

## **Treball final de grau**

**Estudi:** Grau en Enginyeria Electrònica Industrial i Automàtica

**Títol:** Disseny, dimensionament i realització d'un sistema de control de cel·les bioelectroquímiques per l'eliminació de nitrats a l'aigua

**Document:** 1. Memòria

**Alumne:** Jose Antonio Torres Moreno

**Tutor:** Dani Macaya Masferrer

**Departament:** EEEA

**Àrea:** ESA

**Convocatòria (mes/any)** Setembre/2016

## ÍNDEX

<b>1. Introducció .....</b>	<b>3</b>
1.1. Antecedents .....	3
1.2. Objecte .....	4
1.3. Especificacions i abast .....	4
<b>2. La cel·la bioelectroquímica .....</b>	<b>5</b>
2.1. Característiques.....	5
2.2. El potenciostat.....	6
2.3. Proves prèvies i motivació de l'intent de control amb PLC.....	7
<b>3. Estudi de laboratori .....</b>	<b>9</b>
3.1. MyDAQ.....	9
3.1.1. Entrades Analògiques de MyDAQ .....	10
3.1.2. Sortides Analògiques de MyDAQ .....	11
3.1.3. Fonts d'alimentació MyDAQ .....	11
3.2. La font d'alimentació.....	11
3.3. Circuit i connexions .....	12
3.3.1. El circuit subministrador de potència .....	13
3.3.2. El circuit de mesura de la intensitat .....	15
3.3.3. Visualitzador del estat del operacional .....	16
3.4. L'entorn de programació Labview.....	18
3.4.1. El panell frontal. ....	18
3.4.2. El diagrama de blocs.....	20
3.4.3. Labview en la pressa de mesures.....	21
3.5. El programa Anàlisis LAB v0.1 .....	23
3.6. Estudi i control de la cel·la. ....	26
<b>4. Migració del sistema a la planta del pilot del grup de recerca LEQUIA .....</b>	<b>32</b>
4.1. Instal·lació general .....	32
4.2. Adequació del circuit pel cablejat de la planta .....	33
4.3. Adequació del programa Anàlisis Lab v0.1.....	35
4.4. PLC.....	35
4.4.1. CPU .....	35
4.4.2. SLIO.....	36
4.4.3. Font .....	36
4.5. Pantalla.....	36

<b>5. Programació del PLC.....</b>	<b>37</b>
5.1. Escalat de valors .....	37
5.2. PID cel·les .....	37
<b>6. Resum de pressupost .....</b>	<b>38</b>
<b>7. Conclusions .....</b>	<b>39</b>
<b>8. Relació de documents.....</b>	<b>40</b>
<b>9. Bibliografia.....</b>	<b>41</b>
<b>10. Glossari .....</b>	<b>42</b>

## 1. Introducció

La bioelectroquímica ha experimentat un gran avenç en aquests darrers anys. Aquest fet ha comportat la necessitat de coordinar i desenvolupar un treball en equip entre professionals de diverses disciplines, tant químics com electrònics.

En la tesi “Bioremediation of Nitrate-Polluted Groundwater using bioelectrochemical Systems” de l'investigador del LEQUIA Narcís Pous Rodríguez, punt des del qual parteix el present treball de final de grau, s'ha investigat la utilització de sistemes BES per al tractament de les aigües subterrànies contaminades amb nitrats.

Aquests sistemes basats en bioelectroquímica aprofiten la capacitat de determinats microorganismes per realitzar processos d'oxidació/reducció a partir de la pressa o alliberació d'electrons en un elèctrode.

### 1.1. Antecedents

La presència de nitrats en aigües subterrànies és una preocupació global. En certes zones geogràfiques, les concentracions de nitrat excedeixen els límits marcats per l'Organització Mundial de la Salut (OMS) pel consum humà. Actualment, les tecnologies més efectives per eliminar el nitrat en aigües subterrànies són l'osmosi inversa, l'electrodiàlisi inversa o l'intercanvi iònic. Malauradament, aquestes tecnologies requereixen un alt consum energètic i un cost econòmic elevat per fer possible la seva implementació. El grup de recerca LEQUIA del Parc Científic i Tecnològic de la Universitat de Girona està desenvolupant un nou sistema que implica bacteris autotròfics i la utilització d'una font d'electrons (l'elèctrode catòdic) per tal de resoldre aquest problema.

Fins fa relativament poc temps, per a l'estabilització de la reacció (per a establir la reacció) s'utilitzava un instrument de laboratori d'electroquímica anomenat potenciostat, els problemes que planteja aquest tipus de dispositiu electrònic són bàsicament el seu alt cost econòmic i la poca escalabilitat del sistema.

Per tal de solucionar el problema, Narcís Pous, va iniciar una sèrie de proves, per així intentar excitar la cel·la. Durant el procés, va detectar que si aplicàvem un potencial sobre

els terminals ànode i càtode de la cel·la amb una font de laboratori regulable, podíem moure el potencial de referència i, tot i que no el podia mantenir en un valor estable, el podia fer passar per la zona de potencial on es dona la reacció.

Amb aquest resultat es va posar en contacte amb el departament d'electrònica de l'Escola Politècnica els quals em van proposar buscar una solució per tancar el llaç de realimentació. Com a limitacions el departament va decidir que s'havia de controlar cada cel·la amb una entrada i una sortida PLC més un muntatge de circuits dissenyats per mi.

En el primer moment tant el tutor Daniel Macaya com el doctor Joan Colomer estaven treballant amb la tarja d'adquisició de dades MyDAQ i el software Labview, intentant excitar la cel·la amb una font de corrent. Experiment que no donava resultats.

## 1.2. Objecte

L'objecte del projecte és dissenyar i implementar el sistema de control d'una de les cel·les d'un procés format per 36 cel·les bio-electroquímiques. El sistema de subministrament de potència i adaptació dels senyals mitjançant un PLC, per acabar tenint un sistema SCADA.

Això implicarà el desenvolupament de certes fases; en primer lloc caldrà fer un estudi del funcionament de les cel·les amb la MyDAQ i el software LabView. Es continuarà fent un estudi i prova dels mètodes utilitzats pel control de reaccions similars. Seguidament es farà una anàlisi dels requeriments pel control i dimensionat del sistema ajustant-se als recursos disponibles i el disseny i realització de les plaques necessàries. Es conclourà amb la programació i ajusts del sistema de control en el PLC i la pantalla tàtil.

## 1.3. Especificacions i abast

L'estudi del funcionament de les cel·les es durà a terme amb una DAQ i el software Labview. El dimensionat i els circuits es dissenyaran amb Multisim i Utilboard. El control es realitzarà amb un PLC Vipa, per tenir el sistema SCADA s'utilitzarà una pantalla tàtil Siemens. La implementació i posada en funcionament es farà en un mòdul situat a la depuradora municipal de la població de Navata (Girona).

## 2. La cel·la bioelectroquímica

Una cel·la electroquímica és un dispositiu capaç d'obtenir energia elèctrica a partir de reaccions químiques, o bé, de produir reaccions químiques a través de la introducció d'energia elèctrica. Un exemple comú de cel·la electroquímica és la de liti, com les que incorporen els portàtils, mentre una bateria consta de diverses cel·les connectades en sèrie. La particularitat de una cel·la bioelectroquímica roman en el catalitzador de la reacció, que en aquest cas és biològic, una proteobactèria.



Figura 1. Cel·la de prova

### 2.1. Característiques

En aquest cas la cel·la fa un procés de desnitrificació, com es veu a la Figura 2, les variables que intervenen dins d'aquesta reacció són la temperatura, el pH, l'oxigen i la font donadora d'electrons.

La part que recau sobre aquest projecte és la font donant d'electrons. Tenint en compte la capacitat que tenen certs compostos orgànics a l'hora de donar electrons, es pot considerar l'opció que la reacció es pugui controlar ella mateixa. Altrament, per un òptim funcionament i agilitació de la reacció, es pot afegir l'ànode donant d'electrons, donant millors resultats, sobretot en aspectes relacionats amb la velocitat i estabilitat de la reacció.

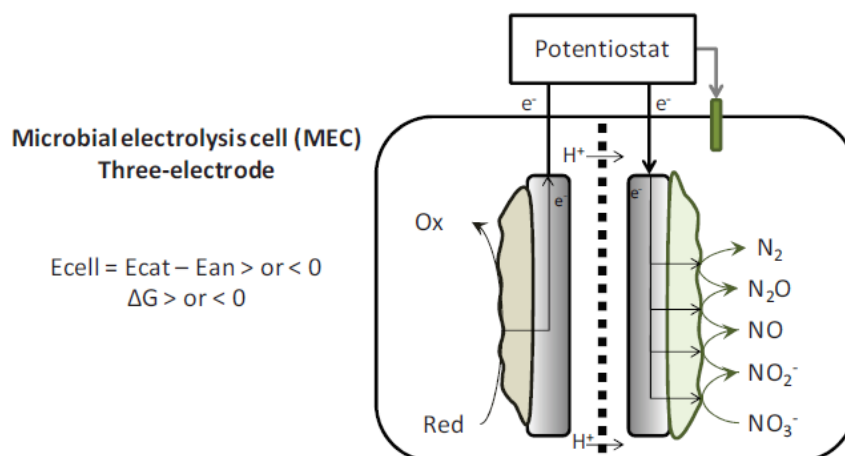


Figura 2. Desnitrificació

Basant-se sobre la tesis de doctor Narcís Pous se sap que per tal de tenir una òptima velocitat de reacció estable s'ha de poder mantenir un potencial de reacció de -0,33V. No obstant això, doctor apunta que seria convenient poder escollir altres valors compresos entre 1,5 i -1,5 volts.

## 2.2. El potenciostat

El potenciostat és un dispositiu electrònic necessari per controlar una cel·la de tres elèctrodes i poder fer la majoria d'experiments electroanalítics. Depenent del nombre d'elèctrodes de treball que pot controlar es pot anomenar bipotenciostat o polipotenciostat.

El sistema funciona mantenint el potencial de l'elèctrode de treball a un nivell constant respecte a la potència de l'elèctrode de referència mitjançant l'ajust del corrent de l'elèctrode auxiliar. Es tracta d'un circuit elèctric que es pot minimitzar al circuit de la Figura 3, i està format per amplificadors operacionals.

Els primers potenciostats treballaven de forma independent,. L'únic control per part de l'usuari era la visualització de les dades de sortida, en aquells temps obtingudes d'una manera mecànica. Els potenciostats moderns estan dissenyats per interactuar amb un ordinador personal i treballen a través d'un paquet de software especialitzat. Aquest sistema permet a l'usuari tenir control real sobre els paràmetres de la reacció, podent canviar els experiments i les condicions dels mateixos amb molta velocitat i facilitat. La importància de

l'ordinador personal radica en l'emmagatzematge i tractament de les dades del procés, fet que dóna lloc a poder extreure més conclusions de cada experiment.

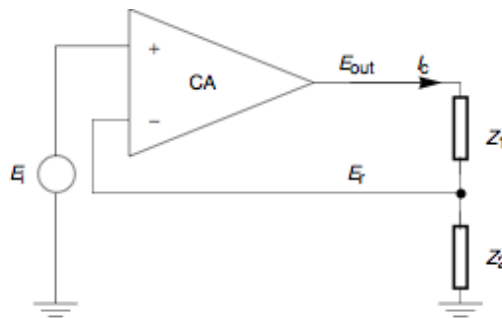


Figura 3. Potenciostat simple

### 2.3. Proves prèvies i motivació de l'intent de control amb PLC

Donat que es va presenciar una certa pauta en moure el potencial de l'ànode respecte del càtode es decideix crear un sistema per analitzar la reacció del potencial creat entre l'elèctrode de referència i el càtode, per així poder veure la reacció i intentar tancar el llaç. A la Figura 4 es presenta la versió simplificada de la cel·la i s'observa el voltatge que s'aplica, en aquest cas  $\Delta V$  i el que es vol controlar, en aquest cas  $E$ .

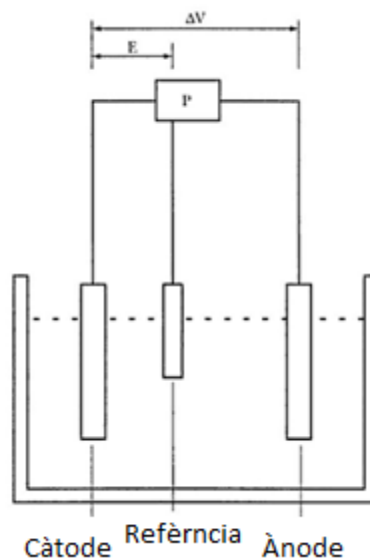


Figura 4. Esquema potencials de cel·la



Per simplificar, es pot veure l'experiment com un llaç tancat, Figura 5, amb el potenciòmetre accionat manualment per l'operari. La pertorbació ve donada pel flux de líquid que circula dintre de la cel·la i la reacció, que s'afegeix a la sortida del sistema, la qual es veu i es rectifica manualment tancant el llaç.

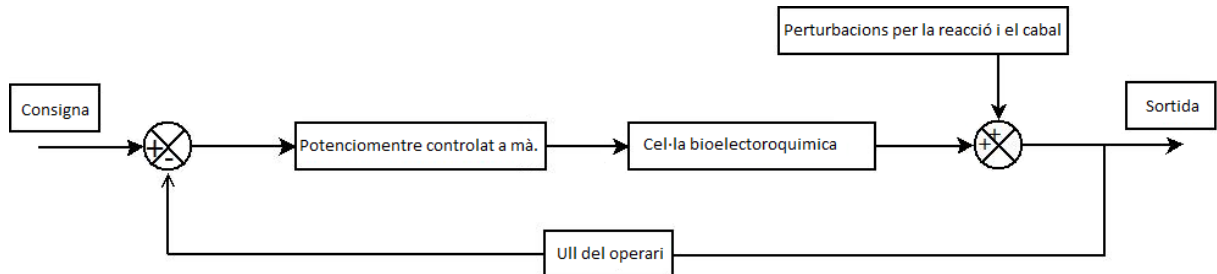


Figura 5. Llaç de control humà

En veure el resultat, amb els tutors es va decidir modificar aquest llaç i substituir l'operari per un llaç electrònic i un sistema PID. Per així poder comprovar si es pot controlar, tot i no conèixer a priori el seu comportament ni la seva funció de transferència.

### 3. Estudi de laboratori

Partint de les particularitats del projecte, en la primera fase es duu a terme un primer prototip de circuit controlador format per diferents petits circuits interconnectats per afegir funcionalitats i mesures a la investigació de la naturalesa del procés a controlar. A continuació s'exposa tant el hardware i la seva disposició general, que es pot veure a la Figura 6, com el software utilitzat.

#### 3.1. MyDAQ

El sistema d'adquisició de mesures i sortides escollit per la implementació del projecte és el dispositiu MyDAQ de National Instruments. El sistema NI MyDAQ és una targeta d'adquisició i generació de senyals, de baix cost i fàcil implementació de l'empresa National Instruments.

En ser un dispositiu dissenyat per la realització de mesures portàtil, l'alimentació es realitza a través del port d'entrada i sortida USB per on també es realitzen els intercanvis de dades entre l'ordinador personal i la DAQ.

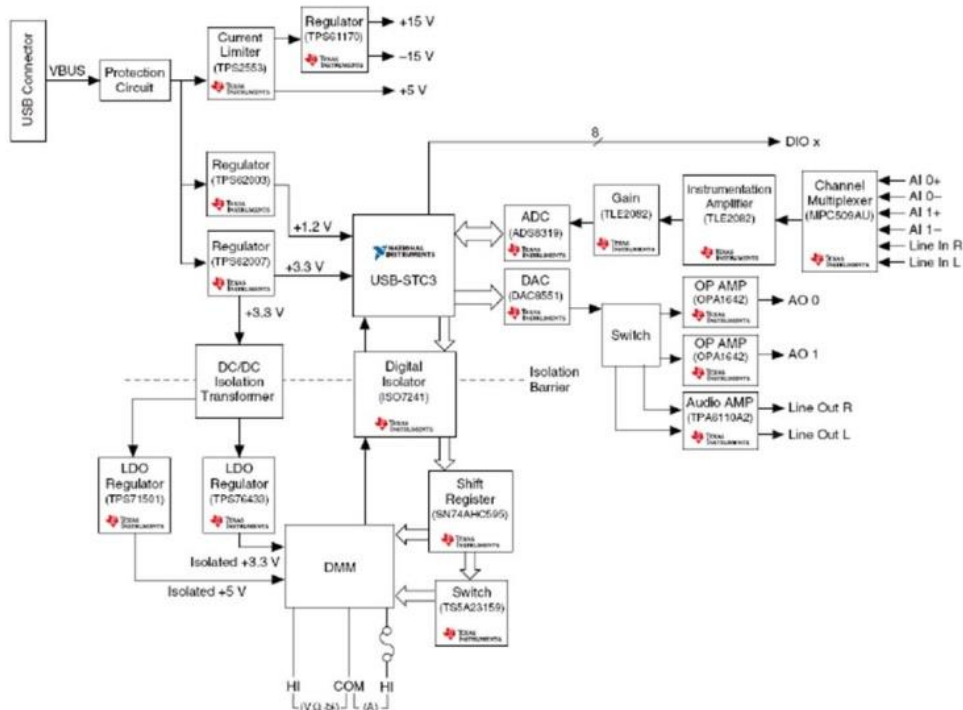


Figura 6. MyDAQ internament

Com es pot observar a la imatge, el dispositiu implementa una sèrie d'entrades i sortides tant analògiques com digitals, a més de les pròpies d'un multímetre digital.

Aquest circuit permet les següents connexions:

- 2 Canals d'entrades analògiques en un rang de  $\pm 10$  Volts.
- 2 Canals de sortides analògiques en un rang de  $\pm 10$  Volts.
- 8 Canals d'entrada o sortida.
- Fonts d'alimentació: Una de  $\pm 15$  Volts i un altre de  $+5$  Volts, que permeten l'alimentació de circuits. La potència total disponible està limitada a 500 mW.
- 1 Entrada d'àudio.
- 1 Sortida d'àudio.
- 1 Multímetre Digital (DMM) que permet obtenir mesures de tensió i corrent tant en alterna com en contínua.

A continuació podem observar una vista lateral del dispositiu on s'aprecia el terminal de 20 connexions laterals del NI MyDAQ i les entrades i sortides d'àudio que es presenten en el mateix:

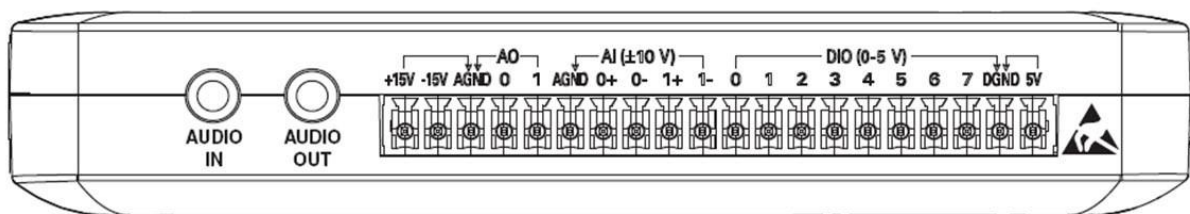


Figura 7. Frontal MyDAQ

### 3.1.1. Entrades Analògiques de MyDAQ

La NI MyDAQ disposa de dos canals d'entrada analògica. Poden ser configurades com entrades de propòsit general de tensió diferencials d'alta impedància o com entrada d'àudio. Les entrades analògiques són multiplexades, utilitzen un únic conversor d'analògic a digital (ADC) per mostrear ambdós canals. En mode d'ús normal poden mesurar senyals de fins  $\pm 10$  V en les entrades analògiques.

En mode d'entrada d'àudio, els dos canals representen una entrada de nivell de línia estèreo. Les entrades analògiques poden mesurar fins a 200 kS/s per canal, fet que permet d'adquirir formes d'ona.

### 3.1.2. Sortides Analògiques de MyDAQ

El NI MyDAQ disposa de dos canals de sortida analògica. Es poden configurar com de propòsit general o com de sortida de tensió per sortida d'àudio. Ambdós canals tenen un convertidor de senyal digital a analògica dedicat (DAC), per la qual cosa es poden utilitzar simultàniament. En el mode d'ús general, poden generar senyals de  $\pm 10$  V.

En mode de sortida d'àudio, els dos canals representen una tensió per sortida d'àudio estèreo. Les sortides analògiques es poden actualitzar a velocitats de fins a 200 kS/s per canal, fet que permet la generació de forma d'ona.

### 3.1.3. Fonts d'alimentació MyDAQ

El dispositiu MyDAQ disposa de tres fonts d'alimentació amb les que es poden alimentar dispositius externs. Dues d'aquestes fonts d'alimentació disposen de tensions de 15 V i -15 V. L'altra font d'alimentació proporciona una tensió de 5 V i es pot utilitzar per alimentar components digitals de potència, tals com els dispositius de lògica.

La potencia total disponible que poden donar les fonts d'alimentació, les sortides analògiques i sortides digitals és 500 mW típics i de 100 mW mínims.

## 3.2. La font d'alimentació

Per tal de poder donar la intensitat de 3 ampers i els 24 volts bipolars necessaris a l'operacional de potencia, es fan servir dues fonts d'alimentació de laboratori model IMHY3003D. Connectar-les en sèrie ens permet controlar tant el voltatge de qualsevol dels dos pols, com la intensitat que circula, a més de poder veure'l fàcilment a les pantalles de cristall líquid que incorpora com es pot veure a la Figura 8.



Figura 8. Font de Laboratori

### 3.3. Circuit i connexions

El conjunt de circuits per l'anàlisi del sistema està format pel DAQ, la font d'alimentació externa de laboratori, el circuit subministrador de potència a la cel·la, un circuit per la mesura de la intensitat que circula en el sistema i un petit circuit per visualitzar l'estat de l'operacional escollit, que incorpora una funcionalitat que ens indica si s'ha apagat per sobreescalfament.

Podem observar a la Figura 9 la disposició general de les diferents parts del muntatge:

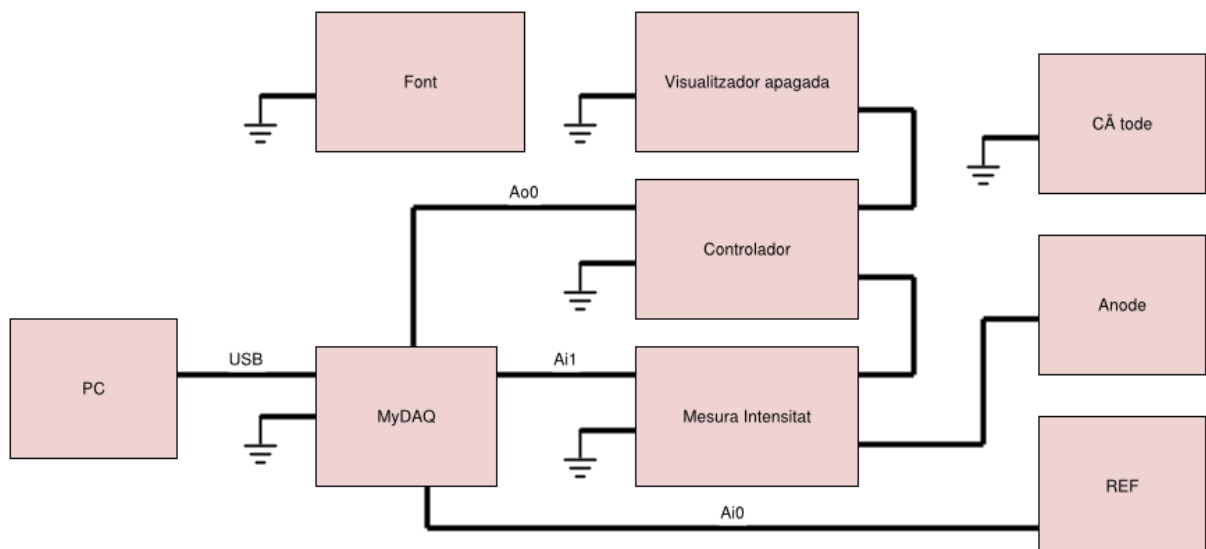


Figura 9. Connexions entre mòduls

Com es pot veure, tot el sistema comparteix un terra comú, els tres circuits del muntatge, el visualitzador d'apagada, el controlador i el mesurador d'intensitat, s'alimenten a través de la font. L'ordinador personal es connecta a la MyDAQ a través del protocol USB i tenint en compte la proximitat, totes les connexions es fan directament.

Ja que la resolució d'adquisició que busquem entre els elèctrodes càtode i referència és de 10mV, que la MyDAQ ens dona una resolució de 0,305 mV i que es considera molt útil poder veure tot el rang de valors en el qual es pot moure aquesta mesura, no es considera necessari amplificar el senyal i és llegit directament per la targeta d'adquisició de senyals.

### 3.3.1. El circuit subministrador de potència

En aquest circuit s'utilitza l'operacional OPA548T de Texas Instruments. És un integrat dissenyat per alimentar elements de potència, amb la capacitat d'arribar als 3 amperes de contínua i 5 amperes de pic, amb el dissipador recomanat pel fabricant, compleix la necessitat d'intensitat de fins a 2.5 amperes. En la Figura 10 es pot observar el circuit intern.

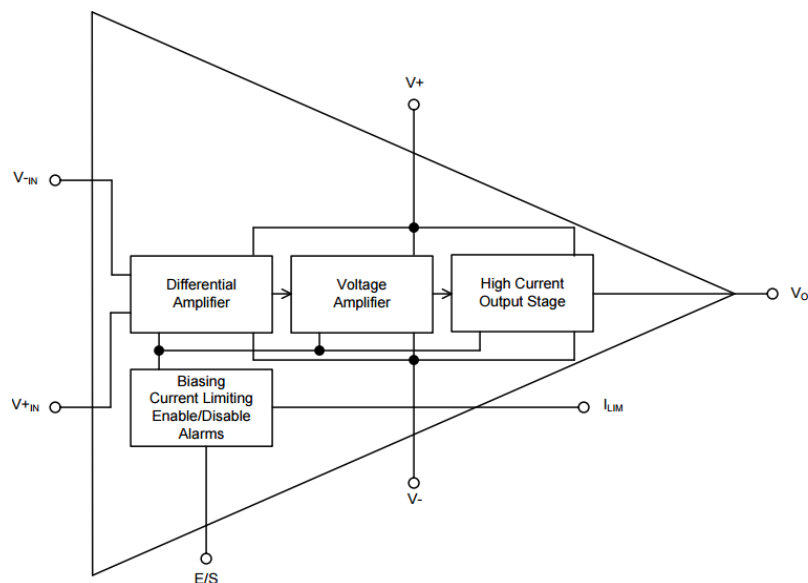


Figura 10. OPA548T internament

Com es pot apreciar a la figura anterior, a més de les connexions habituals en un operacional, aquest incorpora una connexió E/S i una per limitar el corrent de sortida. La connexió E/S és utilitzada en el circuit per visualitzar l'estat de l'operacional, que serà exposat en apartats posteriors. Per altra banda, tenim la connexió de limitació de corrent, on

s'ha d'utilitzar una resistència connectada com es mostra a la Figura 11 i el valor de la qual es regeix per l'Equació 1.

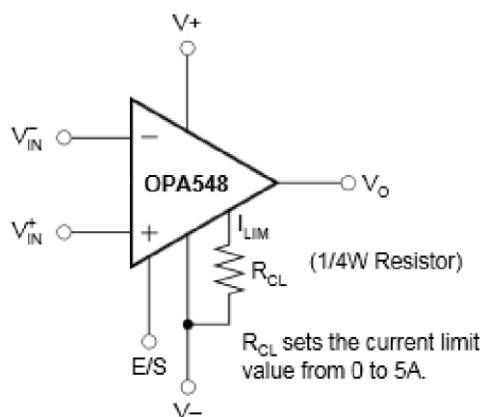


Figura 11. Limitació del corrent de sortida

$$R_{CL} = \frac{(15000)(4.75)}{I_{LIM}} - 13750 \, \Omega \quad (\text{Eq.1})$$

Per no limitar l'operacional i deixar que circuli tot el corrent possible fins a sortir de la zona segura de treball es pot utilitzar un pont o resistència igual a 0.

Ja que es disposa d'un senyal de control de  $\pm 10$  volts i es vol poder obtenir 20 volts a la sortida, garantint que no es demana pràcticament intensitat al senyal d'entrada, es durà a terme un muntatge amb amplificador no inversor. Com es veu a la Figura 12 el guany del qual està regit per l'Equació 2.

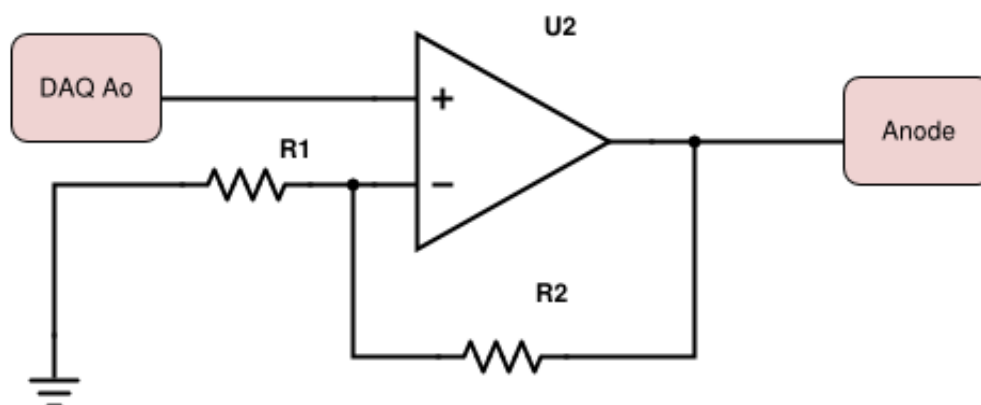


Figura 12. Amplificador no inversor

$$V_0 = 1 + \frac{R_2}{R_1} V_i \quad (\text{Eq.2})$$

S'utilitzaran resistències de 1/4W i condensadors dels valors que aconsella el fabricant.

S'ha decidit posar resistències iguals de 100kΩ per tal d'obtenir un guany de 2.

### 3.3.2. El circuit de mesura de la intensitat

Un altre variable que s'ha trobat interessant de poder mesurar i visualitzar a la gràfica és la intensitat que circula a la cel·la. Per dur-la a terme s'ha implementat un típic circuit format per una resistència de potència d'un valor molt petit 0,1ohms i un amplificador diferencial INA126, molt utilitzat per aquest propòsit. Podem veure el seu encapsulat i circuit intern a la Figura 13. I respon a la funció de transferència de l'Equació 3.

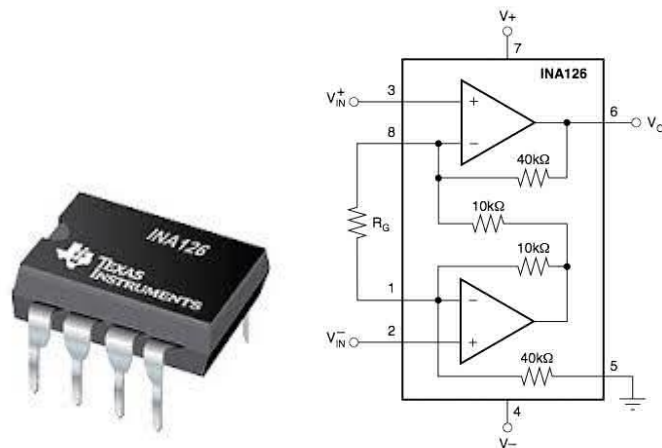


Figura 13. INA 126

$$V_0 = 5 + \frac{80k\Omega}{R_G} (V_{IN+} - V_{IN-}) \quad (\text{Eq.3})$$

El muntatge utilitzat és el recomanat pel fabricant i com es pot veure a la Figura 14. Es vol mesurar intensitats entre 5 i menys 5 amperis i la resistència és de 0,1Ω. Per tant s'ha optat per una resistència de guany 16kΩ amb la que s'obté una amplificació de 10 i així tenir una sortida entre 5 i menys 5 volts.



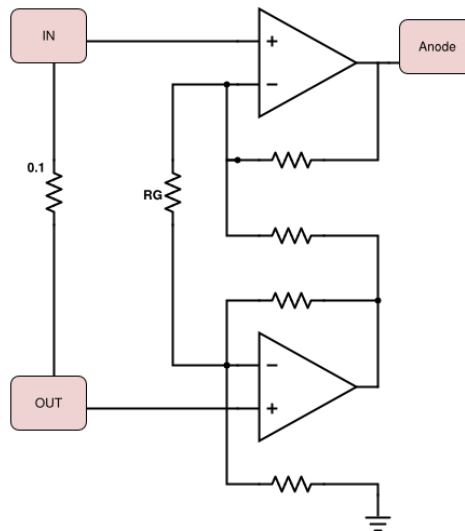


Figura 14. Esquema circuit de mesura de corrent

### 3.3.3. Visualitzador del estat del operacional

L' OPA548T té la particularitat de disposar de la connexió E/S, que permet tant controlar l'apagada voluntària del operacional, com visualitzar l'estat en el qual es troba, ja que per sobreescalfament s'apaga en els marges teòrics de la zona de treball segura que mostra la gràfica del fabricant de la Figura 15.

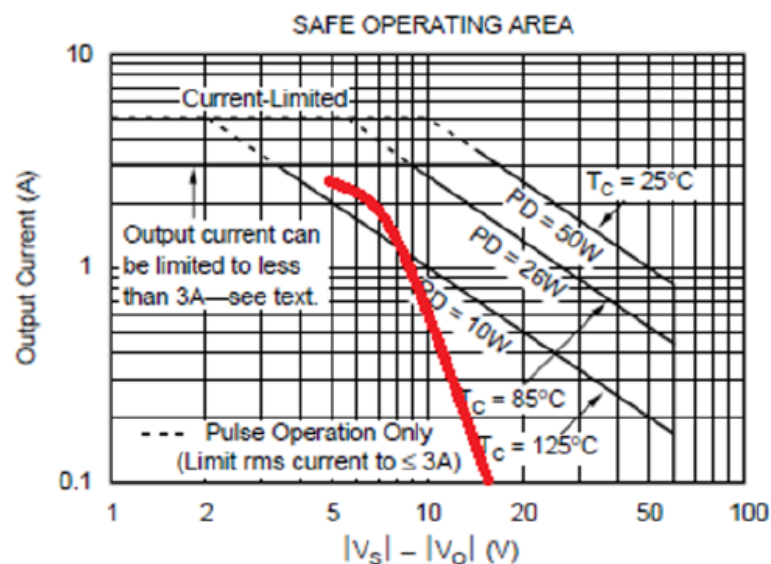


Figura 15. Zona segura de treball

S'ha considerat important implementar aquesta funcionalitat donat que, el fet que s'apagui l'operacional sense saber-ho pot donar lloc a mesures errònies i no controlades durant l'estudi de la cel·la. Es pot veure el comportament de l'operacional al límit de la zona segura de treball respecte al temps en la Figura 16.

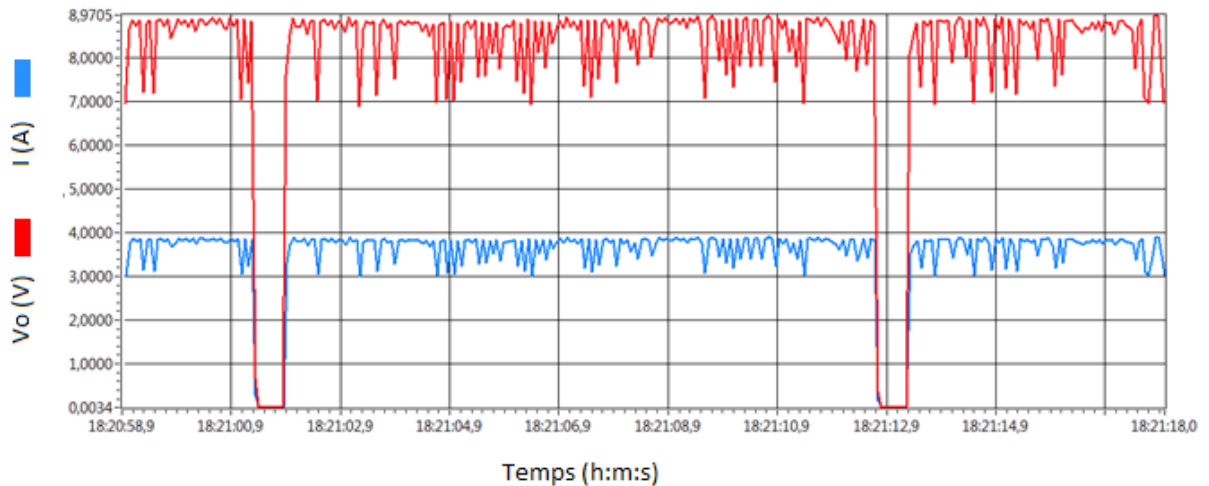


Figura 16. Sortida respecte el temps fora de la zona de treball

En l'estat de funcionament normal la sortida E/S es troba al mateix potencial que l'alimentació de polaritat negativa que rep l'operacional. En l'estat d'apagada el voltatge és 3 volts superior al voltatge negatiu d'alimentació. Aprofitant això, es duu a terme una solució amb un operacional de propòsit general LM324 en mode comparador, que a la sortida alimenta dos LEDS en paral·lel i polaritzats de manera contrària per tal de poder visualitzar de manera senzilla l'estat del operacional. En la Figura 17 es mostra un esquema del circuit.

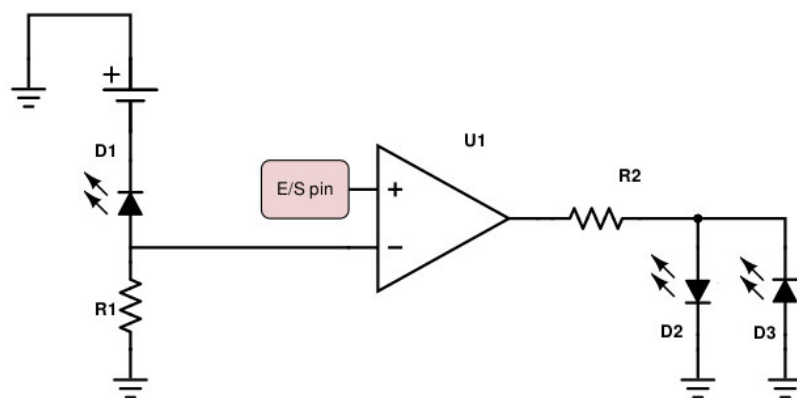


Figura 17. Visualitzador d'apagada

### 3.4. L'entorn de programació Labview

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) es un llenguatge de programació gràfic que utilitza icones en comptes de codi per les aplicacions. Es a dir, es una plataforma y entorn de desenvolupament per dissenyar sistemes, amb un llenguatge de programació visual i gràfic.

Creat per National Instruments el 1976, es àmpliament utilitzat en sistemes de proves, mesura, control y disseny, donat que permet la creació d'un entorn simulat de mesura. A diferencia dels llenguatges de programació basats en text, on les instruccions determinen l'execució del programa, LabVIEW utilitza la programació de flux de dades, on el flux de dades determina la execució.

Una de les seves principals avantatges es la facilitat d'us, dons al ser un entorn gràfic es vàlid per a enginyers amb pocs coneixements en programació, donant la oportunitat de realitzar programes realment complexos que serien molt mes costosos en hores de programador amb un llenguatge de programació convencional.

Labview està disponible per les plataformes: Windows, UNIX, MAC y GNU/Linux.

En LabVIEW a l'hora de generar un programa es distingeixen dos parts clarament diferenciades. El panel de control o frontal que es forma com una interfície d'usuari com un conjunt d'eines objectes. El diagrama de blocs que conté el codi del programa.

Els programes desenvolupats amb LabVIEW es diuen Instruments Virtuals, o VI, i la seva funció principal és la del control de sensors i actuadors, encara que avui dia s'ha expandit àmpliament, no només al control instrumentació electrònica, sinó també a la seva programació per a la realització de mesures i eines de mesura específiques.

#### 3.4.1. El panell frontal

El panell de control és en la interfície on l'usuari interactua amb el programa i on es troben les representacions gràfiques de les mesures, s'utilitza quan l'usuari necessita interactuar amb el programa que s'està executant.

Els usuaris poden observar les variables que va oferint el programa i que s'actualitzen en temps real. És en aquesta interfície on es defineixen els controls, que s'utilitzen com entrades i poden ser de diferents tipus. També els indicadors, que es defineixen com a sortides i que solen ser sortides de dades o gràfiques.

Aquests controls o indicadors, tenen assignat en el diagrama de blocs un terminal d'entrada o sortida de dades. Els controls són botons, dials i altres dispositius d'entrada. Els controls simulen dispositius d'entrada de l'instrument i subministren dades al diagrama de blocs de la VI. Els indicadors són els gràfics, LEDs i altres pantalles. Els indicadors simulen instruments i dispositius de sortida, lliurant les dades que el diagrama de blocs adquireix o generen.

Es poden configurar els controls del panell frontal o indicadors perquè apareguin com a icona o com a diferents tipus de terminals de dades en el diagrama de blocs. De forma predeterminada, els objectes del panell frontal apareixen com a terminals icona.

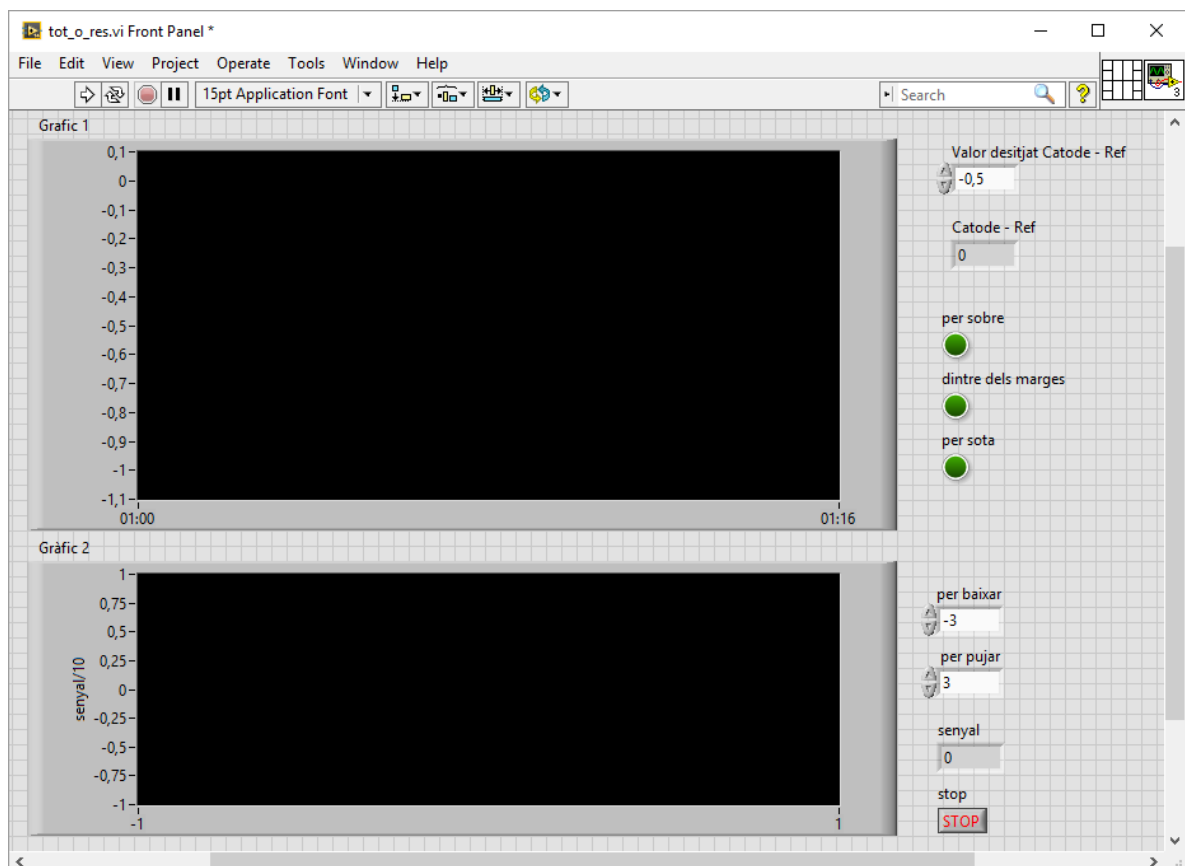


Figura 18. Panell frontal

### 3.4.2. El diagrama de blocs

El diagrama de blocs és on s'agrega el codi de programa utilitzant representacions gràfiques de funcions per controlar els objectes del panell frontal. És el programa pròpiament en si, on es creen i defineixen les funcions que ha de realitzar el programa.

Per a la realització d'un programa es col·loquen VIs que realitzen una determinada funció i s'interconnecten entre si amb altres VIs de forma gràfica mitjançant fils d'interconnexió. Per la seva banda el diagrama de blocs de cada objecte conté el codi en el qual es descriuen les funcions del mateix.

D'alguna manera, el diagrama de blocs s'assembla a un diagrama de flux on s'indica el desenvolupament del programa. Els VI s'alberguen en llibreries des d'on poden ser cridats per a l'execució en un determinat programa. Quan es va executant un VI podem observar en el diagrama de blocs, com van implementant-se tots els valors dels controls i indicadors mentre s'està executant un programa VI.

Els objectes representats en el panell frontal apareixen com a terminals en el diagrama de blocs. Els terminals són ports d'entrada i sortida per a l'intercanvi d'informació entre el panell frontal i diagrama de blocs. Les dades que s'introdueixen en el panell frontal entren en el diagrama de blocs a través dels terminals de control.

Les dades s'ingressen al diagrama de blocs i quan aquest completa els seus càlculs interns genera nous valors de dades. El flux de dades va els terminals d'indicador, on surten del diagrama de blocs i es tornen a introduir el panell frontal.

Els nodes són els objectes en el diagrama de blocs que tenen entrades. Les dades entre els objectes es transfereixen en el diagrama de blocs a través d'una única connexió, cada connexió té una única font de dades, però aquestes al seu torn es poden connectar a molts VIs i funcions de lectura de dades. Les connexions poden ser de colors diferents, estils i gruixos, depenent dels seus tipus de dades. Una connexió apareix trencada quan apareix com una línia discontinua negra amb una X vermella al centre.

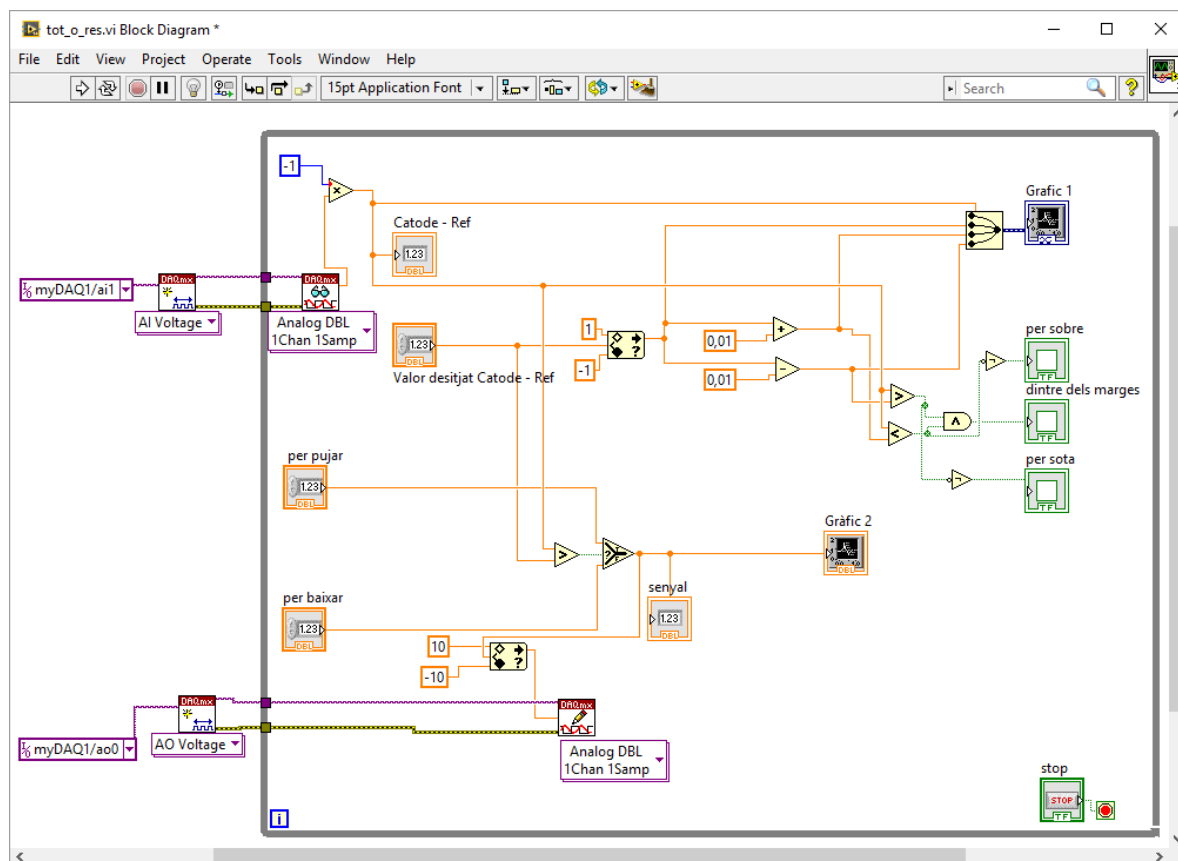


Figura 19. Diagrama de blocs LabView

Les estructures són les representacions gràfiques de cicles i de les sentències de cas dels programes basats en llenguatges de programació de text. Es poden utilitzar les estructures en el diagrama de blocs per repetir blocs de codi i executar codi de forma condicional o en un determinat ordre. Podem deduir, doncs, que la generació de programes de presa de mesures en LabVIEW es realitza de forma gràfica mitjançant la unió de diferents subrutines.

### 3.4.3. Labview en la presa de mesures

Un dels beneficis més grans d'utilitzar Labview per personalitzar la funcionalitat i visualització d'un sistema de mesures és el seu alt grau de manejabilitat. La realització de mesures és un procés manualment costós, lent i propens a errors. Si apliquem els sistemes definits per programari per a la realització de les mateixes veiem que aquestes es realitzen ràpidament, consistentment i de forma continuada. D'aquesta forma és possible automatitzar mesures des de diversos dispositius, analitzar dades en paral·lel amb adquisició i crear reportis personalitzats.

Una altra dels avantatges de LabVIEW és que permet abstraure's de gran part de la complexitat administrativa de la programació com l'assignació de memòria i la sintaxi del llenguatge. Les biblioteques integrades de programari específic per a enginyeria permeten l'adquisició, anàlisi, control i compartir dades, permetent la realització de programes senzills per part de qualsevol tipus d'usuari amb uns mínims coneixements de programació.

En disposar de molts components programari ja dissenyats no és necessari crear el sistema de mesures des de zero donat que es poden utilitzar les funcions integrades de LabVIEW Express i programes exemple. Les funcions exprés permeten programar usant finestres interactives i menús desplegable simples i realitzen una guia pas a pas durant la configuració.

LabVIEW també inclou varis programes exemple que permeten executar les tasques de mesures més comunes, des de les mesures més simples d'un sol canal per a temporització, fins a mesuraments de sincronització avançades entre múltiples dispositius. Aquests programes permeten crear una fàcil automatització en el mesurament de voltatge, corrent, temperatura, tensió, so i un altre tipus de mesures de sensor.

Amb les funcions ja dissenyades es pot crear ràpidament un VI fent servir centenars de controls, gràfiques i eines de visualització. Els elements VI, ja dissenyats per al seu ús en mesures, funcionen amb diferents tipus de dades no fent necessari un desenvolupament personalitzat per a cada programa de mesures.

Tots aquests avantatges fan del programa LabVIEW un referent en els sistemes de mesures enfront de llenguatges de programació com a C, destacant sobre aquests en la seva facilitat d'ús i la seva orientació a la programació de senyals, esdevenint el llenguatge de programació idoni per construir un sistema de mesura i control, i per això mateix serà l'utilitzat en aquest projecte.

El principal avantatge de LabVIEW és que permet combinar tot tipus de programari i maquinari, tant del propi fabricant com d'altres fabricants.

### 3.5. El programa Anàlisis LAB v0.1

Per a l'estudi de la reacció de la cel·la davant de l'estímul del circuit controlador es genera un software amb LabView per tal d'adquirir dos senyals, la intensitat que circula i el voltatge entre càtode i referència, i generar un senyal de sortida per al control d'aquesta.

El panell frontal que es pot veure a la Figura 20 engloba el control de tres modes de sortida. La sortida manual ens permet excitar el sistema en llaç obert i veure en un gràfic la seva reacció. La sortida manual 2 ens permet fer el mateix que la manual i és molt útil a l'hora de fer canvis sobtats de consigna. Per últim, es disposa de la sortida PID amb tots els seus paràmetres editables, per tal de poder provar diferents valors en el cas de voler trobar un conjunt de paràmetres de forma empírica o fent servir diferents mètodes de sintonització PID.

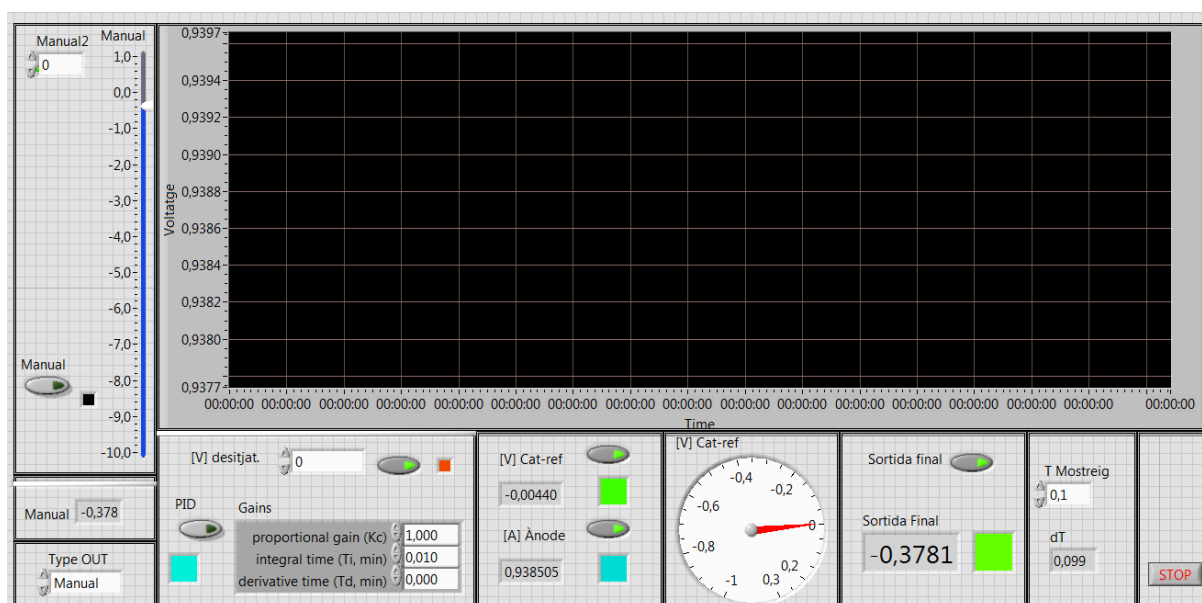


Figura 20. Panell Frontal Anàlisis Lab 0.1

També s'ha implementat la possibilitat d'escollir el color i la visualització o no dels diferents senyals per així poder veure amb més detall el comportament i les reaccions entre elles. A més a més, disposa d'un control del temps de mostreig, que és estable a partir de 50 mil·segons.

El diagrama de blocs on s'implementen les funcionalitats està format pel diagrama general i subVis per tal de fer més còmode la modificació i entesa de la lògica del programa.



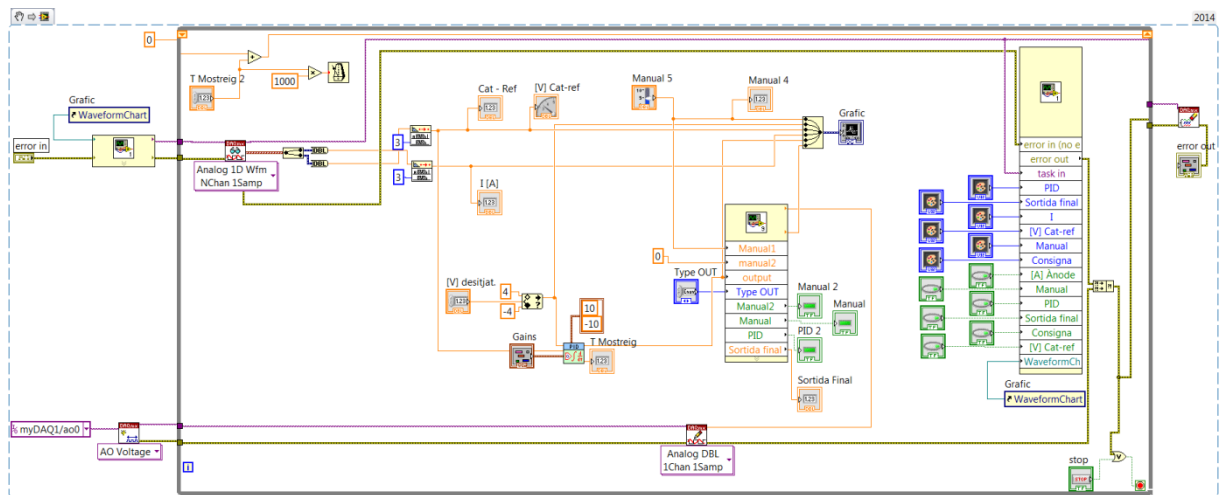


Figura 21. Vi principal Anàlisis Lab 0.1

El Vi principal, que es pot veure a la Figura 21, està format per un bucle que controla el temps de mostreig per software i recull les variables d'intensitat i voltatge Cat-Ref. S'han afegit uns filtres de mitjana per poder jugar amb els valors que llegim, atès que s'ha detectat un patró similar al potencioestat de nanoelectra. Hi ha un subVi de selecció de mode de sortida i el de control dels gràfics. Com es pot veure també tenim un PID per tal de provar diferents mecanismes o procediments de sintonia i veure si és viable abans de portar-lo al PLC.

El subVi Ailnit agrupa les funcions d'inici i captura de les formes d'ona del corrent i el voltatge càtode-referència a mesura. Com es pot veure a la Figura 22 en la inicialització de les sortides, es fa amb crida al MyDAQ per posteriorment configurar cadascuna d'elles.

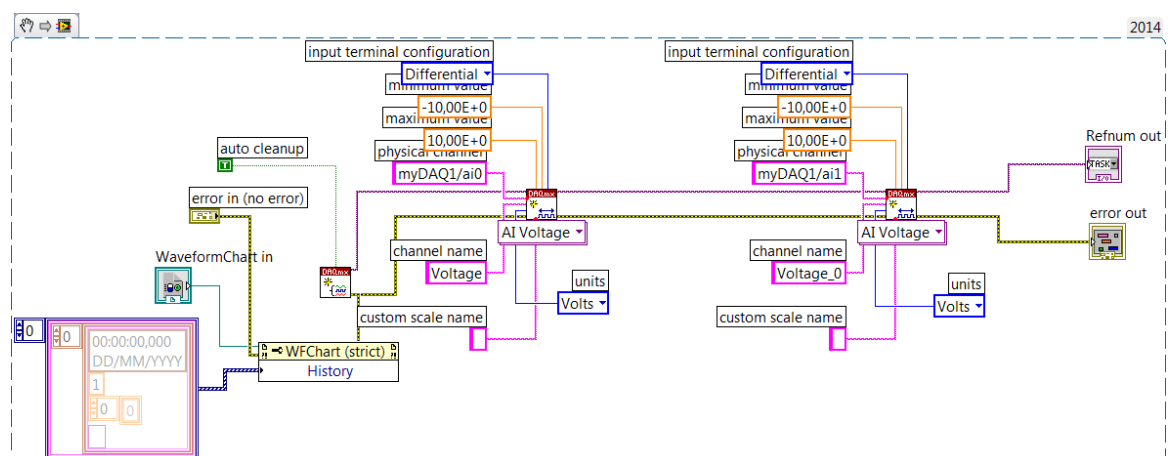


Figura 22. SubVi Ailnit

El subVi Gràfics, que podem veure a la Figura 23, és l'encarregat de connectar els nodes de propietats dels gràfics amb els controls de color i visualització dels diferents senyals.

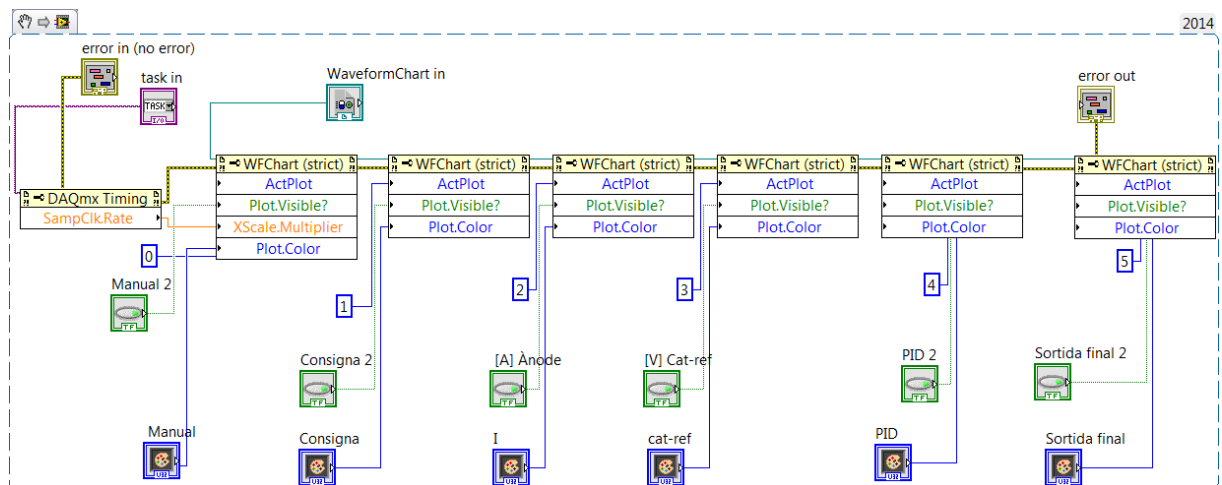


Figura 23. Control de gràfics

Per acabar, el subVi de control del mode permet, que podem veure a la Figura 24, escollir quin tipus de sortida es requereix. Tot el conjunt està implementat en una estructura de casos i limitant la sortida dins dels rangs permesos.

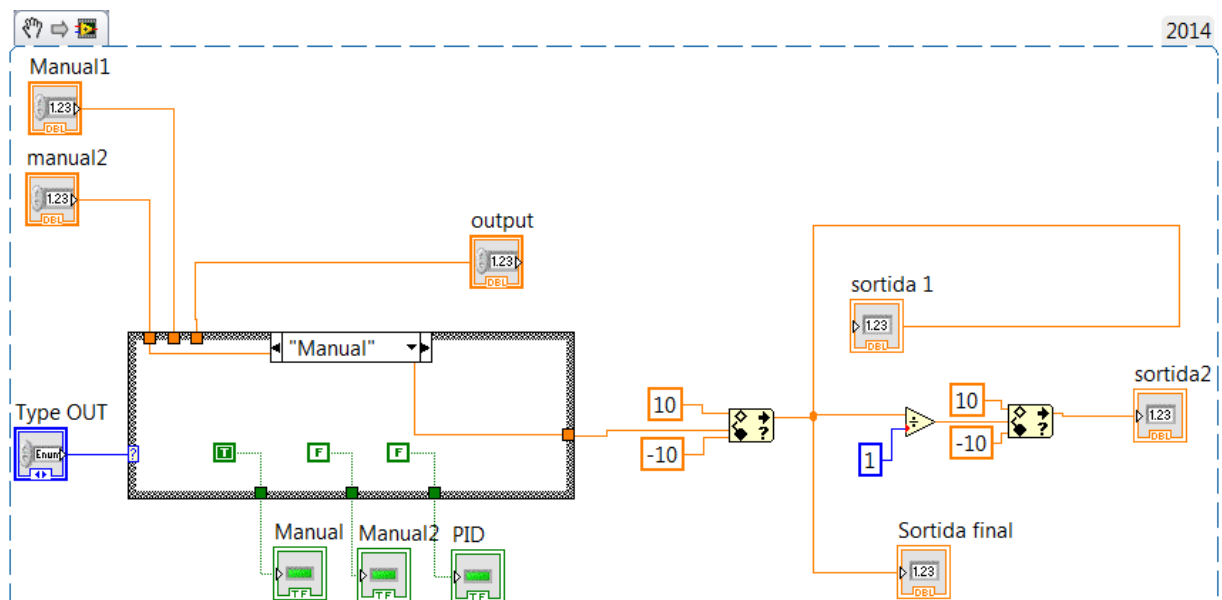


Figura 24. Control de mode

### 3.6. Estudi i control de la cel·la

Per visualitzar la reacció del potencial entre càtode i referència a diferents voltatges de ànode càtode es fa una gràfica al llarg del temps variant el potencial d'excitació, com es pot veure a la Figura 25. En aquesta gràfica s'observa com el consum d'intensitat és mínim i el funcionament correcte en valors des de 0 fins a -6 volts, tenint un marge de resposta des de 0 fins a, pràcticament, -3 volts, fet que indica que es pot arribar als -0,33 volts amb aquest circuit.

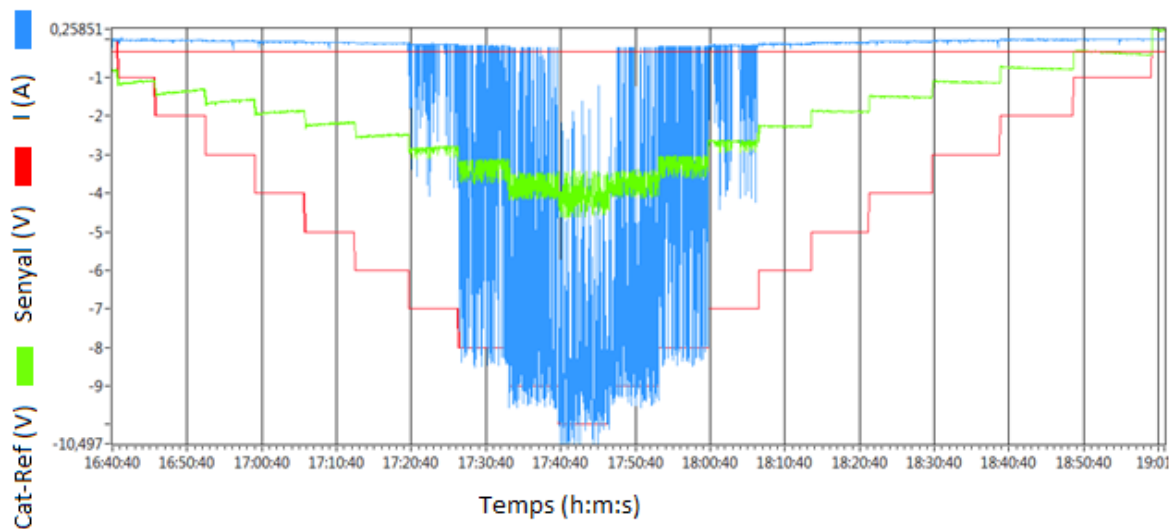


Figura 25. Prova graons

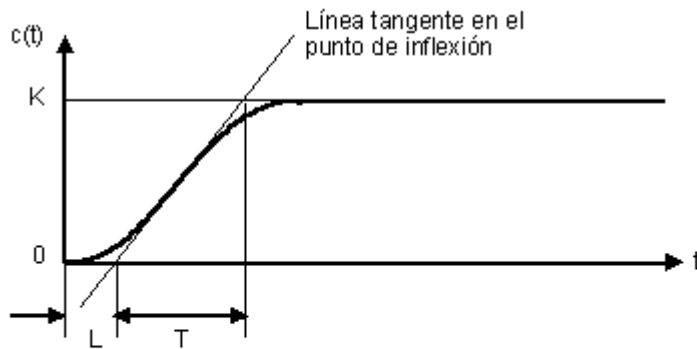
Partint de la naturalesa del sistema, similar a altres processos com és el control de temperatura, es decideix dur a terme una sintonització del PID pel sistema de Ziegler–Nichols per resposta a un graó.

Aquest mètode de sintonització s'adapta molt bé a sistemes estables en llaç obert i que presenten un cert retard des que es s'emet la senyal fins que actua sobre el procés. Per poder determinar la resposta al graó de la cel·la s'ha de dur a terme el muntatge de la Figura 26 on se substitueix el controlador per un graó. El graó d'entrada ha d'estar entre un 10% i un 20% dels valors de sortida del controlador.



Figura 26. Prova graó

D'aquest muntatge s'han d'adquirir el gràfic des de l'inici del graó fins on s'estabilitza la sortida del sistema. Després es poden trobar diferents variants i interpretacions del mètode per extreure els valors de guany i temps integrador que són els que interessen en aquest cas. A la Figura 27 es pot veure un resum del procediment que es desenvoluparà.



Tipo de Controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$T/L$	$\alpha$	0
PI	$0.9T/L$	$L/0.3$	0
PID	$1.2T/L$	$2L$	$0.5L$

Figura 27. Interpretació mètode ZN

Aplicant aquest muntatge el sistema dóna una resposta com la Figura 28, que indica que s'estabilitza en 1 segon aproximadament i pren un valor final de 464 mV.

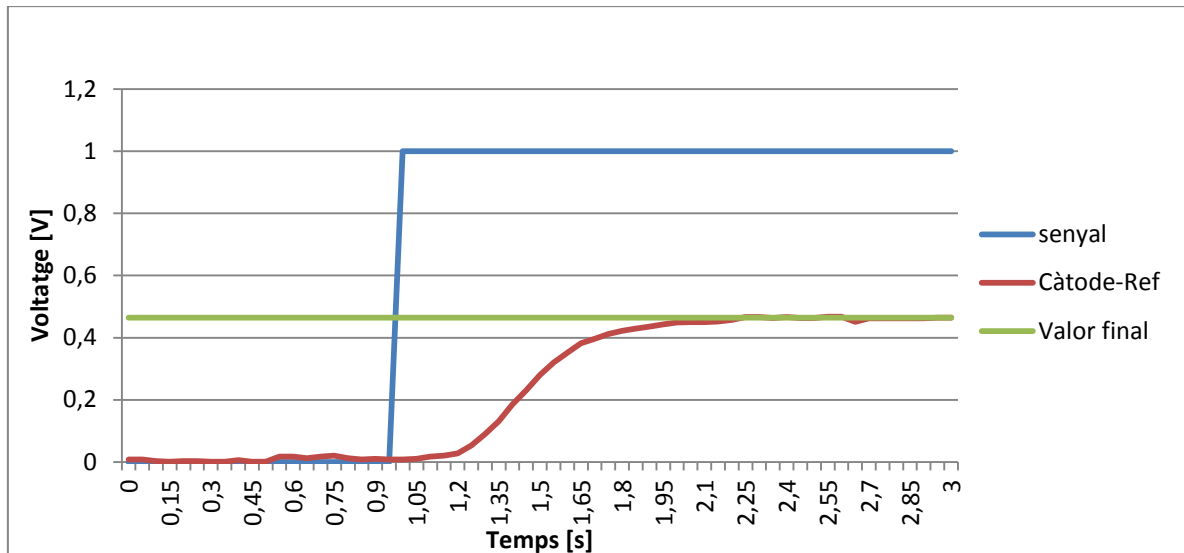


Figura 28. Prova graó

Ara es vol trobar el punt de màxim pendent de la resposta per tal de poder dibuixar la recta tangent com a l'anterior Figura 27, utilitzant l'Equació 4 es duu a terme una nova sèrie de dades per així trobar el pendent màxim.

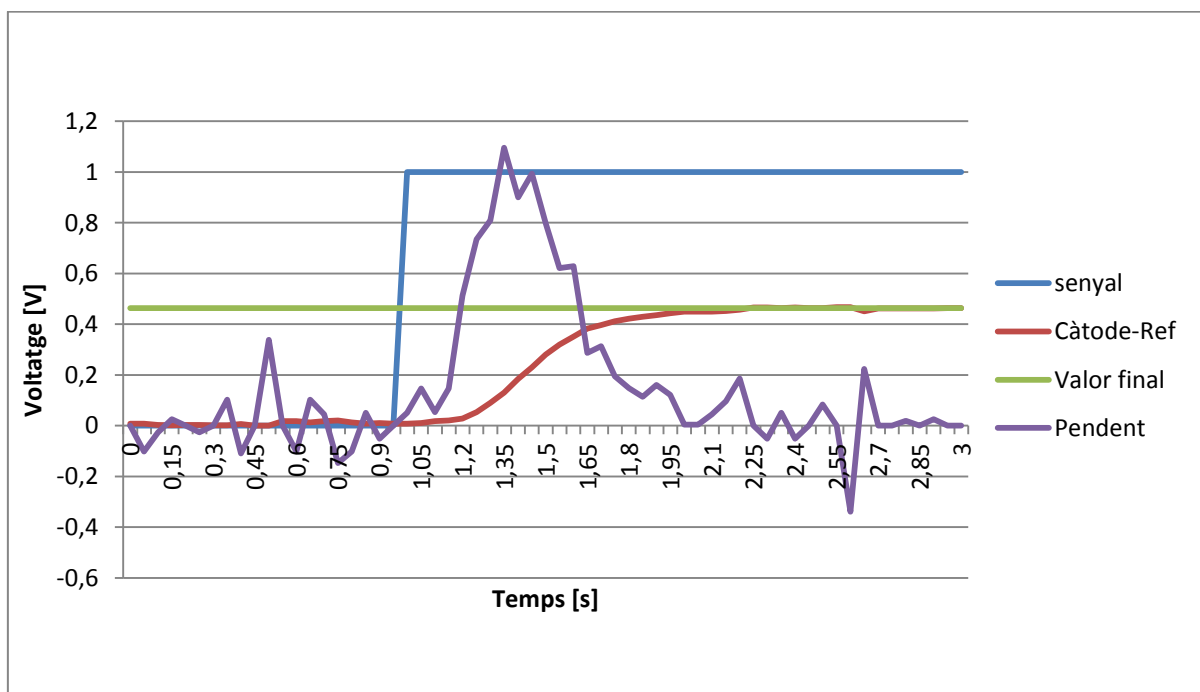


Figura 29. Pendent de la resposta

$$m = \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)} \quad (\text{Eq.4})$$

Com es pot apreciar a la Figura 29 el punt de màxim pendent el trobem en l'instant 1,35 segons en el qual el pendent és de 1,096 volts per cada segon transcorregut. Amb aquestes dades i l'Equació 5 de la recta, es fa un nou gràfic amb totes les dades, es mostra a la Figura 30.

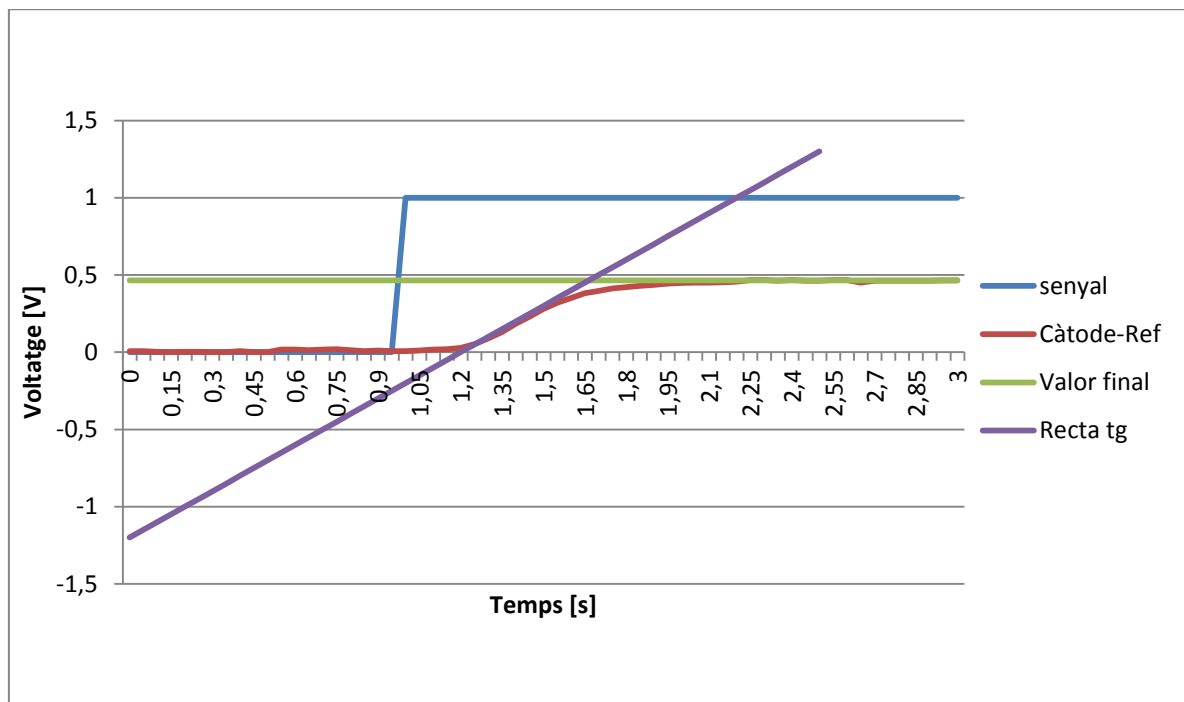


Figura 30. Recta tangent

$$y = m \cdot x + b \quad (\text{Eq.5})$$

Amb la guia de la Figura 27 extraïem els valors de L i T del nostre sistema. L correspon al temps mort. És el temps que triga el sistema a començar a respondre un cop donat el senyal de control. Aquest interval de temps es pren des de la pujada del graó, fins a la intersecció de la recta tangent sobre el valor inicial del sistema, en el nostre cas aproximadament 0 i per tant correspon a l'eix d'ordenades. T correspon al temps de pujada. Es calcula des del punt on la recta tangent talla amb el valor inicial del sistema fins al punt en què aquesta mateixa recta talla amb el valor final del sistema. Les pautes descrites a la figura anterior estan

simplificades per un sistema de guany 1, s'utilitza l'Equació 6 per calcular  $K_p$ . A la Taula 1 es mostren els valors de les variables i els resultats dels paràmetres del controlador. Es considera adequat un PI.

$$K_p = \frac{\Delta V_{IN} \cdot T}{\Delta V_{OUT} \cdot L} \quad (\text{Eq.6})$$

Paràmetre	Valor
L	0.22 s
T	0.44 s
$\Delta V_{IN}$	1 V
$\Delta V_{OUT}$	0.464 V
$K_p$	3.88
$K_i$	0.733

Taula 1. Valor dels paràmetres

Es proven aquests valors sobre el sistema. Es pot observar que es té una reacció esmorteïda i lenta, però donat que es un sistema on les pertorbacions en teoria són d'un caràcter molt lent es creu haver complert les especificacions de control. Es pot veure la reacció del sistema amb el PI a la Figura 31.

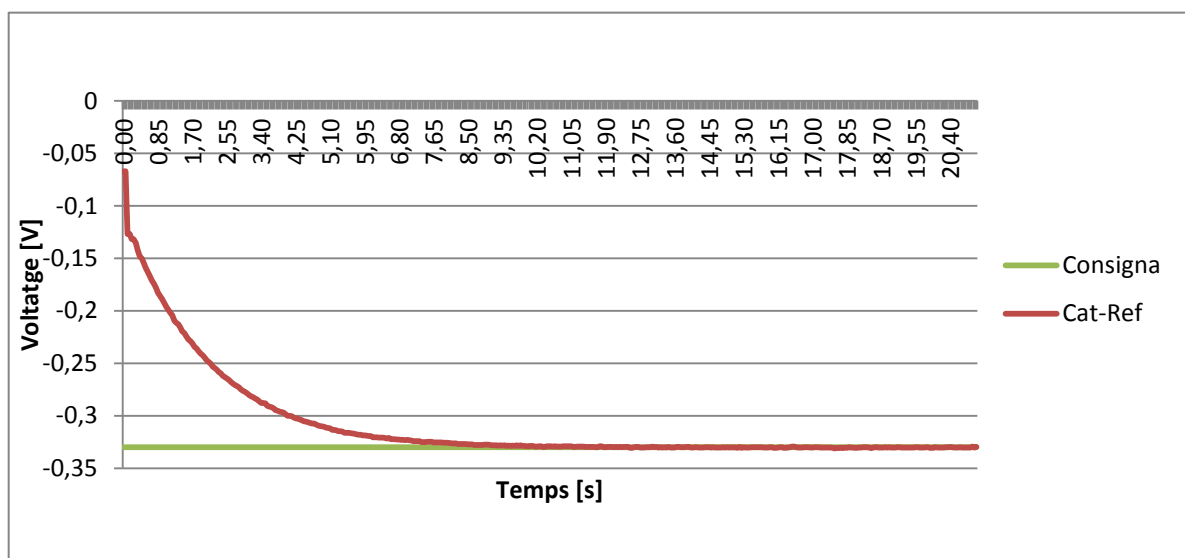


Figura 31. PI sobre la cel·la

Es considera interessant poder veure en detall la part final del gràfic anterior per percebre les petites pertorbacions tot i que estan dins d'un marge realment petit. La Figura 32 ho mostra.

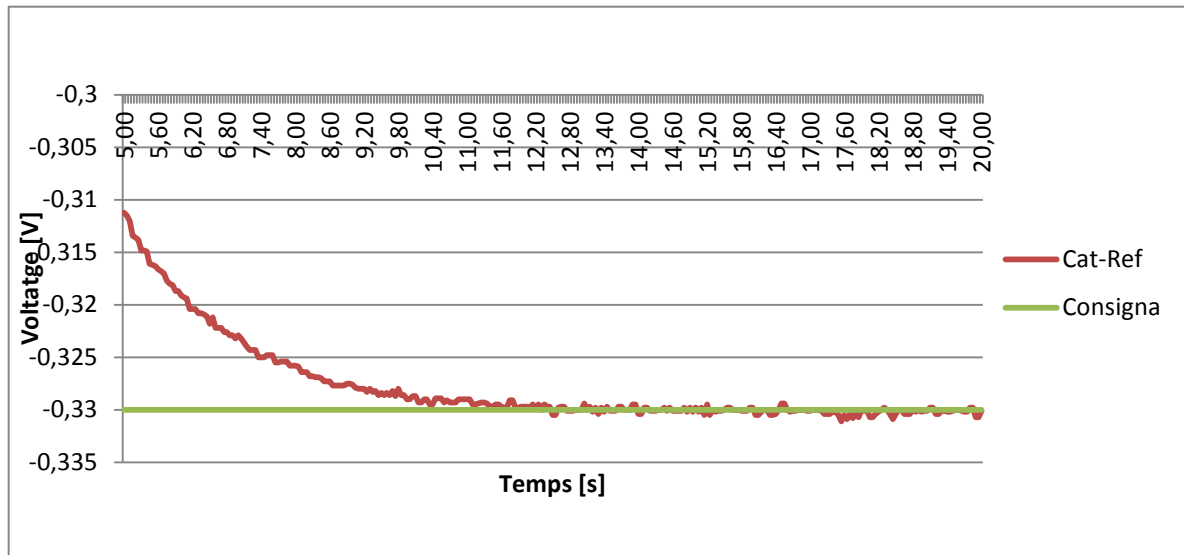


Figura 32. Detall final control



#### 4. Migració del sistema a la planta del pilot del grup de recerca LEQUIA

Una vegada finalitzat l'estudi de laboratori es duu a terme la migració del sistema a un entorn industrial. Es tracta d'un contenidor de camió on s'ha fet tota la instal·lació i on ja s'han disposat les 36 cel·les. Cal remarcar que el sistema es troba en un ambient molt sorollós, hi ha un transformador 400/230V, diferents bombes i una estructura metàl·lica que incrementa les pertorbacions. En aquest projecte es deixa de banda el circuit de l'aigua i la disposició de les cel·les, atès que això s'ha dut a terme amb anterioritat i no està vessat al camp d'aquest projecte.

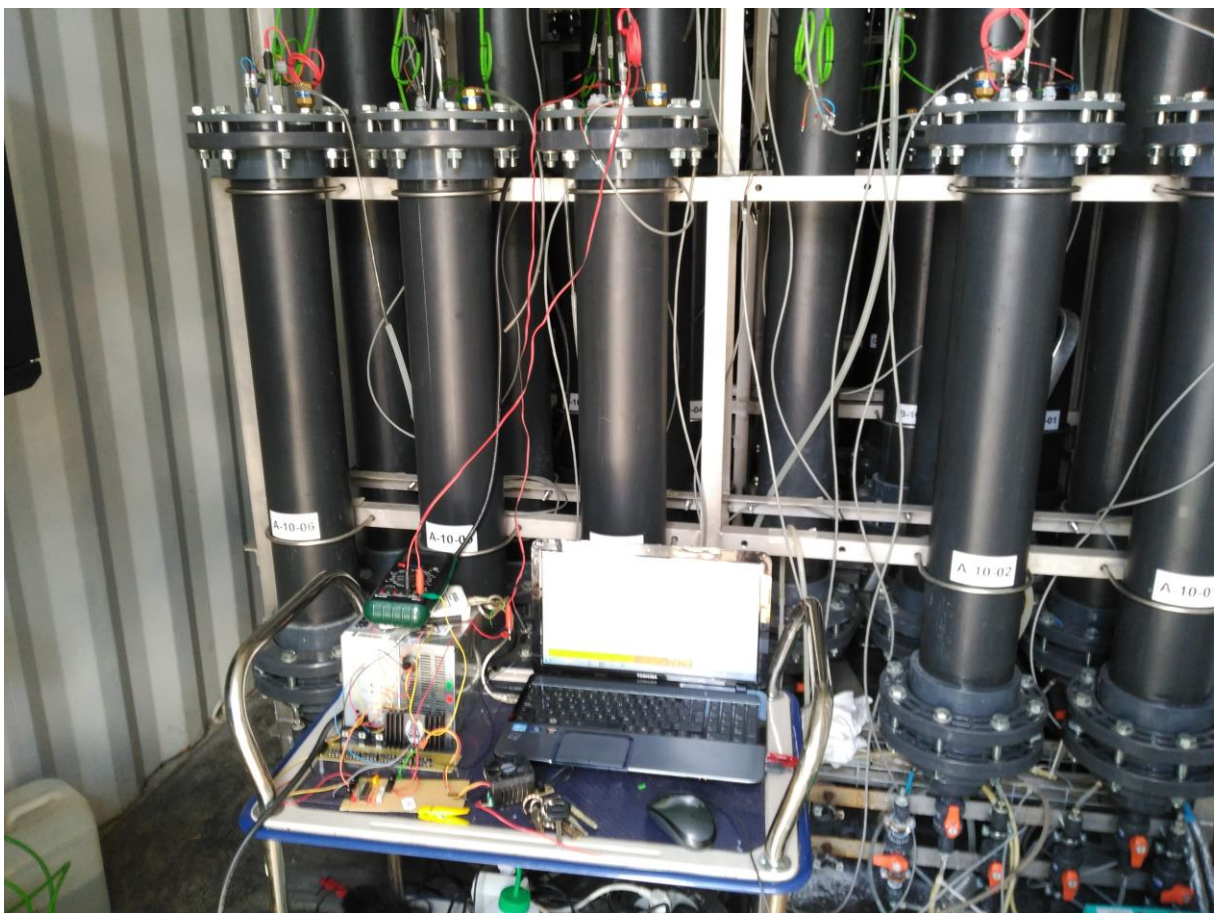


Figura 33. Vista de la planta de Navata

##### 4.1. Instal·lació general

Per a la posada en pràctica s'ha disposat d'un cablejat bipolar de 1mm que connecta l'entrada analògica del PLC amb el terminals Càtode i Referència de la cel·la i un altre que

connecta la sortida del PLC amb els terminals Ànode i Càtode passant pel circuit controlador i sortint al terminals Ànode i Càtode de la cel·la. Com es mostra a la Figura 34.

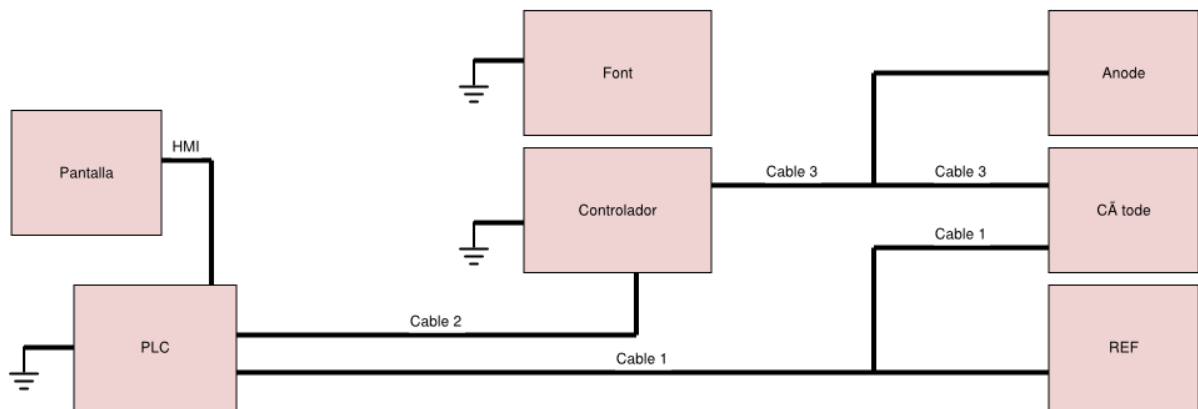


Figura 34. Disposició general del

#### 4.2. Adequació del circuit pel cablejat de la planta

En un primer moment s'intenta fer servir el cablejat de la planta directament però el soroll és massa elevat, com es pot observar a la Figura 35 el soroll és pràcticament de 0,8V de pic a pic quan el senyal passa per el cablejat de la planta pilot, de uns 6 metres, a meitat de gràfica es substitueix per un cable de 1 metre i es pot veure com es redueix considerablement. Aquest fet compromet la fiabilitat de les mesures.

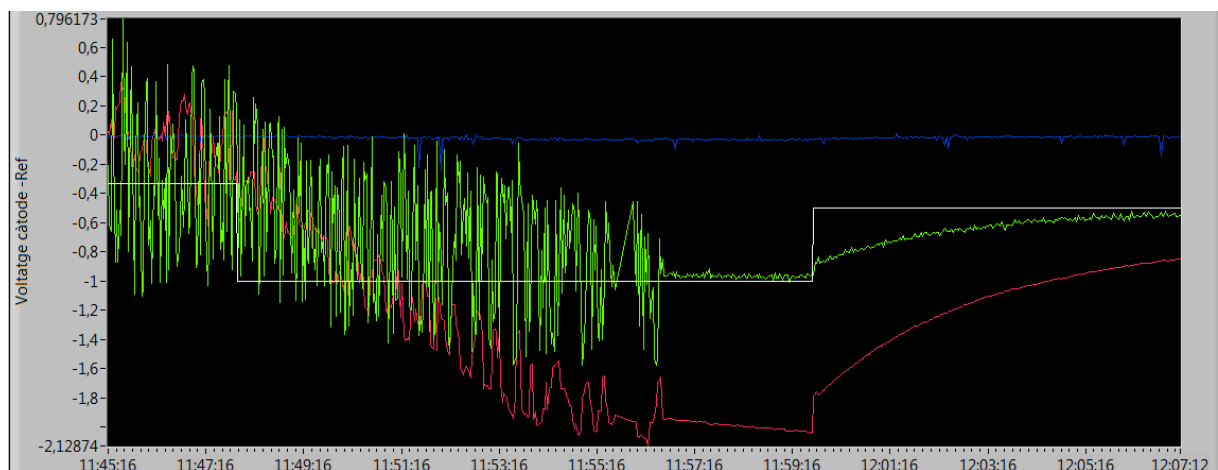


Figura 35. Canvi de cable a 1 metre

Partint de la necessitat de poder rebutjar el soroll que rep el cable, s'opta per transmetre el senyal de control en mode diferencial. És a dir, rebre la informació de la manera més propera a la cel·la com sigui possible, convertint també el senyal de sortida de la cel·la per fer-lo viatjar fins on es trobarà el PLC. Per dur a terme aquesta tasca s'utilitzarà l'integrat drv134 aparellat amb el INA137, un mètode molt utilitzat en sistemes d'àudio. El muntatge recomanat pel fabricant es mostra a la Figura 36.

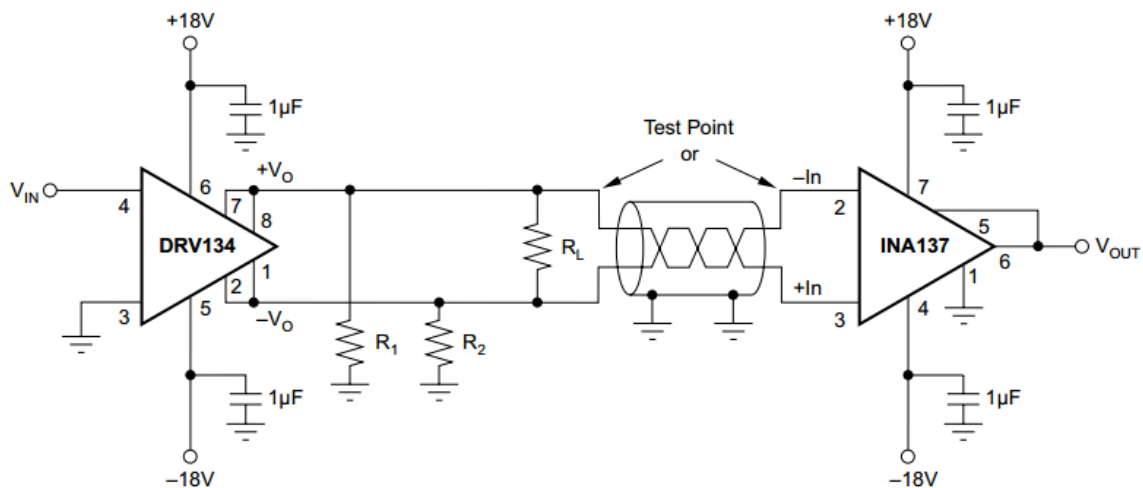


Figura 36. Drv134 i INA137

Aquest muntatge permet aprofitar el cablejat ja existent amb un cost relativament baix, a més no obliga a modificar cap dels circuits anteriors, quedant l'esquema de connexions com es mostra a la Figura 37.

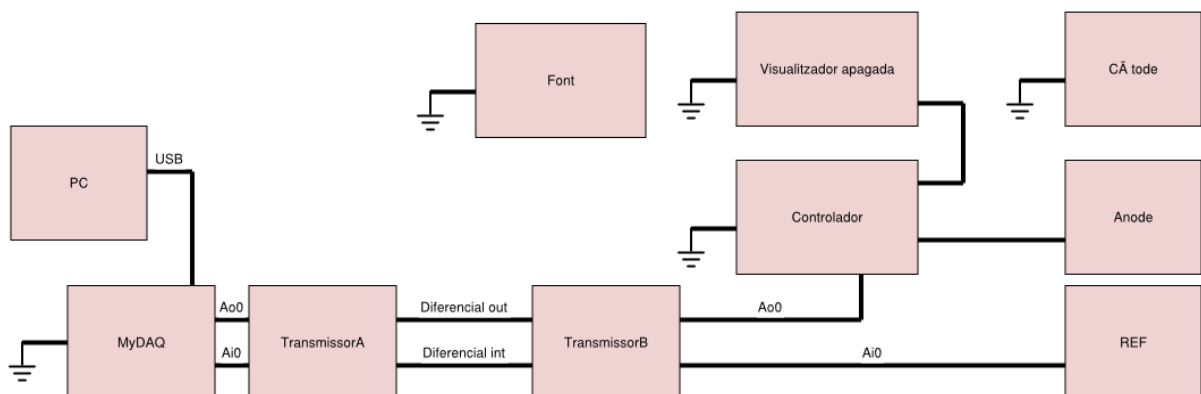


Figura 37. Esquema amb transmissors

### 4.3. Adequació del programa Anàlisis Lab v0.1

En afegir el circuit de transmissió s'ha de fer evolucionar el programa Anàlisis Lab v0.1 per adequar-lo a les noves condicions i situacions. La primera de elles, atès que només es disposa de dos cables, un pel senyal de control i l'altre pel senyal rebuda, és eliminar l'adquisició de la intensitat que circula per la cel·la, ja que no s'ha trobat cap tipus de patró que pugui ajudar al control de la mateixa. L'altre és contrarestar el guany que genera el transmissor del senyal, que, segons el fabricant, és de 2. Per tant, s'hauran d'afegir dos blocs matemàtics per multiplicar el valor que tenim al MyDAQ i obtenir la meitat.

### 4.4. PLC

La planta conté una instal·lació prèvia amb tot un sistema SCADA implementat, tot i que no s'hi pot accedir directament i per fer qualsevol tipus de modificació s'ha de contactar amb l'empresa subcontractada per la universitat.

#### 4.4.1. CPU

El controlador lògic programable VIPA CPU014, clònic dels coneguts siemens PLC S7-300, ofereix la flexibilitat i capacitat de controlar una gran varietat de dispositius en les diferents tasques d'automatització per les que està dissenyat. Gràcies al seu disseny compacte, flexible configuració i ampli joc d'instruccions, VIPA CPU014 és idoni per controlar una gran varietat d'aplicacions. La CPU (Central Processing Unit) incorpora un microprocessador, una font d'alimentació integrada, així com circuits d'entrada i sortida en una carcassa compacta, creant així un potent PLC. Una vegada carregat el programa en la CPU, aquesta conté la lògica necessària per vigilar i controlar els dispositius de l'aplicació. La CPU vigila les entrades i canvia l'estat de les sortides segons la lògica del programa d'usuari, que pot incloure lògica booleana, instruccions de comptatge i temporització, funcions matemàtiques complexes, així com comunicació amb altres dispositius intel·ligents. El VIPA CPU014 disposa d'un connector al corrent, connectors per la connexió dels diferents blocs d'extensió, espai per guarda la targeta de memòria, LED's d'estat per les E/S integrades i el connector PROFINET.

#### 4.4.2. SLIO

Els mòduls d'adquisició i generació de senyals dintre del sistema VIPA està connectat com una unitat de xarxa industrial, fet que permet una gran flexibilitat, però resta comoditat a l'hora de treballar amb el software STEP-7 oficial de siemens.

#### 4.4.3. Font

En el sistema SLIO l'alimentació és subministrada a través de mòduls d'alimentació. Tant la interfície de bus com l'electrònica dels mòduls connectats, s'alimenten a través del mòdul d'alimentació integrat en el mòdul d'interfície.

#### 4.5. Pantalla

Juntament amb el PLC es disposa d'una pantalla VIPA 62H-MGC0-CB, una opció molt econòmica, pensada sobretot per petits projectes. Aquesta pantalla tàctil de 4,3" i 480x272 píxels està dotada d'un processador Cortex-A8 de 667MHz i 248MB de memòria de treball. Les connexions disponibles són RS232/422/485, USB i ethernet RJ45. Tot això configura un sistema amb Windows Embedded CE 6.0 Professional i el Movicon CE Runtime.

## 5. Programació del PLC

Tot i que una de les premisses del projecte era acabar controlant el sistema amb un PLC, la dificultat per trobar un circuit lo suficientment estable i el fet de no tenir accés directe al PLC, ja que era una subcontractació per part del LEQUIA de la planta, ha fet impossible la seva implementació completa. Tot i això, durant una fase en la qual es creia haver trobat un bon circuit i s'esperaven els components per realitzar el muntatge es van preveure i fer unes modificacions que es creuen interessants de documentar. La configuració esperada al final del projecte seria la representada a la Figura 40.

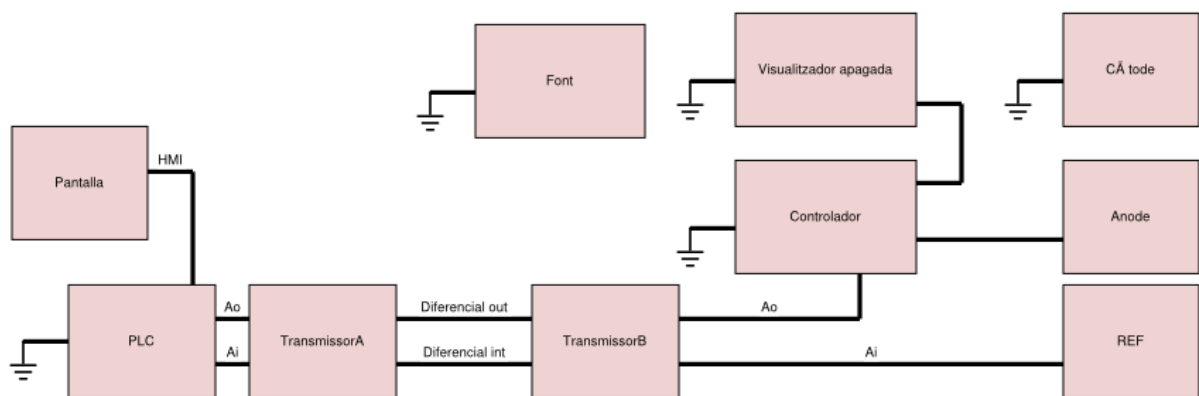


Figura 38. Disposició general final

### 5.1. Escalat de valors

Els valors mostrats a la pantalla tàctil, que en un primer moment es mostraven en divisions i únicament mesuraven valors positius, ara mateix estan representats en volts i en un rang entre 10 volts positius i negatius, per així poder veure i fer intel·ligibles els valors mesurats.

### 5.2. PID cel·les

En un primer moment només hi havia un PID implementat en el primer canal, sense els valors escalats i que només admetia rangs positius. Després de les modificacions fetes conjuntament amb el programador de Kiseki es tenen els 36 PID escalats i amb la possibilitat de modificar els paràmetres Kp, Ki i Kd a la mateixa pantalla tàctil.

## **6. Resum de pressupost**

El preu total del pressupost és de dos mil cinc-cents trenta-quatre euros amb cinquanta-tres cèntims, sense IVA.

## 7. Conclusions

Acabat el projecte coneixem amb més detall el funcionament de la cel·la. Gràcies a les proves sabem el rang i tipus d'estimulació electrònica que ha de rebre per reaccionar. El conjunt de circuit compleixen amb aquestes especificacions i estimulen la cel·la.

S'ha desenvolupat una aplicació per l'estudi i control de la cel·la amb el software LabView juntament amb la targeta d'adquisició de dades MyDAQ. Amb això s'han estudiat les bases per poder implementar el control en el PLC.

El mètode de Ziegler–Nichols de resposta del graó ha resultat satisfactori per trobar uns paràmetres òptims per el control del sistema amb PID.

La planta pilot del LEQUIA ha resultat ser un ambient amb molt de soroll electromagnètic, s'ha trobat una solució per transmetre les senyals sense interferències aprofitant el cablejat existent.

Per avançar en la planta pilot es van fer unes modificacions en el programa del PLC que han donat resultats satisfactoris.

Al tractar-se d'un projecte de recerca s'obrien moltes opcions per solucionar el mateix problema i molts petits problemes que han suposat una càrrega en temps i recursos important. En conjunt s'ha avançat en l'estudi de la cel·la i s'han posat les bases i guies per un projecte de recerca que espera continuïtat.

Jose Antonio Torres Moreno

Graduat en Enginyeria Electrònica Industrial i Automàtica

Girona, 5 de setembre de 2016



## **8. Relació de documents**

Aquest projecte està format per cinc documents: la memòria, els plànols, el plec de condicions, l'estat d'amidaments i el pressupost.

## 9. Bibliografia

CARNEROS, B., RAYÓN, P. Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión. Mc Graw Hill. Aravaca. 2003.

Controlador electrónico de velocidad PID, (<http://www.monografias.com/trabajos93/controlador-electronico-velocidad-pid-usando-cpld/controlador-electronico-velocidad-pid-usando-cpld> , 4 de maig de 2016.)

DAQ circuits, Circuito amplificador de instrumentación <http://daqcircuits.net/index.php/circuitos-tipicos-con-amplificadores-operacionales/circuito-amplificador-de-instrumentacion/70-circuito-amplificador-de-instrumentacion>, 3 d'abril de 2016

IFAC Workshop on Digital Control: Past, Present and Future of PID Control, Mc Graw Hill. Terrasa, España , 2000.

OGATA, K. Ingeniería de control moderna. Pearson. 5a Edició. Madrid. 2010.

Optimum Settings for Automatic Controllers, (<http://chem.engr.utc.edu/Student-files/x2008-Fa/435-Blue/1942-paper.pdf> , 10 de maig de 2016)

RBT. Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión. Paraninfo. 2a Edició. Madrid. 2004.

Siemens. Catàleg CPU i extensions. ([http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/4298/12/Simatic\\_S7\\_300\\_PLC.pdf](http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/4298/12/Simatic_S7_300_PLC.pdf), 10 maig 2016)

User Guide and specifications Ni MyDAQ. National Instruments Corporation. Diciembre 2011.

## **10. Glossari**

CPU: Central Processing Unit.

DAQ: Data Acquisition.

LED: Light-Emitting Diode.

LEQUIA: Laboratori d'Enginyeria Química i Ambiental.

PID: Proportional-Integral-Derivative.

PLC: Programmable Logic Controller.

UdG: Universitat de Girona.

USB: Universal Serial Dus.