val = val;
            val = cal_A(6);
            val = buff(val,1,1);
            if ( val == 0){
                c_R++;
            }else{
                c_R = 0;
            }
        }else{
            val = last_val;
            c_R++;
            break;
        }
    }

    val = cal_R(val, CAL_FACTORS[range-1]);
    if(val == 0){
        val = 1;
        c_R++;
    }
    if(c_R > 5){
        c_R = 0;
        val = 0;
    }
    return val;
}

void init_MEAS(int mode){
    range = cal_range(20, mode);
}

unsigned long cal_temp(){
    //T = -1E-11x3 + 5E-07x2 - 0,0087x + 57,348
    unsigned long value = get_temp();

    float a=-1e-11;
    float b=5e-7;
    float c=-0.0087;

```

```

float d=57.608;

unsigned long R = 0;
R = cal_R( value , 4700 );

a = a*R*R*R;
b = b*R*R;
c = c*R;

return ( a + b + c + d )*10;
//return R;
}

float cal_cond(unsigned long R, float k){
// k = ln(D/d)/(2*pi*L) = ln(11.3)/(2*pi*1.5) = 0.257279559880512
//Resultat en uS
float G = k*1000/R;
float T;
float factor;
T = cal_temp();

factor = 1000 + (T-250)*(T_compensation/10); //Compensació lineal
//factor = 1000;
G = G*factor;

return G;
}

```

11.3 Annex 3 - Fitxers de disseny de la carcassa

Els fitxers adjunts a continuació s'han utilitzat per al disseny de la carcassa del sensor.

Part superior de la carcassa

```

GRUIX = 3;
RAD_BTN = 3;

RAD_DRILL = 2;

FACTOR = 0.8;

fn = 50;
$fn = fn;

difference(){
  translate([-GRUIX,-GRUIX,-GRUIX]){ cube([159.7+GRUIX*2, 45.5+GRUIX*2, 9+GRUIX]); }

  //Arrodoniment cantonades
  translate([-GRUIX,-GRUIX,-GRUIX]){ cantonada_d (GRUIX , 9+GRUIX); }
  translate([-GRUIX, 45.5+GRUIX , -GRUIX]){ cantonada_u( GRUIX , 9+GRUIX); }

  //Forat intern
  cube([159.7+GRUIX, 45.5, 9+GRUIX]);

  //Forat pantalla
  translate([5,16,-GRUIX]){ cube([53, 16.5, GRUIX]);}

  //Forats botons
  translate([72.2, 23,-GRUIX]){ cylinder(GRUIX, RAD_BTN,RAD_BTN);}
  translate([84.2, 23,-GRUIX]){ cylinder(GRUIX, RAD_BTN,RAD_BTN);}
  translate([98.2, 23,-GRUIX]){ cylinder(GRUIX, RAD_BTN,RAD_BTN);}

  //Encaix inferior
  translate([109.7, -GRUIX,-GRUIX]){ cube([50+GRUIX, 45.5+GRUIX*2, GRUIX/2]);}

  //Encaixos laterals
  translate([109.7, -GRUIX, -GRUIX/2]){ cube([50+GRUIX, GRUIX/2, 9+GRUIX/2]);}

  translate([109.7, 45.5+GRUIX/2, -GRUIX/2]){ cube([50+GRUIX, GRUIX/2, 9+GRUIX/2]);}
}

//Laterals fines superiors

```

```

translate([0,(-GRUIX/2)*FACTOR, 9]){ cube([109.7, (GRUIX/2)*FACTOR, 9]); }
translate([0, 45.5, 9]){ cube([109.7, (GRUIX/2)*FACTOR, 9]); }

translate([109.7, -GRUIX/2,9]){ cube([50+GRUIX, GRUIX/2, 4.5]);}
translate([109.7, 45.5,9]){ cube([50+GRUIX, GRUIX/2, 4.5]);}

difference(){
  translate([(-GRUIX/2)*FACTOR, (-GRUIX/2)*FACTOR, 9]){ cube([(GRUIX/2)*FACTOR, 45.5+
(GRUIX*FACTOR), 9]); }
  translate([(-GRUIX/2)*FACTOR, (-GRUIX/2)*FACTOR, 9]){ cantonada_d ( (GRUIX/2)*FACTOR , 9 );}

  translate([(-GRUIX/2)*FACTOR,45.5 + (GRUIX*FACTOR)/2, 9]){ cantonada_u ( (GRUIX/2)*FACTOR ,
9 );}
}

difference(){
  for ( ix = [0,1], iy = [0,1] ){
    translate([4+ix*(159.7-8), 4 + iy*(45.5-8), 0])
      cylinder(6.6, r1 = 4+GRUIX/2, d2 = RAD_DRILL+4, $fn = fn);
  }

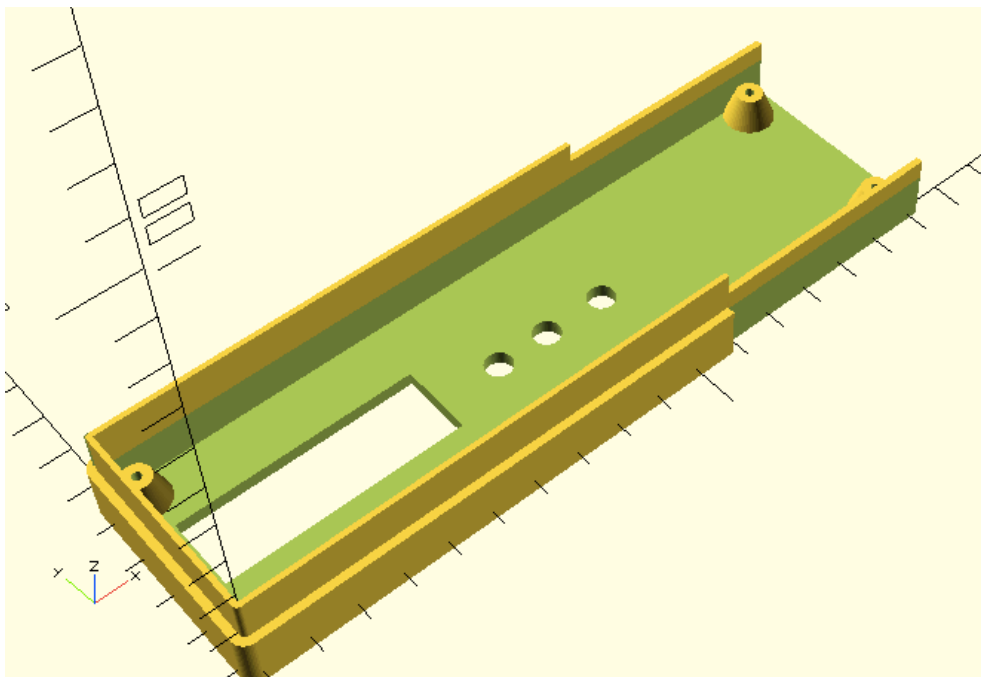
  for ( ix = [0,1], iy = [0,1] ){
    translate([4+ix*(159.7-8), 4 + iy*(45.5-8), 0])
      cylinder(6.6, d1 = RAD_DRILL, d2 = RAD_DRILL, $fn = fn);
  }

  translate([4, 4, 0]){
    cube([4+GRUIX/2,4+GRUIX/2,9.1]);
  }
}

module cantonada_d ( R , H ){
  difference(){
    cube([R*2,R*2,H]);
    translate([R,R,0]){cylinder(H,d=R*2);}
    translate([R,0,0]){cube([R,2*R,H]);}
    translate([0,R,0]){cube([R,R,H]);}
  }
}

module cantonada_u ( R , H ){
  translate([0,-R*2,0]){
    difference(){
      cube([R*2,R*2,H]);
      translate([R,R,0]){cylinder(H,d=R*2);}
      translate([R,0,0]){cube([R,2*R,H]);}
      translate([0,0,0]){cube([R,R,H]);}
    }
  }
}

```



```
}
```

Part inferior de la carcassa

```
GRUIX = 3;
RAD_BTN = 3;

RAD_DRILL = 2;
RAD_CAP = 2.5;

FACTOR = 0.8;

fn = 50;
$fn = fn;

difference(){
  translate([-GRUIX,-GRUIX,-GRUIX]){ cube([159.7+GRUIX*2, 45.5+GRUIX*2, 9+GRUIX]); }

  //Arrodoniment cantonades
  translate([-GRUIX,-GRUIX,-GRUIX]){ cantonada_d (GRUIX , 18+GRUIX); }
  translate([-GRUIX, 45.5+GRUIX ,-GRUIX]){ cantonada_u( GRUIX , 18+GRUIX); }

  //Forat intern
  cube([159.7+GRUIX, 45.5, 9+GRUIX]);

  //Encaix inferior
  translate([109.7, -GRUIX,-GRUIX]){ cube([50+GRUIX, 45.5+GRUIX*2, GRUIX/2]);}

  //Encaixos laterals
  translate([109.7, -GRUIX, -GRUIX/2]){ cube([50+GRUIX, GRUIX/2, 9+GRUIX/2]);}

  translate([109.7, 45.5+GRUIX/2, -GRUIX/2]){ cube([50+GRUIX, GRUIX/2, 9+GRUIX/2]);}

  //Forat piles
  translate([18.5, 17.75,-GRUIX]){ cube([5, 10, GRUIX]);}
  translate([18.5-2, 17.75-3,-GRUIX]){ cube([5+4, 10+6, GRUIX/2]);}

  ix = 0;
  for ( iy = [0,1] ){
    translate([4+ix*(159.7-8), 4 + iy*(45.5-8), -GRUIX]){
      cylinder(2.5, d1 = 6, d2 = 3.15, $fn = fn);
      cylinder(GRUIX, d1 = 3.15, d2 = 3.15, $fn = fn);
    }
  }

  for ( iy = [0,1] ){
    translate([119.7, 4 + iy*(45.5-8), -GRUIX])
      cylinder(GRUIX, d1 = RAD_DRILL, d2 = RAD_DRILL, $fn = fn);
  }
}

translate([109.7, -GRUIX/2,9]){ cube([50+GRUIX, GRUIX/2, 4.5]);}
translate([109.7, 45.5,9]){ cube([50+GRUIX, GRUIX/2, 4.5]);}

//Portapiles
difference(){
  cube([90, 45.5, 5]);
  translate([15, 9.75,0]){ cube([64, 26, 5]); }
  for ( iy = [0,1] ){
    translate([4, 4 + iy*(45.5-8), 0])
      cylinder(5, d1 = 3.15, d2 = 3.15, $fn = fn);
  }
}

difference(){
```

```

for ( ix = [0,1], iy = [0,1] ){
  translate([4+ix*(71), 4 + iy*(45.5-8), 0])
  cylinder(18.7, r1 = 3.15+2, d2 = 3.15+3, $fn = fn);
}

for ( ix = [0,1], iy = [0,1] ){
  translate([4+ix*(71), 4 + iy*(45.5-8), 0])
  cylinder(18.7, d1 = 3.15, d2 = 3.15, $fn = fn);
}

}

difference(){
  for ( iy = [0,1] ){
    translate([119.7, 4 + iy*(45.5-8), 0])
    cylinder(5, r1 = 4+GRUIX/2, r2 = 4+GRUIX/2, $fn = fn);
  }

  for ( iy = [0,1] ){
    translate([119.7, 4 + iy*(45.5-8), 0])
    cylinder(5, d1 = RAD_DRILL, d2 = RAD_DRILL, $fn = fn);
  }
}

//Laterals fines superiors
difference(){
  translate([-GRUIX,-GRUIX, 9]){ cube([109.7+GRUIX, (GRUIX/2)*FACTOR, 9]); }
  //Arrodoniment cantonades
  translate([-GRUIX,-GRUIX,-GRUIX]){ cantonada_d (GRUIX , 18+GRUIX); }
  translate([-GRUIX, 45.5+GRUIX ,-GRUIX]){ cantonada_u( GRUIX , 18+GRUIX); }
}

//+ GROIXUT!!!
translate([-GRUIX+(GRUIX/2)*FACTOR,-GRUIX+(GRUIX/2)*FACTOR, 9]){ cantonada_d ( (GRUIX/2)*FACTOR ,
9 );}

translate([-GRUIX+(GRUIX/2)*FACTOR,45.5+(GRUIX/2+GRUIX/2*(1-FACTOR)), 9]){ cantonada_u ( (GRUIX/
2)*FACTOR , 9 );}

difference(){
  translate([-GRUIX, 45.5+(GRUIX/2+GRUIX/2*(1-FACTOR)), 9]){ cube([109.7+GRUIX, (GRUIX/2)*FACTOR,
9]); }
  //Arrodoniment cantonades
  translate([-GRUIX,-GRUIX,-GRUIX]){ cantonada_d (GRUIX , 18+GRUIX); }
  translate([-GRUIX, 45.5+GRUIX ,-GRUIX]){ cantonada_u( GRUIX , 18+GRUIX); }
}

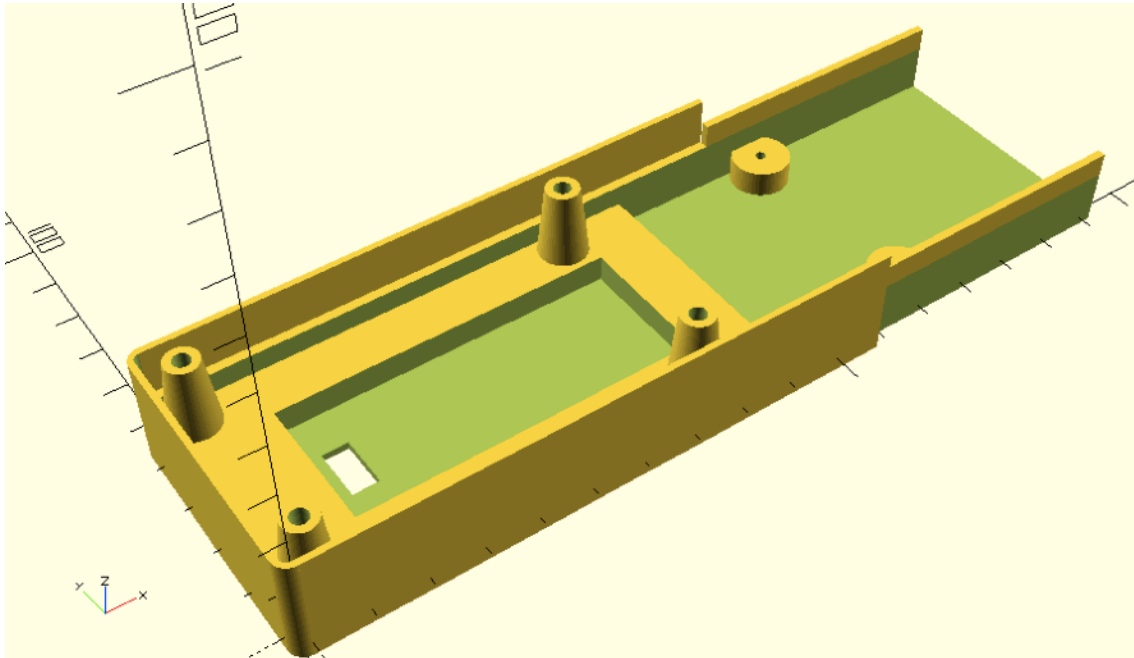
difference(){
  translate([(-GRUIX), -GRUIX, 9]){ cube([(GRUIX/2)*FACTOR, 45.5+GRUIX*2, 9]); }
  //Arrodoniment cantonades
  translate([-GRUIX,-GRUIX,-GRUIX]){ cantonada_d (GRUIX , 18+GRUIX); }
  translate([-GRUIX, 45.5+GRUIX ,-GRUIX]){ cantonada_u( GRUIX , 18+GRUIX); }
}

}

module cantonada_d ( R , H ){
  difference(){
    cube([R*2,R*2,H]);
    translate([R,R,0]){cylinder(H,d=R*2);}
    translate([R,0,0]){cube([R,2*R,H]);}
    translate([0,R,0]){cube([R,R,H]);}
  }
}

module cantonada_u ( R , H ){
  translate([0,-R*2,0]){
    difference(){
      cube([R*2,R*2,H]);
      translate([R,R,0]){cylinder(H,d=R*2);}
      translate([R,0,0]){cube([R,2*R,H]);}
      translate([0,0,0]){cube([R,R,H]);}
    }
  }
}
}

```



Capçal de la carcassa

```

z_case_top = 10;

gruix = 2;
gruix_top = gruix;
fn = 5;

x_case = 160;
y_case = 45.5;
z_case = 17-gruix*0.9*2;

//Mides capçal
x_c = 20;
y_c = y_case;
z_c = z_case;

x = z_case_top+z_case;
y = y_case-2*gruix*0.9;
z_base = x_c-gruix*1.5;
z_ext = 25;

r_v = 0.5;

r = 2;

cone_h = 4;
GRUIX_E = 3;
MARGE = 0.3;

fn = 50;
$fn = fn;

difference(){
  translate([-gruix*0.9-(MARGE*2+GRUIX_E*2)/2,-gruix*0.9-(MARGE*2+GRUIX_E*2)/2,-54])
    cube([27+MARGE*2+GRUIX_E*2, 45.5+MARGE*2+GRUIX_E*2 ,54], center=false);
}

```

```

translate([-gruix*0.9-(MARGE*2+GRUIX_E)/2,-gruix*0.9-(MARGE*2+GRUIX_E)/2,-54])
  cube([27+MARGE*2+GRUIX_E, 45.5+MARGE*2+GRUIX_E, 54], center=false);

//DELICAT!!!
translate([0,-gruix*0.9-(MARGE*2)/2+4,-40]){
  rotate(a=[90,0,90])
  cylinder(100,d=2,center=false);
}
translate([0,-gruix*0.9-(MARGE*2)/2+45.5+MARGE*2-4,-40]){
  rotate(a=[90,0,90])
  cylinder(100,d=2,center=false);
}
}

difference(){
  translate([-gruix*0.9-(MARGE*2+GRUIX_E*2)/2,-gruix*0.9-(MARGE*2+GRUIX_E*2)/2,0])
    cube([27+MARGE*2+GRUIX_E*2, 45.5+MARGE*2+GRUIX_E*2, z_base], center=false);

  translate([-gruix*0.9-(MARGE*2+GRUIX_E*2)/2,-gruix*0.9-(MARGE*2+GRUIX_E*2)/
2+45.5+MARGE*2+GRUIX_E*2, z_base]) {rotate([0,90,0]){ cantonada_u(gruix/2+2,27+MARGE*2+GRUIX_E*2);}}

  translate([-gruix*0.9-(MARGE*2+GRUIX_E*2)/2,-gruix*0.9-(MARGE*2+GRUIX_E*2)/2,z_base])
{rotate([0,90,0]){ cantonada_d(gruix/2+2,27+MARGE*2+GRUIX_E*2);}}

  translate([x/2, y/3-1, 0]) {
    cylinder(z_base,r_v,r_v, center=false,$fn=30);
  }

  translate([x/2, 2*y/3+1, 0]) {
    cylinder(z_base,r_v,r_v, center=false,$fn=30);
  }

  translate([x/2, y/2, 0]){
    cylinder(z_base,1,1, center=false,$fn=30);
  }

  translate([-gruix*0.9-(MARGE*2+GRUIX_E)/2+6,-gruix*0.9-(MARGE*2+GRUIX_E)/2+6,0])
    cube([27+MARGE*2+GRUIX_E-12, 45.5+MARGE*2+GRUIX_E-12, z_base/2], center=false);
}

difference(){
  translate([-gruix/2, -gruix/2, z_base]) {
    cube([x+gruix,y+gruix,z_ext], center=false );
  }
  translate([1, 1, z_base]) {
    cube([x-2,y-2,z_ext], center=false);
  }

  translate([-gruix/2, -gruix/2, z_base]) {cantonada_d(gruix/2+2,z_ext);}
  translate([-gruix/2, y+gruix/2, z_base]) {cantonada_u(gruix/2+2,z_ext);}
  translate([x+gruix/2, -gruix/2, z_base]) {rotate([0,0,180]){ cantonada_u(gruix/2+2,z_ext);}}
  translate([x+gruix/2, y+gruix/2, z_base]) {rotate([0,0,270]){ cantonada_u(gruix/2+2,z_ext);}}

  translate([-gruix/2,y/2,z_base+r+gruix]){
    rotate(a=[90,0,90])
    cylinder(x+gruix,r,r,center=false,$fn=30);
  }
  translate([-gruix/2,y/2-r,z_base+r+gruix]){
    cube([x+gruix,2*r,z_ext-r-gruix], center = false);
  }
}

difference(){
  translate([x/2, y/3-1, z_base]){
    cylinder(cone_h,x/2-1,r_v+1.5, center=false,$fn=30);
  }

  translate([x/2, y/3-1, z_base]){
    cylinder(cone_h,r_v,r_v, center=false,$fn=30);
  }
  translate([x/2, y/2, z_base]){
    cylinder(cone_h,r_v*2,r_v*2, center=false,$fn=30);
  }
}

```

```

    }
}

difference(){
  translate([x/2, 2*y/3+1, z_base]){
    cylinder(cone_h,x/2-1,r_v+1.5, center=false,$fn=30);
  }

  translate([x/2, 2*y/3+1, z_base]){
    cylinder(cone_h,r_v,r_v, center=false,$fn=30);
  }
  translate([x/2, y/2, z_base]){
    cylinder(cone_h,r_v*2,r_v*2, center=false,$fn=30);
  }
}

difference(){
  translate([x/2, y/2, z_base]){
    cylinder(cone_h/2,x/2-2,r_v+1.5, center=false,$fn=30);
  }

  translate([x/2, y/2, z_base]){
    cylinder(cone_h,r_v*2,r_v*2, center=false,$fn=30);
  }
  translate([x/2, 2*y/3+1, z_base]){
    cylinder(cone_h,r_v,r_v, center=false,$fn=30);
  }
  translate([x/2, y/3-1, z_base]){
    cylinder(cone_h,r_v,r_v, center=false,$fn=30);
  }
}

module cantonada_d ( R , H ){
  difference(){
    cube([R*2,R*2,H]);
    translate([R,R,0]){cylinder(H,d=R*2);}
    translate([R,0,0]){cube([R,2*R,H]);}
    translate([0,R,0]){cube([R,R,H]);}
  }
}

module cantonada_u ( R , H ){
  translate([0,-R*2,0]){
    difference(){
      cube([R*2,R*2,H]);
      translate([R,R,0]){cylinder(H,d=R*2);}
      translate([R,0,0]){cube([R,2*R,H]);}
      translate([0,0,0]){cube([R,R,H]);}
    }
  }
}

RAD_BTN = 3;

///BOTONS
translate([5,-15,-54]){
  cube([RAD_BTN*2+2,RAD_BTN*2+2,2.5]);
  translate([RAD_BTN+1,RAD_BTN+1,0]){cylinder(7+GRUIX_E,r = RAD_BTN-0.25);}
}

translate([15,-15,-54]){
  cube([RAD_BTN*2+2,RAD_BTN*2+2,2.5]);
  translate([RAD_BTN+1,RAD_BTN+1,0]){cylinder(7+GRUIX_E,r = RAD_BTN-0.25);}
}

translate([25,-15,-54]){
  cube([RAD_BTN*2+2,RAD_BTN*2+2,2.5]);
  translate([RAD_BTN+1,RAD_BTN+1,0]){cylinder(7+GRUIX_E,r = RAD_BTN-0.25);}
}

```

