



UNIVERSITAT_{DE}
BARCELONA

Aplicació de node IoT pel control de qualitat de l'aigua

Autor: David Mir Gómez

Tutor: Cristian Fàbrega Gallego

Curs acadèmic: 2024-2025

Màster en Energies Renovables i
Sostenibilitat Energètica

Dos Campus d'Excel·lència Internacional:



Health Universitat
de Barcelona
Campus

Agraïments

M'agradaria començar expressant la meva gratitud al director del treball, Cristian Fàbrega, per oferir-me aquest projecte tan innovador per realitzar el meu treball de fi de màster i ajudar-me a dur a terme els diferents experiments al laboratori.

També volia agrair a WS la possibilitat de fer pràctiques a l'empresa i adquirir coneixements que resulten útils per aquest projecte.

Gràcies al JSI per haver facilitat informació del seu prototip i de les proves a fer de cara a preparar al material del laboratori i dissenyar la placa del sensor.

Finalment, a Omar Ramírez per gestionar la fabricació de la placa PCB i la soldadura dels components.

Índex General

Índex General	1
Índex de Figures	2
Índex de Taules.....	3
Memòria Descriptiva	4
1. Introducció.....	4
2. Objectiu	5
3. Antecedents	5
4. Metodologia.....	6
5. Caracterització del sensor.....	7
5.1. Reacció redox	7
5.2. Voltamperometria cíclica	8
5.3. Determinació tensió de treball.....	10
6. Disseny de la PCB	12
6.1. Esquemàtic	13
6.2. Distribució dels components en la PCB	17
7. Integració prototip en node IoT	19
7.1. Node IoT.....	19
7.2. Connexió entre PCB i node	21
7.3. Aplicació WS	22
8. Validació del sistema.....	26
8.1. Cronoamperometria.....	26
8.2. Comparativa dels resultats	28
9. Conclusions	33
10. Treball futur	33
Referències	34
Annexos	35
Abstract.....	106

Índex de Figures

Figura 1. (a) Solució de PBS 10 μ M. (b) Concentracions de BPA. (c i d) Connexió potenciòstat a la cel·la.	8
Figura 2. Configuració de la CV	9
Figura 3. Corbes de la corrent vs tensió aplicada.	10
Figura 4. (a) Anàlisi tram entre 6,25 μ M/L i 100 μ M/L. (b) Corbes de calibració per caracterització	11
Figura 5. (a) Circuit simulació prototip JSI. (b) Circuit per detectar BPA.....	13
Figura 6. Esquemàtic de la PCB.....	16
Figura 7. Muntatge final de la PCB.....	18
Figura 8. Connexió sensor amb node.	21
Figura 9. (a) Node IoT. (b) Connexió node-PCB-mòbil	22
Figura 10. (a) Menú principal app. (b) Configuració sensor	23
Figura 11. (a) Configuració descàrrega. (b) Carpetes	25
Figura 12. (a) PCB amb DRP-150 i mostra potenciòstat. (b) Muntatge complet.....	26
Figura 13. (a) Corbes reals experiment 1. (b) Corbes desfasades experiment 1.	29
Figura 14. (a) Corbes reals experiment 2. (b) Corbes desfasades experiment 2.	30
Figura 15. (a) Corbes reals experiment 3. (b) Corbes desfasades experiment 3.	31

Índex de Taules

Taula 1. Simulació circuit amb font d'1 V.....	14
Taula 2. Simulació circuit amb canvis.....	15
Taula 3. Pics de corrent experiment 1.	32
Taula 4. Pics de corrent experiment 2.....	32
Taula 5. Pics de corrent experiment 3.	32

Memòria Descriptiva

1. Introducció

Els contaminants orgànics persistents (COPs) són substàncies químiques artificials que resisteixen la degradació natural i poden acumular-se on organismes vius. Tot i que es troben tant a l'aire com a l'aigua, és en aquest últim medi on suposen un risc més directe i perllongat per a la salut humana i els ecosistemes. La seva presència en aigües dolces i residuals ha estat associada amb desequilibris ecològics i efectes tòxics.

Un dels COPs més destacats és el bisfenol A (BPA), utilitzat en la fabricació de plàstics i papers tèrmics. El BPA pot migrar fàcilment cap a l'aigua i ha estat identificat com a disruptor endocrí, amb efectes adversos sobre el sistema hormonal, reproductiu i metabòlic. Tot i les restriccions, encara es detecta en concentracions significatives en el medi aquàtic. [1] [2]

Els mètodes clàssics per a la detecció del BPA, com la cromatografia líquida (HPLC) o l'espectrometria de masses (LC-MS), són molt precisos, però requereixen equips costosos i processos complexos. En canvi, les tècniques electroquímiques, com la voltamperometria cíclica (CV), ofereixen una alternativa més assequible i aplicable en temps real. Aquestes tècniques es basen en reaccions redox que generen corrents elèctrics característics del compost analitzat. [3] [4]

Els elèctrodes serigrafiats (*screen-printed electrodes*, SPEs), com el DRP-150, permeten integrar el sistema electroquímic en un format compacte i fàcil d'usar. Combinats amb voltamperometria, permeten identificar els pics d'oxidació del BPA en un rang de potencials específic, facilitant la seva detecció en mostres d'aigua o paper tèrmic. A més, la seva simplicitat, baix cost i portabilitat els fan especialment útils pel control ambiental i la vigilància de la qualitat de l'aigua.

En aquest context, l'aplicació de sensors electroquímics per detectar BPA es presenta com una solució prometedora, eficient i adaptable pel seguiment de contaminants emergents, contribuint a la protecció de la salut pública i el medi ambient. [5]

2. Objectiu

L'objectiu del present projecte és dissenyar i muntar un sensor electroquímic capaç de detectar diferents concentracions de bisfenol A (BPA) a l'aigua. Per aconseguir-ho, cal:

- Caracteritzar el sensor per determinar a quin voltatge reacciona aquesta substància.
- Dissenyar i fabricar una placa de circuit imprès que permeti aplicar la tensió adequada als elèctrodes i mesurar el corrent que circula per la cel·la electroquímica.
- Integrar la PCB a un node IoT que reculli dades periòdicament i permeti que, a través d'una aplicació mòbil, es puguin analitzar els resultats i detectar possibles canvis en la concentració de BPA.

Aquest projecte contribueix a diversos Objectius de Desenvolupament Sostenible (ODS) de l'Agenda 2030. En primer lloc, promou la salut i el benestar (ODS 3) en detectar un contaminant potencialment nociu per l'organisme humà. També dona suport a l'accés a aigua neta i segura (ODS 6), afavorint el monitoratge dels recursos hídrics. A més, fomenta una producció i consum més responsables (ODS 12) i protegeix els ecosistemes aquàtics (ODS 14) en controlar la contaminació química. El fet d'incorporar una placa electrònica i un dispositiu de lectura i transmissió de dades impulsa la innovació tecnològica en el sector ambiental (ODS 9).

3. Antecedents

El Jozef Stefan Institute (JSI) és el principal institut d'investigació científica d'Eslovènia, que cobreix un ampli espectre de recerca. Els temes que tracten estan relacionats amb les tecnologies de producció i control, comunicació i informàtica, nous materials, nanotecnologia, tecnologies mediambientals... La seva missió és acumular i difondre coneixements en benefici de la societat a través de l'aprenentatge, l'educació i el desenvolupament de tecnologia avançada. [6]

Relacionat amb la temàtica de la contaminació de l'aigua, un equip de recerca de l'institut va dissenyar i muntar un prototip de sensor electroquímic per mesurar la concentració del bisfenol S a l'aigua. Aquesta substància química és comuna, persistent i mòbil i es troba en molts productes d'ús quotidià. El problema és que en tocar productes que la contenen, aquesta pot entrar al cos alterant el sistema endocrí.

Donat als efectes que pot tenir en la salut, l'avaluació dels nivells de BPS esdevé una prioritat. Això es pot fer mitjançant mètodes analítics electroquímics que permeten mesurar *in situ* i en temps real. D'aquí el sensor electroquímic per a la seva detecció mitjançant elèctrodes serigrafiats basats en elèctrodes de treball de carboni (SPE-C).

De cara a dissenyar el sensor van dur a terme voltamperometria cíclica per investigar el comportament del BPS amb una concentració de 500 μM aplicant de forma progressiva tensió en un rang determinat i observant en quin moment es donava un pic d'oxidació, tensió en la qual la substància reacciona. A més, també van analitzar la capacitat de detectar-la en un ampli rang de concentracions, ja que és un atribut important per un sensor, així com la repetibilitat. [7]

El prototip consta d'una petita placa PCB que actua com a potenciòstat. Inclou un connector per a la cel·la electroquímica, un amplificador d'instrumentació, el sensor de corrent i un regulador PID. A més hi ha un microcontrolador per digitalitzar les dades. Aquestes es poden visualitzar mitjançant un programa d'ordinador que mostra l'evolució del corrent segons la tensió aplicada, tot regulat pel mateix circuit.

Arran d'aquest projecte, el JSI volia dissenyar un sensor similar, però per detectar BPA i sense haver de dependre de cablejat per llegir les dades en temps real perquè al final el sensor ha de poder treballar a la intempèrie sense necessitat que algú estigui allí. Aleshores es va posar en contacte amb l'empresa Worldsensing SL (WS), que dissenya sistemes de monitoratge sense fils. D'aquí va sorgir un nou projecte que és el present treball i que es va aprofitar per elaborar durant una estada de pràctiques a WS.

4. Metodologia

Les diferents fases que s'han seguit per dur a terme el present projecte són:

- En primer lloc, per tal de familiaritzar-se amb la problemàtica de la contaminació de l'aigua, es van consultar diversos articles científics i tècnics, amb especial atenció al bisfenol A (BPA), la seva presència en l'aigua i els seus efectes sobre la salut humana i el medi ambient.
- Es va contactar amb el JSI per obtenir documentació i material necessaris per a la preparació de diferents concentracions de BPA, amb l'objectiu de dur a terme experiments de caracterització al laboratori.
- Un cop determinada la tensió a la qual reacciona el bisfenol A, es va dissenyar una PCB que inclogués el circuit necessari per aplicar aquesta tensió als elèctrodes i mesurar el corrent generat. En el disseny es va tenir en compte l'ajust de tensió, l'espai per a la presa de mesures, la fixació mecànica de la placa i la ubicació dels connectors de la cel·la electroquímica i del node IoT per evitar interferències.
- Es va demanar informació a WS sobre els diferents models de nodes IoT disponibles, amb l'objectiu de seleccionar el més adequat. Es van estudiar tant les connexions amb la PCB com la comunicació amb el dispositiu mòbil per a la lectura de dades mitjançant una aplicació.
- Decidit el node més adequat i fabricada la placa, es van soldar els components i es va verificar el correcte funcionament del circuit segons simulacions prèvies. A continuació, es van establir les connexions entre el node i la PCB, i entre el node i el mòbil.

- Es va configurar el node i van prendre les primeres lectures per comprovar que el sistema funcionava correctament i que les dades es registraven adequadament.
- Finalment, es van fer experiments afegint quantitats controlades d'una solució concentrada de BPA per observar els pics de corrent i analitzar el rendiment i fiabilitat del sistema de mesura.

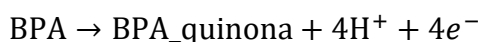
5. Caracterització del sensor

5.1. Reacció redox

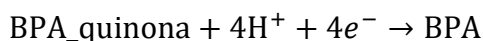
Com ja s'ha comentat, una de les aproximacions més eficients per a la detecció del BPA és mitjançant tècniques electroquímiques, les quals ofereixen simplicitat, sensibilitat i compatibilitat amb dispositius portàtils.

Per tal de garantir unes condicions de mesura estables, el BPA es dissol en una solució tampó fosfat salina (PBS), amb un pH controlat proper a 7,4. Aquest medi no només manté el pH constant durant la reacció redox, sinó que també millora la conductivitat del sistema i facilita l'oxidació.

El BPA ($C_{15}H_{16}O_2$) conté dos grups fenòlics ($Ar-OH$) susceptibles d'oxidació. En presència d'un potencial prou positiu, aquests grups s'oxiden a grups quinona, següent:



Aquesta és la semireacció d'oxidació que es registra com a senyal de corrent en voltamperometria. En el cas que la reacció fos reversible, es podria veure també la reducció de la quinona formada:



No obstant això, en la pràctica, l'oxidació és irreversible, especialment en el medi neutre com PBS. De mode que no hi ha senyal de reducció en el cicle invers, els productes del BPA oxidat són estables i això ajuda a identificar la presència de BPA amb un sol pic.

Per tal que la cel·la funcioni, els electrons cedits han de circular pel circuit fins a l'elèctrode auxiliar (CE). L'elèctrode de referència (RE) només serveix per fixar el potencial i no participa activament en la reacció redox. [8]

Per a l'estudi del comportament redox del BPA es fa servir una cel·la serigrafiada DRP-150, formada per un elèctrode de treball (WE) de carboni de 4 mm de diàmetre, un contra elèctrode de platí (CE) i un pseudoelèctrode de referència (RE) de plata. El substrat és ceràmic amb una llargada de 3,38 cm, una amplada d'1,02 cm i un gruix de 0,05 cm. Mitjançant aquesta configuració, es pot aplicar una tècnica electroquímica com la voltamperometria cíclica (CV), que permet caracteritzar la reacció d'oxidació del BPA i optimitzar les condicions de mesura per a la seva detecció selectiva. [7]

5.2. Voltamperometria cíclica

Per poder dur a terme aquest experiment primer cal tenir el material i fer les connexions pertinents.

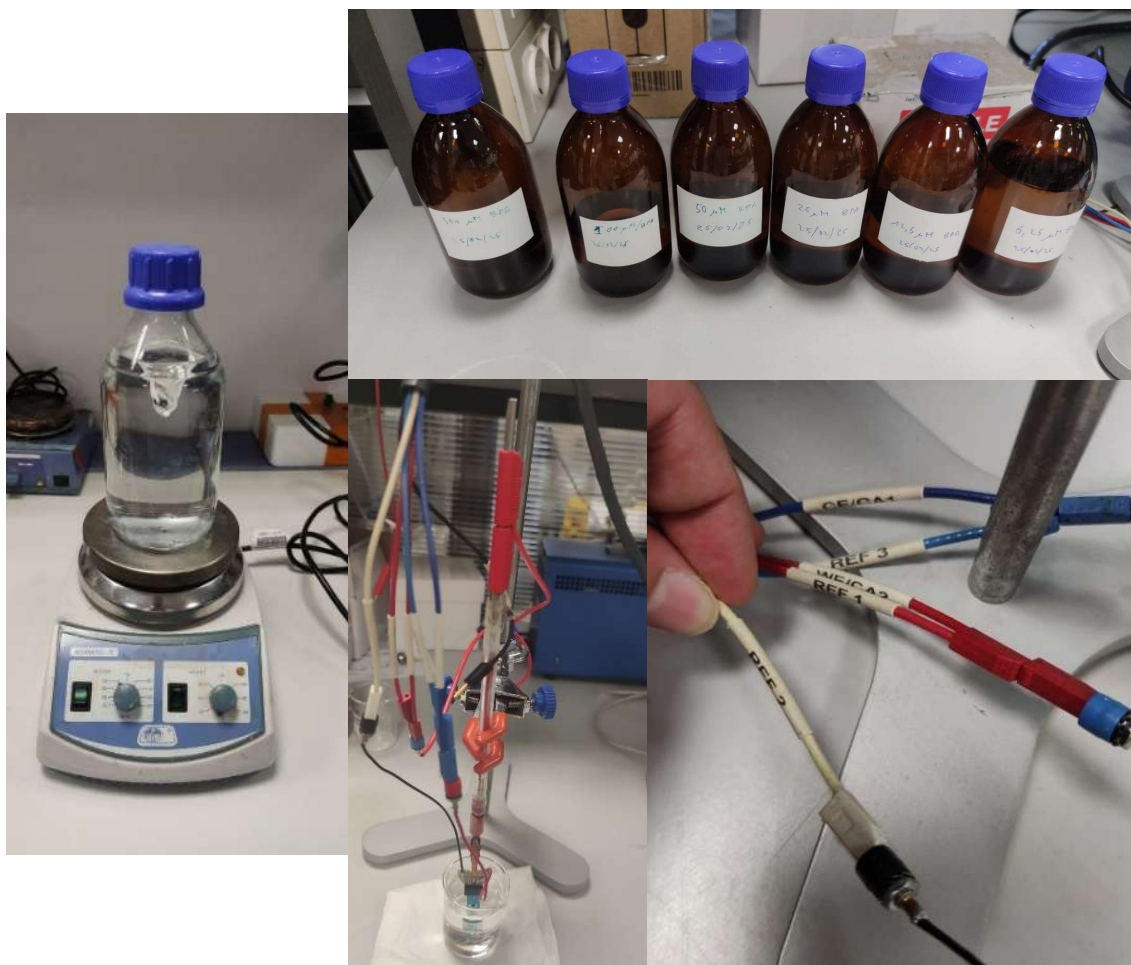


Figura 1. (a) Solució de PBS 10 μ M. (b) Concentracions de BPA. (c i d) Connexió potenciòstat a la cel·la.

De cara a preparar diferents concentracions de BPA, es pren un vas de 500 mL i s'omple amb aigua destil·lada. Seguidament, s'afegeixen 5 pastilles de PBS en un vas d'un litre, que s'omple amb dos vasos dels anteriors. Per dissoldre-ho, es posa a l'agitador magnètic.

Les diferents concentracions de BPA para poder fer la CV es preparen a partir de 100 mL de la solució de PBS. En una bàscula es pesen 11,8 mg de BPA, llavors es fa la mescla i es deixa dissoldre bé.

Les concentracions amb les quals es treballa són: 500 μ M/L; 100 μ M/L; 50 μ M/L; 25 μ M/L; 12,5 μ M/L i 6,25 μ M/L. La primera d'elles és la que s'obté inicialment i serveix per obtenir les altres.

Pels 100 μ M/L: es prenen 40 mL de la solució de 500 μ M/L i s'afegeixen 160 mL de PBS per dissoldre, el que suposa un volum total de 200 mL.

Pels 50 $\mu\text{M/L}$: es prenen 100 mL de la solució de 100 $\mu\text{M/L}$ i s'afegeixen 100 mL de PBS.

Així successivament amb la resta. A mesura que van preparant es posen en pots de vidre ben identificats com es pot veure en la Figura 1b.

Preparades les concentracions es connecta el potenciòstat amb la cel·la mitjançant un *holder* que permet allargar els pins del connector i així poder soldar uns cables que es connecten als del potenciòstat (Figura 1c i 1d).

El *software* EC-Lab és una potent eina que permet dur a terme experiments electroquímics i és el que es fa servir pel potenciòstat del laboratori. En aquest cas es vol configurar un experiment de CV en un rang 0 V - 1 V entre la tensió de treball i la referència per tal que faci un cicle de pujada i baixada en aquest rang amb una velocitat d'escaneig de 50 mV/s. Així es pot veure el pic de l'oxidació en la pujada i, en principi, cap pic en la baixada o reducció. La idea és fer-ho amb cadascuna de les concentracions i llavors encavalcar les gràfiques per veure els diferents pics de corrent.

Set E_{we} to $E_i = 0.000$ V vs. Ref

Scan E_{we} with $dE/dt = 50.000$ mV/s

to vertex potential $E_1 = 1.000$ V vs. Ref

Reverse scan to vertex $E_2 = 0.000$ V vs. Ref

Repeat $n_c = 1$ time(s)

Measure $\langle I \rangle$ over the last 50 % of the step duration

Record $\langle I \rangle$ averaged over $N = 10$ voltage steps

E Range = -2.5 V; 2.5 V ...

Resolution = 100 μV

I Range = Auto ...

Bandwidth = 5 - medium

☐ End scan to $E_f = 0.000$ V vs. Eoc

Force E_1 / E_2

($dE/dt \sim 100 \mu\text{V} / 2 \text{ ms}$)
($dEN \sim 1.0 \text{ mV}$)
(2000 points per cycle)

Figura 2. Configuració de la CV.

En la Figura 3 es poden veure les corbes obtingudes en fer cada CV amb les concentracions comentades. Cal destacar que per obtenir un millor resultat després de fer cada CV i canviar de concentració és necessari canviar la mostra de la cel·la electroquímica, ja que són d'un sol ús i repetir diferents experiments amb una mateixa pot alterar els resultats.

Com es pot observar, en la fase d'oxidació o pujada de voltatge hi ha un pic en cada corba, però en la reducció no s'aprecia cap. A més, es pot veure la diferència de magnitud entre les corbes, com major concentració, més alt és el pic i més corrent circula.

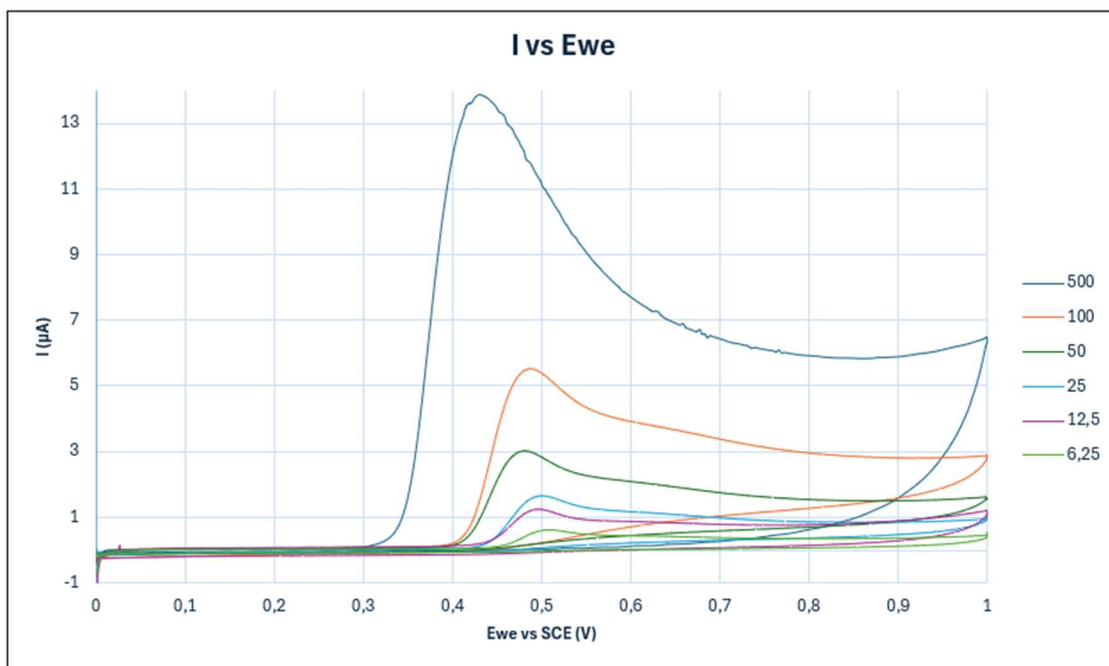


Figura 3. Corbes de la corrent vs tensió aplicada.

5.3. Determinació tensió de treball

Amb les dades de les corbes anteriors es pot determinar la tensió en la qual reacciona el BPA.

Com es pot comprovar, entre els 0,45 V i els 0,55 V és on es troben tots els pics, de forma que el voltatge que interessa determinar estar en aquest interval. Aquests pics poden variar lleugerament depenent del tipus d'elèctrode de treball, el medi i el pH de l'electròlit i la velocitat d'escaneig del potencial.

Tenint en compte aquest rang de tensió, es tracen unes corbes de calibratge a cada tensió per representar el corrent en funció de la concentració per obtenir una relació lineal.

Aquestes corbes permeten mesurar el corrent d'una mostra desconeguda i, aplicant la recta, poder determinar la seva concentració. Quan el pendent és més gran el sensor pot detectar concentracions més petites amb més claredat.

Es pot apreciar que el tram entre 6,25 $\mu M/L$ i 100 $\mu M/L$ té un major pendent, però ja en el darrer tram fins a 500 $\mu M/L$ el pendent es redueix. Això pot ser degut al fet que se satura la superfície activa de l'elèctrode limitant la reacció, a canvis en el mecanisme de reacció, a un transport més lent del BPA a l'elèctrode o per la conductivitat de la solució.

De cara a detectar concentracions petites amb més precisió i sensibilitat, s'analitza el primer tram. En aquest tram la resposta del sensor és més lineal i estable, amb un coeficient de correlació proper a 1. A més s'eviten problemes de saturació i efectes no lineals i, al final, el BPA a analitzar es troba en mostres d'aigua on les concentracions solen estar en aquest rang.

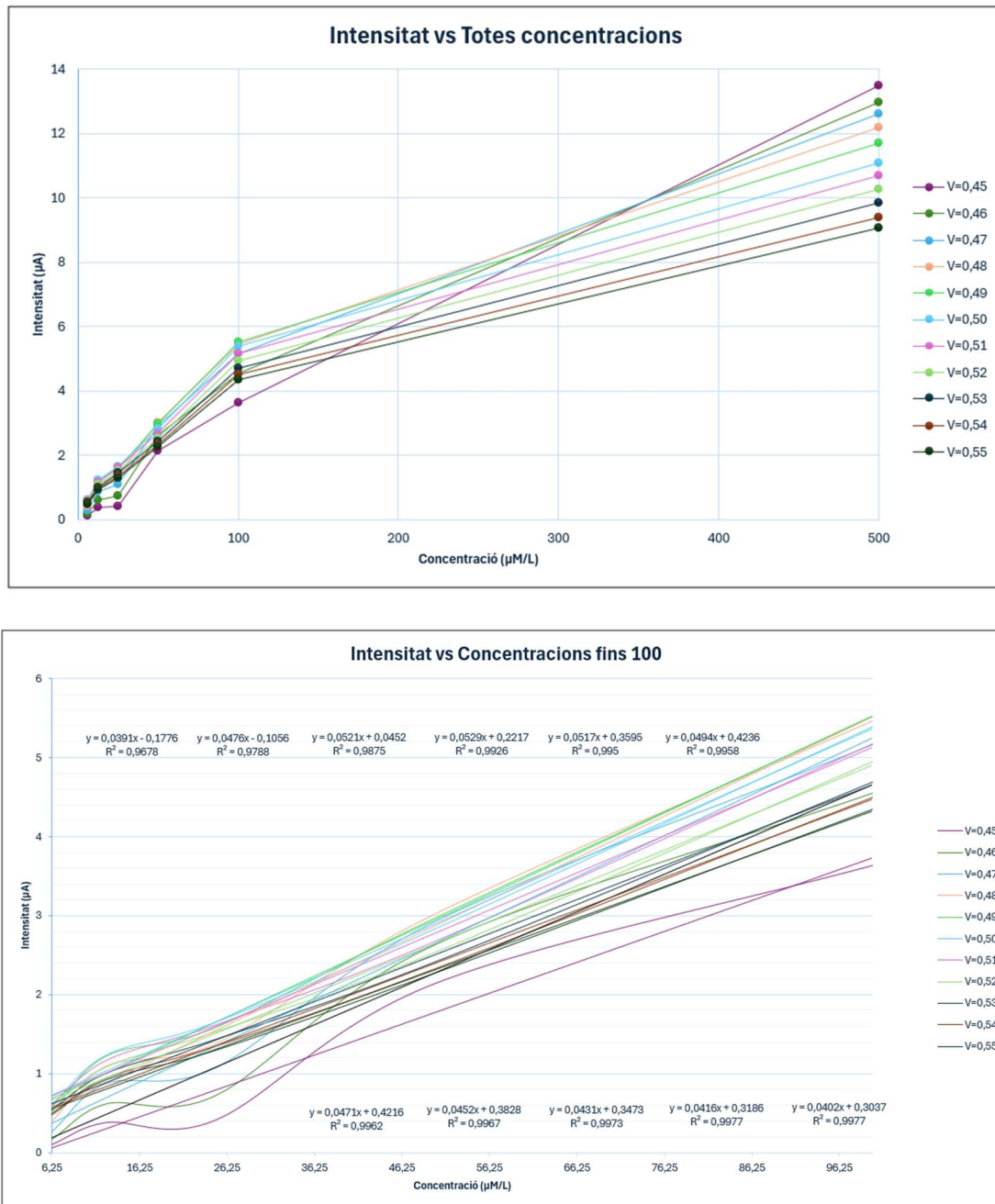


Figura 4. (a) Anàlisi tram entre 6,25 µM/L i 100 µM/L. (b) Corbes de calibració per caracterització.

Centrant-se en el primer tram, es pot veure que la majoria de les corbes presenten inicialment un petit transitori, especialment a concentracions baixes, però a partir de 50 $\mu\text{M/L}$ es comporten de manera força lineal. Aquest transitori pot atribuir-se a fenòmens inicials de difusió o a l'activació progressiva de la superfície de l'elèctrode.

Pel que fa a les equacions, el pendent màxim es dona a 0,48 V, la qual cosa indica que en aquest potencial el sensor presenta la màxima sensibilitat.

No obstant això, el coeficient de correlació R^2 augmenta lleugerament amb el potencial, assolint els valors més pròxims a 1 a 0,54 - 0,55 V, fet que indica una millor linealitat i menor dispersió dels punts respecte a la línia de regressió en aquests valors. Aquest comportament és típic quan el sistema arriba a un règim més controlat per difusió i estable.

De cara al disseny pràctic del sensor, es considera que 0,48 V i 0,5 V són valors molt propers, i atesa la seva alta sensibilitat i bona linealitat, es decideix fixar 0,5 V com a potencial de treball, optimitzant així la resposta del sensor i facilitant el seu ús en aplicacions reals.

6. Disseny de la PCB

Un dels elements clau del projecte és la placa de circuit imprès. Aquesta placa representa un sistema més compacte i portable que el potenciòstat, però també intenta reproduir el comportament electroquímic requerit per a la detecció del BPA. L'objectiu no és substituir l'aparell del laboratori, ja que és molt complex, sinó fer un sensor que sigui capaç de detectar canvis en la concentració de bisfenol A a l'aigua tot indicant uns valors similars als de les corbes que s'obtenen amb EC-Lab.

El procés per dur a terme la placa consta de simulació i adaptació del nou circuit i traçat de les pistes i vies amb el KiCAD 7.0.

6.1. Esquemàtic

Agafant de referència el circuit amb el qual el JSI simulava el seu prototip i la reacció electroquímica, es fan una sèrie d'ajustos.

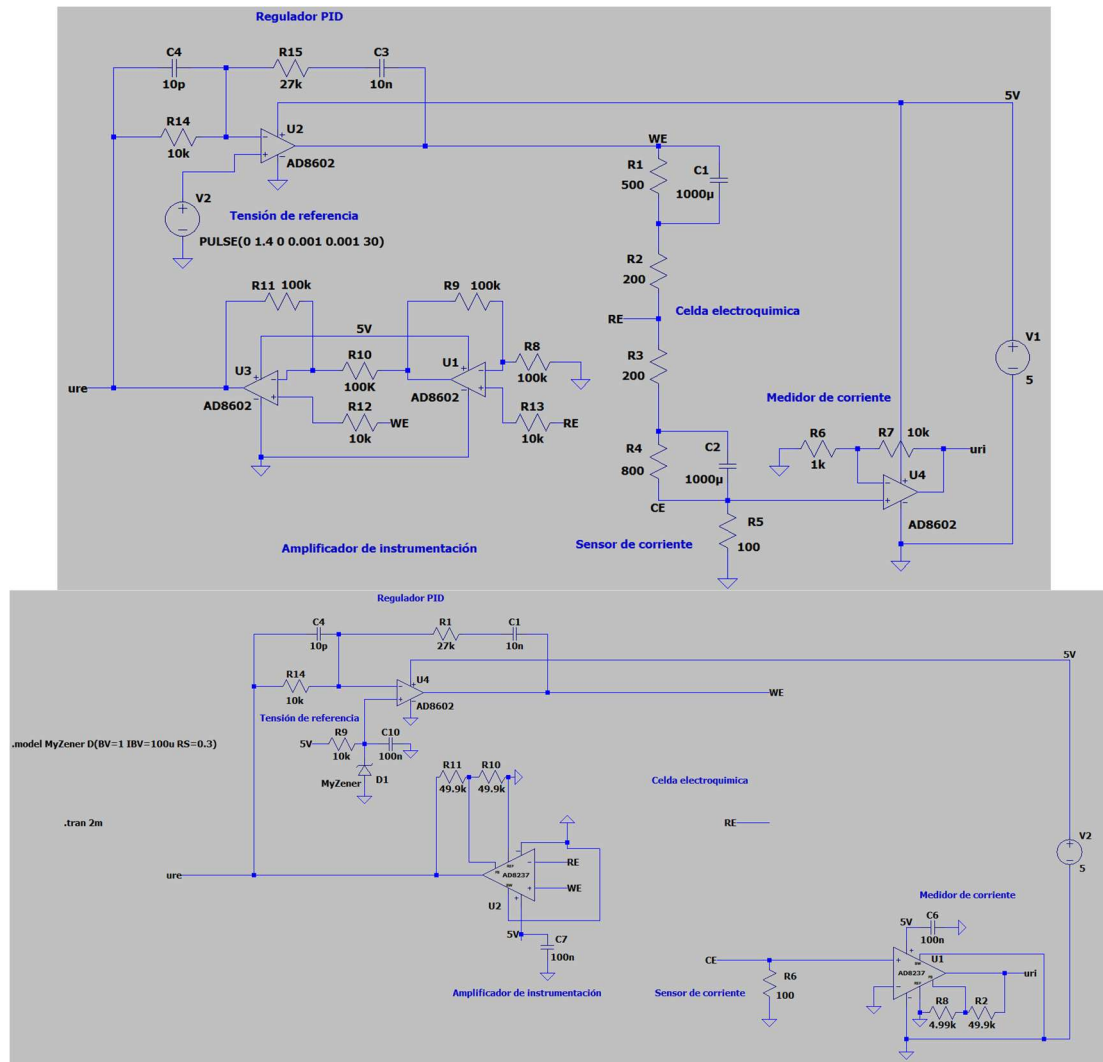


Figura 5. (a) Circuit simulació prototip JSI. (b) Circuit per detectar BPA.

El circuit de la Figura 5a representa un potenciòstat senzill adaptat per detectar BPS i simulant la reacció. Aquesta es representa amb la cel·la electroquímica on, els resistors R1 i R4 simulen la resistència de càrrega en l'elèctrode de treball i el contra elèctrode, els resistors R2 i R3 modelen la resistència del medi electroquímic (electròlit) i els dos condensadors representen la doble capa elèctrica que es forma a la interfície entre cada elèctrode i la solució.

L'amplificador d'instrumentació el que fa és calcular la diferència entre WE i RE i aplicar un guany de 2, el resultat és "ure". El fet d'aplicar aquest guany millora la relació senyal/soroll i permet que si es fa una lectura digital es tingui millor resolució.

Aleshores, s'arriba al regulador PID que és un algoritme de control per mantenir una variable en un valor desitjat minimitzant l'error i ajustant la sortida. Consta de tres parts: proporcional, integral i derivativa. La primera respon a l'error actual i està formada per R14, la segona corregeix l'error acumulat en el temps mitjançant R15 i C3 i, la darrera, anticipa futurs canvis (C4). En aquest cas la variable a controlar és “ure”, que val 1,4 V perquè la tensió de reacció del BPS és 0,7 V aproximadament. De mode que cal posar una referència o valor de consigna per ajustar-lo a 1,4 V. Contínuament es va comparant “ure” amb 1,4 V i s'ajusta la sortida WE perquè la reacció es doni a 0,7 V sabent que RE és una tensió fixada.

La darrera part és el sensor de corrent. Aquest està format per la resistència R5 que és per on passa el corrent que circula per la cel·la. A partir de la tensió en el node CE i sabent que són 100 Ω , per la llei d'Ohm es pot determinar el corrent. El que hi ha més a la dreta és un amplificador per llegir un valor de tensió a “uri” que sigui més gran perquè CE és molt petit tenint en compte que el corrent és de l'ordre dels microamperes. Simplement, multiplica la tensió CE per un guany d'11. Igual que amb l'amplificador anterior, així es redueix el soroll i de cara a llegir el valor de forma digital es té més resolució.

Aleshores, per adaptar aquest circuit al cas del projecte (Figura 5b), primer de tot es canvia la font de tensió d'1,4 V a una d'1 V, ja que és la tensió de 0,5 V determinada aplicant un guany de 2 de l'amplificador. Si se simula es té que:

Test Point	Voltatge (V)
ure	1,000
WE	1,280
RE	0,780
CE	0,071
uri	0,780

Taula 1. Simulació circuit amb font d'1 V.

Es pot comprovar que WE-RE és 0,5 V, “ure” és el doble d'aquesta diferència i “uri” és 11 vegades CE, que en aquest cas no és 0 perquè s'està simulant la reacció.

Havent fet aquest canvi, el que cal modificar és aquesta font per un díode Zener que pugui convertir els 5 V d'entrada en 1 V i els dos amplificadors que ara són AD8602 per uns que siguin AD8237, ja que és recomanable quan es treballa amb corrents petits, és més precís i també més simple.

El díode Zener és un circuit integrat anomenat ADR510. Seguint la configuració típica del full de característiques d'aquest model¹, es posa una resistència Rbias (R9) per on entren els 5 V i aquesta es connecta al díode i a un condensador de desacoblament pel soroll. Aquest condensador sol ser de 100 nF, però la resistència cal ajustar-la per aconseguir la sortida esperada segons el corrent que circula.

¹ Veure annex ADR510 pàgina 1.

Se sap que el corrent mínim de funcionament del díode és de 100 μA , pel que s'afegeix una mica més. Es pren 10 $\text{k}\Omega$, ja que és:

$$R_{bias} = \frac{V_s - V_{out}}{I_L + I_Q} = \frac{5\text{ V} - 1\text{ V}}{300\text{ }\mu\text{A} + 100\text{ }\mu\text{A}} = 10\text{ k}\Omega$$

Es configura en el LTspice XVII el díode amb les característiques de tensió de sortida 1 V, corrent mínim 100 μA i impedància de sortida dinàmica de 0,3 Ω i es torna a simular per comprovar que no afecta el resultat.

L'amplificador d'instrumentació es canvia per un AD8237 ajustant les resistències i capacitats necessàries. En lloc de ser dos amplificadors en cascada com abans, ara amb un sol ja s'aconsegueix el mateix resultat. Es calcula la diferència entre els dos elèctrodes i en ser un amplificador no inversor, per mantenir el guany de 2 cal ajustar les resistències segons la fórmula següent:

$$G = 1 + \frac{R_{11}}{R_{10}}$$

De mode que les dues resistències han de ser iguals. Segons el full de característiques, per aquest guany es recomana que siguin de 49,9 $\text{k}\Omega$. Igual que abans, es posa un condensador de desacoblament pel soroll. La connexió s'ha fet seguint l'esquema del *datasheet*.²

A l'altre amplificador referent al sensor de corrent, se segueix un procediment similar a l'anterior, les dues diferències són les entrades i el guany. Aquí es calcula la diferència de tensió entre CE i terra i es multiplica per 11. Deixant una resistència a 49,9 $\text{k}\Omega$, s'ajusta l'altra a 4,99 $\text{k}\Omega$ per aconseguir el guany segons la fórmula anterior.

Si es torna a simular el circuit amb aquests nous canvis, els resultats són prou similars:

Test Point	Voltatge (V)
ure	1,040
WE	1,330
RE	0,810
CE	0,074
uri	0,810

Taula 2. Simulació circuit amb canvis.

Feta la simulació, es treuen els components de la cel·la electroquímica perquè ara es vol fer el sensor real, no una simulació, de mode que aquells components no s'han de posar, ja que representen la reacció i seria com duplicar-la.

² Veure annex AD8237 pàgina 23.

Com es comprova que els resultats amb el LTspice són similars havent fet els canvis, es procedeix a iniciar el projecte amb el KiCAD, començant per l'esquemàtic:

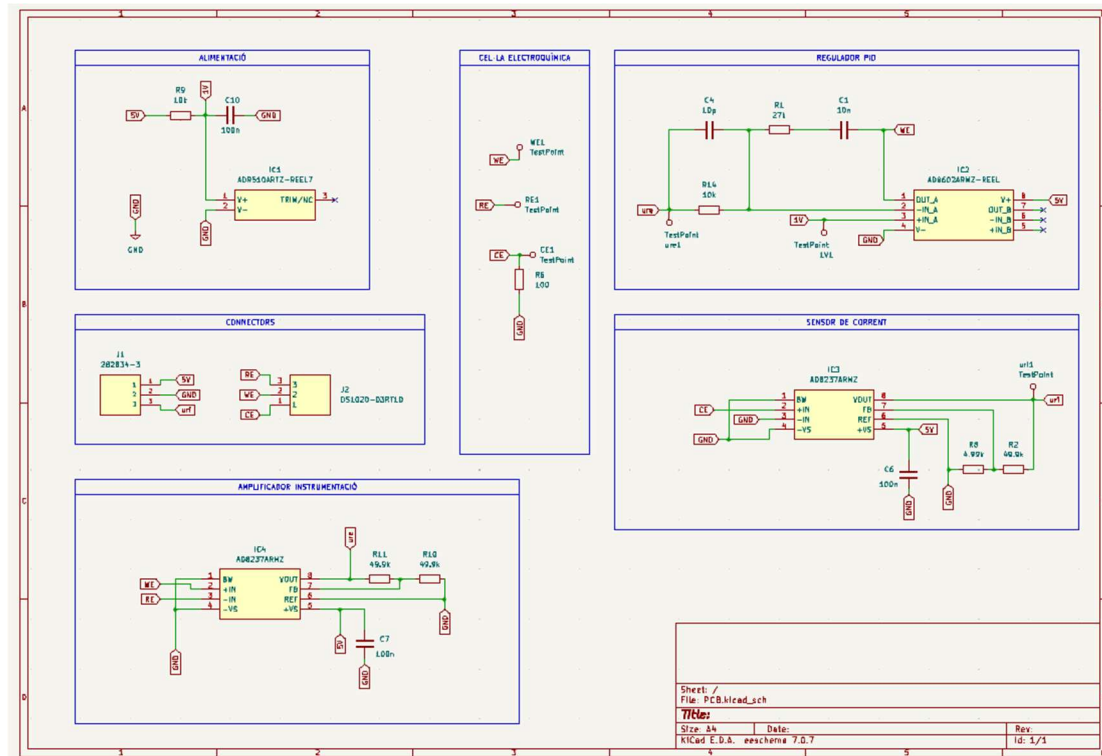


Figura 6. Esquemàtic de la PCB.

Per fer-ho més entenedor, en lloc de posar el mateix circuit que en el programa de simulació, es fan diferents grups segons les parts del circuit que s'han comentat. De cara a interconnectar-los es fan servir etiquetes globals que permeten establir una connexió entre components sense necessitat d'un cable.

A la part superior esquerra hi ha l'alimentació del circuit. Els 5 V provinents del node IoT, d'una banda, alimenten els amplificadors operacionals AD8237 i AD8602 i, per l'altra, es converteixen en 1 V amb el díode. Es pot observar que aquest té tres pins que són els terminals positiu i negatiu i un tercer que, segons el *datasheet*, no cal connectar.

Just a sota hi ha els connectors. Aquesta part no s'ha comentat anteriorment, ja que no afecta el circuit com a tal, sinó a la connexió de la PCB amb l'exterior. El connector de l'esquerra és simplement per poder vincular la placa amb el node amb uns cables, de forma que permet passar de les pistes de la placa als cables. Amb tres entrades és suficient perquè hi ha d'haver els dos terminals d'entrada i la tensió que es vol llegir, "uri". El de la dreta és el connector per posar la mostra SPE-C per poder fer la reacció. Ja es posen els pins en ordre segons la distribució de la cel·la: RE, WE i CE.

Continuant baixant, hi ha l'amplificador d'instrumentació amb el guany de 2. Aquí es veu millor els pins que té i com estan distribuïts realment. El BW fa referència al mode d'amplada de polsos i es pot connectar tant al terminal +VS com al -VS d'alimentació. En aquest cas s'ha connectat al segon perquè no cal una resposta molt ràpida, es vol poc soroll i més precisió. FB és el *feedback input*, que és un pic de retroalimentació que es pot utilitzar per aplicar guany, filtratge, compensació... En aquest cas, juntament amb el pin REF, s'ha fet servir per establir el guany. REF és el pin on es connecta la tensió que es vol tenir en cas que la diferència entre +IN i -IN sigui zero, és a dir, per fixar un *offset* en cas necessari.³

En el quadre del mig, hi ha el connector de la cel·la. Només hi ha les etiquetes perquè és la connexió directa amb la mostra. A cada un hi ha un *test point* de cara a poder mesurar amb un multímetre la tensió i fer comprovacions. En el CE hi apareix R6 com al component que permet mesurar el corrent.

A la dreta hi ha el regulador PID. La part de resistors i capacitats no canvia. En aquest cas, la distribució dels pins de l'amplificador canvia una mica respecte al d'instrumentació. Només inclou els pins d'alimentació, entrada i sortida, però té dos canals o possibles connexions per si es vol fer servir un segon amplificador amb la mateixa alimentació. Es posen punts de testatge a 1 V i "ure" per tenir més punts a comprovar i poder comparar valors amb les simulacions.

Finalment, a sota hi ha el sensor de corrent, que aquest sí que és com l'amplificador d'instrumentació. Té la mateixa alimentació, el mode BW també és baix, l'entrada prové de CE, el guany ajustat a 11 seguint la mateixa configuració entre FB i REF i, a la sortida "uri" per poder mesurar-la.

Amb tot això, es pot traçar el *layout* ja pensant en com quedarà realment.

6.2. Distribució dels components en la PCB

Amb tots els components necessaris en l'esquemàtic, primer cal assignar un *footprint* a cadascun d'ells. Es tracta d'escollir entre si es vol que els components estiguin soldats sobre la superfície o travessant la placa i també les dimensions que cal reservar per fixar-los.

Decidit això, es poden distribuir les petjades segons convingui. Per tenir una àrea de referència es marquen els límits reals de la placa, que s'intenta que sigui la més petita possible i així ja se sap de l'espai que es disposa.

En la Figura 7 es pot veure com queda:

³ Veure annex AD8237 pàgina 8.

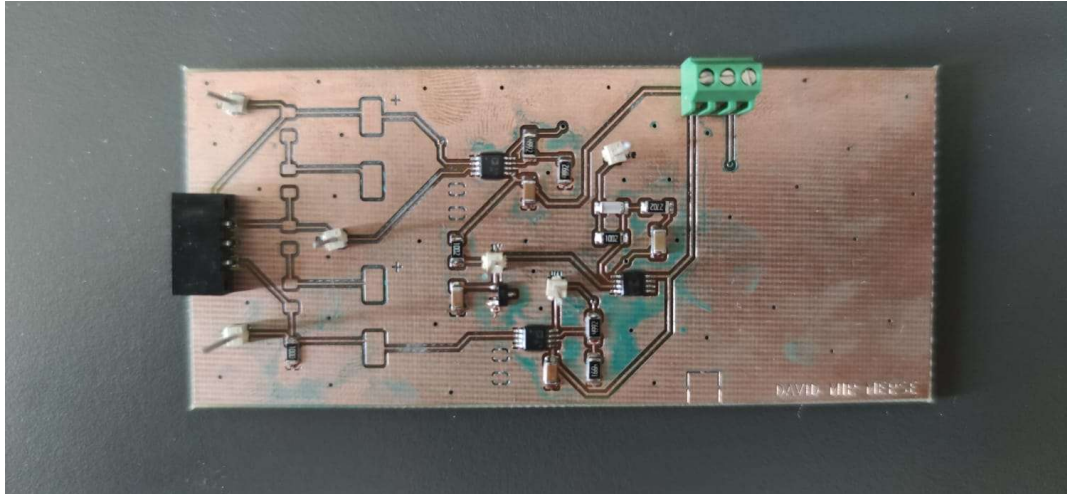


Figura 7. Muntatge final de la PCB.

Les dimensions són de 86x45 mm. A l'esquerra del tot hi ha el connector de la mostra DRP-150 per tal que quedi cap a fora de la placa i es pugui col·locar verticalment. Just al voltant, hi ha tres *test points* que són els de cada pin de la cel·la i R6 per mesurar el corrent d'aquesta. Aleshores, més a la dreta ja es troba el circuit.

A la part superior hi ha el circuit integrat de l'amplificador d'instrumentació amb les dues resistències R10 i R11 i el condensador C7 amb la sortida "ure" per mesurar. Baixant, primer hi ha l'integrat del díode Zener amb l'R9 i C10 segons l'esquema i, després, l'amplificador del sensor de corrent amb R2, R8 i C6.

Ja a la dreta de tot hi ha el regulador PID amb R1, R14, C1 i C4 i, el connector verd que és per connectar els cables d'alimentació i lectura.

D'entrada s'ha fixat la posició dels connectors i s'ha deixat un espai lliure a la dreta per poder subjectar la placa amb les mans en cas necessari. A partir d'aquí, els components s'han anat col·locant de forma que hi hagués els menors encreuaments possibles entre les connexions.

Per poder traçar les pistes o connexions, primer cal assignar xarxes perquè el programa sàpiga quantes connexions cal fer i ja indiqui automàticament que cal connectar amb què. Actualitzant la placa des de l'esquemàtic, el sistema ja estableix unes xarxes, però se li pot canviar el nom o modificar segons conveniència. Alguns dels noms utilitzats són: 5 V, 1 V, ure, uri, WE, RE, CE... Per facilitar la identificació.

Tenint l'entramat de connexions, s'ajusten els components de manera que quedin les rutes el més curt possible. En principi tot això es fa a la cara TOP de la placa, però en cas necessari es fa servir la BOTTOM.

Les pistes es tracen de mode que no hi hagi angles de 90° en el camí i tinguin una amplada o gruix adequat pel corrent que hi circula. Així, les que són de la xarxa de 5 V es fan amb una amplada de 0,4 mm, ja que és la part de potència. La resta, que és més de control, amb 0,3 mm ja és suficient.

Com hi ha tants *pads* o nodes a la xarxa GND, per evitar traçar moltes pistes, es marca un pla de massa a les dues cares de la placa de forma que només calgui assegurar que els nodes d'aquesta xarxa estenguin ben connectats a través del pla. Això evita moltes pistes pel mig.

No obstant això, que es pugui fer tot només en una cara és difícil, per tant, es traça alguna pista a la cara inferior quan ja no hi ha manera de fer-ho en la superior. Per unir les dues cares es fa ús de les vies de 0,8 mm de diàmetre, que no deixen de ser forats a la placa. Com es pot observar en la Figura 7, n'hi ha moltes, però només 5 serveixen per a les pistes. La resta de vies és per assegurar una bona connexió del pla de massa entre les dues cares i, estan disposades de forma irregular sense cap uniformitat perquè així s'eviten problemes d'interferències entre les cares.

Fetes les connexions es verifiquen les regles de disseny i es tenen en compte alguns detalls de cara a la fabricació. Com a l'hora de fabricar no es marcaran els noms de cada component ni dels punts de mesura, al costat d'aquests punts es posa el nom per saber quin és cadascun una vegada fabricada. A més, si es vol mesurar amb un oscil·loscopi, s'afegeix un *pad* a baix a la dreta que serveix per enganxar el connector cocodril.

S'intenta que tot quedi el més compacte i que els condensadors de desacoblament quedin ben a prop dels integrats. Amb el visor 3D s'observa quin seria el resultat final.

Just abans de generar els fitxers Gerber s'assegura que la *clearance* mínima és de 0,2 mm, l'amplada de les pistes és l'adequada, els orificis són de 0,6 o 0,8 mm, el pla de massa té una *clearance* de 0,4 mm i la placa està identificada. Llavors ja es generen els fitxers Gerber de les capes superior, inferior i talls de vora i s'envia a fabricar.

7. Integració prototip en node IoT

Fabricada la placa de circuit imprès, se solden els components segons el disseny i llavors ja es passa a estudiar el node IoT.

7.1. Node IoT

Com ja s'ha comentat, aquest dispositiu s'encarrega d'alimentar el circuit amb 5 V i de llegir la tensió "uri" cada cert temps per poder descarregar els valors des d'una aplicació. Per escollir el node, es contacta amb WS per veure quin dels disponibles s'ajusta millor. Les característiques principals que es contemplen són que pugui subministrar 5 V i un corrent de fins a 1 mA i que pugui llegir valors en volts amb bona resolució de forma analògica.

D'entre els possibles nodes, s'escull el model LS-G6-ANALOG-4⁴. Aquest node és un dispositiu sense fil de quatre canals, de baixa potència i llarg abast, compatible amb la majoria d'entrades analògiques, com ara voltatge, corrents d'entre 4 i 20 mA, potenciómetres, ponts de *Wheatstone* i sensors de temperatura. També es pot utilitzar per a monitoratge manual, i es configura i connecta amb un cable USB i un telèfon Android. Les principals aplicacions són: obra civil, túnels, esllavissades, mineria i altres entorns industrials.

Pel que fa a especificacions tècniques, el temps de mostreig es pot ajustar entre els 30 segons i 24 hores, cada canal pot donar 5 V / 12 V / 24 V i fins a 60 mA, el temps d'escalfament es pot seleccionar fins a 65 segons, es configura amb l'aplicació de WS i té una memòria de 4 MB per emmagatzemar fins a 130.000 lectures. En cas de superar aquest límit de lectures, les dades se sobreescrueixen. A part de les dades de mesura, també informació d'estat sobre la bateria, la temperatura interna i el temps de funcionament.

La tria del model es justifica pel seu equilibri entre compatibilitat amb el circuit dissenyat, capacitat de lectura analògica precisa i facilitat de connexió amb dispositius mòbils.

Per la part mecànica, com es pot veure a la Figura 9a, el node és una caixa d'aliatge d'alumini amb un connector RP N femella a la part superior per connectar l'antena en cas necessari, un connector IP68 femella a la dreta amb una tapa blava, una vàlvula gore just a sota del connector i quatre premsaestopes per passar els cables dels sensors. Les dimensions són de 145x220x61 mm, opera entre -40°C i 80°C i té una massa d'1,1 kg amb les piles.

La carcassa robusta i la protecció IP68 fan que el dispositiu sigui adequat tant per a condicions de laboratori com per a entorns exteriors, on pugui estar exposat a humitat o pols.

A l'interior es pot observar, a l'esquerra, la bateria formada per quatre piles del tipus Li-SOCl₂ amb una tensió de 3,6 V. El node es pot alimentar amb una font externa o amb les piles. En funció del nombre i tipus d'interfície dels sensors, el temps d'escalfament i la freqüència de mostreig, la durada de la bateria pot variar entre pocs mesos i més de 10 anys. Quan es decideix quin tipus d'alimentació es fa servir, just a la part entre les piles i els canals hi ha un interruptor que permet seleccionar el mode.

A la part de la dreta, hi ha els quatre canals. El de més a l'esquerra conté 11 pins, que són els terminals positiu i negatiu de lectura, les alimentacions de 5 V i 12/24 V, la massa GND, el terminal CE1N, el CEIP, el de corrent 4-20 mA i, a més, tres pins extra per a aplicacions personalitzades. En els altres canals només hi ha els vuit primers pins.

⁴ Veure annex LS-G6-ANALOG-4 pàgina 3.

Segons el tipus de sensor que es connecta, es fan servir uns pins o uns altres segons l'esquema del manual del node.⁵

7.2. Connexió entre PCB i node

Vistes les característiques del node i les diferents parts, cal determinar com connectar la PCB al node perquè funcioni com a sensor.

Tal com s'ha comentat anteriorment, interessa llegir la tensió en el punt de mesura anomenat "uri", que correspon a la tensió CE amplificada. Això implica l'ús de l'entrada de tipus voltatge. Aquesta entrada admet un rang de mesura entre -10 V i +10 V amb una precisió de $\pm 0,05\%$, o inclús de $\pm 0,02\%$ si es treballa dins el rang reduït de -2 V a +2 V.

El node permet dos tipus de lectura de voltatge:

- Entrada d'un sol extrem: mesura la tensió entre un cable de senyal i la referència de terra (GND). És més senzilla, però menys resistent al soroll elèctric.
- Entrada diferencial: mesura la diferència entre dos cables (CH+ i CH-) sense referència directa a terra. És més robusta davant el soroll, però requereix una connexió més complexa.

En aquest projecte s'utilitza l'entrada d'un sol extrem, ja que es vol llegir la diferència entre "uri" i GND. Segons el full de característiques del node, cal fer la següent connexió:

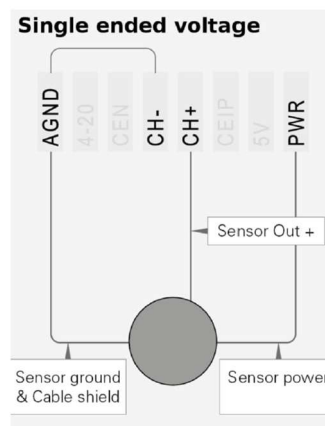


Figura 8. Connexió sensor amb node.

El cable provinent del punt "uri" es connecta al terminal CH+. El GND de la PCB s'ha de connectar tant al terminal AGND com a CH-, per la qual cosa cal fer un pont entre aquests dos pins. L'alimentació del sensor (5 V) s'ha de connectar al pin 5 V del node, i s'ha de configurar adequadament a l'aplicació.

⁵ Veure annex LS-G6-ANALOG-4 pàgina 12.

A la Figura 9b es mostra la connexió entre el sensor i la PCB, així com el cable per a la connexió amb el mòbil. A la PCB es van habilitar tres terminals per facilitar la connexió: 5 V, GND i “uri”. Per facilitar la identificació, s'utilitza el cable blau per l'alimentació positiva (5 V), el taronja pel terra (GND) i el groc per la tensió de lectura (“uri”).

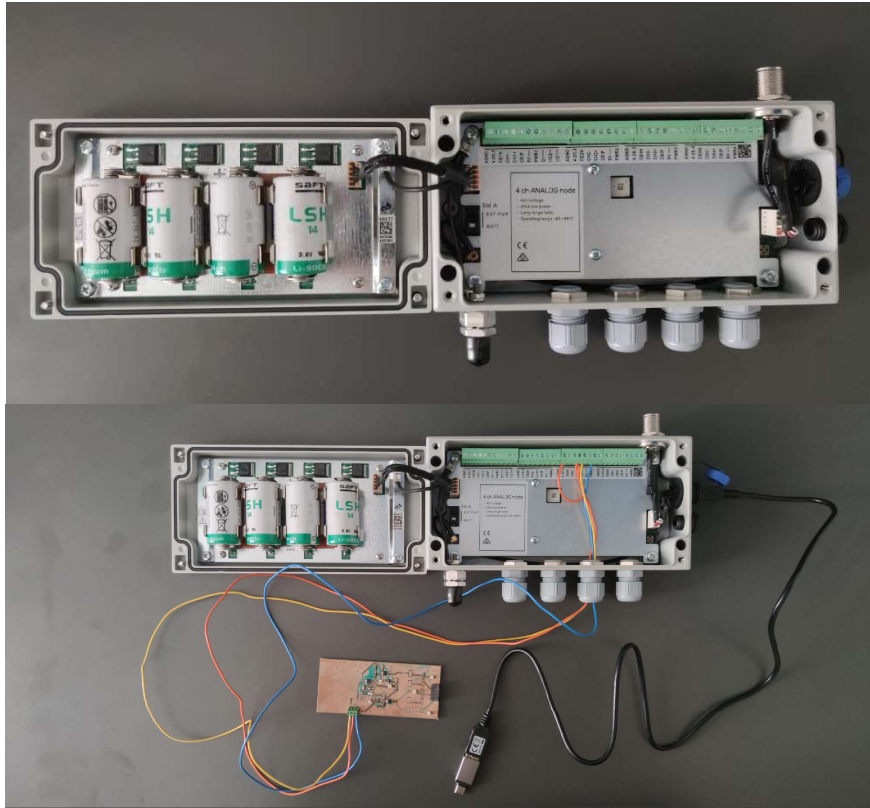


Figura 9. (a) Node IoT. (b) Connexió node-PCB-mòbil.

S'ha escollit el canal 3 per fer la connexió, tot i que és indiferent i s'ha triat per qüestions pràctiques (centralitat i facilitat de fixació dels cables). Un cop fets els ponts i connexions segons l'esquema de la Figura 8, només cal establir la connexió amb el mòbil i procedir a la configuració del node.

7.3. Aplicació WS

Per configurar el node, cal fer servir l'aplicació de Worldsensing, compatible amb dispositius Android amb connexió USB On-The-Go (OTG). L'aplicació s'inicia automàticament quan el mòbil es connecta al node mitjançant el cable adequat, sense necessitat d'executar-la manualment.⁶

⁶ Veure annex WS App pàgina 9.

El cable, visible a la Figura 9b, té un extrem amb un connector mini USB B mascle que es connecta al node, i l'altre extrem és USB A. Tanmateix, com que la majoria dels mòbils actuals tenen un port USB tipus C, cal utilitzar un adaptador d'USB A a USB C.

Si la connexió és correcta, el node té les piles ben posades i l'interruptor està en mode bateria, el telèfon detecta automàticament el node i obre l'aplicació prèviament instal·lada.

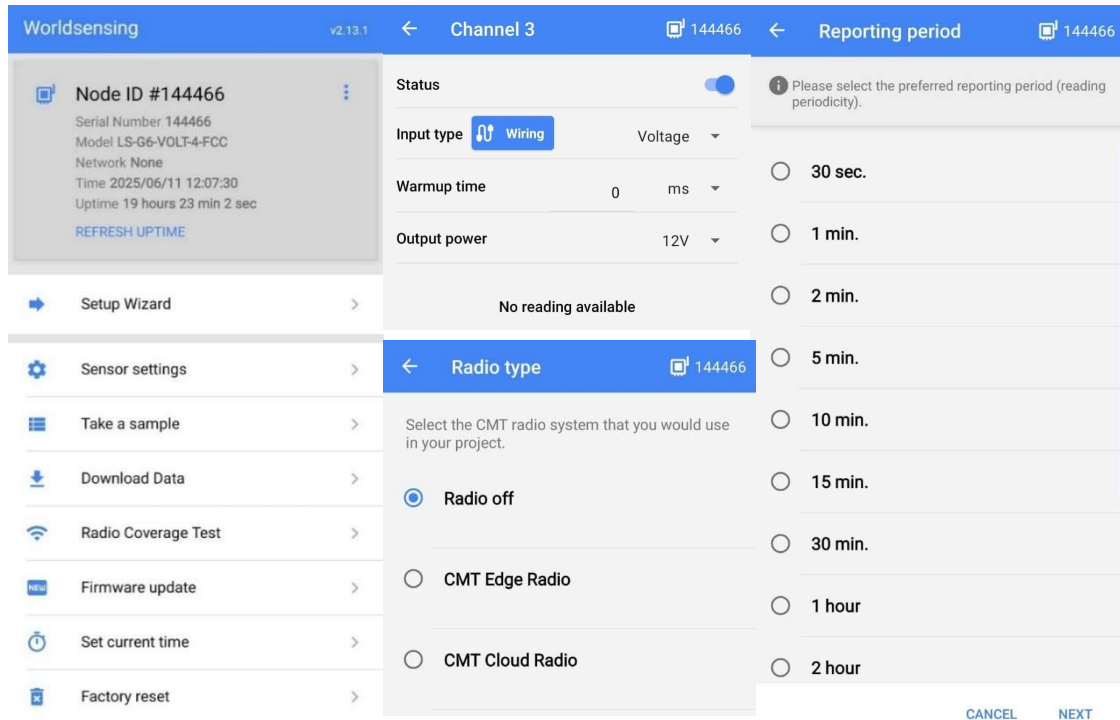


Figura 10. (a) Menú principal app. (b) Configuració sensor. (c) Tipus de ràdio. (d) Temps de mostreig.

En iniciar-se, l'aplicació comprova que la data i hora del node coincideixin amb les del mòbil. En cas contrari, apareix un missatge per actualitzar-les. També es mostra un avís si hi ha una nova versió del *firmware* disponible, per tal d'incorporar millores i correccions d'errors.

El menú principal es mostra a la Figura 10a. A la part superior s'hi pot consultar informació específica del node, com el número de sèrie, l'ID i el model. Si es prem sobre els tres punts de la dreta, apareix informació addicional.

La secció de *Setup Wizard* permet fer tota la configuració del node. Els passos habituals són: afegir la localització (si es permet l'accés a la ubicació del mòbil), configurar el sensor, prendre una lectura, escollir el tipus de ràdio i seleccionar la freqüència de mostreig.

Si no es vol assignar la localització, es pot ometre aquest pas i passar directament a la configuració del sensor (Figura 10b). Allà es poden ajustar els canals de manera individual: primer s'activa el canal, després es consulta l'esquema de connexió i es defineix el tipus d'entrada.

El *warmup time* és el temps necessari perquè el sensor arribi a unes condicions estables després d'engegar-se, cosa que millora la precisió i fiabilitat de les lectures. En aquest cas, s'ha establert un valor de 5 segons després de cada lectura.

A la part inferior d'aquesta secció es configura l'alimentació. Tot i que el sensor funciona amb 5 V, al desplegable només hi ha les opcions de 0, 12 i 24 V, per tant, cal seleccionar 12 o 24 V per tal que s'activi aquest pin.

Un cop completada la configuració, es pot fer una lectura d'exemple o passar a escollir el tipus de ràdio (Figura 10c). Aquesta opció només és rellevant si es vol fer servir el protocol LoRa per enviar les dades. Si no s'utilitza LoRa, el node pot treballar de manera autònoma, prenent i guardant les dades localment. En aquest cas, per descarregar-les caldrà connectar el node al mòbil.

A la Figura 10d es mostren les opcions de temps de mostreig, que defineixen cada quant el node prendrà lectures. Aquesta configuració és comuna a tots els canals. Durant les proves finals s'ha seleccionat un interval de 30 segons. Si la configuració s'ha completat correctament, apareix un missatge de confirmació.

A més, des del menú inicial també es pot accedir directament a la configuració del sensor (Figura 10b), sense passar per la localització. Aquesta via és més ràpida si no cal indicar ubicació.

La icona de prendre una mostra permet llegir tots els sensors alhora i mostrar-ne els valors. Si es volen més lectures, es poden demanar successivament.

L'opció Radio Coverage Test només té sentit si s'ha seleccionat una ràdio. Aquesta prova permet comprovar la cobertura entre el node i la porta d'enllaç. Inclou una prova d'enllaç (per valorar el rendiment de transmissió) i dues proves de cobertura, una en línia i una altra fora de línia, segons si el mòbil té accés a Internet o no. En ambdós casos, el node envia 10 missatges als factors de dispersió 7, 8 i 9, i 5 missatges més als factors 10, 11 i 12.

La secció d'actualització del *firmware* i la de sincronització de data i hora també es poden accedir manualment si no es van completar correctament en el moment de connexió inicial.

Finalment, l'opció de restabliment de fàbrica esborra totes les dades guardades al node i retorna la configuració per defecte, inclús l'ID.

Aplicació de node IoT pel control de qualitat de l'aigua Memòria Descriptiva

Tot això és respecte a la configuració del node, però per descarregar les dades, que seria la secció restant, es mostra la interfície de la Figura 11a.

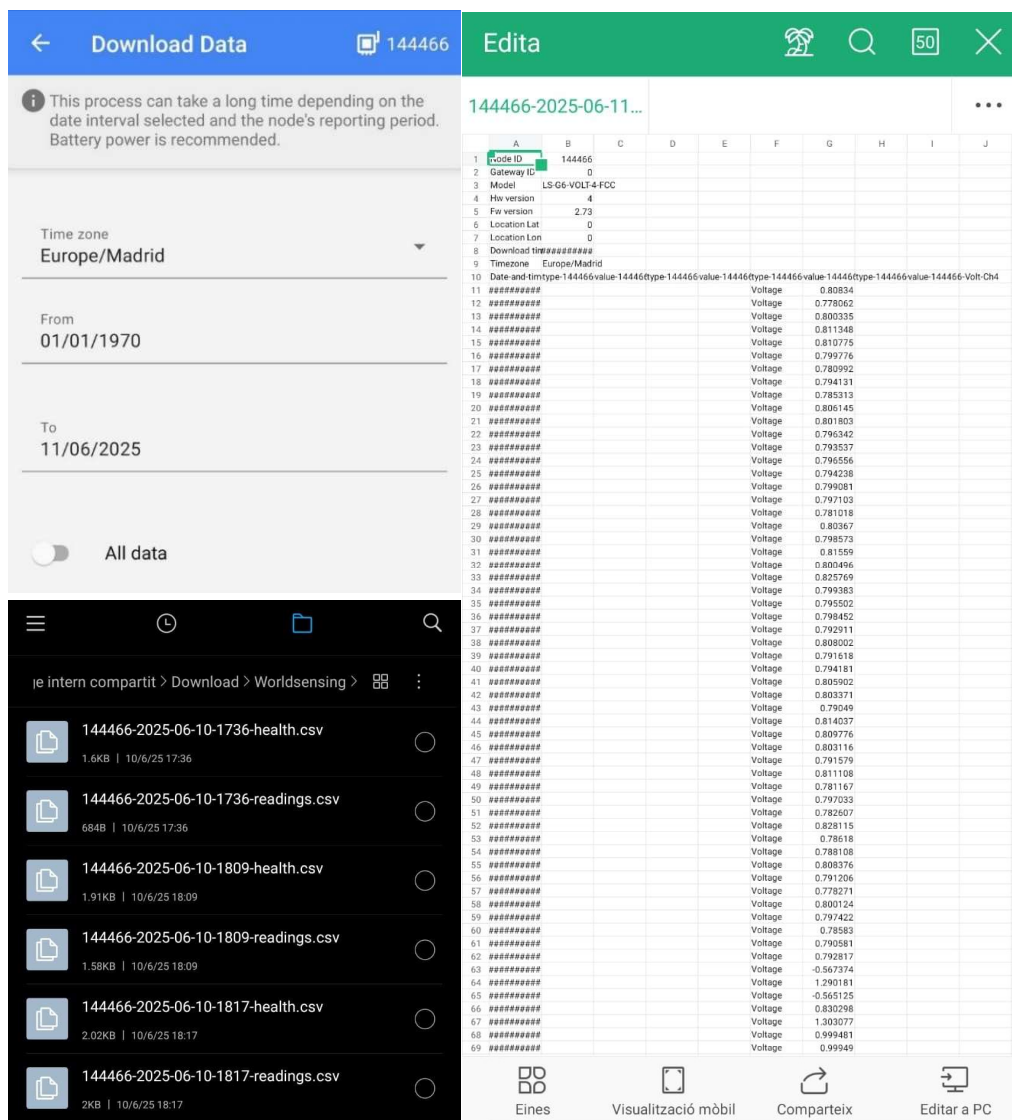


Figura 11. (a) Configuració descàrrega. (b) Carpetes. (c) Fitxers csv amb lectures.

Es pot escollir entre descarregar totes les dades guardades (lectures i fitxers d'estat) o només les d'un període concret. Si s'escull "totes les dades", el procés pot trigar més segons la quantitat de dades acumulades.

Quan la descàrrega finalitza correctament, s'indica amb una notificació i es mostra la carpeta on s'han guardat les dades. A la Figura 11b es poden veure algunes de les carpetes generades, habitualment localitzades a: emmagatzematge intern > descàrregues > Worldsensing.

Els fitxers descarregats són en format .csv i el seu nom inclou l'ID-any-mes-dia-hora-estat/lectures. A la Figura 11c es pot veure un exemple de fitxer de lectures: a la capçalera hi ha informació del node i, a continuació, les lectures s'organitzen en columnes amb l'hora i els valors corresponents.

8. Validació del sistema

L'objectiu d'aquesta secció és validar la resposta del sistema desenvolupat (node amb PCB) comparant-la amb la d'un potenciòstat comercial mitjançant mesures de cronoamperometria, amb l'addició controlada de BPA.

8.1. Cronoamperometria

Igual que es va fer al principi per a la caracterització, ara es torna a preparar una solució de PBS per fer alguna prova més. Es posen dues pastilles de PBS en un vas amb 400 mL d'aigua destil·lada i es dissolen amb un agitador magnètic.

Es prepara una solució concentrada de BPA dissolent 33 mg en 100 mL de PBS per tenir una concentració d'1,5 mM o 1500 $\mu\text{M/L}$. La idea és tenir un vas amb 200 mL de PBS o aigua de l'aixeta i amb una xeringa afegir quantitats controlades de la solució de BPA.

Abans, però, cal fer les connexions i configurar l'experiment en qüestió. D'una banda, se subjecta la placa PCB amb la mostra DRP-150 tal com es veu en la Figura 12a i es connecta, com ja s'ha comentat, al node IoT amb els tres cables. A aquest dispositiu se li connecta el cable amb l'adaptador per connectar el mòbil, configurar-lo i descarregar les dades. La configuració es fa segons el procediment de l'apartat anterior.

D'altra banda, a la imatge de l'esquerra també es pot veure l'altra mostra que és la que va connectada al potenciòstat com ja es va fer en els experiments inicials. A la Figura 12b es pot veure una imatge completa de les connexions referents als dos mètodes.

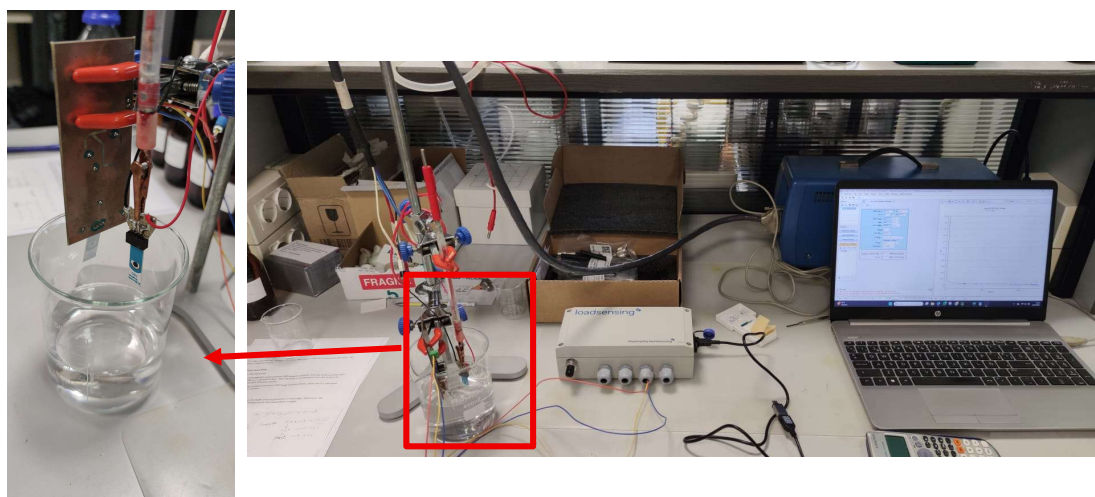


Figura 12. (a) PCB amb DRP-150 i mostra potenciòstat. (b) Muntatge complet.

Així com inicialment es va fer voltamperometria cíclica per a la caracterització, ja que es volia determinar la tensió adequada per a la reacció redox del BPA, ara es fa un altre tipus d'experiment anomenat cronoamperometria. Aquest consisteix a fixar una tensió i veure com evoluciona el corrent que circula pels elèctrodes al llarg del temps.

De cara a configurar-lo amb el programa EC-Lab, en un menú similar al de la Figura 2 es fixa una tensió de 0,5 V en l'elèctrode de treball respecte al de referència i es programa un temps llarg de 2h per deixar que s'estabilitzi el corrent i poder anar injectant quantitats de BPA cada cert temps. Tot i ser un període llarg, es pot parar en qualsevol moment. A més, s'indica que prengui mesures cada segon de cara a tenir una bona resolució a les gràfiques. Cal destacar que mentre el potenciòstat permet un mostreig cada segon, el node IoT limita la freqüència a una lectura cada 30 segons, fet que pot influir en la detecció de pics ràpids.

Es fan tres experiments, el primer amb la solució de PBS i els altres dos amb aigua directament de l'aixeta per veure les diferències i analitzar unes condicions més realistes. En finalitzar cadascun es canvien les mostres dels elèctrodes per no afectar els resultats.

En el primer experiment es posa en un vas 200 mL de PBS i llavors s'inicia l'experiment per estabilitzar el corrent. Com es pot veure a la Figura 13, la corba blava de corrent, que és la del potenciòstat, va disminuint fins a pràcticament ser una línia recta. Al cap d'uns 23 minuts des de l'inici s'afegeix 1 mL de BPA. Per saber la concentració resultant es calcula amb la següent proporció:

$$C = \frac{\text{Concentració BPA} \cdot \text{Volum afegit}}{\text{Volum total vas}} = \frac{1500 \frac{\mu\text{M}}{\text{L}} \cdot 0,001 \text{ L}}{0,2 \text{ L} + 0,001 \text{ L}} = 7,46 \frac{\mu\text{M}}{\text{L}}$$

Pocs instants més tard d'afegir aquest volum de la solució de BPA s'observa un pic de corrent, de forma que es deixa que s'escampi fins que es torni a estabilitzar. Cinc minuts més tard es posen 2 mL més. Ara el pic és una mica més alt perquè hi ha més concentració (22,16 $\mu\text{M/L}$) i es parteix d'un corrent superior a abans. Tanmateix, és petit. Aleshores seguint una escala logarítmica es posen 5 mL més que resulten en 57,7 $\mu\text{M/L}$. Aquest pic ja és més notori que els anteriors, destaca molt més. Com és més alt, es deixa més temps perquè el corrent baixi i torni a estabilitzar-se. Ara s'afegeixen 10 mL (123,85 $\mu\text{M/L}$), però amb el potenciòstat no s'observa cap pic. I amb 20 mL (239,5 $\mu\text{M/L}$) més al cap de pocs minuts tampoc es nota cap canvi brusc de corrent, quan hauria de ser cada vegada més elevat.

Arribats aquí, es finalitza l'experiment i es canvien les mostres, ja que potser, degut a la reacció, han format una capa que impedeix que el corrent circuli com al principi. És moment de posar-ne de noves i fer una segona prova. Aquesta vegada es fa amb 200 mL d'aigua de l'aixeta. Amb el PBS es facilita la reacció i en principi són unes condicions ideals, però al cap i a la fi, el sensor està pensat per control els nivells de BPA en aigües d'un llac o estany, de forma que cal intentar aproximar-se al tipus d'aigua.

Amb la mateixa configuració, s'inicia la prova i en uns 8 minuts es posen 5 mL (36,6 $\mu\text{M/L}$). El pic és molt més elevat que en el primer cas com es veu a la Figura 14. S'espera 10 minuts més i ara es posen 10 mL (104,65 $\mu\text{M/L}$), però tampoc es veu cap pic, similar al cas anterior.

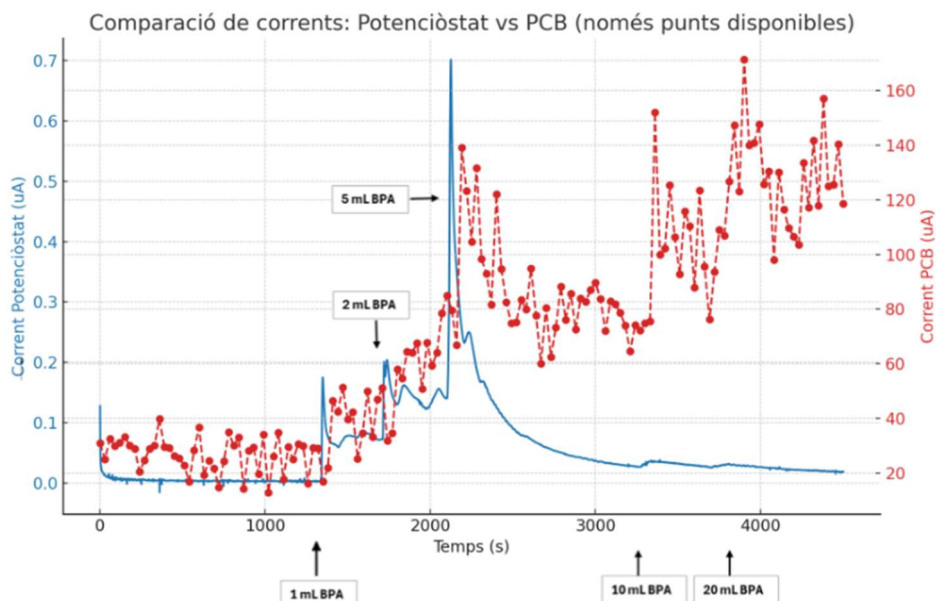
Es tornen a canviar les mostres i, també amb aigua de l'aixeta, es fa la darrera prova. Com en les anteriors, es deixa establir el corrent i en uns 8 minuts es posen 5 mL de BPA (36,6 $\mu\text{M/L}$). Ara el pic és més petit que en els altres casos (Figura 15). Sense deixar passar gaire temps, es posen 5 mL més (71,43 $\mu\text{M/L}$) i es torna a veure un pic similar. Com no sembla que augmenti gaire, es finalitza l'experiment.

Un cop finalitzats els experiments, es procedeix a analitzar les dades registrades pel node i pel potenciòstat per tal de comparar-ne la resposta i determinar la sensibilitat i precisió del sistema desenvolupat.

8.2. Comparativa dels resultats

Des de l'aplicació es descarreguen totes les dades enregistrades pel node IoT. Coneixent l'hora d'inici i de fi de cada experiment, s'analitzen per separat. Les dades es tracten en un full excel, on es registren en tres columnes: el temps (en segons), els valors de tensió del node i els valors de corrent del potenciòstat. Per poder comparar-les, els valors de tensió es converteixen a corrent dividint pel factor 1100 (guany d'11 i resistència de 100 Ω) i es treballa en microampers. Com les dades del node són cada 30 segons, cal ajustar-les a l'escala del potenciòstat perquè coincideixin ambdues lectures.

A la Figura 13 es mostren les corbes del primer experiment realitzat. A l'esquerra els valors reals del node (vermell) i de l'aparell del laboratori (blau) i a la dreta, els mateixos valors, però amb un desfasament de 60 segons per ajustar millor les dues gràfiques i que els pics coincideixin.



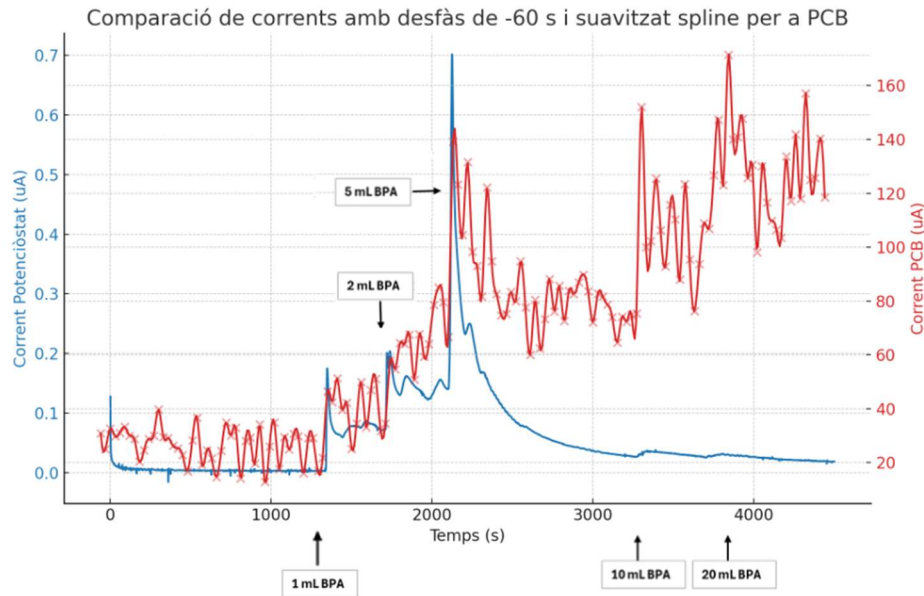


Figura 13. (a) Corbes reals experiment 1. (b) Corbes desfasades experiment 1.

A la Figura 13a es veu que en afegir 1 mL de BPA el pic es detecta tant en el node com en el potenciòstat i s'estabilitza en un corrent superior. Després, amb 2 mL més també es repeteix el mateix patró. És en afegir 5 mL quan el pic ja s'alça més fins a arribar a 0,7 μ A, però que segons la lectura del node, es correspon amb 140 μ A, cosa que representa un factor de 200. A partir d'aquí, en el programa EC-Lab es veu una disminució progressiva del corrent, com si el sistema no detectés noves concentracions. Tot i això, s'afegeixen 10 mL i posteriorment 20 mL de BPA.

El node registra canvis en la tensió "uri", mentre que el potenciòstat només mostra una petita alteració que podria correspondre als nous pics, però sense una resposta significativa. Això suggereix que el sensor del laboratori podria estar saturat o bloquejat.

Passant al segon experiment, es fan el mateix tractament de dades, però els valors són diferents:

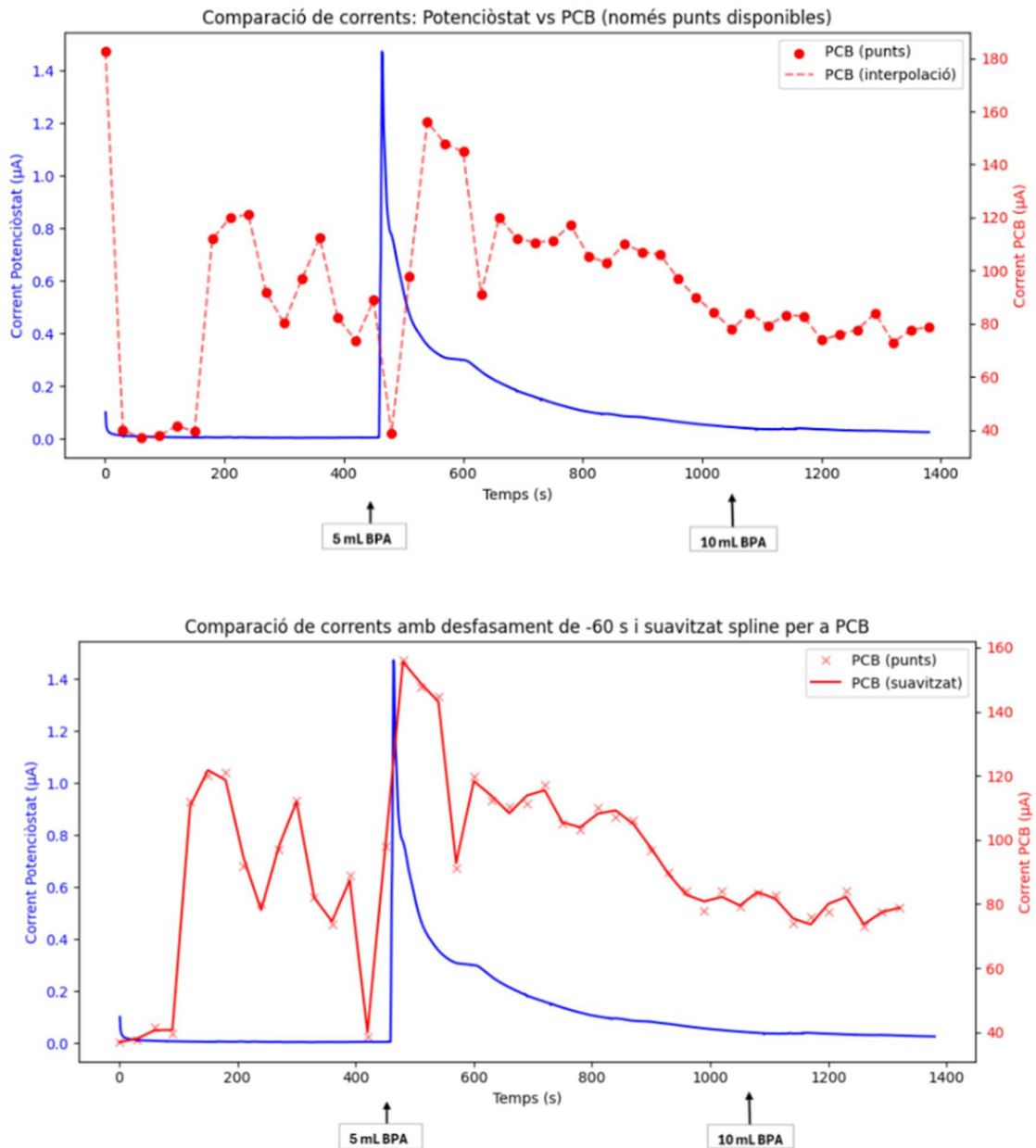


Figura 14. (a) Corbes reals experiment 2. (b) Corbes desfasades experiment 2.

En aquest cas es fa servir aigua de l'aixeta. Igual que abans, es mostra la gràfica amb els valors reals i amb un desfasament d'un minut per una millor visualització. Quan s'afegeixen 5 mL de BPA, tots dos sistemes detecten un augment de corrent, però el node registra fins a 160 µA, mentre que el potenciòstat marca un màxim d'1,4 µA. Tot i que el factor d'error és lleugerament menor que en l'experiment amb PBS, continua sent molt elevat. A partir d'aquest instant, totes dues corbes s'estabilitzen i cap de les dues mostra una resposta clara en afegir 10 mL.

Comparant amb l'anterior prova, la resposta del potenciòstat és similar quant a que s'estabilitza, el primer pic l'identifica, però a partir de 10 mL ja no ho detecta. En canvi, amb el node costa més identificar els pics i el segon ja ni apareix.

Passant a l'última prova, també es fa amb aigua de l'aixeta, però canviant les mostres una altra vegada per evitar possibles efectes acumulatius. Es repeteix la prova anterior, però afegint dues vegades 5 mL. A la Figura 15a es pot veure que les dades registrades al node són força irregulars, amb variacions que dificulten la identificació de pics. Tot i això, tant el node com el potenciòstat detecten la primera addició. En aquest cas, el node registra un pic molt més gran que en les proves anteriors, mentre que el potenciòstat arriba només a 0,5 μA . Això incrementa encara més el desfasament entre els dos sistemes.

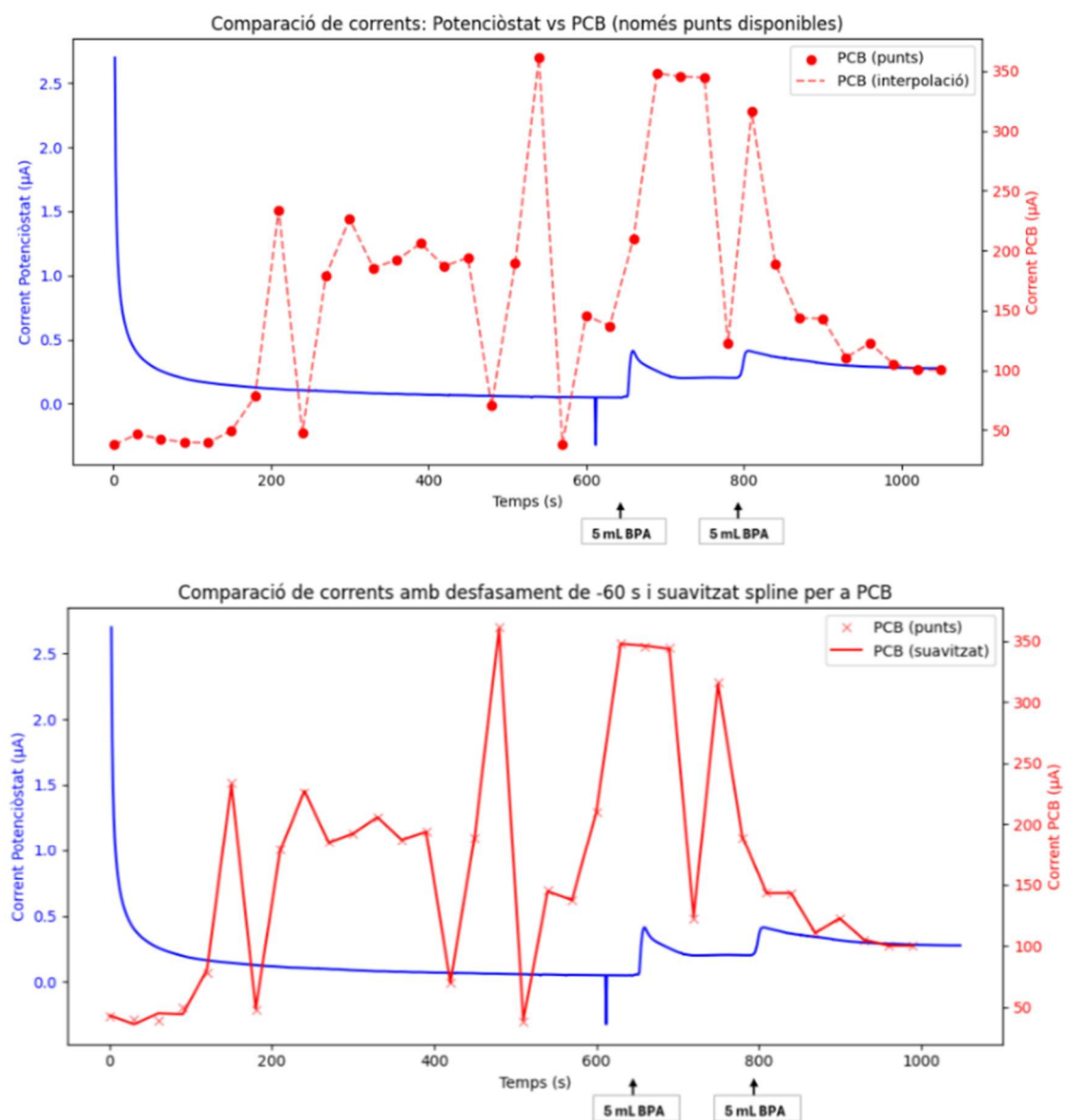


Figura 15. (a) Corbes reals experiment 3. (b) Corbes desfasades experiment 3.

Com el pic és petit, ràpidament ja s'estabilitza i en tornar a posar 5 mL més es detecta de nou. De forma proporcional les dues corbes augmenten el mateix, ja que els dos pics són similars en cada gràfic. A diferència dels casos anteriors, ara es detecten tots els pics amb els dos mètodes, tanmateix, amb el node costa més distingir quan hi ha realment una addició de BPA, pel fet que hi ha altres pics que no resulten d'haver afegit aquesta substància i la corba blava no presenta uns pics gaire elevats comparant amb quan s'han afegit 5 mL en les altres proves.

Com a resum de les proves, es mostren els valors de corrent quan es fan les addicions de BPA en cada cas:

Primer experiment: solució de PBS					
	1 mL	2 mL	5 mL	10 mL	20 mL
Potenciòstat (μA)	0,174	0,200	0,700	-	-
PCB (μA)	51	65	140	153	171

Taula 3. Pics de corrent experiment 1.

Segon experiment: aigua de l'aixeta		
	5 mL	10 mL
Potenciòstat (μA)	1,4	-
PCB (μA)	156	-

Taula 4. Pics de corrent experiment 2.

Tercer experiment: aigua de l'aixeta		
	5 mL	5 mL
Potenciòstat (μA)	0,4	0,4
PCB (μA)	348	316

Taula 5. Pics de corrent experiment 3.

Segons els pics de corrent, es pot comprovar que entre fer les proves amb PBS o amb aigua de l'aixeta, és en el primer cas quan es detecten millor els pics.

Amb el potenciòstat, en general es diferencien els pics tot i ser concentracions baixes, però en els casos de posar 10 mL o més no s'ha detectat.

Amb la PCB es detecta millor amb PBS que amb aigua corrent, ja que no hi ha pics alternatius tan pronunciats. Tenint en compte les concentracions amb les quals s'ha treballat, en canvi, amb concentracions altes és quan es detecta millor, perquè amb petites, per poc soroll o interferències que hi hagi, ja no destaquen gaire els pics de les addicions.

9. Conclusions

El present projecte ha permès desenvolupar, implementar i validar un sistema portàtil per a la detecció de Bisfenol A (BPA) mitjançant tècniques electroquímiques amb un sensor serigrafiat DRP-150 connectat a una PCB pròpia. Aquest sistema s'ha integrat amb un node IoT capaç d'enregistrar dades de manera autònoma i mostrar-les a través d'una aplicació mòbil. La seva funcionalitat s'ha contrastat amb un potenciòstat de laboratori com a sistema de referència.

Els resultats obtinguts mostren que el potenciòstat és capaç de detectar increments de concentració de BPA, amb especial èxit en les primeres addicions i a concentracions relativament baixes (entorn dels 5 $\mu\text{M/L}$). No obstant això, la resposta obtinguda mitjançant el node presenta més variabilitat i soroll que la de l'aparell del laboratori i, en alguns casos s'han detectat pics que no es corresponen necessàriament amb afegits reals de BPA.

Tot i això, el sistema demostra una sensibilitat aparent significativa i valida el concepte de mesura remota de contaminants. Tanmateix, caldrà millorar la fiabilitat i la capacitat de quantificació per convertir-lo en una eina per a entorns reals.

Entre els factors que poden haver afectat el rendiment del sistema cal destacar:

- Els valors de les resistències utilitzades podrien ser massa baixos fent que el sistema pugui estar poc esmorteït.
- El controlador PID mal ajustat pot causar oscil·lacions brusques de corrent i inestabilitat. Altres components mal escollits poden amplificar aquest efecte.
- Soroll i interferències electromagnètiques de fonts properes, com ordinadors i mòbils, a l'hora de fer les proves poden afectar a la PCB.

10. Treball futur

Per tal d'optimitzar i ampliar les capacitats del sistema desenvolupat, es proposen les següents línies de treball futur:

- Redissenyar el circuit per millorar la relació senyal-soroll, afegir filtres RC i ajustar correctament el PID.
- Ampliar les proves amb més concentracions i repeticions per obtenir resultats més robustos estadísticament i poder establir límits de detecció més definits.
- Fer assaigs *in situ* en aigües naturals per verificar el funcionament del sistema en condicions ambientals reals i detectar possibles interferències externes.

Aquestes accions permetrien evolucionar el sistema cap a una eina portable, fiable i pràctica pel monitoratge ambiental de contaminants com el BPA.

Referències

- [1] J. K. Deka, P. Robi i B. Sharma, «Emerging Technology for Sustainable Development,» Springer, Guwahati, Assam, India, 2022.
- [2] L. Lin, Y. Haoran y X. Xu, «Effects of Water Pollution on Human Health and Disease Heterogeneity: A Review,» Frontiers, Chongqing, 2022.
- [3] K. Rohitashw, M. Qureshi, A. Kuriqi, A. Elbeltagi i A. Saraswat, «A review on emerging water contaminants and the application of sustainable removal technologies,» Elsevier, Pantnagar, 2021.
- [4] B. Orimolade, L. Dennany, B. Mamba, S. Azizi y M. Maaza, «A Review on Monitoring of Organic Pollutants in Wastewater Using Electrochemical Approach,» Springer, Pretoria, 2023.
- [5] B. B. Mamba, A. S. Adekunle, C. Kumunda y N. W. Hlongwa, «Electrochemical Detection of Environmental Pollutants Based on Graphene Derivatives: A Review,» Frontiers, Johannesburg, 2021.
- [6] I. J. Stefan, «Institut Jozef Stefan,» [En línia]. Available: <https://www.ijs.si/ijsw/JSI?action=fullsearch&context=180&value=&fullsearch=Text>. [Último acceso: 12 Juny 2025].
- [7] «Rapid and reliable electrochemical detection of bisphenol S in thermal paper,» *Elsevier*, vol. 44, núm. 100662, p. 9, 2024.
- [8] Metrohm DropSens, «Metrohm DropSens,» [En línia]. Available: <https://metrohm-dropsens.com/>. [Últim accés: 21 Juny 2025].

FEATURES

Precision 1.000 V voltage reference
Ultracompact 3 mm × 3 mm SOT-23 package
No external capacitor required
Low output noise: 4 μ V p-p (0.1 Hz to 10 Hz)
Initial accuracy: $\pm 0.35\%$ maximum
Temperature coefficient: 70 ppm/ $^{\circ}$ C maximum
Operating current range: 100 μ A to 10 mA
Output impedance: 0.3 Ω maximum
Temperature range: -40° C to $+85^{\circ}$ C

APPLICATIONS

Precision data acquisition systems
Battery-powered equipment
Cellular phone
Notebook computer
PDA
GPS
3 V/5 V, 8-/12-bit data converters
Portable medical instruments
Industrial process control systems
Precision instruments

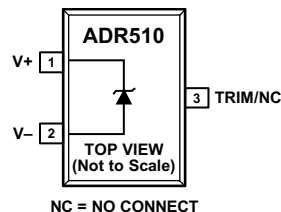
GENERAL DESCRIPTION

Designed for space critical applications, the ADR510 is a low voltage (1.000 V), precision shunt-mode voltage reference in an ultracompact (3 mm × 3 mm) SOT-23-3 package. The ADR510 features low temperature drift (70 ppm/ $^{\circ}$ C), high accuracy ($\pm 0.35\%$), and ultralow noise (4 μ V p-p) performance.

The ADR510 advanced design eliminates the need for an external capacitor, yet it is stable with any capacitive load. The minimum operating current increases from 100 μ A to a maximum of 10 mA. This low operating current and ease of use make the ADR510 ideally suited for handheld battery-powered applications.

A TRIM terminal is available on the ADR510 to provide adjustment of the output voltage over $\pm 0.5\%$ without affecting the temperature coefficient of the device. This feature provides users with the flexibility to trim out any system errors.

PIN CONFIGURATION



NC = NO CONNECT

Figure 1. 3-Lead SOT-23-3

03270-001

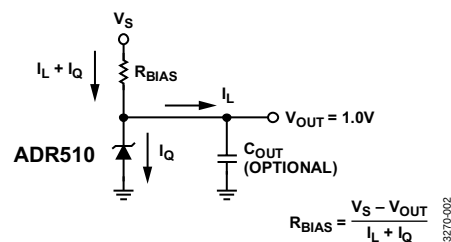


Figure 2. Typical Operating Circuit

03270-002

Table 1. ADR510

Part	Output Voltage, V_{OUT}	Initial Accuracy		Temperature Coefficient
ADR510A	1.000 V	3.5 mV	0.35%	70 ppm/ $^{\circ}$ C

Rev. B

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. Specifications subject to change without notice. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

TABLE OF CONTENTS

Features	1	Parameter Definitions.....	7
Applications.....	1	Temperature Coefficient.....	7
Pin Configuration.....	1	Thermal Hysteresis	7
General Description	1	Applications Information	8
Revision History	2	Adjustable Precision Voltage Source.....	8
Specifications.....	3	Output Voltage Trim.....	8
Electrical Characteristics	3	Using the ADR510 with Precision Data Converters	8
Absolute Maximum Ratings.....	4	Precise Negative Voltage Reference	9
Thermal Resistance	4	Outline Dimensions	10
ESD Caution.....	4	Ordering Guide	10
Typical Performance Characteristics	5		

REVISION HISTORY

9/07—Rev. A to Rev. B

Changes to Adjustable Precision Voltage Source Section	8
Changes to Figure 11.....	8
Changes to Figure 12.....	8

4/07—Rev. 0 to Rev. A

Changes to Table 1.....	1
Changes to Table 3 and Table 4.....	4
Changes to Figure 4, Figure 5, Figure 6, and Figure 7	5
Changes to Thermal Hysteresis Section	7
Changes to Figure 11.....	8
Changes to Figure 14 and Equation 5.....	9
Changes to Ordering Guide	10

8/03—Revision 0: Initial Version

SPECIFICATIONS

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

$I_{IN} = 100 \mu\text{A}$ to 10 mA @ $T_A = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise noted.

Table 2.

Parameter	Symbol	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
Output Voltage ¹	V_{OUT}		0.9965	1.0	1.0035	V
Initial Accuracy	V_{OUTERR}		−3.5		+3.5	mV
	$V_{OUTERR\%}$		−0.35		+0.35	%
Temperature Coefficient, A Grade	TCV_{OUT}	$0^\circ\text{C} < T_A < 70^\circ\text{C}$ $-40^\circ\text{C} < T_A < +85^\circ\text{C}$			70 85	ppm/ $^\circ\text{C}$ ppm/ $^\circ\text{C}$
Output Voltage Change vs. I_{IN}	ΔV_R	$I_{IN} = 0.1 \text{ mA}$ to 10 mA			3	mV
Dynamic Output Impedance	$(\Delta V_R / \Delta I_R)$	$I_{IN} = 1 \text{ mA} \pm 100 \mu\text{A}$			0.3	Ω
Minimum Operating Current	I_{IN}	$0^\circ\text{C} < T_A < 70^\circ\text{C}$	100			μA
Voltage Noise	e_N p-p	$f = 0.1 \text{ Hz}$ to 10 Hz		4		$\mu\text{V p-p}$
Turn-On Settling Time ²	t_R	To within 0.1% of output		10		μs
Output Voltage Hysteresis	V_{OUT_HYS}			50		ppm

¹ The forward diode voltage characteristic at -1 mA is typically 0.65 V .

² Measured without a load capacitor.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Table 3.

Parameter	Rating
Reverse Current	25 mA
Forward Current	20 mA
Storage Temperature Range	–65°C to +150°C
Operating Temperature Range	–40°C to +85°C
Junction Temperature Range	–65°C to +150°C
Lead Temperature (Soldering, 60 sec)	300°C

Stresses above those listed under Absolute Maximum Ratings may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only; functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational section of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

THERMAL RESISTANCE

θ_{JA} is specified for the worst-case conditions, that is, a device soldered in a circuit board for surface-mount packages. Package power dissipation = $(T_{JMAX} - T_A)/\theta_{JA}$.

Table 4. Thermal Resistance

Package Type	θ_{JA}	θ_{JC}	Unit
3-Lead SOT-23-3 (RT-3)	230	146	°C/W

ESD CAUTION



ESD (electrostatic discharge) sensitive device. Charged devices and circuit boards can discharge without detection. Although this product features patented or proprietary protection circuitry, damage may occur on devices subjected to high energy ESD. Therefore, proper ESD precautions should be taken to avoid performance degradation or loss of functionality.

TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS

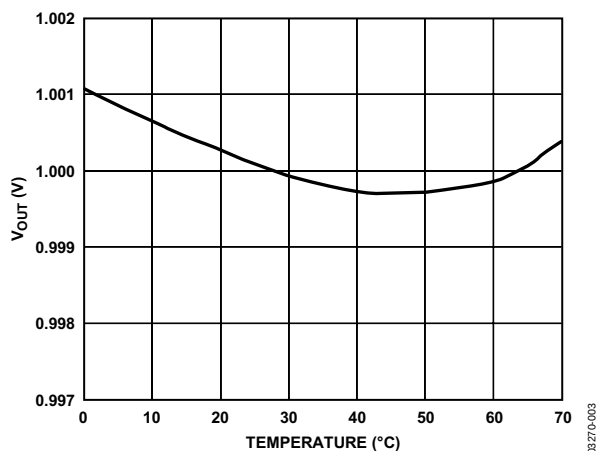


Figure 3. Typical V_{OUT} vs. Temperature

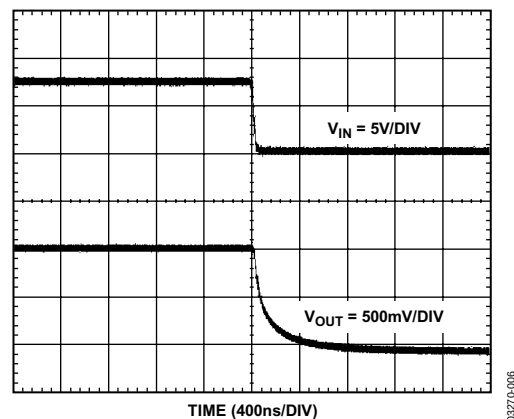


Figure 6. Turn-Off Time

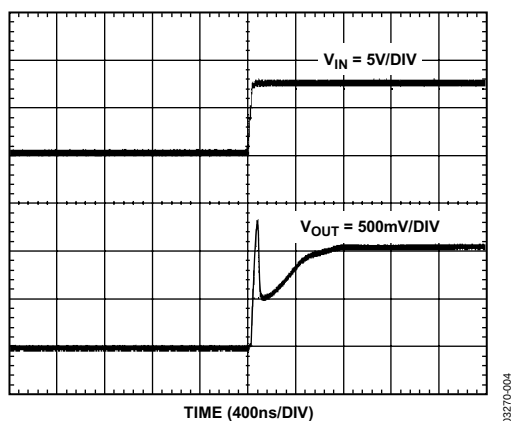


Figure 4. Turn-On Time

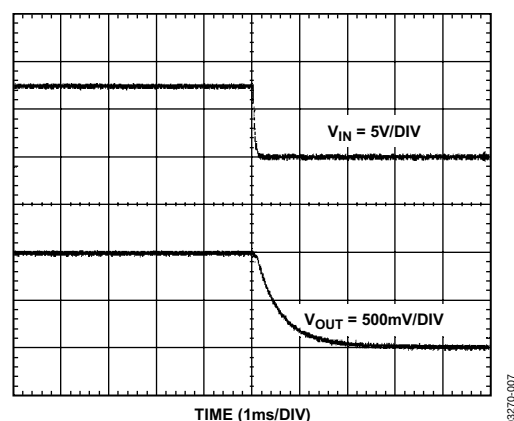


Figure 7. Turn-Off Time with 1 μF Input Capacitor

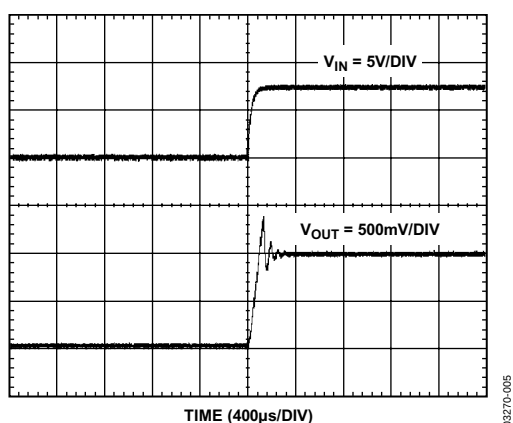


Figure 5. Turn-On Time with 1 μF Input Capacitor

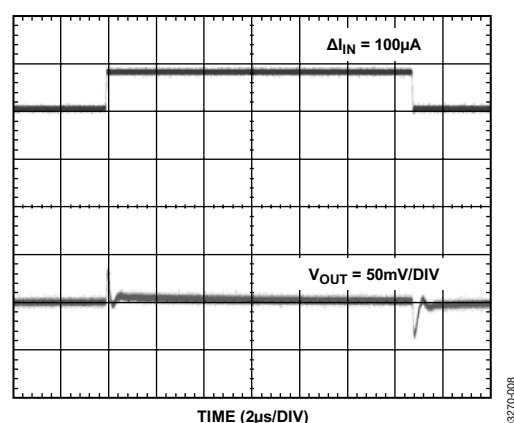


Figure 8. Output Response to 100 μA Input Current Change

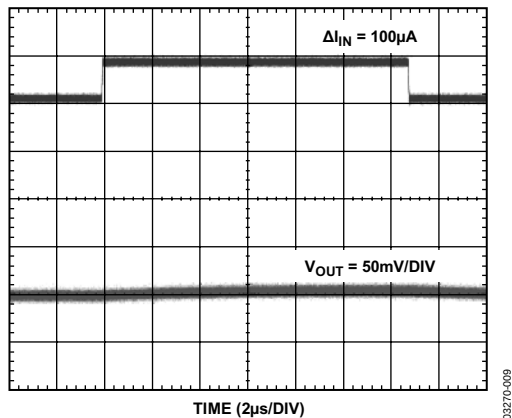


Figure 9. Output Response to 100 μA Input Current Change with 1 μF Capacitor

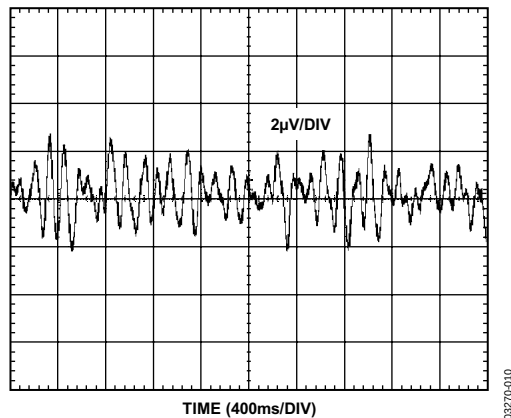


Figure 10. 1 Hz to 10 Hz Noise

PARAMETER DEFINITIONS

TEMPERATURE COEFFICIENT

This is the change of output voltage with respect to the operating temperature changes, normalized by the output voltage at 25°C. This parameter is expressed in parts per million/degrees Celsius (ppm/°C) and can be determined with the following equation:

$$TCV_{OUT}[\text{ppm}/^{\circ}\text{C}] = \frac{V_{OUT}(T_2) - V_{OUT}(T_1)}{V_{OUT}(25^{\circ}\text{C}) \times (T_2 - T_1)} \times 10^6 \quad (1)$$

where:

$V_{OUT}(25^{\circ}\text{C})$ is the output voltage at 25°C.

$V_{OUT}(T_1)$ is the output voltage at Temperature 1.

$V_{OUT}(T_2)$ is the output voltage at Temperature 2.

THERMAL HYSTERESIS

Thermal hysteresis is the change of output voltage after the device is cycled through the temperature from 25°C to 0°C to 85°C and back to 25°C.

$$V_{OUT_HYS} = V_{OUT}(25^{\circ}\text{C}) - V_{OUT_TC}$$

$$V_{OUT_HYS}[\text{ppm}] = \frac{V_{OUT}(25^{\circ}\text{C}) - V_{OUT_TC}}{V_{OUT}(25^{\circ}\text{C})} \times 10^6 \quad (2)$$

where:

$V_{OUT}(25^{\circ}\text{C})$ is the output voltage at 25°C.

V_{OUT_TC} is the output voltage at 25°C after temperature cycle at +25°C to -40°C to +85°C and back to +25°C.

APPLICATIONS INFORMATION

The ADR510 is a 1.0 V precision shunt voltage reference designed to operate without an external output capacitor between the positive terminal and the negative terminal for stability. An external capacitor can be used for additional filtering of the supply.

As with all shunt voltage references, an external bias resistor (R_{BIAS}) is required between the supply voltage and the ADR510 (see Figure 2). R_{BIAS} sets the current that is required to pass through the load (I_L) and the ADR510 (I_Q). The load and the supply voltage can vary, thus R_{BIAS} is chosen based on the following conditions:

- R_{BIAS} must be small enough to supply the minimum I_Q current to the ADR510 even when the supply voltage is at minimum value and the load current is at maximum value.
- R_{BIAS} also needs to be large enough so that I_Q does not exceed 10 mA when the supply voltage is at its maximum value and the load current is at its minimum value.

Given these conditions, R_{BIAS} is determined by the supply voltage (V_S), the load and operating current (I_L and I_Q) of the ADR510, and the ADR510 output voltage.

$$R_{BIAS} = \frac{V_S - V_{OUT}}{I_L + I_Q} \quad (3)$$

ADJUSTABLE PRECISION VOLTAGE SOURCE

The ADR510, combined with a precision low input bias op amp such as the AD860x, can be used to output a precise adjustable voltage. Figure 11 illustrates implementation of this application using the ADR510.

Output of the op amp, V_{OUT} , is determined by the gain of the circuit, which is completely dependent on the $R2$ and $R1$ resistors.

$$V_{OUT} = 1 + \frac{R2}{R1} \quad (4)$$

An additional capacitor in parallel with $R2$ can be added to filter out high frequency noise. The value of $C2$ is dependent on the value of $R2$.

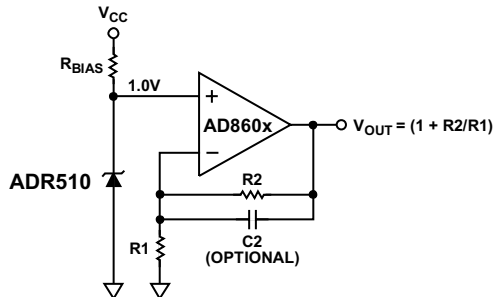


Figure 11. Adjustable Precision Voltage Source

OUTPUT VOLTAGE TRIM

Using a mechanical or digital potentiometer, the output voltage of the ADR510 can be trimmed $\pm 0.5\%$. The circuit in Figure 12 illustrates how the output voltage can be trimmed using a 10 k Ω potentiometer. Note that trimming using other resistor values may not produce an accurate output from the ADR510.

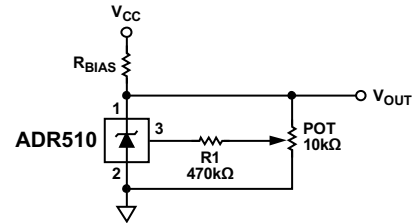


Figure 12. Output Voltage Trim

USING THE ADR510 WITH PRECISION DATA CONVERTERS

The compact ADR510 and its low minimum operating current requirement make it ideal for use in battery-powered portable instruments, such as the AD7533 CMOS multiplying DAC, that use precision data converters.

Figure 13 shows the ADR510 serving as an external reference to the AD7533, a CMOS multiplying DAC. Such a DAC requires a negative voltage input in order to provide a positive output range. In this application, the ADR510 is supplying a -1.0 V reference to the REF input of the AD7533.

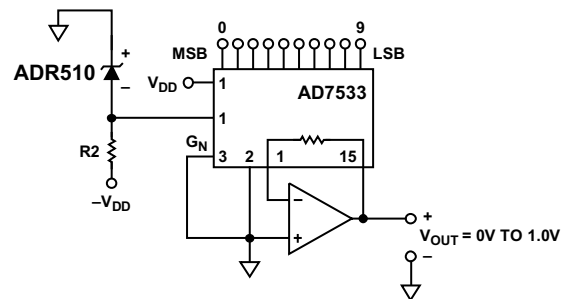


Figure 13. ADR510 as a Reference for a 10-Bit CMOS DAC (AD7533)

PRECISE NEGATIVE VOLTAGE REFERENCE

The ADR510 is suitable for use in applications where a precise negative voltage reference is desired, including the application detailed in Figure 13.

Figure 14 shows the ADR510 configured to provide an output of -1.0 V .

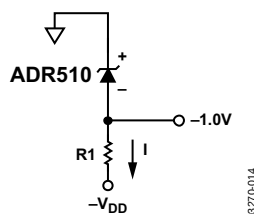


Figure 14. Precise -1.0 V Reference Configuration

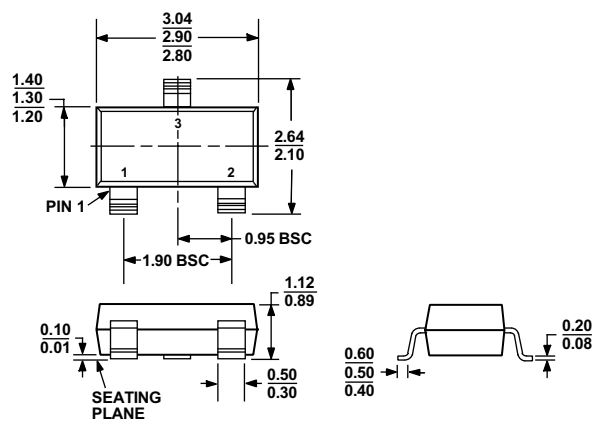
Because the ADR510 characteristics resemble those of a Zener diode, the cathode shown in Figure 14 is 1.0 V higher with respect to the anode ($V+$ with respect to $V-$ on the ADR510 package). Because the cathode of the ADR510 is tied to ground, the anode must be -1.0 V .

$R1$ in Figure 14 should be chosen so that $100\text{ }\mu\text{A}$ to 10 mA is provided to properly bias the ADR510.

$$RI = \frac{-1 - (-V_{DD})}{I} \quad (5)$$

The $R1$ resistor should be chosen so that power dissipation is at a minimum. An ideal resistor value can be determined through manipulation of Equation 5.

OUTLINE DIMENSIONS



COMPLIANT TO JEDEC STANDARDS TO-236-AB

Figure 15. 3-Lead Small Outline Transistor Package [SOT-23-3]
(RT-3)

Dimensions shown in millimeters

ORDERING GUIDE

Model	Output Voltage (V _{OUT})	Initial Accuracy		Temperature Coefficient	Temperature Range	Package Description	Package Option	Ordering Quantity	Branding
ADR510ART-REEL7	1.0 V	3.5 mV	0.35%	70 ppm/°C	−40°C to +85°C	3-Lead SOT-23-3	RT-3	3,000	RAA
ADR510ART-R2	1.0 V	3.5 mV	0.35%	70 ppm/°C	−40°C to +85°C	3-Lead SOT-23-3	RT-3	250	RAA
ADR510ARTZ-REEL7 ¹	1.0 V	3.5 mV	0.35%	70 ppm/°C	−40°C to +85°C	3-Lead SOT-23-3	RT-3	3,000	RAA#
ADR510ARTZ-R2 ¹	1.0 V	3.5 mV	0.35%	70 ppm/°C	−40°C to +85°C	3-Lead SOT-23-3	RT-3	250	RAA#

¹ Z = RoHS Compliant Part. # denotes lead free, may be top or bottom marked.

FEATURES

- Gain set with 2 external resistors
- Can achieve low gain drift at all gains
- Ideal for battery powered instruments
- Supply current: 115 μA
- Rail-to-rail input and output
- Zero input crossover distortion
- Designed for excellent dc performance
- Minimum CMRR: 106 dB
- Maximum offset voltage drift: 0.3 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
- Maximum gain error: 0.005% (all gains)
- Maximum gain drift: 0.5 ppm/ $^\circ\text{C}$ (all gains)
- Input bias current: 1 nA guaranteed to 125 $^\circ\text{C}$
- Bandwidth mode pin (BW) to adjust compensation
- 8 kV HBM ESD rating
- RFI filter on-chip
- Single-supply operation: 1.8 V to 5.5 V
- 8-lead MSOP package

APPLICATIONS

- Bridge amplification
- Pressure measurement
- Medical instrumentation
- Thermocouple interface
- Portable systems
- Current measurement

GENERAL DESCRIPTION

The [AD8237](#) is a micropower, zero drift, rail-to-rail input and output instrumentation amplifier. The relative match of two resistors sets any gain from 1 to 1000. The [AD8237](#) has excellent gain accuracy performance that can be preserved at any gain with two ratio-matched resistors.

The [AD8237](#) employs the indirect current feedback architecture to achieve a true rail-to-rail capability. Unlike conventional in-amps, the [AD8237](#) can fully amplify signals with common-mode voltage at or even slightly beyond its supplies. This enables applications with high common-mode voltages to use smaller supplies and save power.

The [AD8237](#) is an excellent choice for portable systems. With a minimum supply voltage of 1.8 V, a 115 μA typical supply current, and wide input range, the [AD8237](#) makes full use of a limited power budget, yet offers bandwidth and drift performance suitable for bench-top systems.

PIN CONFIGURATION

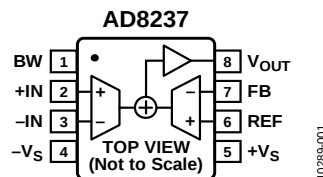


Figure 1.

Table 1. Instrumentation Amplifiers by Category¹

General Purpose	Zero Drift	Military Grade	Micropower	Digital Gain
AD8421	AD8237	AD620	AD8237	AD8250
AD8221/AD8222	AD8231	AD621	AD8420	AD8251
AD8220/AD8224	AD8293	AD524	AD8235/AD8236	AD8253
AD8228	AD8553	AD526	AD627	AD8231
AD8295	AD8556	AD624		
AD8226	AD8557			

¹ See www.analog.com for the latest instrumentation amplifiers.

The [AD8237](#) is available in an 8-lead MSOP package. Performance is specified over the full temperature range of -40 $^\circ\text{C}$ to +125 $^\circ\text{C}$.

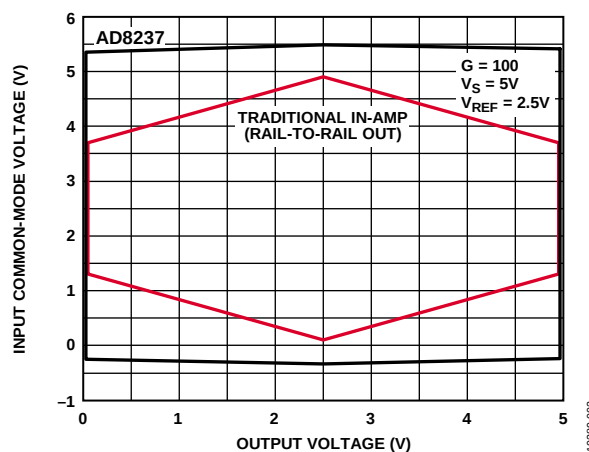


Figure 2. Input Common-Mode Voltage vs. Output Voltage, +Vs = 5 V, G = 100

Rev. 0

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. Specifications subject to change without notice. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

TABLE OF CONTENTS

Features	1	Clock Feedthrough.....	21
Applications.....	1	Input Voltage Range.....	21
Pin Configuration.....	1	Input Protection	22
General Description	1	Filtering Radio Frequency Interference	22
Revision History	2	Using the Reference Pin	22
Specifications.....	3	Layout	23
Absolute Maximum Ratings.....	7	Input Bias Current Return Path	23
Thermal Resistance	7	Applications Information	25
ESD Caution.....	7	Battery Current Monitor	25
Pin Configuration and Function Descriptions.....	8	Programmable Gain In-Amp.....	25
Typical Performance Characteristics	9	AD8237 in an Electrocardiogram (ECG) Front End.....	26
Theory of Operation	20	Outline Dimensions	27
Architecture.....	20	Ordering Guide	27
Setting the Gain	20		
Gain Accuracy.....	21		

REVISION HISTORY

8/12—Revision 0: Initial Version

SPECIFICATIONS

+V_S = +5 V, -V_S = 0 V, V_{REF} = 2.5 V, V_{CM} = 2.5 V, T_A = 25°C, G = 1 to 1000, R_L = 10 kΩ to ground, specifications referred to input, unless otherwise noted.

Table 2.

Parameter	Test Conditions/Comments	Min	Typ	Max	Unit
COMMON-MODE REJECTION RATIO (CMRR)	V _{CM} = 0.1 V to 4.9 V				
CMRR at DC					
G = 1, G = 10		106	120		dB
G = 100, G = 1000		114	140		dB
Over Temperature (G = 1)	T _A = -40°C to +125°C	104			dB
CMRR at 1 kHz			80		dB
NOISE					
Voltage Noise					
Spectral Density	f = 1 kHz		68		nV/√Hz
Peak to Peak	f = 0.1 Hz to 10 Hz		1.5		μV p-p
Current Noise					
Spectral Density	f = 1 kHz		70		fA/√Hz
Peak to Peak	f = 0.1 Hz to 10 Hz		3		pA p-p
VOLTAGE OFFSET					
Offset			30	75	μV
Average Temperature Coefficient	T _A = -40°C to +125°C			0.3	μV/°C
Offset RTI vs. Supply (PSR)		100			dB
INPUTS ¹	Valid for REF and FB pair, as well as +IN and -IN				
Input Bias Current	T _A = +25°C		250	650	pA
Over Temperature	T _A = -40°C to +125°C			1	nA
Average Temperature Coefficient			0.5		pA/°C
Input Offset Current	T _A = +25°C		250	650	pA
Over Temperature	T _A = -40°C to +125°C			1	nA
Average Temperature Coefficient			0.5		pA/°C
Input Impedance					
Differential			100 5		MΩ pF
Common Mode			800 10		MΩ pF
Differential Input Operating Voltage	T _A = -40°C to +125°C		±3.85		V
Input Operating Voltage (+IN, -IN, or REF)	T _A = +25°C	-V _S - 0.3		+V _S + 0.3	V
	T _A = -40°C to +125°C	-V _S - 0.2		+V _S + 0.2	V
DYNAMIC RESPONSE					
Small Signal Bandwidth	-3 dB				
Low Bandwidth Mode	Pin 1 connected to -V _S				
G = 1			200		kHz
G = 10			20		kHz
G = 100			2		kHz
G = 1000			0.2		kHz
High Bandwidth Mode	Pin 1 connected to +V _S				
G = 10			100		kHz
G = 100			10		kHz
G = 1000			1		kHz

Parameter	Test Conditions/Comments	Min	Typ	Max	Unit
Settling Time 0.01%	4 V output step				
Low Bandwidth Mode	Pin 1 connected to $-V_S$				
G = 1			80		μs
G = 10			100		μs
G = 100			440		μs
G = 1000			4		ms
High Bandwidth Mode	Pin 1 connected to $+V_S$				
G = 10			80		μs
G = 100			100		μs
G = 1000			820		μs
Slew Rate					
Low Bandwidth Mode			0.05		V/ μs
High Bandwidth Mode			0.15		V/ μs
EMI Filter Frequency			6		MHz
GAIN ²	$G = 1 + (R_2/R_1)$				
Gain Range ³		1		1000	V/V
Gain Error	$V_{\text{OUT}} = 0.1 \text{ V to } 4.9 \text{ V}, G = 1 \text{ to } G = 1000$			0.005	%
Gain Error vs. V_{CM}			15		ppm/V
Gain vs. Temperature	$T_A = -40^\circ\text{C to } +125^\circ\text{C}$			0.5	ppm/ $^\circ\text{C}$
Gain Nonlinearity	$V_{\text{OUT}} = 0.2 \text{ V to } 4.8 \text{ V}, R_L = 10 \text{ k}\Omega \text{ to ground}$				
G = 1, G = 10			3		ppm
G = 100			6		ppm
G = 1000			10		ppm
OUTPUT					
Output Swing					
$R_L = 10 \text{ k}\Omega \text{ to Midsupply}$	$T_A = +25^\circ\text{C}$	$-V_S + 0.05$		$+V_S - 0.05$	V
	$T_A = -40^\circ\text{C to } 125^\circ\text{C}$	$-V_S + 0.07$		$+V_S - 0.07$	V
$R_L = 100 \text{ k}\Omega \text{ to Midsupply}$	$T_A = +25^\circ\text{C}$	$-V_S + 0.02$		$+V_S - 0.02$	V
	$T_A = -40^\circ\text{C to } 125^\circ\text{C}$	$-V_S + 0.03$		$+V_S - 0.03$	V
Short-Circuit Current			4		mA
POWER SUPPLY					
Operating Range		1.8		5.5	V
Quiescent Current	$T_A = +25^\circ\text{C}$		115	130	μA
	$T_A = -40^\circ\text{C to } +125^\circ\text{C}$			150	μA
TEMPERATURE RANGE					
Specified		-40		+125	$^\circ\text{C}$

¹ Specifications apply to input voltages between 0 V and 5 V. When measuring voltages beyond the supplies, there is additional offset error, bias currents increase, and input impedance decreases, especially at higher temperatures.

² For $G > 1$, errors from the external resistors, R1 and R2, must be added to these specifications, including error from the FB pin bias current.

³ The AD8237 has only been characterized for gains of 1 to 1000; however, higher gains are possible.

$+V_S = 1.8\text{ V}$, $-V_S = 0\text{ V}$, $V_{REF} = 0.9\text{ V}$, $V_{CM} = 0.9\text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$, $G = 1$ to 1000 , $R_L = 10\text{ k}\Omega$ to ground, specifications referred to input, unless otherwise noted.

Table 3.

Parameter	Test Conditions/Comments	Min	Typ	Max	Unit
COMMON-MODE REJECTION RATIO (CMRR)	$V_{CM} = 0.2\text{ V}$ to 1.6 V				
CMRR at DC					
$G = 1$, $G = 10$		100	120		dB
$G = 100$, $G = 1000$		114	140		dB
Over Temperature ($G = 1$)	$T_A = -40^\circ\text{C}$ to $+125^\circ\text{C}$	94			dB
CMRR at 1 kHz			80		dB
NOISE					
Voltage Noise					
Spectral Density	$f = 1\text{ kHz}$, $V_{DIFF} \leq 100\text{ mV}$		68		nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Peak to Peak	$f = 0.1\text{ Hz}$ to 10 Hz , $V_{DIFF} \leq 100\text{ mV}$		1.5		$\mu\text{V p-p}$
Current Noise					
Spectral Density	$f = 1\text{ kHz}$		70		fA/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Peak to Peak	$f = 0.1\text{ Hz}$ to 10 Hz		3		pA p-p
VOLTAGE OFFSET					
Offset			25	75	μV
Average Temperature Coefficient	$T_A = -40^\circ\text{C}$ to $+125^\circ\text{C}$			0.3	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Offset RTI vs. Supply (PSR)		100			dB
INPUTS ¹	Valid for REF and FB pair, as well as +IN and -IN				
Input Bias Current	$T_A = +25^\circ\text{C}$		250	650	pA
Over Temperature	$T_A = -40^\circ\text{C}$ to $+125^\circ\text{C}$			1	nA
Average Temperature Coefficient			0.5		pA/ $^\circ\text{C}$
Input Offset Current	$T_A = +25^\circ\text{C}$		250	650	pA
Over Temperature	$T_A = -40^\circ\text{C}$ to $+125^\circ\text{C}$			1	nA
Average Temperature Coefficient			0.5		pA/ $^\circ\text{C}$
Input Impedance					
Differential			100 5		M Ω pF
Common Mode			800 10		M Ω pF
Differential Input Operating Voltage	$T_A = -40^\circ\text{C}$ to $+125^\circ\text{C}$		± 0.75		V
Input Operating Voltage (+IN, -IN, REF, or FB)	$T_A = +25^\circ\text{C}$	$-V_S - 0.3$		$+V_S + 0.3$	V
	$T_A = -40^\circ\text{C}$ to $+125^\circ\text{C}$	$-V_S - 0.2$		$+V_S + 0.2$	V
DYNAMIC RESPONSE					
Small Signal Bandwidth	-3 dB				
Low Bandwidth Mode	Pin 1 connected to $-V_S$				
$G = 1$			200		kHz
$G = 10$			20		kHz
$G = 100$			2		kHz
$G = 1000$			0.2		kHz
High Bandwidth Mode	Pin 1 connected to $+V_S$				
$G = 10$			100		kHz
$G = 100$			10		kHz
$G = 1000$			1		kHz
Slew Rate					
Low Bandwidth Mode			0.05		V/ μs
High Bandwidth Mode			0.15		V/ μs
EMI Filter Frequency			6		MHz

Parameter	Test Conditions/Comments	Min	Typ	Max	Unit
GAIN²	$G = 1 + (R2/R1)$				
Gain Range ³		1		1000	V/V
Gain Error	$V_{OUT} = 0.2\text{ V to }1.6\text{ V}, G = 1\text{ to }G = 1000$			0.005	%
Gain Error vs. V_{CM}			15		ppm/V
Gain vs. Temperature	$T_A = -40^\circ\text{C to }+125^\circ\text{C}$			0.5	ppm/ $^\circ\text{C}$
Gain Nonlinearity	$V_{OUT} = 0.2\text{ V to }1.6\text{ V}$				
G = 1, G = 10			3		ppm
G = 100			6		ppm
G = 1000			10		ppm
OUTPUT					
Output Swing					
$R_L = 10\text{ k}\Omega$ to Midsupply	$T_A = +25^\circ\text{C}$	$-V_S + 0.05$		$+V_S - 0.05$	V
	$T_A = -40^\circ\text{C to }125^\circ\text{C}$	$-V_S + 0.07$		$+V_S - 0.07$	V
$R_L = 100\text{ k}\Omega$ to Midsupply	$T_A = +25^\circ\text{C}$	$-V_S + 0.02$		$+V_S - 0.02$	V
	$T_A = -40^\circ\text{C to }125^\circ\text{C}$	$-V_S + 0.03$		$+V_S - 0.03$	V
Short-Circuit Current			4		mA
POWER SUPPLY					
Operating Range		1.8		5.5	V
Quiescent Current	$T_A = +25^\circ\text{C}$		115	130	μA
	$T_A = -40^\circ\text{C to }+125^\circ\text{C}$			150	μA
TEMPERATURE RANGE					
Specified		-40		+125	$^\circ\text{C}$

¹ Specifications apply to input voltages between 0 V and 1.8 V. When measuring voltages beyond the supplies, there is additional offset error, bias currents increase, and input impedance decreases, especially at higher temperatures.

² For $G > 1$, errors from the external resistors, R1 and R2, must be added to these specifications, including error from the FB pin bias current.

³ The AD8237 has only been characterized for gains of 1 to 1000; however, higher gains are possible.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Table 4.

Parameter	Rating
Supply Voltage	6 V
Output Short-Circuit Current Duration	Indefinite
Maximum Voltage at $-IN$, $+IN$, FB , or REF ¹	$+V_S + 0.5\text{ V}$
Minimum Voltage at $-IN$, $+IN$, FB , or REF ¹	$-V_S - 0.5\text{ V}$
Storage Temperature Range	-65°C to $+150^{\circ}\text{C}$
Junction Temperature Range	-65°C to $+150^{\circ}\text{C}$
ESD	
Human Body Model	8 kV
Charge Device Model	1.25 kV
Machine Model	0.2 kV

¹ If input voltages beyond the specified minimum or maximum voltages are expected, place resistors in series with the inputs to limit the current to 5 mA.

Stresses above those listed under Absolute Maximum Ratings may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only; functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational section of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

THERMAL RESISTANCE

θ_{JA} is specified for a device in free air.

Table 5.

Package	θ_{JA}	Unit
8-Lead MSOP, 4-Layer JEDEC Board	145.7	$^{\circ}\text{C}/\text{W}$

ESD CAUTION



ESD (electrostatic discharge) sensitive device. Charged devices and circuit boards can discharge without detection. Although this product features patented or proprietary protection circuitry, damage may occur on devices subjected to high energy ESD. Therefore, proper ESD precautions should be taken to avoid performance degradation or loss of functionality.

PIN CONFIGURATION AND FUNCTION DESCRIPTIONS

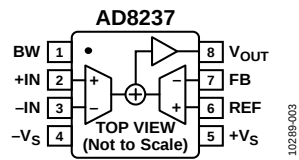


Figure 3. Pin Configuration

Table 6. Pin Function Descriptions

Pin No.	Mnemonic	Description
1	BW	For high bandwidth mode, connect this pin to +V _s , or for low bandwidth mode, connect this pin to -V _s . Do not leave this pin floating.
2	+IN	Positive Input.
3	-IN	Negative Input.
4	-V _s	Negative Supply.
5	+V _s	Positive Supply.
6	REF	Reference Input.
7	FB	Feedback Input.
8	V _{OUT}	Output.

THEORY OF OPERATION

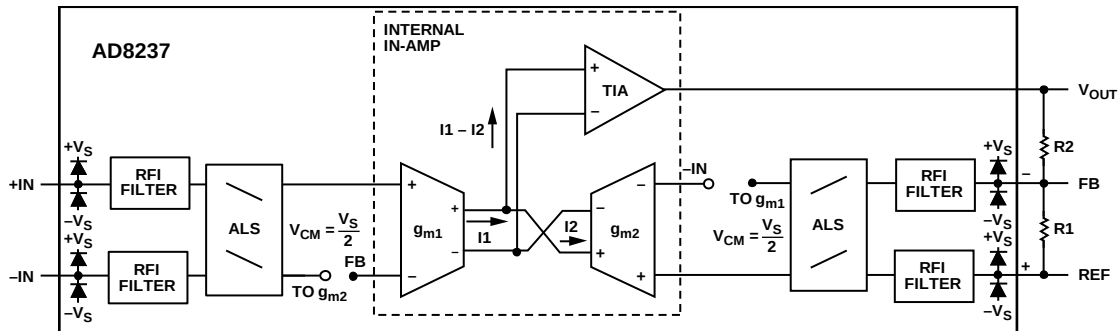


Figure 65. Simplified Schematic

ARCHITECTURE

The **AD8237** is based on an indirect current feedback topology consisting of three amplifiers: two matched transconductance amplifiers that convert voltage to current, and one transimpedance amplifier, TIA, that converts current to voltage.

To understand how the **AD8237** works, first consider only the internal in-amp. Assume a positive differential voltage is applied across the inputs of the transconductance amplifier, g_{m1} . This input voltage is converted into a differential current, I_1 , by the g_{m1} . Initially, I_2 is zero; therefore, I_1 is fed into the TIA, causing the output to increase. If there is feedback from the output of the TIA to the negative terminal of g_{m2} , and the positive terminal is held constant, the increasing output of the TIA causes I_2 , as shown, to increase. When it is assumed that the TIA has infinite gain, the loop is satisfied when I_2 equals I_1 . Because the gain of g_{m1} and g_{m2} are matched, this means that the differential input voltage across g_{m1} appears across the inputs of g_{m2} . This behavioral model is all that is needed for proper operation of the **AD8237**, and the rest of the circuit is for performance optimization.

The **AD8237** employs a novel adaptive level shift (ALS) technique. This switched capacitor method shifts the common-mode level of the input signal to the optimal level for the in-amp while preserving the differential signal. Once this is accomplished, additional performance benefits can be achieved by using the internal in-amp to compare $+IN$ to FB and $-IN$ to REF . This is only practical because the signals emitting from the ALS blocks are all referred to the same common-mode potential.

In traditional instrumentation amplifiers, the input common-mode voltage can limit the available output swing, typically depicted in a hexagon plot of the input common-mode vs. the output voltage. Because of this limit, very few instrumentation amplifiers can measure small signals near either supply rail. Using the indirect current feedback topology and ALS, the **AD8237** achieves a truly rail-to-rail characteristic. This increases power efficiency in many applications by allowing for power supply reduction.

The **AD8237** includes an RFI filter to remove high frequency out-of-band signals without affecting input impedance and CMRR over frequency. Additionally, there is a bandwidth mode pin to adjust the compensation. For gains greater than or equal to 10, the bandwidth mode pin (BW) can be tied to $+V_S$ to change the compensation and increase the gain bandwidth product of the amplifier to 1 MHz. Otherwise, connect BW to $-V_S$ for a 200 kHz gain bandwidth product.

SETTING THE GAIN

There are several ways to configure the **AD8237**. The transfer function of the **AD8237** in the configuration in Figure 65 is

$$V_{OUT} = G(V_{+IN} - V_{-IN}) + V_{REF}$$

where:

$$G = 1 + \frac{R2}{R1}$$

Table 7. Suggested Resistors for Various Gains (1% Resistors)

R1 (kΩ)	R2 (kΩ)	Gain
None	Short	1.00
49.9	49.9	2.00
20	80.6	5.03
10	90.9	10.09
5	95.3	20.06
2	97.6	49.8
1	100	101
1	200	201
1	499	500
1	1000	1001

Whereas the ratio of $R2$ to $R1$ sets the gain, the designer determines the absolute value of the resistors. Larger values reduce power consumption and output loading; smaller values limit the FB input bias current and input impedance errors. If the parallel combination of $R1$ and $R2$ is greater than about 30 kΩ, the resistors start to contribute to the noise. For best output swing and linearity, keep $(R1 + R2) \parallel R_L \geq 10$ kΩ.

The bias current at the FB pin is dependent on the common-mode and differential input impedance. FB bias current errors from the common-mode input impedance can be reduced by placing a resistor value of $R1 \parallel R2$ in series with the REF terminal, as shown in Figure 66. At higher gains, this resistor can simply be the same value as $R1$.

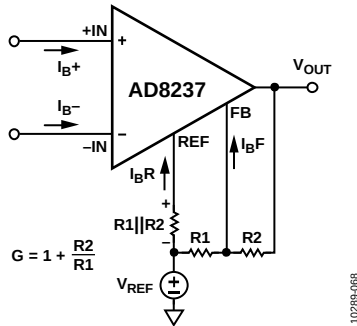


Figure 66. Cancelling Error from FB Input Bias Current

Some applications may be able to take advantage of the symmetry of the input transconductance amplifiers by canceling the differential input impedance errors, as shown in Figure 67. If the source resistance is well known, setting the parallel combination of $R1$ and $R2$ equal to R_S accomplishes this. If practical resistor values force the parallel combination of $R1$ and $R2$ to be less than R_S , add a series resistor to the FB input to make up for the difference.

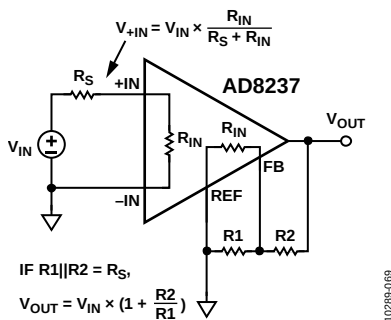


Figure 67. Canceling Input Impedance Errors

GAIN ACCURACY

Unlike most instrumentation amplifiers, the relative match of the two gain setting resistors determines the gain accuracy of the AD8237 rather than a single external resistor. For example, if two resistors have exactly the same absolute error, there is no error in gain. Conversely, two 1% resistors can cause approximately 2% maximum gain error at high gains. Temperature coefficient mismatch of the gain setting resistors increases the gain drift of the instrumentation amplifier circuit according to the gain equation. Because these external resistors do not have to match any on-chip resistors, resistors with good TCR tracking can achieve excellent gain drift without the need for a low absolute TCR.

For the best performance, keep the two input pairs (+IN and -IN, and FB and REF) at similar dc and ac common-mode potentials. This has two benefits. For dc common-mode, this minimizes the gain error of the AD8237. For ac common-mode, this yields improved frequency response. There is a maximum rate at which the ALS circuit can shift the common-mode voltage, which is shown in Figure 27. Because of this limit, the best large signal frequency response is achieved when the ac common-mode voltage of the two input pairs are matched. For example, if the negative input is at a fixed voltage and the positive input is driven with a signal, the feedback input moves with the positive input; therefore, the ac common-mode voltage of the two input pairs is the same. The effect of this is shown in Figure 25 and Figure 26.

CLOCK FEEDTHROUGH

The AD8237 uses nonoverlapping clocks to perform the chopping and ALS functions. The input voltage-to-current amplifiers are chopped at approximately 27 kHz.

Although there is internal ripple-suppression circuitry, trace amounts of these clock frequencies and their harmonics can be observed at the output in some configurations. These ripples are typically 100 μ V RTI when the bandwidth is greater than the clock frequency. They can be larger after a transient pulse but settle back to nominal, which is included in the settling time specifications. The amount of feedthrough at the output is dependent upon the gain and bandwidth mode. The worst case is in high bandwidth mode when the gain can be almost 40 before the clock ripple is outside the bandwidth of the amplifier. For some applications, it may be necessary to use additional filtering after the AD8237 to remove this ripple.

INPUT VOLTAGE RANGE

The allowable input range of the AD8237 is much simpler than traditional architectures. For the transfer function of the AD8237 to be valid, the input voltage must follow two rules

- Keep the differential input voltage within the limits shown in Figure 14; approximately $\pm(\text{Total Supply Voltage} - 1.2)$ V.
- Keep the voltage of the inputs (including the REF and FB pins) and the output within the specified voltage range, which are approximately the supply rails.

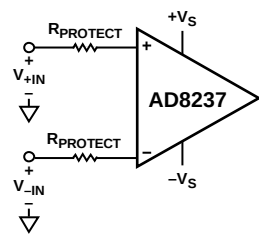
Because the output swing is completely independent of the input common-mode voltage, there are no hexagonal figures or complicated formulas to follow, and no limitation for the output swing the amplifier has for input signals with changing common mode.

INPUT PROTECTION

If no external protection is used, keep the inputs of the [AD8237](#) within the voltages specified in the absolute maximum ratings. If the application requires voltages beyond these ratings, input protection resistors can be placed in series with the inputs of the [AD8237](#) to limit the current to 5 mA. For example, if $+V_S$ is 3 V and a 10 V overload voltage can occur at the inputs, place a protection resistor of at least $(10\text{ V} - 3\text{ V})/5\text{ mA} = 1.4\text{ k}\Omega$ in series with the inputs.

POSITIVE VOLTAGE PROTECTION:

$$R_{\text{PROTECT}} > \frac{V_{\text{IN}} - +V_S}{5\text{ mA}}$$



NEGATIVE VOLTAGE PROTECTION:

$$R_{\text{PROTECT}} > \frac{-V_S - V_{\text{IN}}}{5\text{ mA}}$$

Figure 68. Protection Resistors for Large Input Voltages

FILTERING RADIO FREQUENCY INTERFERENCE

The [AD8237](#) contains an on-chip RFI filter that is sufficient for a majority of applications. For applications where additional radio frequency immunity is needed, an external RFI filter can also be applied as shown in Figure 69.

$$\text{DIFFERENTIAL FILTER CUTOFF} = \frac{1}{2\pi R (2C_D + C_C)}$$

$$\text{COMMON-MODE FILTER CUTOFF} = \frac{1}{2\pi R C_C}$$

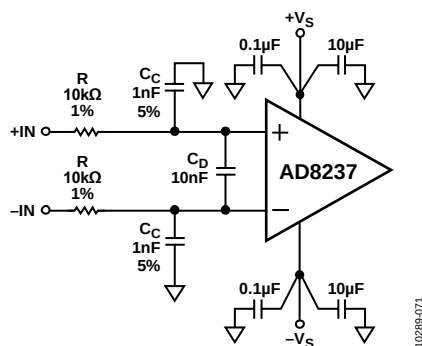
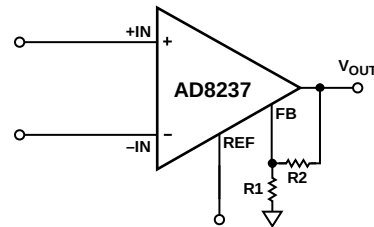


Figure 69. Adding Extra RFI Filtering

USING THE REFERENCE PIN

In general, instrumentation amplifier reference pins can be useful for a few reasons. They provide a means of physically separating the input and output grounds to reject ground bounce common to the inputs. They can also be used to precisely level shift the output signal. In the configuration shown in Figure 65 through Figure 67, the gain of the reference pin to the output is unity, as is common in a typical in-amp. Because the reference pin is functionally no different from the positive input, it can be used with gain, as shown in Figure 70.

This configuration can be very useful in certain cases, such as dc removal servo loops, which typically use an inverting integrator to drive REF and compensate for a dc offset. This requires special attention to the input range (especially at REF) and the output range. All three input voltages are referred to the one ground shown, which may need to be a low impedance midsupply.



$$V_{\text{OUT}} = (V_{\text{REF}} + V_{\text{+IN}} - V_{\text{-IN}}) \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

Figure 70. Applying Gain to the Reference Voltage

Traditional instrumentation amplifier architectures require the reference pin to be driven with a low impedance source. In these traditional architectures, impedance at the reference pin degrades both CMRR and gain accuracy. With the [AD8237](#) architecture, resistance at the reference pin has no effect on CMRR.

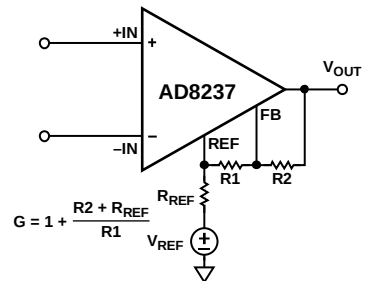


Figure 71. Calculating Gain with Reference Resistance

Resistance at the reference pin does affect the gain of the AD8237; however, if this resistance is constant, the gain setting resistors can be adjusted to compensate. For example, the AD8237 can be driven with a voltage divider, as shown in Figure 72.

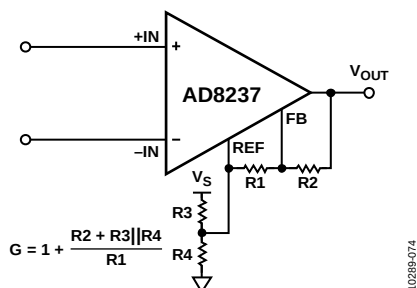


Figure 72. Using Voltage Divider to Set Reference Voltage

LAYOUT

Common-Mode Rejection Ratio over Frequency

Poor layout can cause some of the common-mode signal to be converted to a differential signal before reaching the in-amp. This conversion can occur when the path to the positive input pin has a different frequency response than the path to the negative input pin. For best CMRR vs. frequency performance, closely match the impedance of each path. Place additional source resistance in the input path (for example, for input protection) close to the in-amp inputs to minimize interaction between the resistors and the parasitic capacitance from the printed circuit board (PCB) traces.

Power Supplies

Use a stable dc voltage to power the instrumentation amplifier. Noise on the supply pins can adversely affect performance. For more information, see the PSRR performance curves in Figure 17 through Figure 20.

Place a 0.1 μF capacitor as close as possible to each supply pin. As shown in Figure 73, a 10 μF tantalum capacitor can be used farther away from the part. This capacitor, which is intended to be effective at low frequencies, can usually be shared by other precision integrated circuits. Keep the traces between these integrated circuits short to minimize interaction of the trace parasitic inductance with the shared capacitor. If a single supply is used, decoupling capacitors at $-V_S$ can be omitted.

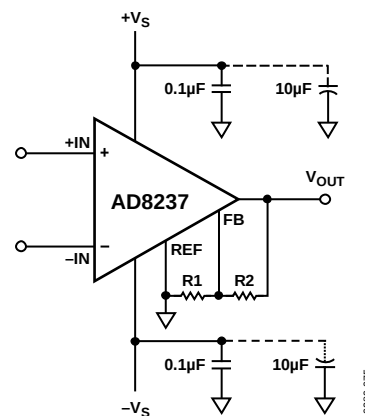


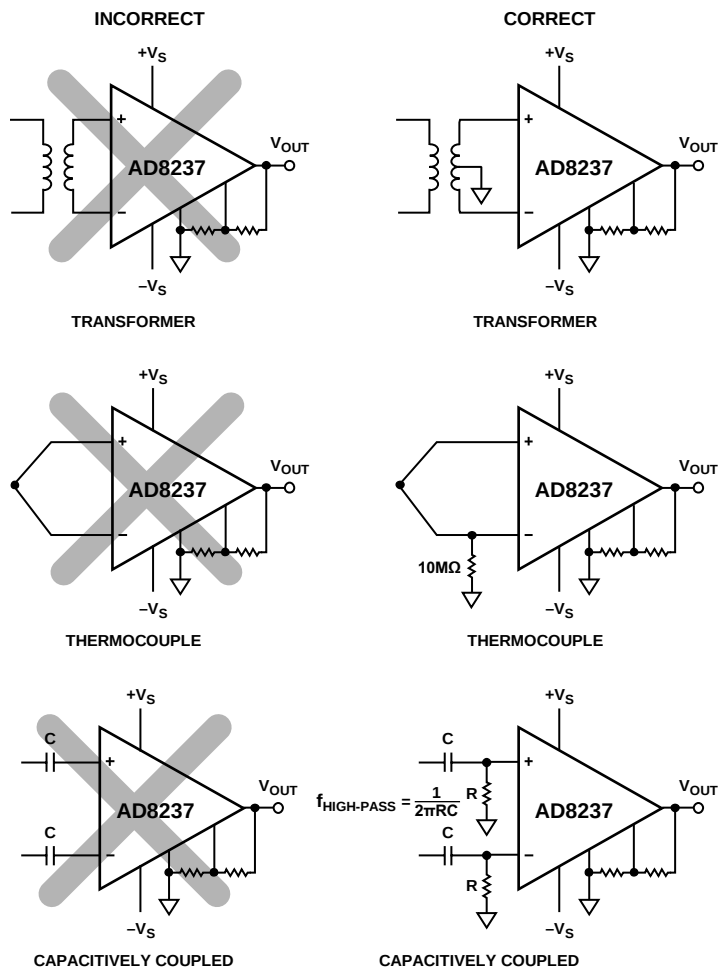
Figure 73. Supply Decoupling, REF, and Output Referred to Local Ground

Reference

The output voltage of the AD8237 is developed with respect to the potential on the reference terminal. Take care to tie REF to the appropriate local ground.

INPUT BIAS CURRENT RETURN PATH

The input bias current of the AD8237 must have a return path to ground. When the source, such as a thermocouple, cannot provide a return current path, create one, as shown in Figure 74.

Figure 74. Creating an I_{BIAS} Path

APPLICATIONS INFORMATION

BATTERY CURRENT MONITOR

The micropower current consumption, unique topology, and rail-to-rail input of the AD8237 make it ideal for battery-powered current sensing applications. When configured as shown in Figure 75, the AD8237 is able to obtain an accurate high-side current measurement for both charging and discharging. Depending on the nature of the load, $+V_S$ may require RC decoupling. Use Kelvin sensing methods to achieve the most accurate results.

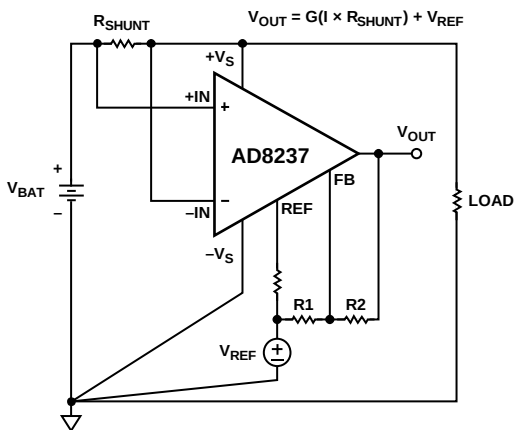


Figure 75. Battery-Powered Current Sense

10298-077

PROGRAMMABLE GAIN IN-AMP

Most integrated circuit instrumentation amplifiers use a single resistor to set the gain, which is in a low impedance path. Any component placed between the gain setting pins has current flowing through it, which adds to the gain resistance. Typical CMOS switches have on resistance, R_{ON} . R_{ON} is not well controlled, is nonlinear with input voltage, and has high drift. This creates large gain errors and distortion at the output of the in-amp. This R_{ON} problem has made it difficult to build a precision programmable gain in-amp in the past. With the AD8237 topology, the switches can be placed in a high impedance sense path, eliminating the parasitic resistance effects. Figure 76 shows one way to accomplish programmable gain. Some applications may benefit from using a digital potentiometer instead of a multiplexer.

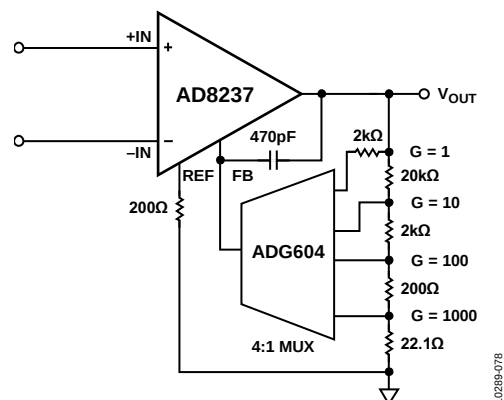


Figure 76. Programmable Gain with a Multiplexer

10298-078

AD8237 IN AN ECG FRONT END

Electrocardiogram (ECG) circuits must operate with a differential dc offset due to the half-cell potential of the electrodes. The tolerance for this over potential is typically ± 300 mV; however, it can be a volt or more in some situations. As ECG circuits move to lower supply voltages, the half-cell potential problem becomes more difficult, strictly limiting the gain that can be applied in the first stage. The AD8237 architecture provides a unique solution to this problem.

If the REF pin is left unconnected to the gain setting network, a low frequency inverting integrator can be connected from the output to the REF pin. Because the AD8237 applies gain to the integrator output, the integrator only has to swing as far as the dc offset to compensate for it, rather than the dc offset multiplied by the gain.

With this system architecture, large gains can be applied at the in-amp stage, and the requirements of the rest of the system can be greatly reduced. This also reduces noise and offset error contributions from devices after the in-amp in the signal path. The circuit in Figure 77 illustrates the core concept. Additional op amps can be added for improved performance, such as input buffering, filtering, and driven lead, if it is required by the system. Proper decoupling is not shown.

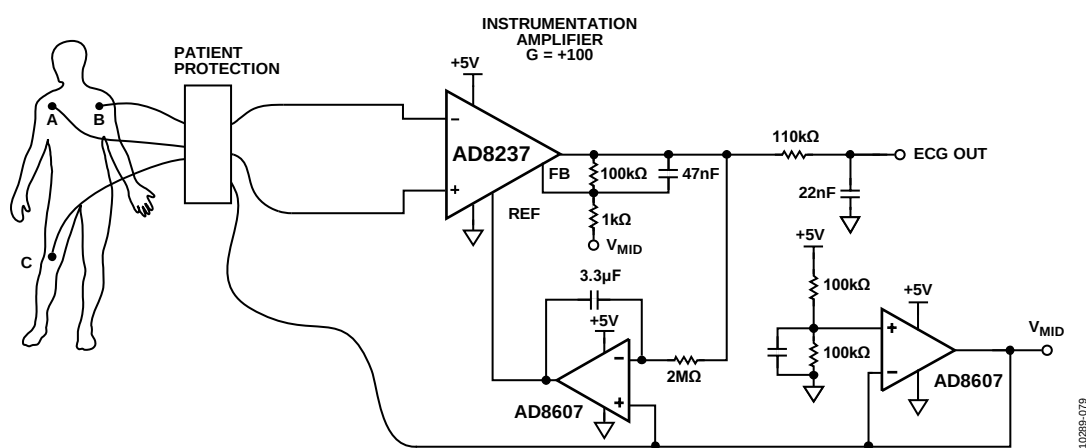
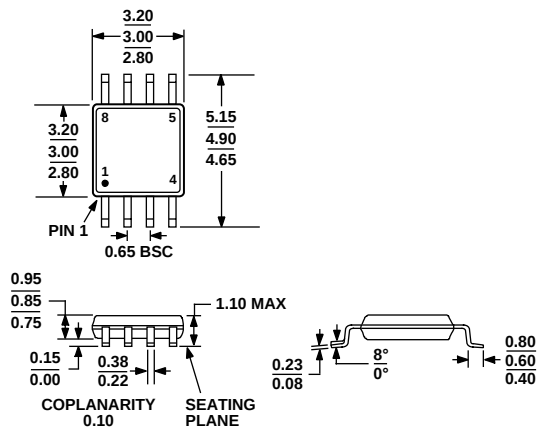


Figure 77. AD8237 in ECG

10289-079

OUTLINE DIMENSIONS



COMPLIANT TO JEDEC STANDARDS MO-187-AA

Figure 78. 8-Lead Mini Small Outline Package [MSOP]
(RM-8)

Dimensions shown in millimeters

ORDERING GUIDE

Model ¹	Temperature Range	Package Description	Package	Branding
AD8237ARMZ	−40°C to +125°C	8-Lead Mini Small Outline Package [MSOP], Tube	RM-8	Y4H
AD8237ARMZ-R7	−40°C to +125°C	8-Lead Mini Small Outline Package [MSOP], 7-Inch Tape and Reel	RM-8	Y4H
AD8237ARMZ-RL	−40°C to +125°C	8-Lead Mini Small Outline Package [MSOP], 13-Inch Tape and Reel	RM-8	Y4H

¹ Z = RoHS Compliant Part.

User Guide

Loadsensing Analog 4 channel Datalogger (LS-G6-ANALOG-4)

Version 1.9



Table of contents

Before starting to use Analog Data logger	2
Overview of the Loadsensing Analog Devices	3
Analog Datalogger Specifications	4
Equipment provided	4
Data Logger Mounting accessories	6
Sensor interfaces	7
Powering the wireless data logger	16
Loadsensing Device Configuration	17
Specific features on the CMT - Low battery message	32
Maintenance and troubleshooting	33
Battery Lifespan	34
Data Storage	40
Environmental practices	42
FAQs	44
CONTACT WORLDSENSING	46

Before starting to use Analog Data logger

Please read these instructions carefully and ensure that the required conditions specified in this document are met before using the product. Each of our edge devices includes this information inside the packaging

General warnings

- Follow these precautions to avoid a battery explosion or leakage of flammable liquid or gas:
 - Use the correct battery type. Dispose of the batteries according to instructions. Do not dispose of the batteries by throwing them into a fire or a hot oven, or mechanically crush or cut them.
 - Do not leave the batteries in an extremely high-temperature environment.
 - Do not subject the batteries to extremely low air pressure. It may result in an explosion or leakage of flammable liquid or gas.
 - Do not short circuit the batteries. This will blow the protection fuse.
- Batteries and equipment to be connected via the data port must meet IEC 62368-1 ES1 and PS1 requirements.
- Equipment to be installed in restricted access areas.

Symbol	Description
	Caution. Do not proceed until the instructions are clearly understood and all required conditions are met.
	Read the instructions for use carefully before using.
	Caution, hot surface.
	According to the European Union WEEE Directive 2012/19/EU, this product and its batteries should not be discarded as unsorted waste. Please send them to separate collection facilities for recovery and recycling. It is your responsibility to dispose of your waste equipment and batteries properly. The correct disposal of your old equipment and batteries will help prevent potential negative consequences for the environment and human health.

Overview of the Loadsensing Analog Devices

This user guide explains the basic procedure for configuring and operating Worldsensing's Loadsensing LS-G6 analog node (LS-G6-ANALOG-4). You can find further technical details in our [data sheets](#).

The Loadsensing analog data logger is a 4-channel low-power, long-range wireless edge device. This logger admits most inputs from analog sensors, such as voltage, 4-20mA, potentiometer, FWB, thermistor or PT100, allowing it to easily connect load cells, strain gauges and pressure cells .

The Loadsensing analog data logger can also be used as a standalone logger for manual monitoring. It can be configured easily and connected with a USB cable and an Android phone.

Loadsensing analog nodes can be used for geotechnical applications in civil works, tunnel construction, landslides and mining and other industrial applications.

Analog Datalogger Specifications

You can check the Analog datalogger specifications [here](#)

Equipment provided

When ordering the code LS-G6-ANALOG-4 the set will contain the following items:

- Analog data logger.
- Antenna.
- Antenna adapter.

The following items are not included:

- A USB-OTG configuration cable.
- Batteries.
- A grounding connector.
- Mounting support .

The analog logger comprises the following parts:

Aluminum alloy case	
An easy to use grounding screw	
Accessible IP68 USB for communications and external powering with mini USB B female connection	
RP N female connector	

Male RP N connector to RP - SMA male and aerial with RP - SMA male.	
4 Cable glands to connect sensors (clamping range Ø4.5-Ø10mm)	
Gore valve	

Table 1: Summary of the most relevant mechanical parts from the analog logger.

Data Logger Mounting accessories

The accessories that can be used for attaching the analog nodes are available on the [Accessories List](#) document in our knowledge base.

Depending on the application and the conditions of the site, the analog node can be mounted:

- On a wall, using a metallic (LS-MEC-MP-001) mounting support.
- On a 35-mm or 50-mm mounting pole, using an aluminum mounting plate (WS-ACC-POLE-PL8). Nuts and U-bolts for pole diameter of less than 35 mm and 50 mm can be also purchased (WS-ACC-U35 and WS-ACC-U50).
- Inside a manhole, with a plastic or metallic cover. No special accessories are available for this type of mounting. Even though the data loggers are IP67 certified, if they are closed following the instructions in the chapter on [water](#)

[tightness document](#), we strongly recommend reading the [Data Logger Installation in Manholes](#) guide.

Sensor interfaces

Analog datalogger can power sensors at 5/12/24 VDC up to 60 mA and provide compatibility with the following interfaces within the specs presented on the chapter *analog datalogger specifications*:

- Potentiometer
- Full Wheatstone bridge (FWB)
- current loop (2-3 wires)
- voltage
- Thermistor
- PT 100

The node has 4 channels and the first one includes 3 control ports, that are reserved for custom applications, plus eight additional connectors :

- 01
- I/O2
- I/O1
- ground terminal *AGND*
- 4-20 mA terminal
- Control terminal *CE1N*
- sensor out *CH-*
- sensor out *CH+*
- *CEIP* terminal
- 5V input terminal
- power input (12/24 VDC) *PWR*



Image 1: Channels and connectors from the analog logger.

Note: Loadsensing does not read HART interface (digital signal over the 4-20 mA), please check if any of the functions provided by Hart are necessary for the application.

Please note that there are 4-20 mA sensors which are required to be read dynamically (i.ex an anemometer that measures the speed of wind). Loadsensing analog datalogger can measure the 4-20mA output but has been designed to read periodic static monitoring signals.

Please note that some sensors output 0mA as a fault alarm and Loadsensing has not been designed to detect those alarms, as it reads within a range of 4-20 mA.

D. Voltage interface

Voltage interface of Loadsensing can measure DC signals within the range of +/-10V and reads with better accuracy smaller ranges.

There are two different inputs that can be measured:

- single ended: which measures the voltage difference between a wire and the ground. This type of input is less protected against noise immunity. To connect a sensor as a single ended voltage on the analog node the negative input needs to be connected to node ground
- differential: this input carries the signal on two wires, a (+) signal wire and a (-) signal wire and has no reference to ground. This type of input is more protected against noise immunity

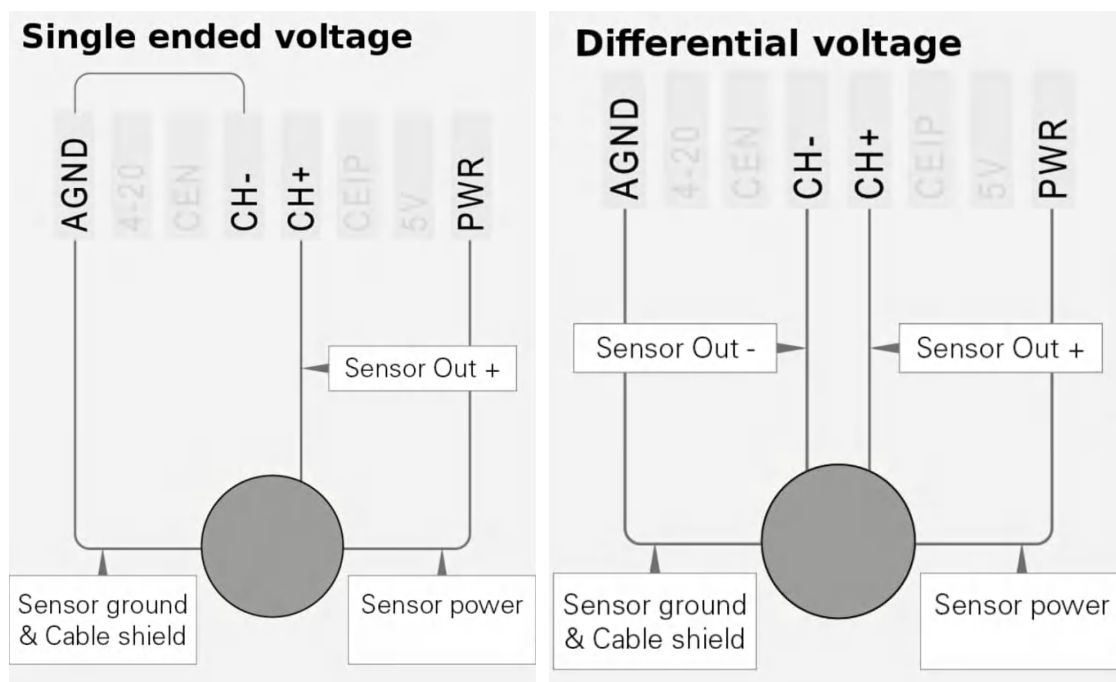


Image 5: Ws App voltage sensors wiring guide.

Note: Loadsensing can not measure 2 single ended input with one differential input

There are sensors on the market that their input signal is too small compared to the Loadsensing measured range. Please note that it is not possible to apply a gain with Loadsensing to adapt the input signal and match the instrument range. We strongly recommend using sensors adapted to the ranges measured by Loadsensing to benefit from the maximum resolution of the data obtained.

Powering the wireless data logger

The Loadsensing vibrating wire nodes are shipped closed, without batteries. To power it up, follow these steps:

1. Open the vibrating wire node using a 2.5 mm Allen key.
2. Insert **C-type batteries** in the battery holders (more batteries will give the logger a longer life for a given configuration). See our [LS G6 data logger recommended batteries guide](#) for further information.

Please note our devices have reverse battery protection but it is not safe to keep batteries reversed in the node for a long time.

Warning: There is a risk of explosion if you use the wrong batteries. Dispose of batteries according to instructions and refer to the General Warnings from below.

Please note that since serial 52594 and above, the ½ AA size battery holder that was present in the datalogger that hosted the RTC battery in order to keep time, have been removed from the battery board to simplify the product installation and maintenance and in line with our thrust to provide more environmentally sustainable products by reducing battery waste.

Please take note that this update shall have no impact whatsoever on the performance of the edge device, as since Gateway firmware version 1.12.1 the Gateway is able to check if the node is on time. If it's not, a time synchronization message is sent.

3. As well as batteries, the logger can be powered with external power. There is a power mode switch on the node. Turn it to whichever power mode you are using. Please take a look at the [External power options document](#) before using this option.

General Warnings

- We advise during usage of the batteries to observe the following precautions:
 - Risk of explosion if the battery is replaced with an incorrect type.
 - Disposal of the battery into fire or a hot oven, or mechanically crushing or cutting of a battery, can result in an explosion.
 - Leaving the battery in an extremely high temperature surrounding environment can result in an explosion or the leakage of flammable liquid or gas.
 - The battery subjected to extremely low air pressure that may result in an explosion or the leakage of flammable liquid or gas.
 - Short-circuiting the battery will result in blowing the protection fuse.
- Batteries and equipment to be connected via the data port must meet the requirements of ES1 and PS1 according to the IEC 62368-1.
- Equipment to be installed in restricted access areas.

Loadsensing Device Configuration

We strongly recommend configuring the Loadsensing device on location so you can conduct an on-site radio coverage test at the same time.

Device configuration has to be carried out using the Worldsensing Android app (WS App), which is compatible with USB On-The-Go (OTG) Android devices. Please refer to the [Worldsensing app User Guide](#) for more details. To make sure the app works properly, we recommend purchasing one of the mobile phone models in stock from Worldsensing. Please contact the technical support team for more information.

WS App starts up once the Android device is connected to the Loadsensing node using an USB-OTG cable. It does not need to be started up manually.

The whole configuration process takes no more than five minutes. From then on, the Loadsensing node will start taking readings and sending data to the gateway.

The process for configuring the analog is the same as the other nodes and it is detailed in the Worldsensing App user guide.

The user will need to enable the channels where the sensors are connected to and select the interface from the sensor that is going to be configured.

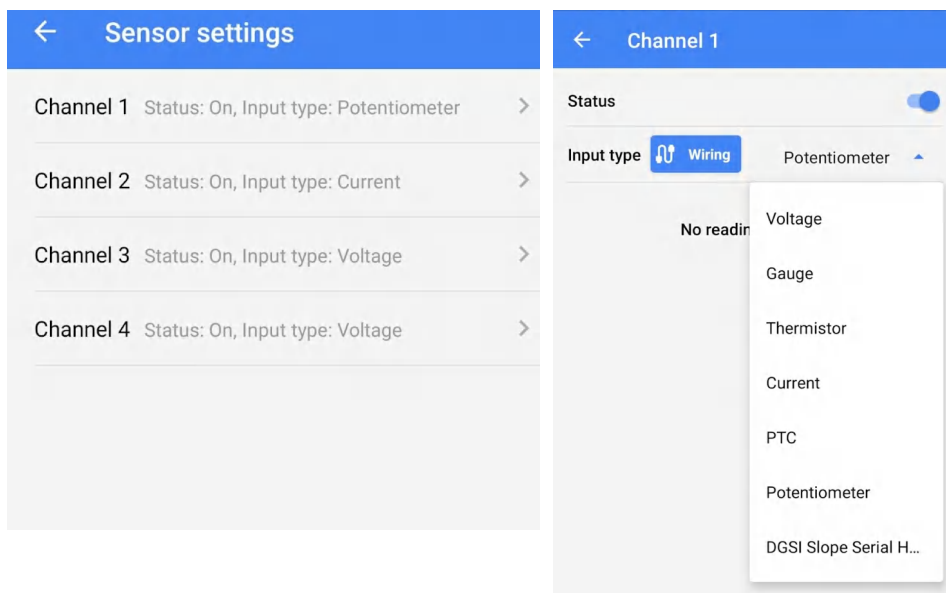


Image 9: Ws App sensor interfaces that can be selected with the analog node.

The wiring is provided on the wiring icon for each interface (also attached on sensor interface chapter)

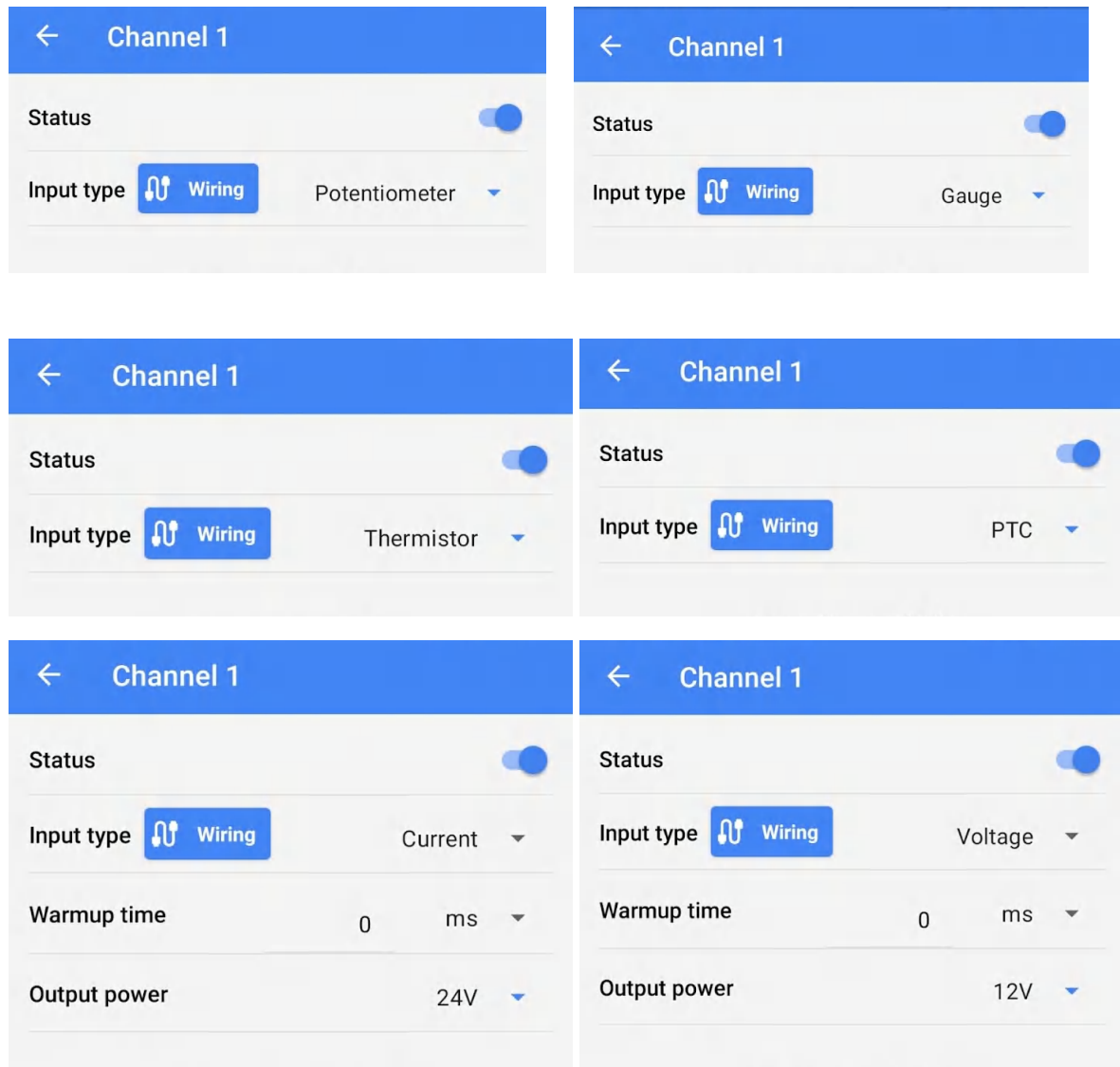


Image 10: Ws App sensor interfaces that can be selected with the analog node and different parameters that need to be selected for its configuration.

There are some configurations and functionalities that are particular for the analog node which are mentioned below.

While configuring the current loop and voltage interfaces the user will be able to select 0 V of power excitation (besides 12 V/ 24 V). This option has been designed for sensors that will be externally powered.

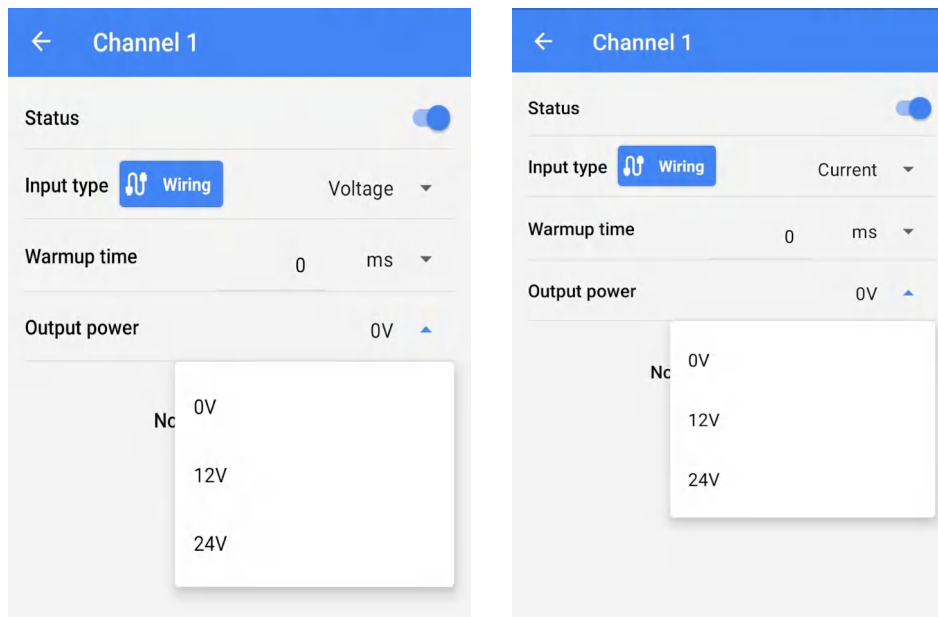


Image 11: Ws App power options when powering voltage and current loop sensors.

Please note that besides the power excitation, voltage and current sensors will require a warm up time for configuration. The WS APP allows the user typing its value and selecting between milliseconds (ms) and seconds (s).

Note: The voltage interface has not been designed to power sensors at 5V (that is why the option of 5V is not available on the WS App). Although that, is possible to power a voltage sensor through the 5V input terminal by selecting any of the output power and applying the warm up time, if required.

For the DGSi slope serial HD IPI the user is able to configure the number of sensors connected to the chain (up to 16 sensors can be connected to a single chain) and also select the type of sensors that is configured (uniaxial or biaxial).

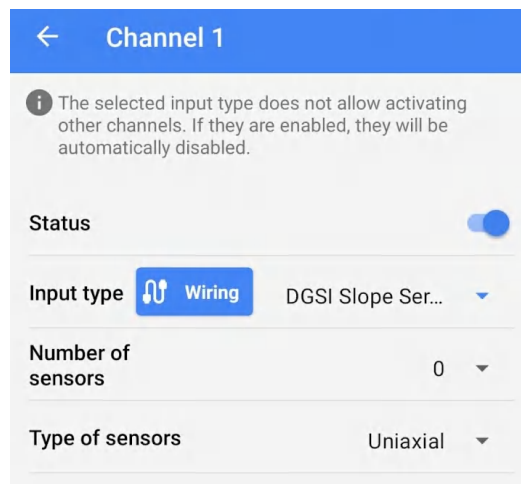


Image 12: Ws App configuring options for DGSi HD IPI sensors.

User Guide

Worldsensing mobile app

Version 2.8



Document Information

Creation Date	20/04/2021	Document description	How Worldsensing mobile App works.
---------------	------------	----------------------	------------------------------------

Version	Date	Author	Description
2021-01	20/07/2021	Customer Success	Version 1.0.4
2021-02	03/12/2021	Customer Success	Version 2.0.1
2022-03	20/05/2022	Customer Success	Version 2.1.0
2022-11	02/11/2022	Customer Success	Version 2.4.0
2023-03	23/03/2023	Customer Success	Version 2.5.0
2023-06	27/06/2023	Customer Success	Version 2.6.1
2023-12	29/12/2023	Customer Success	Version 2.8
2024-04	20/04/2024	Customer Success	Version 2.9

Contents

Document Information	1
Contents	1
Legal Disclaimer	4
Purpose	5
Initial steps	6
How to get the Worldsensing App	6
Step 1: Download the app	6
Step 2: Delete the older version of the app	7
App installation	7
Edge device power supply	8
Connection	9
Coexistence with the Dlog App	10
Getting started	10
No connection	10
Updating the app	11
Set the correct date and time	12
Update the edge device firmware	12
Edge device connection problem	13
Main page	14
Edge device information	14
Change the edge device ID	15
More edge device info	17
Setup wizard	17
Add location	18
Sensor settings	20
Sensor manufacturer (Only DIG node)	20
Take a sample	21
Radio type	21
Region	22
Radio types for CMT Edge	22
Radio types for CMT Cloud	23
Advanced Radio options	24
Network or server credentials	25
Node registration on CMT Edge	25
Network credentials	25
Node registration on CMT Cloud	26
Online registration	26
Choose a network	28
Offline registration	28

Radio coverage test	30
Online coverage test (CMT Edge)	31
Online coverage test (CMT Cloud)	32
Offline coverage test	34
Link check test	34
Network size	37
Reporting period	38
Device configured correctly	39
Set last configuration	40
Take a sample	41
Edge device model-specific options	42
Calibration parameters	43
Sensor settings	43
Sensor manufacturer (DIG node)	45
Laser pointing mode	46
Download Data	46
Radio Coverage Test (stand-alone)	49
Online	52
Offline	53
Link check test	54
Firmware update (stand-alone)	57
Available firmwares per node	58
Set the current time	59
Factory reset	60
Reboot node	61
Worldsensing App folder	61
FAQS	63
CONTACT WORLDSENSING	65

Initial steps

How to get the Worldsensing App

From version 2.9 and above, the Worldsensing App is available for download on the Google Play Store and will be the only distribution channel.

Step 1: Download the app

1. On your Android device, scan this QR that will take you to the Worldsensing App in the Google Play Store.



Figure 1: QR code to access the Worldsensing App published in the Google Play Store

Alternatively, copy paste this URL in your device's preferred browser

<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.worldsensing.loadsensing.wsapp>

You can also go to the Google Play Store on your Android device and search for “Worldsensing” in the app search box.

2. Once you reach the Worldsensing App page in the Google Play Store, tap the download button. You will be prompted to accept the app download according to your privacy preferences.
3. Once downloaded, your new app will sit in your application screen along with the old version ready to be used.



Figure 2: the new version of the App next to the old version. The old one can be safely deleted after downloading version 2.9.0

Version 2.9 will sit along the old version of the app in your Android device if it was already installed. The older version can be safely deleted.

Step 2: Delete the older version of the app

4. Confirm you can access and operate the Worldsensing App 2.9.0
5. After confirming correct access to the Worldsensing App 2.9.0 you can safely delete the older version. Newer versions will be automatically updated under the same icon of version 2.9.0 when available and accepted by the user.

Downloading the Worldsensing App from the Google Play Store gives you an extra layer of security and an enhanced user experience.

Security: Applications that are published through the store keep consumers safe by building rigorous protections and requiring developers to follow high safety standards.

Updates: Allows Worldsensing to alert you automatically through the app about new versions available, so you have the latest version as soon as it's published, with quick access to the change log and latest additions.

App installation

Before installing the app, please check if your device complies with these points:

- From version 2.9.0 onwards, the Worldsensing App will only operate on Android devices with operating system (OS) 8.0 or higher. Please, update your android device to the latest OS.
- Android device is USB-OTG compatible.



About app file management permissions

Please note that your device will ask for your permission to grant access to the Worldsensing App to store data when executing certain functionalities, such as Radio Coverage Test, Download Data, etc. It will also prompt the native file browser to choose a folder location where these files will be stored. Follow the steps according to your device to successfully grant these accesses for optimum app performance.

Edge device power supply

Some Worldsensing nodes can be powered by both batteries and USB but others only allow battery power. The following nodes **CAN NOT** be powered through USB:

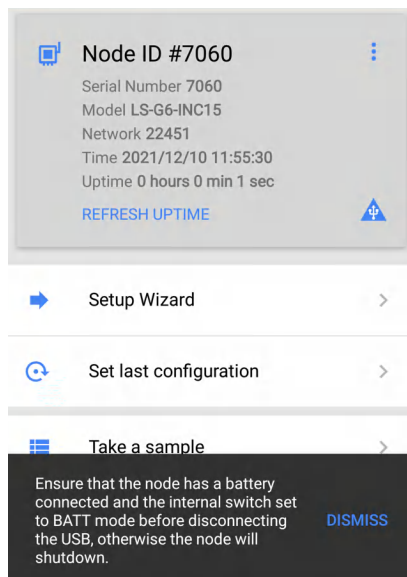
Edge devices		BATT	USB
LS-G6-TIL90-X	Wireless tiltmeter with an external antenna. 3-axis. Range: $\pm 90^\circ$	x	
LS-G6-TIL90-I	Wireless tiltmeter with an internal antenna. 3-axis. Range: $\pm 90^\circ$	x	
LS-G6-TIL90-XE	Wireless tiltmeter with an external antenna. 3-axis. Range: $\pm 90^\circ$. Configured to operate in event detection mode	x	
LSG7ACL-BILH-VIB	Wireless vibration meter	x	
LS-G6-PICO	Piconode analog 1-channel + 1 thermistor + 1 pulse counter data logger	x	

Figure 3: list of edge devices that cannot be powered through the USB connector

It is important to note that these require the use of batteries for configuration and use. Attempting to configure them with drained batteries or without batteries will result in erratic behaviour and inability to operate.

For the other nodes, which can be powered via USB by using the switch between BATT and EXT PWR to choose the power mode, take note that if the configuration is done without batteries, the node will be powered from the wired connection to the mobile device. Once the configuration is finished, when the cable is disconnected, the node will shut down.

Therefore, we recommend that configuration be done with the batteries inserted and, if applicable, the switch is on BATT mode.



If the configuration is being done in EXT PWR mode or without batteries, being powered by the connection to the mobile phone, two warnings will be displayed in the main page:

- Warning at the bottom of the screen which will be displayed until DISMISS is clicked.
- Connection icon in the node information (blue, bottom right corner). This warning will be displayed until the power mode is switched to battery power and click REFRESH UPTIME updating the node data.

Figure 4: warning to properly power the node

For more information, please refer to the [node user guide](#).

Connection

To connect the Android device to the node, you need to use the USB On-The-Go (OTG) cable with a mini USB connection for the node provided by Worldsensing. The other end of the cable can have either a *micro USB* or *USB C* connection depending on the model of the Android device.

If you do not have a cable with the required connection, please contact the [technical support department](#) before purchasing one to ensure that it is compatible.

NOTE: Some Android devices have the option of the USB OTG locked. Each make/model follows a different shape to be able to unlock it. In case of doubt, check the specifications of your device or contact its technical service.

Coexistence with the Dlog App

Dlog configuration application is discontinued, and no longer supported.

Please update the configuration app to the new Worldsensing app in case you have not done it yet, and remove the old Dlog application from your Android device.

Getting started

Connect the node to the Android device via the OTG cable to open the Worldsensing App, if it is set as the default app. Otherwise, select your preferred app once you see the prompt.

Once the app opens, you will see different prompts depending on the status of the app and the node.

No connection

When disconnecting a node or in case of a connection problem, the following screen will be displayed indicating that there is no connection but the app will remain open with the prompt **Waiting for a new connection** to a node.

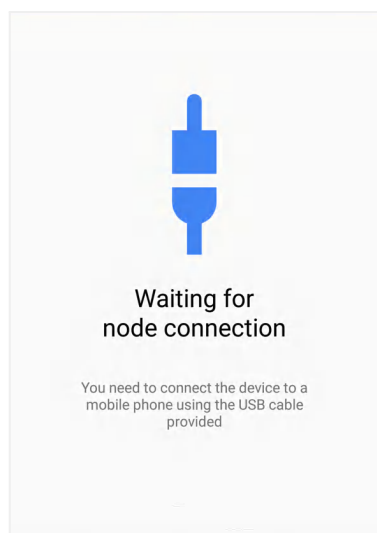
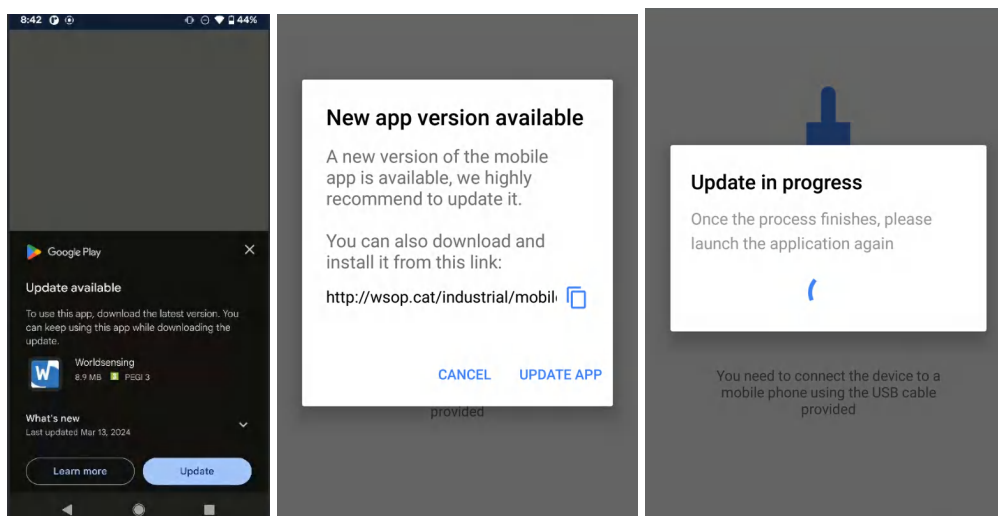


Figure 5: warning about the connection of the node

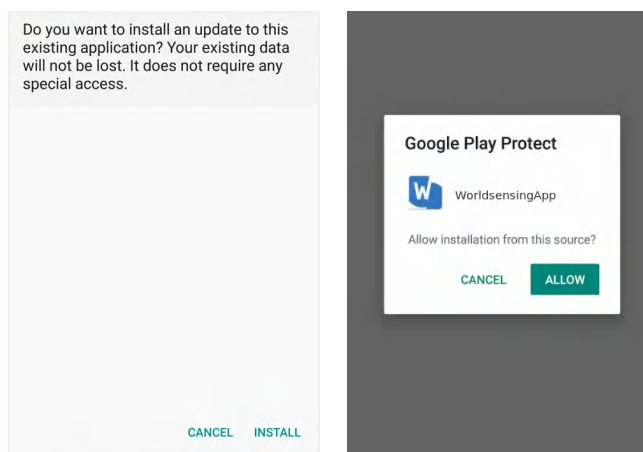
Updating the app

If the Android device is connected to the Internet, you will receive a notification if there is a new app version available.



Figures 6, 7 & 8: examples of notifications to update the WS app

Click **INSTALL** and **ALLOW** to finish the app update.



Figures 9 & 10: example of messages that will appear to complete the update

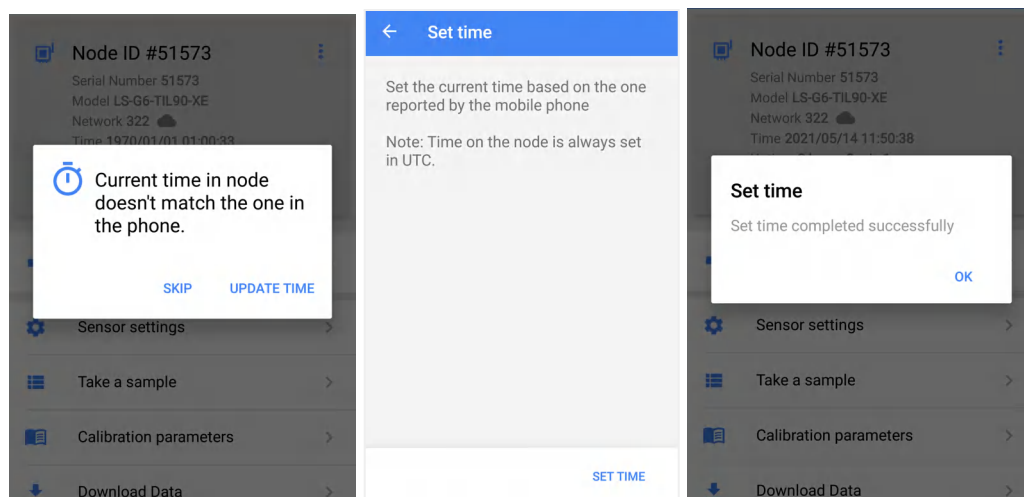
Once the installation is completed, reopen the app to finish the process and to be able to use the latest version.

We recommend always using the latest app version to take advantage of new features, new node firmware versions and to correct previous bugs.

Set the correct date and time

The Android device always checks if the date of the connected node matches the system date and displays a prompt to correct it if needed.

It is important to do this because if the node date is not correct, the node will send data dated 1970 which will be discarded by the gateway and will not be shown in the CSV files.



Figures 11, 12 & 13: sequence for setting the timing of the node

NOTE: The date and time correction can also be done later in the SET CURRENT TIME menu.

Update the edge device firmware

If there is a new version of the node's firmware, you will receive a prompt to update

We recommend keeping the node firmware updated as new versions have new functionalities and bug fixes.

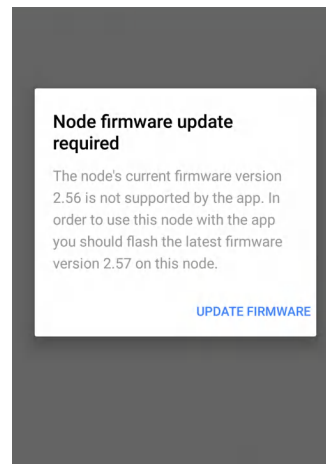


Figure 14: warning about the need of updating the firmware

Edge device connection problem

You will get the prompt below if a problem occurs during the update. The error message lists several causes for this error. Follow the instructions and check these points, then click RETRY to try again.

In case it doesn't work click on FIRMWARE RECOVERY.

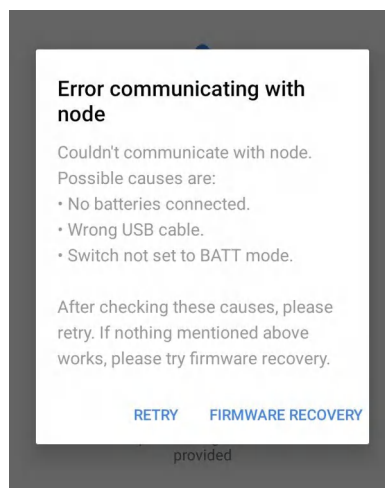


Figure 15: error message that will appear if the communication fails

If after the firmware recovery attempt there are still connection problems, please contact our [technical support department](#).

Main page

The Worldsensing App homepage shows specific information of the node connected to the Android device and the various options to perform the complete configuration of the node, collect data and perform some specific configuration.

Check in the following sections to see all the configuration options (some options are related to the node model, check the [Edge device model-specific options](#) section).

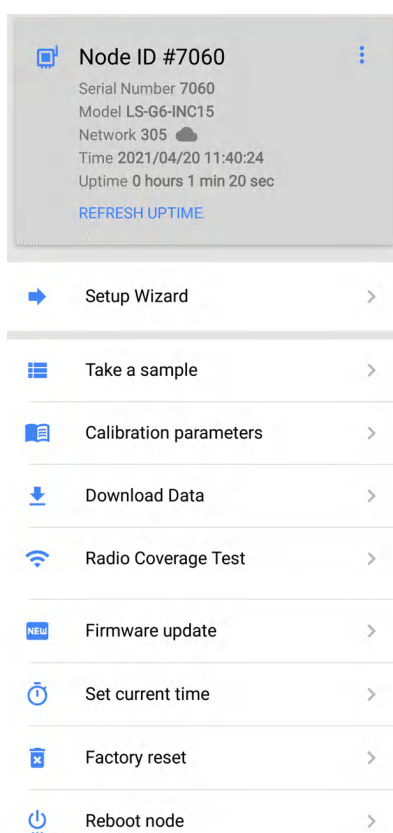


Figure 16: WS app homepage

Edge device information

A summary with the main information of the connected node, such as the node ID, the serial number and model, if it's already connected to a network, the node's time and the uptime is displayed in a grey box.

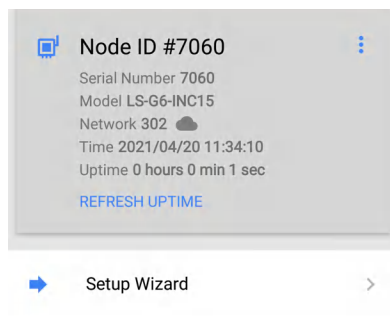
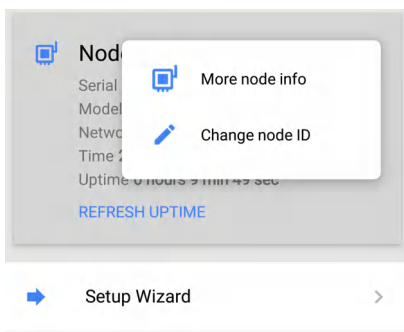


Figure 17: WS app homepage's information

In addition, there is a refresh uptime button to know exactly how long the node has been on without any reboot.

Finally, on the top right, there are three dots to open the node's menu which provides the following:



- **More node info:** *displays the complete node information.*

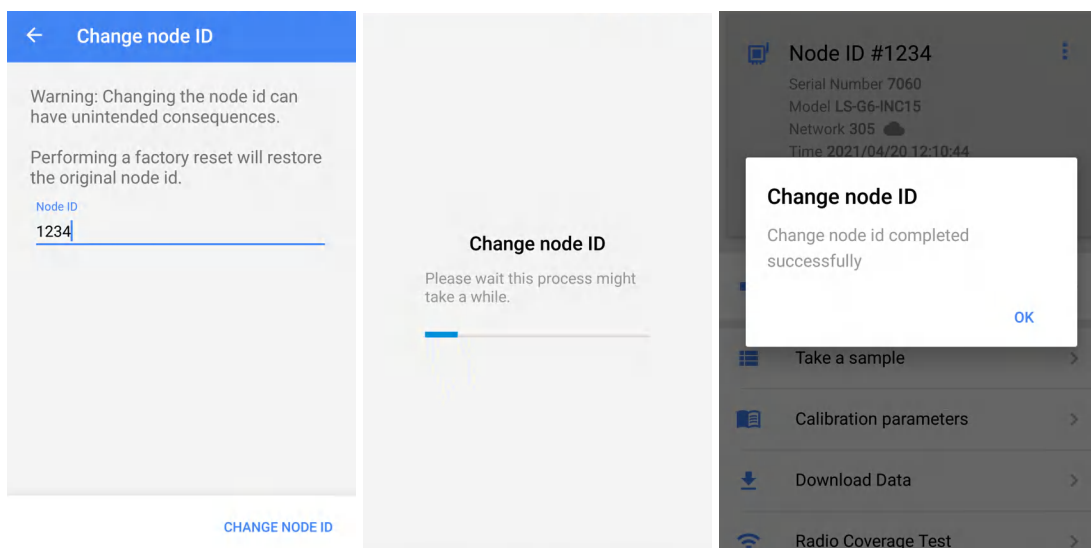
- **Change node ID:** *to change the edge device ID (not the serial number).*

Figure 18: node's menu at the WS app's homepage

Change the edge device ID

The **Change node ID** section allows changing the node ID (not the serial number). This function is recommended to be used only in case you need to replace a node that for some reason is no longer available.

Important: Don't connect two nodes with the same node ID as this may cause data loss and malfunction.



Figures 19, 20 & 21: sequence for changing the node ID

Enter the preferred ID, click CHANGE NODE ID and wait until you see the notification that the change has been made successfully. The updated node ID will now be displayed in the Node information.

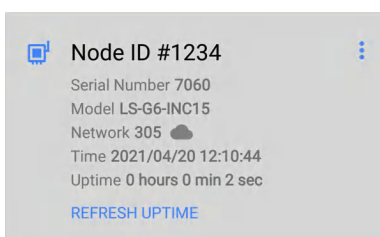


Figure 22: New node ID

In the example below, a node with the serial number (SN) 18919 had its node ID changed to 7060 another node with SN 7060 has stopped working correctly. This will consolidate all the readings from both nodes, with SN 7060 and SN 18919, in the same node ID in the gateway network.

Id	Name	Status	Model	Serial
☐ 7060 1m		OK	LS-G6-INC15	18919

Figure 23: Example of a changed Node Id keeping the original serial number

More edge device info

On the MORE NODE INFO section, all the node information is displayed at the time of access.

The information includes the ode ID, serial number, network ID (if it is already connected)*, model, firmware version, node time, input voltage and temperature.

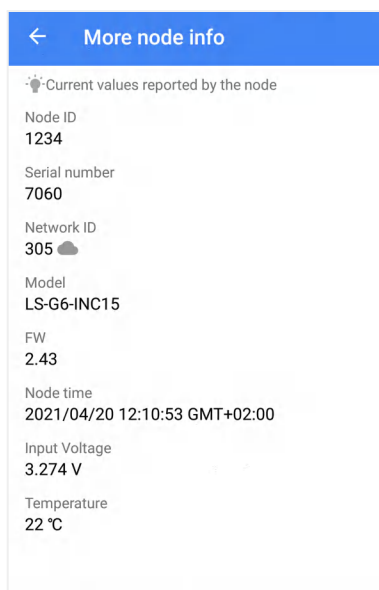


Figure 24: Example of the content under the 'More node info' option

*In case the node is already connected to a CMT Cloud server, a cloud icon will be displayed in addition to the ID. Whereas in CMT Edge only the ID will be displayed. This makes it easy to determine whether the node is connected to a CMT Edge or Cloud.

Setup wizard

The SETUP WIZARD section enables the complete configuration of the node to connect it to CMT (Edge or Cloud). Click NEXT to start the configuration process which will be described in the succeeding sections.

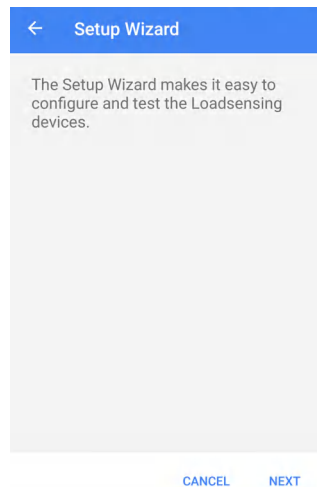
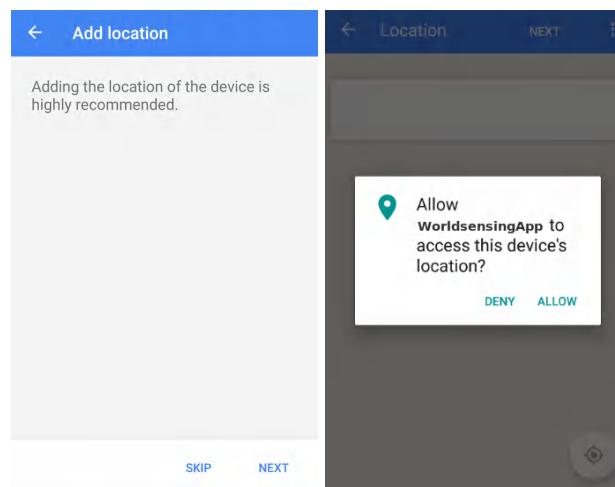


Figure 25: Setup Wizard's message

Add location

The first step of the SETUP WIZARD allows adding the node location so it can also be visible in CMT.

To do this you must allow access to the location of the Android device from the onset. Clicking ALLOW to enable access to the device location. In case the access was denied previously, you must access the device settings and permit the app. If you have any doubts about how to access these permissions, please check the specific information of your device.



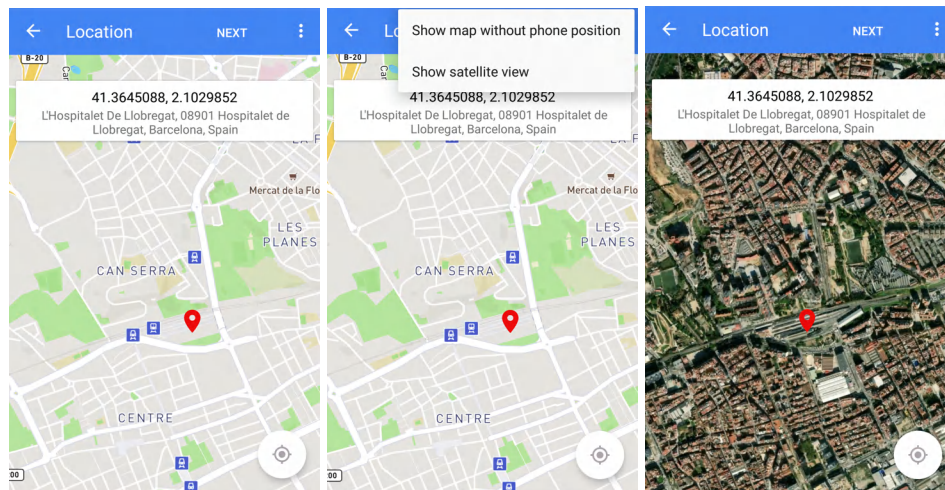
Figures 26 & 27: Setup Wizard's message

The map will show the position of the Android device as well as the exact coordinates taken with the GPS but it is possible to change this initial location by simply clicking on the screen the place you want to use as the node location.

By clicking on the three dots at the top right of the screen, the following options will be displayed:

- **Show map without phone position** in case you don't want to use the default location of the Android device and instead choose the location on the map.
- **Show street map/satellite view** to change the type of map being displayed, either a street map or a satellite view.

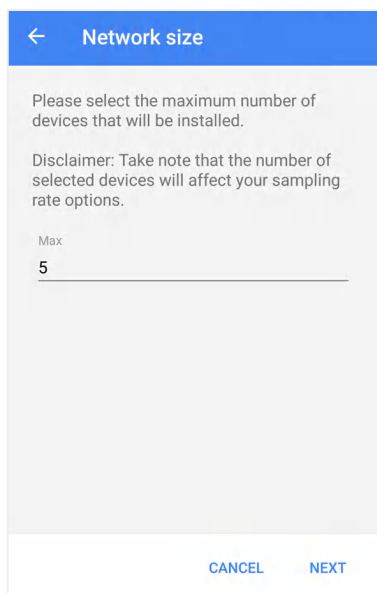
At the bottom right is a grey button that returns the position to the default location of the Android device.



Figures 28, 29 & 30: Sequence for adding the location of the node

Once the location is correctly located, click NEXT to continue with the node configuration process.

Important: The location will only be available in CMT in case an **online coverage test** is performed during the setup wizard and previously added in this step.



← Network size

Please select the maximum number of devices that will be installed.

Disclaimer: Take note that the number of selected devices will affect your sampling rate options.

Max
5

CANCEL NEXT

Figure 66: maximum network size

Reporting period

The reporting period, formerly called the sampling rate, is the frequency at which the node will take data. This can be from every 30 seconds to every 24 hours.

The same reporting period will be applied to all channels in the node, it cannot be set independently for each channel in the node.

This is also directly related to network size, as there are some limitations. The bigger the network (number of nodes), the less frequent reporting period options will be available to prevent message collisions and data loss.

Some nodes may also have reporting period limitations related to the type of sensor connected, warmups and other affecting variables. Please refer to the [node's user guide](#) for more information.

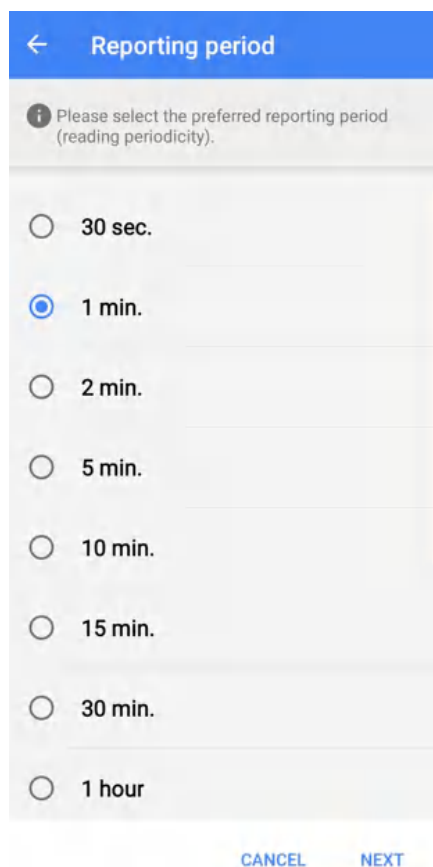


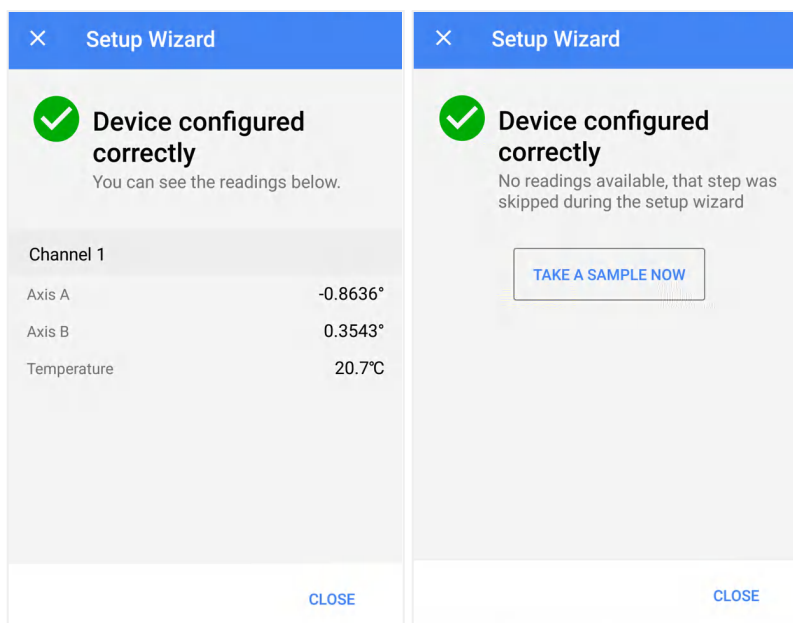
Figure 67: list of possible reporting periods



It is highly recommended reconfiguring the reporting periods of the nodes from the CMT after configuring the node via the WS app. This process optimises the radio performance by minimising the slot times.

Device configured correctly

After finishing the configuration, you will see a notification that the node has been successfully configured. Also, if a reading has been taken previously, the reading will be displayed, otherwise, the option to take it at that moment will be displayed.



Figures 68 & 69: 'device configured correctly' output message

Set last configuration

For nodes that do not have sensors connected or option to configure their own sensors, such as INC15, TILT90, LASTIL90 and LASER, after making the first complete configuration in the SETUP WIZARD section, a new option will be displayed in the main menu to reuse the previous configuration with the option to change the reporting period. To do so, click on SET LAST CONFIGURATION:

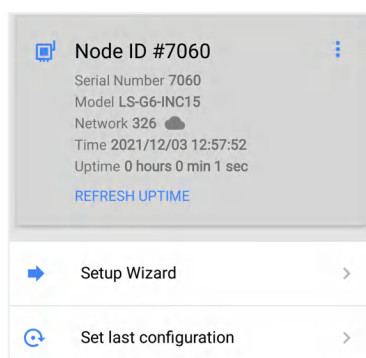
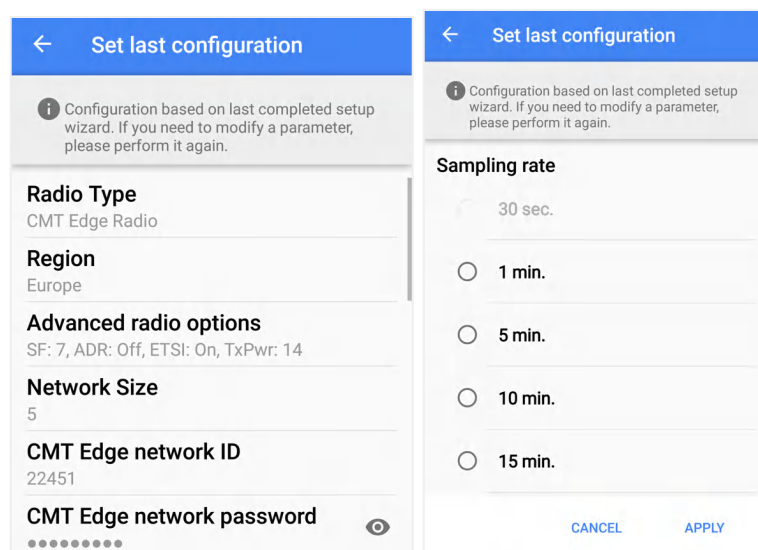


Figure 70: set last configuration option displayed on the WS app homepage

The SET LAST CONFIGURATION section shows all the configurations done in the last setup wizard performed (radio, region, advanced radio options and network. Also it allows checking the radio password by clicking on the eye button) and all the reporting periods, those available in black and those unavailable due to network size, in grey. By default, the reporting period used in the previous setup wizard is selected, but it can be changed by clicking on the new reporting period.



Figures 71 & 72: example of 'set last configuration' data that is applied when configuring a new node

After checking the configuration and choosing the reporting period if you want to change it, click APPLY to configure the node with these parameters. This process will take a few seconds.

Take a sample

The TAKE A SAMPLE menu allows to take a sample reading from all the sensors connected to the node. Also, if it already took a reading, it will be displayed and the date when it was taken.

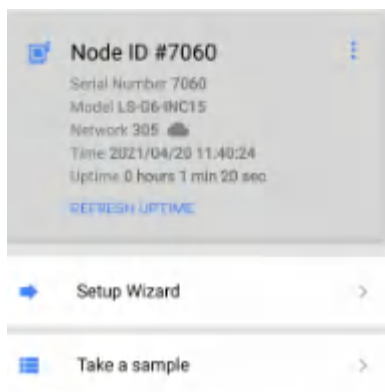
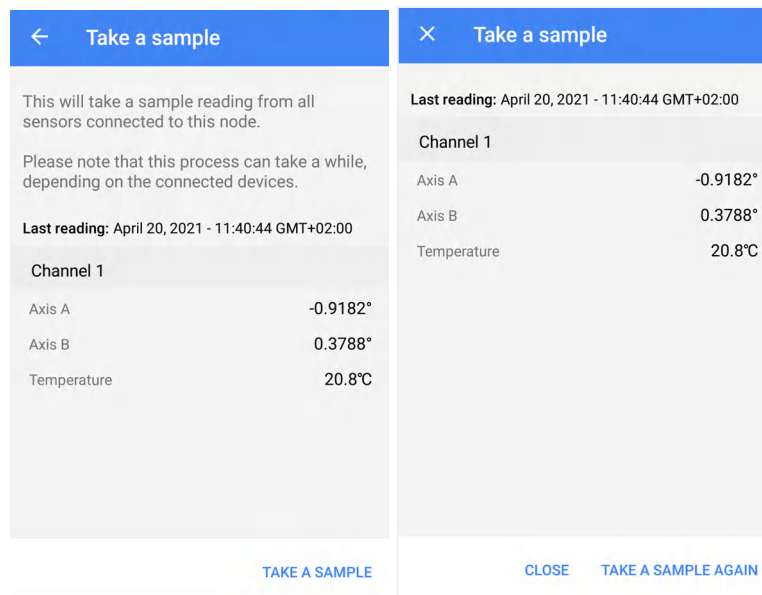


Figure 73: take a sample option displayed on the WS app homepage

By clicking on the TAKE A SAMPLE button it will start taking a reading and will take a few minutes to display it on the screen. Once it is done, it can take another one by clicking on TAKE A SAMPLE AGAIN or go back to the main screen by clicking CLOSE.



Figures 74 & 75: take a sample option displayed on the WS app homepage

Edge device model-specific options

The Worldsensing App adds different configuration options for each model.

Calibration parameters

Calibration parameters will be shown for wireless tiltmeters.

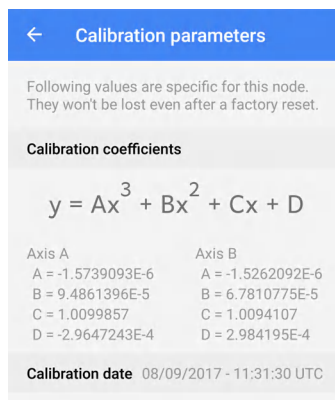


Figure 76: Ex. Calibration parameters and calibration date for the INC15 node.

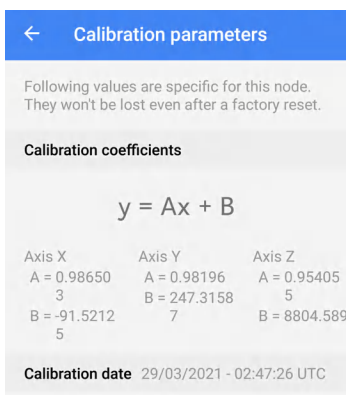


Figure 77: Ex. Calibration parameters and calibration date for the LaserTil90 and Til90 devices.

Sensor settings

Different configuration parameters are also available for the vibrating wire, Piconode, analog and digital nodes.

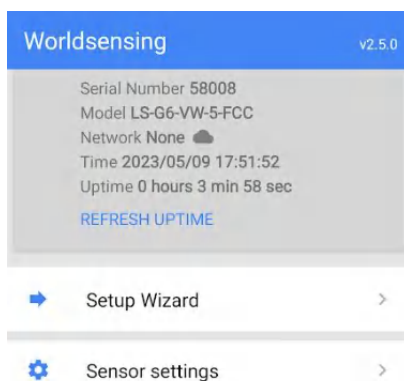


Figure 78: sensor settings option displayed on the WS app homepage

For specific information regarding the sensor configuration for a specific node, please, refer to the [node user guide](#). It is also necessary to refer to the sensor's datasheet for more details on how it should be wired.

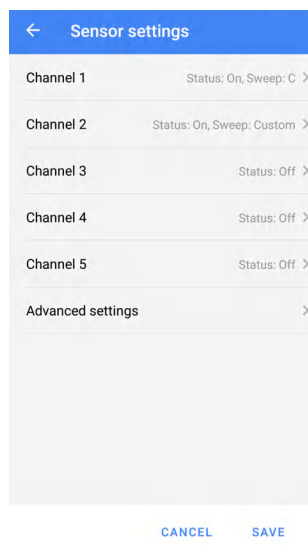


Figure 79: Vibrating wire 5-channel data logger sensor settings

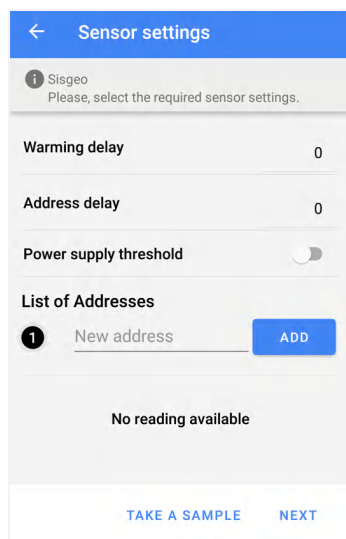


Figure 80: DIG + Sigeo sensor settings

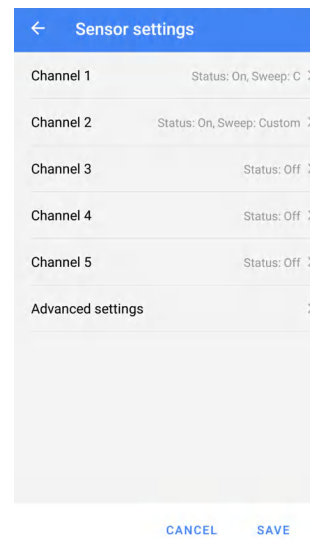


Figure 81: VW5 sensor settings

This option will be available in case the node has sensors to be configured. If not, it will not be displayed as with INC15.

Sensor manufacturer (DIG node)

When configuring a digital node, it is necessary to select the sensor manufacturer before configuring the sensor. A list of compatible manufacturers will be displayed from which the sensor connected to the node must be selected.

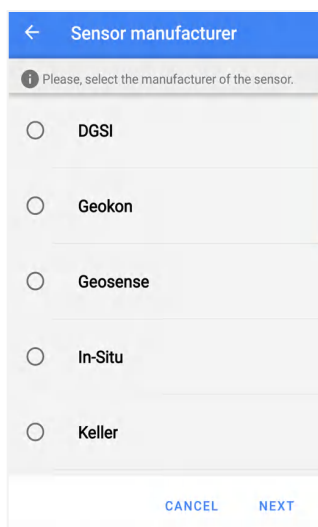


Figure 82: list of sensor's manufacturers

Laser pointing mode

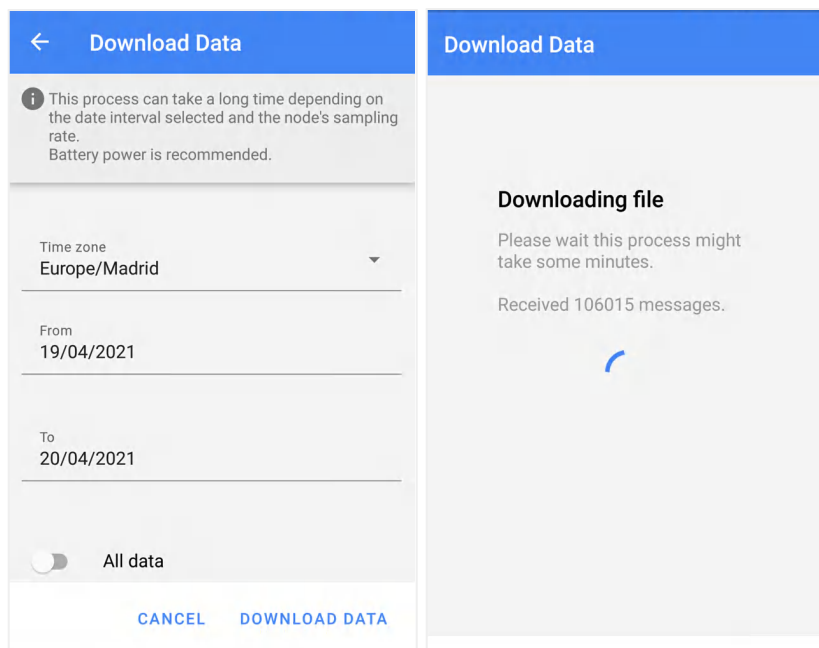
This option is only available for the laser nodes. It allows the laser to be activated for a certain period of time to facilitate the installation.

Download Data

The DOWNLOAD DATA menu allows downloading all the data of the node, both readings and health files, for a specific period. It also enables the selection of the timezone and the start and end date (ALL DATA) of the collection of the readings.

Click ALLOW and then DOWNLOAD DATA to store data on the Android device.

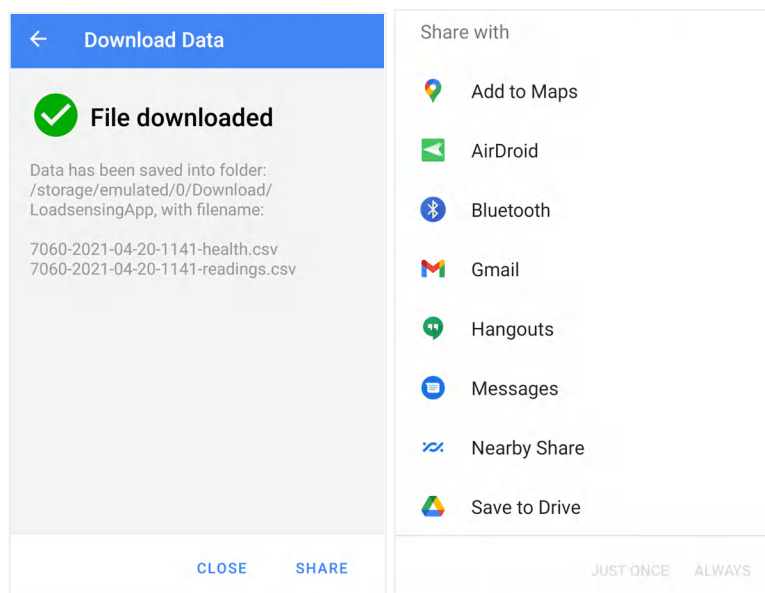
Please note that this process will take some time depending on the total number of messages being downloaded. For example, in the image below more than 100k messages are being downloaded which will cause the download to be slow.



Figures 83 & 84: list of sensor's manufacturers

Once the download is finished, you will see a notification that the download was successful and where the data was downloaded.

You can also click on SHARE to see the available sharing options.



Figures 85 & 86: available sharing options

For Android Versions 10.0 or lower, The Worldsensing Mobile App creates a folder called *Worldsensing* in the Android device's memory where the downloaded files as well as the coverage tests will be stored. The location of the folder will depend on the device itself. Go to the [Worldsensing App folder section](#) to have more information related to each file.

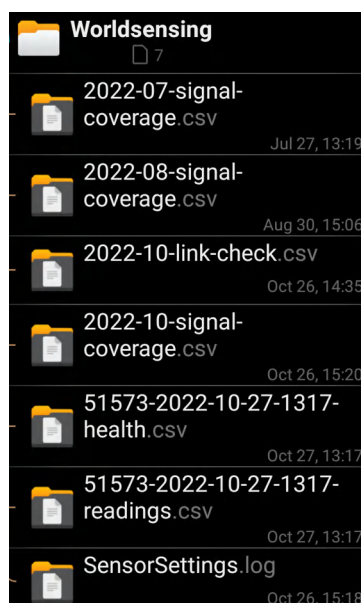


Figure 87: Worldsensing folder created by the WS App

Abstract

This project focuses on the design and development of a water quality monitoring system for the detection of Bisphenol A (BPA), a harmful endocrine-disrupting compound found in many consumer products. The work builds on an initial prototype developed by the Jozef Stefan Institute for Bisphenol S detection and adapts it to BPA, integrating it into an IoT-based monitoring platform.

A series of electrochemical tests, including cyclic voltammetry, are conducted to characterize the redox behavior of BPA and determine the optimal detection voltage. Based on these findings, a custom printed circuit board (PCB) is designed and simulated using LTspice and KiCAD, with the goal of replicating potentiostat functionality in a compact and energy-efficient format.

The system is designed to interface with a Worldsensing IoT node using LoRa wireless communication, allowing real-time data transmission over long distances. The final prototype is validated through laboratory experiments comparing the custom PCB's performance to a commercial potentiostat, confirming its reliability in BPA detection.

This approach contributes to environmental monitoring innovation by enabling autonomous, remote sensing of water pollutants using low-power, scalable technology.