

**Oriol Zaragoza Alcaine**

**PROTOTIP DE SISTEMA D'ANÀLISI FOTOMÈTRIC PER A TESTS  
ENZIMÀTICS**

**TREBALL DE FI DE GRAU**

**dirigit pel Prof. Josep Ferré Borrull**

**Grau d'Enginyeria Electrònica Industrial i Automàtica**



**UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI**

**Tarragona**

**2015**



# Índex de contingut

<b>1</b>	<b>Objectius del TFG .....</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Introducció.....</b>	<b>5</b>
2.1	Procés general de producció de begudes fermentades.....	6
2.1.1	Fermentació malolàctica i àcid màlic.....	8
2.1.2	Controls de qualitat .....	9
2.2	Tests enzimàtics .....	10
2.2.1	Productor de tests enzimàtics .....	11
2.2.2	Enzims.....	12
2.3	Compost a analitzar .....	12
2.3.1	Principi de la reacció.....	12
2.3.2	Anàlisi del NAD.....	13
2.3.3	Com preparar les mostres pel test enzimàtic.....	14
2.4	Llei de Beer-Lambert.....	15
2.4.1	Principi de la llei .....	16
2.4.2	Absorbància, transmitància i concentració.....	16
2.4.3	Càlculs de la concentració en el test enzimàtic .....	18
2.4.4	Relacions teòriques pel disseny inicial.....	19
2.5	Sistema optoelectrònic: Espectrofotòmetre .....	20
2.5.1	Parts d'un espectrofotòmetre de feix simple.....	22
2.5.2	Instruments disponibles en el mercat .....	23
2.6	Concepte d'un sistema optoelectrònic bàsic.....	23
2.6.1	Components elegits per a un sistema optoelectrònic bàsic .....	24
<b>3</b>	<b>Anàlisi d'un sistema fotomètric de mesures .....</b>	<b>34</b>
3.1	Sistema 1: Comprovació de la resposta dels elements bàsics del sensor... 34	
3.1.1	Càlculs inicials .....	35
3.1.2	Resultats i discussió de l'assaig del sistema 1 .....	36
3.2	Estudi per les millores del sistema 1.....	39
3.2.1	Assaigs i metodologia de test.....	39
3.2.2	Caracterització de l'instrument i càlcul d'errors .....	42
3.3	Sistema 2: Influència de les resistències a la sortida .....	45
3.3.1	Resultats i discussió de l'assaig del sistema 2 .....	46
3.4	Sistema 3: Amplificació del senyal de sortida.....	52
3.4.1	Estudi previ d'un amplificador operacional.....	53
3.4.2	Càlcul del circuit amplificador del sistema.....	55
3.4.3	Plantejament amb un amplificador d' instrumentació.....	56

3.4.4	Experiments amb amplificadors operacionals.....	59
3.4.5	Resultats i discussió de l'assaig del sistema 3 .....	64
3.5	Sistema 4: Prototip de sistema final.....	67
3.5.1	Resultats i discussió de l'assaig del sistema 4 .....	67
3.5.2	Experiment amb concentracions: Material i procediment.....	75
3.5.3	Resultats i discussió del experiment amb concentracions.....	76
<b>4</b>	<b>Disseny del sistema .....</b>	<b>79</b>
4.1	Requeriments bàsics pel prototip.....	79
4.1.1	Necessitats mecàniques .....	79
4.1.2	Necessitats de hardware .....	79
4.2	Condicionament del hardware .....	80
4.2.1	Característiques tècniques dels elements introduïts per les millores .....	80
4.2.2	Esquemàtic definitiu del circuit.....	83
4.3	Disseny de la placa PCB .....	86
4.3.1	Procediment de confecció de la PCB .....	86
4.4	Pressupost .....	89
4.4.1	Preus unitaris .....	89
4.4.2	Preus descompostos.....	90
4.4.3	Resum pressupost per tasques .....	95
4.4.4	Resum del pressupost total.....	97
<b>5</b>	<b>Millores del sistema .....</b>	<b>98</b>
5.1	Arduino .....	99
5.1.1	Descripció del dispositiu .....	99
5.1.2	Plaques d'Arduino.....	99
5.2	Característiques de la medició analògica amb l'Arduino .....	102
5.2.1	Adaptació del hardware.....	104
5.2.2	Adaptació del software.....	110
5.3	Futures millores .....	113
<b>6</b>	<b>Conclusions i valoració personal.....</b>	<b>114</b>
	<b>Índex d'il·lustracions .....</b>	<b>117</b>
	<b>Índex de taules .....</b>	<b>118</b>
	<b>Bibliografia .....</b>	<b>119</b>

## 1 Objectius del TFG

L'objectiu principal d'aquest treball de fi de grau és estudiar i dissenyar un prototip d'un sistema fotomètric capaç de determinar la quantitat d'àcid màlic en una mostra amb una resolució equiparable als equips comercialitzats en l'actualitat per aquest fi i a una fracció del cost.

Com a segon objectiu definim el disseny i construcció dels sistemes òptics i electrònics necessaris per poder crear un prototip físic real però amb elements accessibles i econòmics per així analitzar-ne la viabilitat i l'impacte que podria tenir en la indústria alimentària i en concret, al sector de les begudes fermentades com és el cas del vi.

Un tercer objectiu és definir un producte aportant les solucions que esperaria un client amb l'aplicació dels coneixements obtinguts al llarg de la formació acadèmica per tal de buscar solucions a un problema de la indústria, buscant els coneixements i les eines que ens descriuen les necessitats d'aquell procés.

Finalment, el quart objectiu, compta amb la realització d'una memòria del projecte clara i estructurada descrivint la proposta de possibles sistemes i l'avaluació experimental dels mateixos, per a verificar el funcionament tal i com es realitza en les propostes de prototips reals. Tot aquest procediment estarà intercalat amb conceptes teòrics que donaran suport a l'explicació del procés experimental i de disseny.

## 2 Introducció

L'alimentació és una necessitat bàsica per garantir la supervivència humana. Al llarg de la història, les formes de producció dels aliments han canviat molt: des de la recol·lecció, caça i pesca com a única font d'alimentació, passant per l'agricultura i ramaderia bàsica i fins arribar a avui en dia que la producció alimentària s'ha convertit en una indústria molt potent, inclús en el motor econòmic de molts països.

Aquesta evolució de la producció alimentària ha fet que els consumidors no busquin solament alimentar-se sinó que busquen uns productes més específics regits per diferents factors com la qualitat, el preu, característiques organolèptiques, entre altres. Tot això ha produït que la indústria s'adeqüi a aquestes peticions, oferint avantatges enfront de la competència per destacar un producte concret i tenir un peu dins del mercat.

Per tant estem en un punt que es fa imprescindible conèixer la primera matèria i el producte que es fabrica, a fons, per saber-ne les qualitats que ens aporta i potenciar-les o simplement per corregir les mancances que hi hagi amb additius o altres elements. Aquest fet ha generat la necessitat de la creació de diferents tècniques d'anàlisis que ens reflecteixin la composició dels productes de forma precisa i relativament ràpida.

En la indústria aquest tipus de tècniques analítiques són àmpliament utilitzades, des de la recol·lecció de qualsevol fruita per fer suc, a la producció de begudes fermentades, fins qualsevol tipus de producció alimentària sòlida. Per tant, aquest fet obre un gran ventall d'empreses amb necessitats de dispositius específics, senzills i capaços d'obtenir lectures de compostos en les mostres dels seus productes. En l'actualitat el tipus d'instruments de mesura que existeixen són molt cars i en molts casos necessiten personal especialitzat i per tant, cal contractar serveis d'una empresa o un laboratori d'anàlisis extern.

Molts dels casos que s'analitzen simplement necessiten trobar una concentració aproximada d'un compost concret que pugui tenir la mostra, per tant, si estudiem la

viabilitat de dissenyar un instrument de mesura que proporcioni una mesura aproximada d'un compost en concret, de forma fiable i amb un cost econòmic, pot interessar a part dels productors de la indústria alimentària.

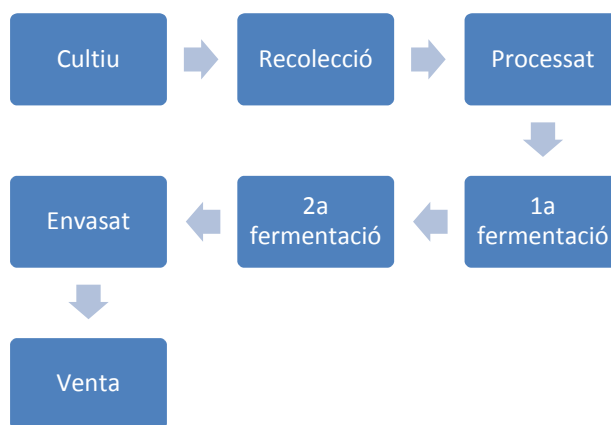
En aquest projecte estudiarem quines són les necessitats d'aquesta indústria alimentària, concretament la indústria vinícola. Caldrà entendre els tipus d'assaigs de control que es fan i les seves característiques per tal de buscar una bona solució, en forma d'instrument de mesura, per a ells. Un cop fets els estudis del possible instrument, comprovarem la funcionalitat i la viabilitat del mateix a la fi de poder obtenir un prototip d'instrument de mesura que ens ofereixi una informació útil i que estigui a l'abast dels productors de la indústria alimentària que ho necessitin.

## 2.1 Procés general de producció de begudes fermentades

La indústria de les begudes fermentades és una de les indústries alimentàries que necessita conèixer en profunditat l'estat de la primera matèria i definir com serà el producte definitiu. Per aconseguir necessita dispositius de mesura per poder controlar, tots els aspectes necessaris en les diferents parts del procés de forma precisa.

En aquest projecte focalitzem l'estudi en un centre de producció vinícola, descriurem doncs, de forma simplificada, en que consisteix el procés de producció del vi per tal d'entendre les metodologies i els controls bàsics que es realitzen. Tot això ens servirà per definir les necessitats bàsiques del procés i així començar a senyalar les característiques que hauria de tenir un futur instrument de mesura.

En l'esquema de la *Figura 1* podem veure l'estructura, simplificada, que segueix la producció d'una beguda fermentada com és el cas del vi. Aquest esquema també pot servir d'exemple en la producció d'altres begudes fermentades com les cerveses o caves.



**Figura 1.** Esquema del procés de fabricació del vi.

El procés comença en el cultiu de les primeres matèries, en el nostre cas el raïm. Quan el raïm està a la planta passa per diferents fases de creixement i maduració. Per poder determinar com evoluciona el cultiu i saber el moment exacte de maduresa, es fa necessària una avaluació dels sucres, entre altres compostos, que té en aquell moment el raïm. En aquest punt podem determinar el primer cas que cal fer un anàlisi a partir de diferents tècniques.

Un cop ja hem determinat l'estat de maduresa òptim del raïm, vindrà el procés de la recol·lecció. Aquest es basa en la collita del producte de la planta i el transport al celler. En

aquest punt també es poden realitzar diferents anàlisis per determinar les qualitats del raïm en el moment just de la recol·lecció.

En el processat, és premsa el raïm i se'n extreu el suc, conegut com a most. Un cop tenim el most fet s'han de determinar els sucres que conté, ja que, pel primer procés de fermentació serà clau. Com que el raïm és un element viu mai té la mateixa composició i pot tenir variacions en l'acidesa i en els sucres. Aquests fets poden ser involuntaris: ha estat un any sec o molt plujós; o voluntaris: el most és un conglomerat de varietats o de raïms de diferents zones. Sigui el cas que sigui, s'ha d'igualar el contingut en sucres i per tant s'ha d'analitzar i corregir.

Un cop tenim el most apunt, es sotmet al procés de la primera fermentació, coneguda com a fermentació alcohòlica. De forma resumida, la fermentació alcohòlica consisteix en un procés biològic de fermentació en absència d'oxigen originat per l'activitat d'uns microorganismes presents de forma natural en el raïm, coneguts com a llevats, que processen els hidrats de carboni, com els sucres, per tal d'obtenir: alcohol (etanol), diòxid de carboni (CO<sub>2</sub>) i molècules que consumeixen ells mateixos. Aquest procés es duu a terme en recipients d'acer inoxidable tal i com es pot veure en la *Figura 2*.

Continuaríem el procés amb la fermentació secundària. Aquesta, també coneguda com a fermentació malolàctica, ja es realitza dins de les típiques botes de vi, on encara també dura la primera fermentació. Entre altres coses el que fa és la conversió de l'àcid màlic en àcid làctic fet que influeix a millorar les qualitats del vi. Aquesta fermentació pot durar poc temps, com en el cas dels vins joves, o pot durar molt de temps, anys, com en el cas de vins negres amb més cos o qualitats. Això depèn de la qualitat del producte i del procés que es vulgui realitzar. Aquest és un punt clau en la producció del vi i per això es fa necessari la realització d'anàlisis per determinar els diferents compostos que influeixen en aquesta part del procés.

Un cop finalitzada la segona fermentació, ja hi hauria l'envasat del producte. Consisteix en introduir el vi finalitzat en els diferents recipients de comercialització, com ampolles de vidre, brics, botes... En aquest cas es necessiten assaigs per determinar-ne la qualitat del producte, el mètode de millor conservació, les característiques del vi i poder definir: la data de consum preferent, l'envàs més adient, l'evolució de les característiques del vi dins del envàs, entre altres aspectes.

Tot el procés de producció finalitza amb la venda, on el producte és adquirit pel consumidor, el qual valorarà la feina feta. La resposta del client serà decisiva per conèixer les seves preferències i gustos per tal de millorar el vi que s'està produint.



**Figura 2.** Recipients d'acer inoxidable on es fa la primera fermentació.

### **2.1.1 Fermentació malolàctica i àcid màlic**

Un cop definit el procés general de producció de les begudes fermentades i localitzades les necessitats, ens centrarem en els controls d'un punt en concret de la producció. Concretament just després de la fermentació alcohòlica i on en qualsevol moment pot començar la segona fermentació, la fermentació malolàctica. Aquest és un punt molt important i decisiu en la producció vinícola.

La fermentació malolàctica principalment consisteix en el procés pel qual l'àcid màlic es transforma químicament en àcid làctic i es produeix degut a l'acció dels bacteris d'origen làctic, existents de forma natural al vi, els quals consumeixen àcid màlic per produir energia. En el cas de la producció vinícola, la fermentació malolàctica és un objecte d'interès ja que determinarà: l'acidesa, la suavitat, l'aroma, la qualitat i les característiques organolèptiques del vi.

Per aquest procés de fermentació és imprescindible la proliferació de les bacteries làctiques, les quals obtenen l'energia a partir de l'àcid màlic. Així mateix, un factor clau és conèixer la concentració d'àcid màlic que hi ha al vi en aquell moment, per decidir com s'ha de propiciar la fermentació. Així es pot definir el moment just d'aquesta fermentació i atraçar-la o avançar-la segons convingui, per donar un caràcter específic al producte final i afavorir-lo.

Podem propiciar aquesta fermentació de dues maneres. De manera natural: a partir dels bacteris d'origen làctic que hi ha presents al vi, o de manera forçada: iniciant-la per la inoculació<sup>1</sup> del bacteri escollit. La darrera, entre altres coses, evita que cultius de bacteris no desitjats afectin als aromes que es busquen en el vi. Per consegüent sabent la quantitat exacte d'àcid màlic podrem controlar escrupolosament el procés de fermentació malolàctica.

L'àcid màlic és un dels àcids més abundants de la naturalesa i es pot trobar en algunes fruites i verdures amb un sabor una mica àcid com els codonys, el raïm, les pomes, les cireres no madures i el ruibarbre, entre altres. Per exemple, en el cas que ens ocupa, aquest àcid és el responsable del color verd i sabor àcid del raïm quan és verós. Per veure un exemple, les concentracions reals que hi ha d'aquest àcid en el raïm, van de 1 a 4 g/l.

La concentració de l'àcid màlic depèn de molts factors. Quan el raïm és poc madur, hi ha una concentració molt elevada. A mesura que el raïm va madurant aquesta concentració d'àcid es va reduint. El clima de la zona de cultiu o les inclemències meteorològiques que hagin succeït en la temporada també pot influir en aquesta concentració. Altres factors modificadors, estan més lligats al moment de la producció del vi. Hi ha productors que opten per una producció en massa, la qual no es pot cultivar tota la matèria prima en un sol camp. Per tant, es necessita una aportació extra de raïm de diferents camps o incús de diferents regions, totes elles cultivades amb diferents condicions, les quals donaran propietats diferents al raïm. Aquest fet també influirà en la concentració d'àcid màlic que tindrà aquest conglomerat de raïms.

En tots els casos anteriors, tot i les variacions de concentració d'àcid màlic, és vol obtenir un producte que mantingui un gust similar en cada lot i que tingui les mateixes qualitats. Per poder aconseguir això és necessari determinar de la manera més exacta possible la concentració d'àcid màlic per fer les correccions adients i determinar quin és el

---

<sup>1</sup> Inocular: Introduir (microorganismes vius, morts o atenuats o llurs toxines) en un organisme, d'una manera natural, voluntària o accidental.

millor moment per a propiciar la fermentació malolàctica, donant les característiques i qualitats que es busquen al producte final.

### **2.1.2 Controls de qualitat**

Durant el desenvolupament dels apartats anteriors, hem descrit una sèrie de punts on es realitzaven controls. Aquests controls s'anomenen controls de qualitat. Entenem per controls de qualitat: el conjunt de programes, tècniques i accions que es realitzen, ja sigui a través d'anàlisis, tests o altres eines de control, per tal de determinar la qualitat o els defectes existents en productes, processos i serveis. Un cop s'obté tota la informació possible, s'analitzen i s'interpreten les dades per assegurar que els productes o serveis finals estan dissenyats i es produeixen amb les especificacions i requisits demanats.

El procés de producció del vi, es controla de la mateixa manera que tots els processos de producció alimentaria, amb controls obligatoris, per prevenir problemes de salut pública, i controls específics, els que fan les empreses per analitzar millor el seu producte. En el nostre cas, definirem que els controls de qualitat es fan principalment per:

- Determinar problemes higiènics en la matèria o en el procés de producció.
- Controlar els processos de fermentació.
- Verificar la qualitat del producte.
- Obtenir informació del producte com nutrients, proteïnes, sucres...
- Detectar problemes en la composició com adulteracions, manipulacions...

El procediment per a realitzar un control de qualitat es basa en prendre una petita mostra d'un lot o d'un punt del procés de producció el qual es vol analitzar. Posteriorment es fan els tests o anàlisis pertinents (per exemple per buscar : concentracions de compostos, restes d'elements químics, traces de bacteris o el que requereixi el control) dins de la mostra extreta. Un cop fets els anàlisis se'n obtenen uns resultats que es compararan amb uns rangs prèviament definits, els quals considerem correctes. Si els valors dels resultats estan dins d'aquests rangs definits es pot considerar que el producte, el qual s'ha sotmès a l'anàlisi, compleix les especificacions i supera el control de qualitat.

#### Controls de qualitat en el vi

Molts d'aquests controls de qualitat que necessita el nostre procés, es basen en l'estudi de les concentracions de diferents compostos que hi han dissolts dins del vi. Es realitzen controls a la matèria prima i durant el procés de producció, ja que aquests punts són els que en determinen la qualitat i la diferenciació del vi.

Els controls de qualitat a les primeres matèries es fan per verificar l'estat de les mateixes i es determinarà si són les òptimes pel vi que es vol produir. Si ens centrem en els tests que es fan en el procés de producció, la major part estan enfocats a controlar el bon funcionament dels processos de fermentació. Abans de la primera fermentació és molt important saber el contingut de sucres per determinar el grau d'alcohol que tindrà el vi. Els controls del contingut de sucres en el vi es pot fer amb diferents dispositius, ja siguin analògics o digitals. Un exemple d'aquests instruments analògics és un refractòmetre com el que es pot veure en la *Figura 3*.



**Figura 3.** Refractòmetre analògic.

Un altre punt del procés on es centren els controls és abans de la segona fermentació, la fermentació malolàctica. Per a realitzar un vi amb unes especificacions concretes, tal com hem vist, és necessari saber la quantitat d'àcid màlic que hi ha per tal de determinar les condicions en que s'enfrontarà a la segona fermentació. En aquest punt els controls de qualitat, enfocats a determinar la concentració d'àcid màlic, es poden fer de moltes maneres però els que més s'utilitzen són les basats en tests enzimàtics.

Per a realitzar aquests tipus de controls de qualitat, és necessari l'ús de material de laboratori, maquinària especialitzada i inclús empreses externes al centre productor. Aquest fet genera una despesa afegida al producte. En el projecte definirem un prototip de sistema de mesura especialitzat en realitzar controls en aquest punt del procés. Obtindrà la quantitat d'àcid màlic que hi ha dins d'una mostra de vi de manera precisa i econòmica. Amb això intentarem aportar una solució més econòmica a la realització d'aquests controls de qualitat. Posteriorment, el sistema, es podria extrapolar en altres punts on el procediment d'anàlisi sigui semblant al descrit.

## **2.2 Tests enzimàtics**

Els mètodes enzimàtics ens ofereixen molts avantatges a l'hora de fer un control de qualitat. Són tests ràpids de fer, utilitzen equips i reactius comuns en un laboratori i són fàcils d'utilitzar. Aquest tipus de tests, si els realitzem amb els enzims específics per a cada compost a analitzar, assegurem una exactitud en l'anàlisi i aconseguirem uns resultats de referència, que ens aportaran un avantatge important envers altres mètodes de control. Aquesta exactitud en els resultats ha inclòs els anàlisis enzimàtics a formar part de les lleis nacionals, de les regulacions europees i les mundials (ISO, CEN, IFU, IDF, OIV, AOAC), obligant a realitzar determinats assaigs per complir lleis de salut o higiene i definir les qualitats de diferents productes, siguin alimentaris o no.

El funcionament dels assaigs enzimàtics es basa en analitzar el substrat consumit, el producte generat, o l'evolució durant un temps de la reacció, un cop hem introduït els enzims dins de la mostra i es produeix la reacció. Aquestes reaccions poden generar un canvi de color o, el més important, un seguit de nous compostos, amb propietats físiques específiques (com per exemple: fluorescència, absorció de llum...) que podran ser mesurades a partir de diferents tècniques, com ja veurem en apartats posteriors. Aquest fet ens pot proporcionar una informació molt fiable de la concentració del compost que pel qual s'ha dissenyat l'assaig enzimàtic.

Inicialment els assaigs enzimàtics s'utilitzaven en el diagnòstic clínic i posteriorment es van adaptar per a mesurar components en els aliments. Actualment els anàlisis enzimàtics juguen un paper molt important en el procés d'avaluació del vi permetent-nos

realitzar molts dels controls de qualitat que hem definit anteriorment en el procés de producció. Per fer-nos una idea del que es pot controlar, definirem els compostos analitzats, a partir de tests enzimàtics, en els punts més important de la producció. Segons el punt del procés tenim:

Abans de la fermentació alcohòlica: s'ha de determinar l'estat nutricional del suc del raïm per assegurar les condicions òptimes pel creixement del llevat. Això inclou una estimació del llevat present de forma natural, el producte de nitrogen lliure: la L-arginina, i el principi de sucres fermentables: la D-fructosa i la D-glucosa.

Durant el procés de fermentació alcohòlica: es controla el nivell d'àcid acètic per detectar la presència d'*Acetobacter sp*<sup>2</sup>. També es determina el nivell d'urea amb el fi d'establir si el vi ha de ser tractat afegint ureasa, per tal d'eliminar el risc de formar el carbonat d'etilè, que és cancerigen. Hi ha altres components que degut a la fase de fermentació alcohòlica s'eliminaran de forma natural.

Abans i durant la fermentació malolàctica: s'ha de mesurar de forma precisa la concentració d'àcid màlic per determinar el nivell de caiguda de L-màlic i comprovar l'augment de L-làctic. Ens servirà per determinar el moment just de la fermentació i saber amb les condicions que ho farà. Durant el procés és important controlar l'evolució dels dos compostos. Per altra banda en aquest punt també s'analitza el nivell d'àcid cítric.

En el procés final: es realitzen nombrosos anàlisis enzimàtics amb el fi de determinar la qualitat, estabilitat i autenticitat del vi. S'inclouen assajos per determinar: l'acetaldehid, l'àcid acètic, l'àcid L-ascòrbic, l'etanol, la proporció d'etanol/ glicerol, la D-fructosa, la D-glucosa, el ràtio de D-fructosa / D-glucosa, el glicerol, l'àcid D-glucònic, la relació d'àcid D-glucònic / etanol, la relació d'àcid L- i D-làctic, i d'àcid L- i D-màlic, el D-sorbitol, l'àcid succínic, la urea, entre d'altres.

En el cas de la fabricació del vi aquests tests enzimàtics són de vital importància, com podem observar amb la multitud de compostos que hi ha per analitzar. Per a determinar cadascun dels compostos, es realitza un anàlisi enzimàtic de forma individual a cada compost amb l'ajuda d'equips especialitzats que podem trobar en el mercat.

### **2.2.1 Productor de tests enzimàtics**

En el mercat existeixen multitud de proveïdors d'equips per a realitzar tests enzimàtics, cadascun enfocat a un compost en concret. Un cop analitzades les diferents opcions, hem elegit el proveïdor de l'equip al laboratori Roche (anteriorment conegut com Boehringer Mannheim). Aquest laboratori compta amb més de 30 anys d'experiència en la producció d'enzims, l'element clau dels tests. Aquests equips de test de Roche han estat utilitzats i validats en tot el món durant dècades, havent estat publicats en nombroses ocasions. Moltes de les organitzacions internacionals, mencionades anteriorment, els han seleccionat com a mètodes de referència, on encara avui segueixen sent un referent de qualitat. Per aquesta raó pensem que són un bon referent a seguir per a obtenir-ne informació pel desenvolupament del nostre sistema.

Un dels equips que hem triat, que ens servirà d'inspiració en el projecte, és un específic per a la mesura de la concentració d'àcid màlic en aliments, begudes i altres materials. En aquests equips hi han els enzims (especials per a cada compost), els elements

---

<sup>2</sup> Acetobacter sp, és un gènere de bacteris que produeix l'àcid acètic. El que fan és oxidar ràpidament els alcohols i sucres, acumulant àcids orgànics, entre ells l'àcid acètic com a principal producte. Es caracteritzen per convertir l'alcohol (etanol) en àcid acètic en presència d'oxigen. Un dels usos comercials més destacats d'aquests bacteris és la utilització per a la fabricació del vinagre.

químics necessaris per formar el substrat i les instruccions que descriuen: la preparació de les solucions, el procediment, el càlcul de paràmetres, els requisits que ha de tenir l'instrument de mesura necessari i altres condicions.

### 2.2.2 Enzims

Per entendre el funcionament bàsic d'un assaig enzimàtic és necessari introduir breument que és un enzim i quina és la seva funció principal en un d'aquests assaigs. Els enzims són biomolècules de naturalesa proteica que catalitzen les reaccions químiques, és a dir, n'augmenten la velocitat de reacció. La funció del enzim és fer que en una reacció química que és energèticament possible, però que transcorre a una velocitat molt baixa, sigui cinèticament favorable i que transcorri a una velocitat més elevada que sense la presència del enzim.

Com tots els catalitzadors, els enzims funcionen reduint l'energia d'activació (la barrera a superar perquè s'iniciï una reacció química) d'una reacció, augmentant així de manera dramàtica la velocitat de la reacció. Per altra banda, els enzims que no són consumits per les reaccions que catalitzen, no n'alteren l'equilibri químic.

A totes les reaccions mesurades per enzims les denominarem reaccions enzimàtiques. En les reaccions enzimàtiques, les molècules amb les quals interacciona l'enzim, al principi del procés, reben el nom de substrat. Mentre que, un cop transformades per aquest, en molècules diferents, són anomenades productes.

## 2.3 Compost a analitzar

Tot i la multitud de compostos que es poden analitzar en un vi, tal i com hem vist en els apartats anteriors, hem decidit centrar-nos en l'anàlisi d'un compost en concret, l'àcid màlic que trobem en una part específica del procés: al inici de la fermentació malolàctica. Centrant-nos en un compost concret podem veure les seves característiques específiques i començar a estudiar quines són les tècniques per determinar-ne la seva presència en una mostra.

Com que l'àcid màlic no presenta cap propietat física que el pugui fer ressaltar dels altres compostos presents en el vi, realitzem un assaig enzimàtic per obtenir un compost estequiomètric que sí tingui les propietats que busquem. Així podrem mesurar la concentració d'aquest nou compost amb un instrument específic. Per saber quin és aquest compost resultant, estudiarem el principi de la reacció que té lloc dins de l'assaig enzimàtic específic que ens proporciona l'equip d'assaig del proveïdor elegit. D'aquesta manera podrem veure les necessitats que té, els substrats necessaris, els productes que en surten i com es poden analitzar els resultats.

### 2.3.1 Principi de la reacció

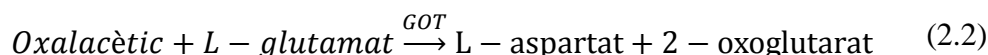
En el test que hem localitzat podem determinar el funcionament i els compostos que actuen en aquesta reacció definint-nos els substrats i els productes que en sortiran.

En el full de característiques del test, s'ha determinat que L-màlic s'oxida per la nicotinamida adenina dinucleòtid oxidada ( $NAD^+$ ) en àcid oxalacètic, usant L-màlic deshidrogenasa (L-MDH) com a catalitzador.



L'equilibri d'aquesta reacció es troba en el costat de l'àcid màlic. L'eliminació de l'àcid oxalacètic, amb un enzim atrapador, des del sistema de reaccions provoca el desplaçament de l'equilibri a favor de l'àcid oxalacètic. La quantitat de NADH que es forma es relaciona estequiomètricament amb la quantitat de L-màlic que es consumeix. Apart, el compost NADH ens interessa perquè una de les seves propietats físiques li permet absorbir llum a una certa longitud d'ona.

En aquest mètode l'enzim transaminasa de glutamat-oxalacètic (GOT), s'utilitza com a enzim atrapador, el qual en presència de L-glutamat, l'àcid oxalacètic es converteix irreversiblement en L-aspartat.



### 2.3.2 Anàlisi del NAD

Hem vist que el compost de NADH en un assaig enzimàtic, és l'eix central dels anàlisis ja que després de la reacció hem convertit tot l'àcid màlic en àcid oxalacètic i hem fet el NADH. Un cop acabada la reacció, sabem que la quantitat de NADH, és estequiomètrica a la quantitat d'àcid màlic que conté la mostra. Degut a la seva importància en l'assaig es fa necessari entendre d'on prové el NADH i les propietats que el fan tant especial en aquest tipus d'assaigs enzimàtics. La base del NADH, és el NAD.

La nicotinamida adenina dinucleòtid (NAD) és un coenzim d'oxidoreducció, reacció redox, que es troba en totes les cèl·lules vives. El compost és un dinucleòtid, perquè consisteix en dos nucleòtids enllaçats a través dels seus grups fosfats. Un dels nucleòtids conté una base d'adenina i l'altre de nicotinamida. El NAD pot existir en dues formes: la forma oxidada  $\text{NAD}^+$  i la forma reduïda NADH.

En el metabolisme, el NAD està involucrat en les reaccions redox, en les quals, és l'encarregat de transportar els electrons d'una reacció a una altra. El  $\text{NAD}^+$  és un agent oxidant, és a dir, accepta electrons d'altres molècules quedant així reduït. Aquesta reacció crea el NADH, que pot ser utilitzat com agent reductor per a cedir electrons. Aquesta transferència d'electrons és la funció principal del NAD.

La particularitat del NAD, són les seves propietats físiques. El  $\text{NAD}^+$  i el NADH tenen la capacitat d'absorbir radiació ultraviolada degut a la seva base d'adenina. En el cas del  $\text{NAD}^+$ , posseeix un màxim d'absorció en l'espectre de radiació ultraviolada a una longitud d'ona de 259 nm. Per altra banda el NADH, la forma reduïda, té dos màxims d'absorció ultraviolada, un primer situat a una longitud d'ona de 259 nm i un segon a 339 nm, tal i com es pot veure en la *Figura 4*.

Amb aquesta propietat d'absorció que té el NADH, podem veure que la quantitat total que hi hagi, de NADH, en una mostra després de la reacció, influirà amb l'absorció de la llum. Sabent la relació estequiomètrica que hi ha amb l'àcid màlic, si mesurem la diferència d'absorcions que hi pot haver entre un referent (mostra sense àcid màlic) i una mostra d'estudi (amb un contingut d'àcid màlic), podem mesurar la concentració d'àcid màlic que conté una mostra de vi utilitzada en un assaig enzimàtic. Tot això a partir d'uns procediments i relacions teòriques, que veurem en apartats posteriors.

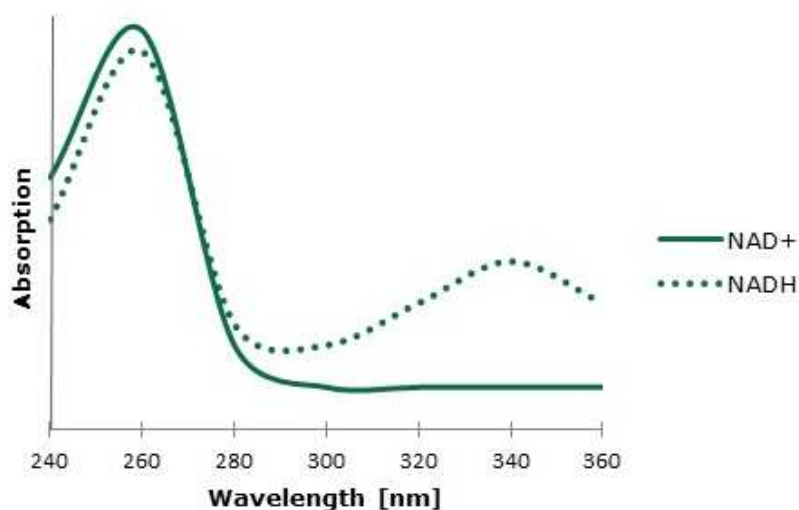


Figura 4. Pics d'absorció ultraviolada de les dues formes del NAD.

### 2.3.3 Com preparar les mostres pel test enzimàtic

El coneixement de la metodologia i els procediments habituals són molt útils per entendre el tipus d'instrument que es necessita i quins requisits optoelectrònics requerirà el dispositiu a dissenyar. Per poder definir la recepta de la preparació d'un test enzimàtic ens basarem en les instruccions del full de característiques del proveïdor (Roche) de l'equip, específic per la determinació d'àcid màlic en aliments i altres materials. Aquest ens identifica: les combinacions dels components que hem d'introduir, com preparar els substrats, les quantitats i els procediments per aconseguir la reacció descrita i que ens porti el compost desitjat.

Nosaltres partim de la base que disposem d'una mostra d'un vi, extreta just després del procés de la fermentació alcohòlica. Utilitzarem l'assaig enzimàtic per obtenir, de la forma més ràpida i eficient possible, la concentració d'àcid màlic dins d'una mostra. Aquests assaigs, tal com hem vist, ens permeten obtenir uns productes que gràcies a les seves propietats físiques, i a diferents relacions teòriques que exposarem, podrem mesurar-ne la seva concentració a partir d'instruments específics.

Un assaig enzimàtic necessita dues mostres per poder fer una comparació: una d'estudi que conté una certa quantitat del producte a analitzar (el vi), i una altre de referència anomenada blanc. El blanc consisteix en una mostra amb el mateix solvent i productes químics que la mostra d'estudi, però se sap amb certesa que no conté la substància que es vol detectar, en aquest cas, l'àcid màlic.

Disposem de tres productes químics diferents que ens proporciona el proveïdor de l'equip de test per a realitzar el solvent de les mostres. Per no entrar en detall en els components dels productes químics els anomenarem A, B i C. Amb aquests productes químics, la mostra del vi i els enzims específics, preparem les dues solucions requerides: el blanc i la mostra d'estudi.

Inicialment introduïm 1,000 ml de producte químic A, després 0,200 ml del B i finalment 0,010 ml del C, tal i com ens defineix el proveïdor del test, dins de les dues provetes: el blanc i la mostra d'estudi. Amb això, aconseguim un volum en les dues provetes de 1,210 ml. En aquest punt tenim dues provetes iguals amb la mateixa proporció dels productes químics A,B i C. Reservem una de les provetes que serà el blanc.

Per aconseguir la mostra d'estudi, introduïm 0,100 ml del vi que volem analitzar (és necessari adequar-la segons la taula de dissolucions del full de característiques), a la proveta que no hem reservat. Un cop introduït el vi a la proveta, ja tenim la mostra d'estudi junt amb els compostos químics A, B i C. Per igualar el volum de les dues solucions, la del blanc i la de la mostra d'estudi, introduïm aigua destil·lada a les dues provetes fins assolir un total de 2,210 ml en les dues.

En aquest punt faríem la primera lectura de l'absorbància, al blanc i a la mostra d'estudi, per mesurar-ne el valor i després poder-lo eliminar en els càlculs per reduir els errors ja que encara no hi ha hagut la reacció.

Passats 3 minuts, introduïm 0,010 ml del enzim a les dues provetes aconseguint un volum final de 2,220 ml en cadascuna. L'enzim començarà la reacció en la proveta que conté la mostra d'estudi, ja que hi haurà una presència d'àcid màlic. Per altra banda el blanc no hauria de mostrar activitat al afegir-li l'enzim, ja que no hi ha àcid màlic. Es deixarà reposar uns 10 minuts que s'estabilitzi la reacció.

Passat el temps establert, es farà una segona mesura de l'absorbància del blanc i de la mostra a estudi. El valor de l'absorbància ens aportarà la informació necessària per a que posteriorment, a partir de les definicions, podem calcular la concentració d'àcid màlic que conté el vi.

Per entendre les mesures d'absorbància que són necessàries, amb la formula següent es pot deduir que:

$$\Delta A = (A_2 - A_1)_{mostra} - (A_2 - A_1)_{blanc} \quad (2.3)$$

$A_1$  seria la lectura de l'absorbància del blanc i de la mostra quan afegim els compostos químics, A, B i C.  $A_2$ , seria la lectura de l'absorbància un cop introduït l'enzim i hagin passat els 10 minuts després de la reacció.

Amb la resta de les dues diferències, la de la mostra a estudi i el blanc, podem obtenir l'absorbància final d'aquella mostra de vi en concret. Aquest és el procediment per assegurar-nos que l'absorbància que puguin tenir els productes químics A, B i C introduïts en les provetes no influeixen en la lectura de l'absorbància final. Així eliminem els errors quedant-nos només amb l'absorbància real de la mostra d'estudi, la que conté el vi.

## 2.4 Llei de Beer-Lambert

En l'apartat del procediment dels tests enzimàtics hem vist com realitzem l'estudi de les mostres de vi. Creem un substrat, introduïm la mostra de vi i posteriorment afegim uns enzims que reaccionen amb el contingut d'àcid màlic de la mostra, obtenint un producte amb una concentració de NADH. Realitzem tot aquest procediment perquè el compost que obtenim té una relació directa amb l'àcid màlic i unes propietats físiques específiques que estan relacionades amb l'absorció de la llum. Per poder explicar millor aquesta relació que hi ha entre la llum emesa, l'absorció de la llum per part del compost (l'absorbància) i la llum resultant, introduïrem el concepte que ens diu la llei de Beer-Lambert.

### 2.4.1 Principi de la llei

És una llei òptica, que descriu la relació empírica entre l'absorció de la llum i les propietats del material travessat. La llei ho relaciona amb la intensitat de llum que entra en un medi i amb la intensitat que en surt després de que en aquest es produeixi una absorció de la llum.

La relació entre aquestes dues intensitats varia segons el medi (si és líquid o gas), que travessarà. En el nostre cas, la mostra és vi, els compostos estan dissolts en un medi líquid, per aquesta raó ens fixarem en el que passa en un medi com aquest. Les relacions són les següents:

$$\frac{I_1}{I_0} = 10^{-alc} = 10^{-A} \quad (2.4)$$

Els paràmetres del qual són:

$I_1$  = Intensitat de llum que surt després de travessar la mostra.

$I_0$  = Intensitat de llum que entra a la mostra.

$A$  = Absorbància, l'absorció de llum, que hi ha a la mostra.

L'absorbància és determinada pels factors següents:

$\alpha$  = Coeficient d'absorció.

$c$  = La concentració de l'absorbent en el medi.

$l$  = La longitud travessada per la llum en el medi.

Observant la relació, podem veure que identificant les variacions d'intensitat lumínica podrem calcular l'absorbància del compost dissolt en el medi líquid.

### 2.4.2 Absorbància, transmitància i concentració

Hem vist que en la relació anterior introduïm els conceptes d'absorbància i concentració. Per altra banda durant el desenvolupament del projecte també introduïrem el concepte de transmitància, que està relacionat amb els altres dos conceptes. Aquest fet fa necessari introduir el que significa cadascun dels paràmetres i la relació que existeix entre ells.

#### Absorbància

Podríem definir l'absorbància com a el valor de l'absorció que es produeix quan la llum (o més generalment, l'energia radiant) travessa una substància.

Si aïllem l'absorbància,  $A$ , de l'equació (2.4) obtenim:

$$A = - \log_{10} \frac{I_1}{I_0} \quad (2.5)$$

Com en el cas anterior:

$I_1$  = Intensitat de llum que surt després de travessar la mostra.

$I_0$  = Intensitat de llum que entra a la mostra.

Les mesures d'absorbància són utilitzades en química analítica a causa de que l'absorbància és proporcional a la concentració de la substància. Per això també es pot definir com:

$$A = \alpha lc \quad (2.6)$$

On, com hem vist, l'absorbància és determinada pels factors següents:

$\alpha$  = Coeficient d'absorció (provinent de part dels paràmetres del test).

$c$  = La concentració del absorbent en el medi.

$l$  = La longitud travessada per la llum en el medi.

### Transmitància

La transmitància en òptica es defineix com la fracció de llum incident, a una longitud d'ona especificada, que passa a través d'una mostra.

La seva expressió matemàtica és la següent:

$$T = \frac{I_1}{I_0} \quad (2.7)$$

La transmitància normalment està expressada en forma percentual, definint un percentatge de pas de llum:

$$T = \frac{I_1}{I_0} \cdot 100 [\%] \quad (2.8)$$

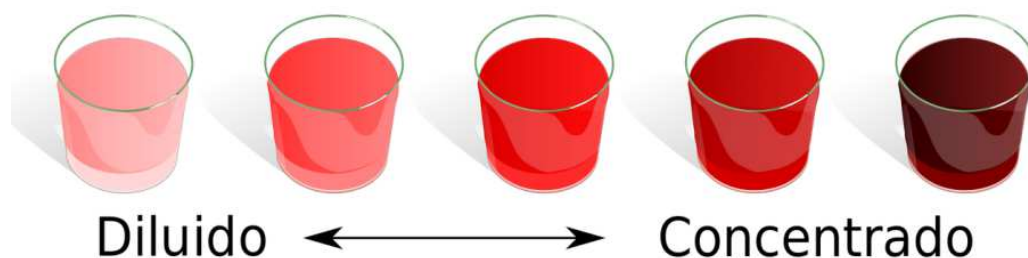
Podem veure que la transmitància es pot relacionar amb l'absorbància de manera que:

$$A = -\log_{10} \frac{I_1}{I_0} = -\log_{10} T \quad (2.9)$$

Aquest fet facilita molt les coses ja que la relació que existeix entre el percentatge de pas de llum, (la transmitància) i el quocient d'intensitats lumíniques, presenta una relació lineal, així doncs pot ser analitzada. Posteriorment es pot determinar l'absorbància a partir de la relació logarítmica que existeix i en definitiva calcular la concentració del compost dissolt en la mostra.

### Concentració

Si ens centrem en la química, la concentració és la magnitud física que expressa la quantitat d'un element o d'un compost que es troba mesclat amb una altra substància. Hi ha diferents tipus de mescles, homogènies i heterogènies. En el cas que estudiem, fem referència a les mescles homogènies on apareix un solut dissolt en un dissolvent.



**Figura 5.** Progressió entre diluït i concentrat d'una mostra líquida com és el vi.

Si ho transportem en el cas que ens ocupa, el dissolvent seria el vi, el qual té un contingut en aigua. Per altra banda, el solut serien tots els compostos presents en el vi, dels quals ens fixarem únicament amb l'àcid màlic.

Si analitzem el cas anterior on definíem l'absorbància, en l'equació (2.6), aïllant la concentració podem observar:

$$c = \frac{A}{\alpha l} \quad (2.10)$$

D'aquesta equació, per les característiques del test enzimàtic, podem determinar la  $l$ , que estarà fixada des d'un principi i la  $\alpha$ , que és específica del compost que volem analitzar. Per tant, a partir de la relació entre les intensitats de llum, la que incideix a la mostra i la que surt després de travessar la mostra, podem determinar l'absorbància i a partir de l'equació (2.10) podem determinar la concentració d'un compost concret. Aquest és el punt que més ens interessa de la relació que hem descrit anteriorment.

### 2.4.3 Càlculs de la concentració en el test enzimàtic

Un cop entenem el que és l'absorbància i la relació que hi ha amb la concentració, és el moment d'analitzar com es calcula la concentració d'àcid màlic en una mostra a partir dels paràmetres i les condicions específiques que hem utilitzat en l'assaig enzimàtic. A partir de l'equació (2.10), veiem que la concentració depèn de l'absorbància i d'uns factors que la multipliquen. L'absorbància la determinem a partir de l'equació (2.3), on trobem l'absorbància de la mostra d'estudi depreciant els errors inherents en el procés de la mesura, tal i com hem vist. El que ens falta determinar són aquests factors, els quals són característics del tipus de compost que es vol analitzar i dels paràmetres del assaig enzimàtic.

A partir de les dades que ens dona el fabricant del test enzimàtic podem definir que l'equació de la concentració que utilitzarem serà la següent:

$$c = \frac{V \times MW}{\epsilon \times d \times v \times 1000} \times \Delta A \text{ [g/l]} \quad (2.11)$$

On es defineixen els paràmetres següents:

$V$  = Volum final de la mostra [ml].

$v$  = Volum de la mostra de vi introduïda a la mostra d'estudi [ml].

MW = Pes molecular de la substància que serà analitzada [g/mol].

$d$  = Distància que travessa la llum incident [cm].

$\varepsilon$  = Coeficient d'extinció del NADH:

Si és 340 nm = 6,3 [ $l \times mmol^{-1} \times cm^{-1}$ ].

Si és 365 nm = 3,4 [ $l \times mmol^{-1} \times cm^{-1}$ ].

Si és 334 nm = 6,18 [ $l \times mmol^{-1} \times cm^{-1}$ ].

$\Delta A$  = Diferència d'absorbàncies.

Alguns dels paràmetres d'aquesta equació els determinem del procediment de preparació. Obtenim el volum final que és de 2,220 ml i el volum de la mostra de vi que és de 0,100 ml.

El pes molar sempre serà el mateix ja que només analitzarem un compost, l'àcid màlic, que és de 134,09 [g/mol].

La distància que travessa la llum incident serà la amplitud de la proveta, és a dir, la distància de mostra que ha de travessar la llum. Normalment aquesta distància és la amplada de la proveta específica per a mesures òptiques i està estandarditzada amb un valor de 1 cm.

El coeficient d'extinció és un valor que prové d'un càlcul específic. Per facilitar els tests, el fabricant ja ha introduït el valor calculat dins de les instruccions diferenciant-lo segons la longitud d'ona que utilitzarem. En el nostre cas, el coeficient d'extinció serà 3,4 [ $l \times mmol^{-1} \times cm^{-1}$ ], coincident amb una longitud d'ona de 365 nm, pròxima al pic d'absorció del NADH.

La diferència d'absorbàncies la determinarem a partir de l'equació (2.3), del apartat anterior de preparació del test enzimàtic, amb el procediment descrit.

#### **2.4.4 Relacions teòriques pel disseny inicial**

En els apartats anteriors hem estudiat com es realitzen els tests enzimàtics, descrivint el seu funcionament, components i composició. Després de realitzar un assaig enzimàtic hem vist que el compost derivat de la reacció enzimàtica és el NADH, el qual, té unes propietats físiques concretes, com és l'absorció de la llum en una determinada longitud d'ona. A partir dels conceptes teòrics observem que hi ha una relació entre la intensitat de la llum i l'absorció del compost, i que amb l'absorbància i un factor concret podem determinar la concentració. Aquestes relacions teòriques ens serviran per definir les característiques bàsiques que necessitarà el nostre prototip d'instrument de mesura.

Per a fer una mesura concreta de la concentració, primer necessitem un sistema optoelectrònic que sigui capaç de mesurar les absorbàncies de les mostres del test enzimàtic. Aquest sistema ha de poder incidir llum en una mostra a partir d'un element emissor que generi la llum en una longitud d'ona concreta. Aquesta longitud d'ona ha de ser la que millor s'adapti al pic d'absorció del NADH, tal com hem vist, propera als 339 nm. Després necessita tenir un detector que sigui capaç de mesurar la llum restant que no ha absorbit la mostra.

El detector obtindrà un corrent fotogenerat, aparentment, proporcional a la llum que l'incideix. Posteriorment podem transformar el corrent fotogenerat, en tensió a partir de la llei d'Ohm i un resistor conegut. Farem una consideració inicial, i direm que la tensió que

obtidrem a la sortida és proporcional a la intensitat de la llum que rep el detector. Amb les proves de funcionament que realitzarem al prototip verificarem si es compleix la relació.

Aquesta fracció de llum incident que passa a través d'una mostra la hem definit com a transmitància. En les proves que realitzarem al prototip, la relació entre la transmitància i la tensió de sortida ens donarà molta de la informació que estem buscant per verificar l'efectivitat d'un sistema de mesura d'aquest tipus. Aquesta relació és important perquè sabent la tensió de sortida de l'instrument en funció de diferents transmitàncies, podem realitzar una corba característica de l'instrument, a partir d'un gràfic, la qual ens ajudarà a determinar l'absorbància i posteriorment la concentració, amb relació a la tensió de sortida.

En el final del apartat "Com preparar les mostres d'un test enzimàtic", hem determinat les mesures d'absorbància que s'han de fer per realitzar un test correctament. El prototip de l'instrument haurà de ser capaç de realitzar aquestes mesures per acostar-se a la realitat del procés. En tots els casos per mesurar  $A_1$  i  $A_2$ , la del blanc i la de la mostra d'estudi, tan abans com després de la reacció enzimàtica, hem de calcular la inversa del logaritme del quocient de la intensitat de llum que incideix a la mostra, i la intensitat de llum que surt després de l'absorció de la pròpia mostra. Calcularem aquesta absorbància en referència a la tensió de sortida del nostre instrument, i no la intensitat lumínica, apel·lant la consideració inicial que hem fet, considerant que la tensió és proporcional a la intensitat de llum incident.

En els apartats de disseny i experimentació anirem desenvolupant sistemes optoelectrònics que compleixin els plantejaments inicials que hem presentat. A partir de les diferents combinacions de dispositius electrònics, anirem comprovant els resultats que ens ofereixen, entenent el seu significat i verificant si es compleixen els plantejaments i les relacions teòriques que hem plantejat. Amb els resultats que obtinguem, es valorarà si es pot dissenyar un prototip de sistema de mesura real.

## **2.5 Sistema optoelectrònic: Espectrofotòmetre**

Hem vist que podem transformar l'àcid màlic, a partir d'una reacció, amb el compost NADH que té unes propietats físiques específiques. Amb els conceptes teòrics hem pogut relacionar la propietat física de l'absorció amb una variació d'intensitats lumíniques, i inclús podem determinar la concentració del compost. Extreure la informació dels resultats d'un assaig enzimàtic és possible gràcies a l'existència d'un mètode òptic d'anàlisi anomenat espectrofotometria.

Aquest mètode s'utilitza en investigacions químiques i bioquímiques, i mesura la quantitat d'energia que radia, absorbeix o transmet un sistema químic en funció de la longitud d'ona de la llum que l'incideix. Aquest mètode aprofita l'absorció de radiació electromagnètica de regions concretes del espectre de la llum. La mostra a analitzar, absorbeix part de la radiació incident mesurant la quantitat de llum absorbida en funció de la longitud d'ona utilitzada. Aquesta absorció dependrà exclusivament de l'estructura de les molècules de cada substància química que hi hagi a la mostra.

Els instruments utilitzats per a fer aquests tipus de mesures s'anomenen espectròmetres. Un espectròmetre és la denominació general dels aparells que són capaços d'analitzar l'espectre de freqüències característiques d'un moviment ondulatori. Amb aquesta base s'aplica a diferents instruments de mesura que operen sobre un ampli camp de longituds d'ona.

L'instrument de mesura que necessitem per obtenir els valors que busquem dels assaigs enzimàtics es basa en la tecnologia del espectròmetre, però farà els anàlisis basant-

se en una longitud d'ona concreta, o llum monocromàtica, prèviament elegida. Aquest instrument rep el nom de espectrofotòmetre.

El espectrofotòmetre és un aparell òptic que permet fer travessar una mostra per un raig de llum monocromàtica, llum a una longitud d'ona concreta la qual, després de l'absorció que hi ha hagut a la mostra, és detectada i quantificada per un sensor i una electrònica adequada. Depenent del tipus d'instrument, podem seleccionar diferents longituds d'ona de l'espectre electromagnètic per analitzar la mostra. Per exemple els UV-Vis poden mesurar en regions UV i visible del espectre electromagnètic, de 190 a 380 nm i de 380 a 760 nm, respectivament. També n'hi ha que poden treballar en una regió infraroja, de 2600 a 3300 nm. Aquests instruments són utilitzats, majoritàriament, per determinar la concentració de compostos en solucions líquides, per exemple en química clínica per determinar la concentració de diferents compostos dissolts a la sang o en alimentació per detectar compostos concrets en begudes.

Hi ha dos tipus d'espectrofotòmetres: de feix de llum simple i de doble feix de llum. Un espectrofotòmetre de feix simple fa l'anàlisi amb dos passos. Primer s'introdueix el blanc, que s'utilitzarà com a referent, i es farà la lectura de l'absorbància. Posteriorment posarem la mostra d'estudi, amb el compost a analitzar, i es farà una altra lectura de l'absorbància. La diferència d'absorbància entre les dos provetes, tal i com hem vist en apartats anteriors, serà l'absorbància del compost concret. Aquest mètode és més lent i és més propens a tenir uns errors dinàmics majors degut a que les mostres no es mesuren en el mateix temps i hi ha un moviment de les mateixes per posar-les i per extreure-les del instrument. Tot i això, aquest error no afecta en excés a la mostra i l'instrument té l'avantatge que és més compacte i simple.

Un espectrofotòmetre de doble feix el que fa és dividir el feix de llum emès entre dos, conduint una part del feix de llum que passi pel blanc i l'altre part de feix de llum que passi per la mostra d'estudi amb el compost, a totes dues provetes a la vegada. D'aquesta manera es poden comparar els dos feixos i extreure'n el valor de l'absorbància de forma més ràpida i eliminant els errors dinàmics.

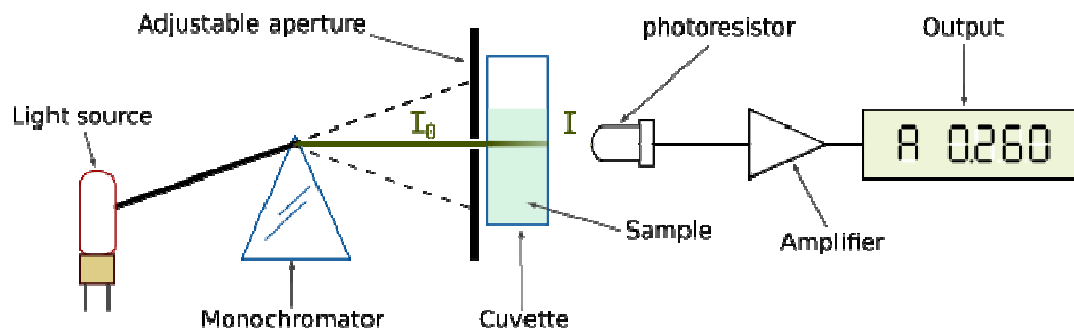
Un exemple d'espectrofotòmetre de feix simple el podem veure en la *Figura 6*.



**Figura 6.** Espectrofotòmetre de feix simple.

### 2.5.1 Parts d'un espectrofotòmetre de feix simple

A grans trets, el disseny bàsic d'un espectrofotòmetre de feix simple és el que podem veure en el esquema de la *Figura 7*.



**Figura 7.** Esquema bàsic d'un espectròmetre de feix simple.

Un instrument d'aquest tipus està format pels següents dispositius:

**Font lluminosa (Light source):** És la llum que il·lumina la mostra formada normalment per una bombeta amb un filament de wolframi, tungstè, o un llum d'arc de xenó. Les condicions principals que ha de complir aquesta font lluminosa són: la estabilitat, la direccionalitat, distribució d'energia espectral contínua i llarga vida.

**Monocromador (Monochromator):** És l'encarregat d'aïllar les radiacions de la longitud d'ona desitjada que incideixen o es reflecteixen des del conjunt lumínic per obtenir una llum monocromàtica. És bàsicament una lent que porta el feix de llum cap a un prisma que separa totes les longituds d'ona d'aquest feix.

**Obertura ajustable (Adjustable aperture):** És l'esclletxa pel qual surt la llum monocromàtica que es vol analitzar amb la longitud d'ona elegida. Per exemple, si volem llum visible situaríem la ranura just damunt de la llum de color verd.

**Compartiment de la mostra (Cuvette, Sample):** És el compartiment on situem la proveta especial amb la mostra a analitzar. En aquest punt és on es realitzarà l'absorció de la llum per part de la mostra. Cal destacar que el material de la proveta pel espectròmetre varia segons el tipus de longitud d'ona que ha de rebre, aquesta pot ser de: quars, per treballar amb llum ultraviolada, i de plàstic, per treballar amb llum visible.

**Receptor (Photoresistor):** Aquest element és l'encarregat de rebre la llum restant de l'absorció, la que no ha absorbit la mostra. Aquest receptor pot ser un fotorresistor o un fotodíode i la seva funció principal és traduir aquesta llum en un valor d'intensitat o tensió per tal de poder-la interpretar amb diferents instruments de mesura.

**Etapa amplificadora (Amplifier):** Normalment el valor d'intensitat o tensió que aporta el receptor solen ser molt petits. Per poder tractar correctament el senyal i evitar interferències i fluctuacions és necessari un sistema amplificador que augmenti el rang del valor de sortida.

**Sortida (Output):** En aquesta part es tradueix el valor de tensió o intensitat en els paràmetres que ens interessin segons una proporcionalitat. A partir de multímetres, programes de software, microprocessador, entre altres, podem calcular el valor de l'absorbància, la transmitància o inclús la concentració de forma directa i mostrar-ho en una pantalla, display o en una aplicació en un dispositiu mòbil.

### **2.5.2 Instruments disponibles en el mercat**

Sabent que els assaigs enzimàtics són molt comuns en multitud d'anàlisis de productes, el mercat ha de proveir d'instruments capaços d'obtenir la informació que ens aporta un test enzimàtic. Per fer-nos una idea del que hi ha al mercat, hem buscat en diferents empreses, proveïdores de material de laboratori, els tipus d'instruments descrits en els apartats anteriors amb les característiques que ens interessarien. Així podem veure que ens ofereixen i els preus que hi ha. Segons el tipus d'instrument tenim:

**Espectrofotòmetres de doble feix de llum UV/visible:** Entre els diferents proveïdors, hem elegit els instruments més simples i els preus dels quals oscil·len entre els 2.500 € i els 4.000 €. Si ja mirem models més sofisticats (amb impressora, Bluetooth, i altres aplicacions), els preus oscil·len entre els 5.000 € i els 8.000€. Per a instruments de games més elevades, específics per anàlisis mèdics i bioquímics, els preus ja es disparen fins els 60.000 € o més.

**Espectrofotòmetres de feix simple:** Entre diferents proveïdors, hem destacat els més senzills, amb selecció manual de la longitud d'ona (en un rang més reduït), i que únicament faci la lectura de la transmissió i l'absorbència. El preu d'aquests oscil·la entre els 720 € i els 3.000 €.

Amb aquesta cerca de productes podem veure que ens movem en uns preus bastant elevats, tanmateix si ens fixarem en el funcionament d'un espectròmetre de feix simple i en dissenyem un prototip d'instrument de mesura especialitzat en un compost en concret, podríem obtenir un producte específic pel sector alimentari i a un preu més econòmic que els instrument d'anàlisis general que hem trobat.

### **2.6 Concepte d'un sistema optoelectrònic bàsic**

És una realitat que els assaigs enzimàtics són imprescindibles en l'actualitat. Aquests assaigs com hem vist, tenen sentit si es disposa d'un espectrofotòmetre que sigui capaç de mesurar la transmissió o l'absorbència de la mostra, per així poder definir la concentració del compost concret dissolt. Aquest instrument al ser material específic de laboratori és molt car i a vegades per realitzar un seguit d'assaigs espontanis pot encarir molt el producte manufacturat.

El que proposem realitzar en aquest projecte és la creació d'un sistema optomètric bàsic capaç d'obtenir una mesura d'absorbència de manera senzilla i eficaç. Per a fer aquest sistema ens basarem en l'estructura bàsica d'un espectrofotòmetre de feix simple. Com que sabem la longitud d'ona exacte per analitzar el compost el que podem fer és utilitzar un LED que l'emeti així no necessitem un monocromador i la font lluminosa es podrà simplificar considerablement.

Definida la font de llum, necessitem un detector capaç de percebre les variacions d'intensitat lumínica entre una mostra d'estudi i un blanc. Per a realitzar aquesta acció utilitzarem un fotodíode, el qual ens aportarà una intensitat fotogenerada proporcional a la llum incident. Amb aquest procediment podem tenir desenvolupat el sensor del sistema que ens detecta magnituds físiques, anomenades variables d'instrumentació i les transforma en variables elèctriques.

Posteriorment tractarem les variables elèctriques del sensor per tal d'obtenir la millor resposta possible fent que la resolució que ens pugui aportar aquest prototip sigui equiparable a la necessària en els assaigs. Aquestes modificacions es basen en amplificacions del senyal, segons el guany que ens interressi, amb filtres i altres modificacions per adequar-lo.

Després de fer les correccions i les adaptacions necessàries s'hauria d'adaptar el senyal per tal que ens mostri unes unitats que podem entendre. En el moment de fer els assaigs aquesta traducció la farem amb un voltímetre que ens oferirà els valors de tensió del sensor per tal de comprovar el funcionament i avaluar les relacions que hem definit en la teoria. En un prototip que estes al mercat es podria pensar en altres mètodes.

Aquest prototip plantejat no pot obtenir totes les aplicacions com les que ens podria aportar un dels models d'instrument del mercat. Només es desenvoluparà per analitzar un sol compost. Aquesta especificació tan concreta pot semblar contraproductiu, però el compost que es proposa és molt comú d'analitzar en varis processos. Per altra banda la simplificació que suposa aquesta especialització, probablement reduiria el cost del propi instrument resultant ser una oportunitat. Si el sistema resulta econòmic es podria desenvolupar un instrument per a cada compost en concret.

### 2.6.1 Components elegits per a un sistema optoelectrònic bàsic

Un cop definides les necessitats i els apartats que ha de tenir el nostre instrument s'ha de buscar la solució electrònica en forma de dispositiu. En els apartats següents aportarem una descripció general dels dispositius electrònics i les seves característiques principals que ens serviran per desenvolupar el sensor. També inclourà una descripció del tipus de multímetre que es necessita i com funciona. Amb tot això es farà possible el sistema de mesura optoelectrònic.

#### 2.6.1.1 Díode emissor de llum

Un díode LED (*Light Emitting Diode*) és un dispositiu optoelectrònic passiu amb el mateix funcionament que un díode comú amb unió PN. Quan es polaritza de forma directa i és travessat per un corrent elèctric, emet una certa quantitat de radiació lumínica fruit de la recombinació dels parells d'electró - forat a la zona de càrrega especial anomenada "bandgap". Aquesta banda es produeix quan els electrons cauen des de la banda de conducció (de major energia) a la banda de valència (de menor energia). Podem veure un esquema simplificat del funcionament a la *Figura 8*.

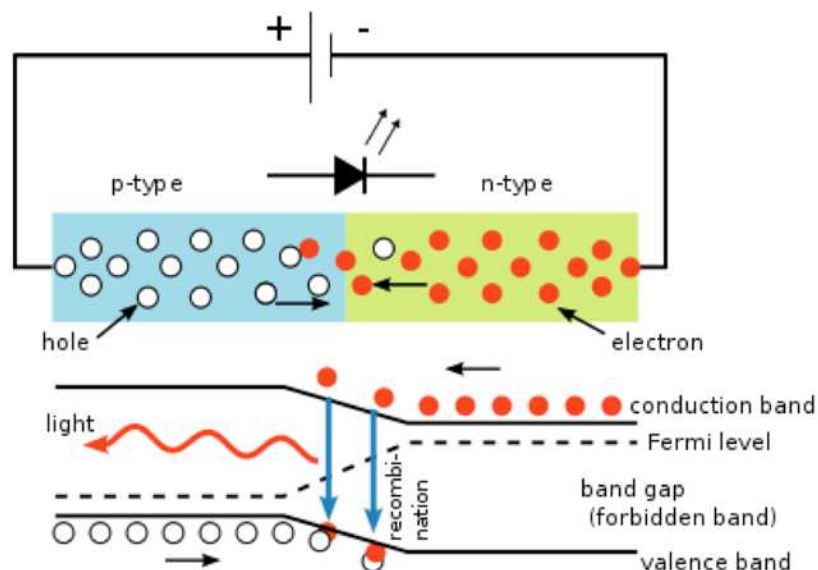


Figura 8. Esquema de funcionament d'un díode LED.

La freqüència i el color d'aquesta radiació electromagnètica, sorgida d'aquesta recombinació, dependran de l'amplitud del bandgap. Aquestes diferències d'energia entre les bandes depenen directament del material emprat per la fabricació del díode.

Aquest dispositiu semiconductor, LED, pot estar encapsulat en multitud de formes ja sigui per SMD, THT, per celes lumíniques, etc. El tipus més comú d'encapsulat és una coberta de plàstic, com es pot veure en la de la *Figura 9*, la qual pot estar acolorida amb el color de llum que emetrà. Això és per raons estètiques i funcionals. Usualment, la coberta té una cara plana que indica el càtode. També s'identifica perquè la poteta metàl·lica del càtode és més curta que la de l'ànode.

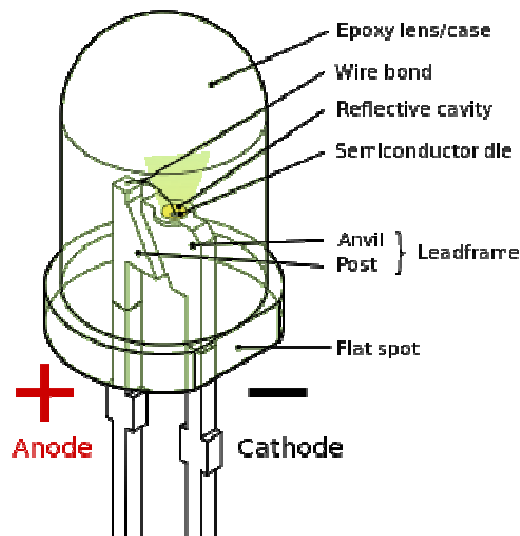


Figura 9. Imatge d'un díode LED comú.

### Característiques principals d'un LED

El LED el podem alimentar en tensió contínua, a un voltatge d'operació baix que pot anar des d'1,5 a 2,2 V aproximadament. La gamma d'intensitats que han de circular pel LED, si és de llum visible, van entre 20 i 40 mA, fent que sigui un dispositiu amb un consum baix.

Un aspecte important a tenir en compte, és que el LED té polaritat i només condueix l'electricitat quan es polaritza de forma directa, com els díodes PN convencionals. Això serà important en el moment de la connexió del dispositiu al circuit.

Un altre paràmetre important és triar bé el corrent que travessarà el LED per a obtenir una intensitat lluminosa controlada. Per altra banda, controlant la intensitat, ens assegurarem que el dispositiu no treballi per sobre de les seves possibilitats.

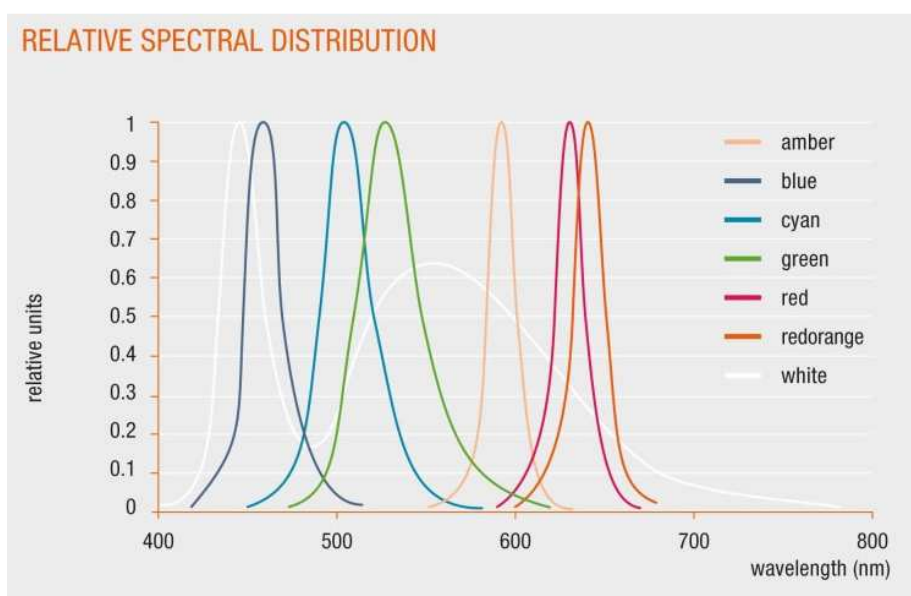
### Recursos útils del LED pel sistema optomètric

La llum que emet un LED té un valor de longitud d'ona concret. Aquest valor està centrat dins d'un rang de valors que correspon a l'energia del gap del semiconductor i amb una amplada de banda relativament petita. Això fa que la llum generada estigui acotada entre un valors de longitud d'ona pròxims. Per aquesta raó es pot considerar que el LED emet llum en una longitud d'ona concreta. Al actuar en un rang acotat de longitud d'ona, farà que la llum sigui d'un color ben determinat. Un LED de color vermell emetrà una longitud d'ona acotada dins del rang infraroig del espectre electromagnètic. Un exemple de

la distribució espectral, amb els rangs de longituds d'ona corresponents, per diferents colors de LED, el podem observar en la gràfica de la *Figura 10*.

Existeixen diferents combinacions, depenent del material semiconductor en que estigui fabricat el LED. Cadascuna d'aquestes combinacions desprenen quantitats d'energia variables, en funció de la banda prohibida del material semiconductor. Quan els portadors de càrrega es combinen, els fotons són emesos segons nivells específics d'energia. Per exemple, per generar una llum blava els fotons són emesos en un nivell més elevat d'energia i per la llum vermella necessita un nivell més baix d'energia.

Amb aquesta característica tan particular podem buscar un LED que emeti una llum amb un rang de longituds d'ona pròxim a 339 nm. Recordem que amb aquest valor de longitud d'ona obtenim un dels pics de màxima absorció del NADH. D'aquesta manera podem definir un emissor amb una longitud que aprofita correctament les característiques del NADH.



**Figura 10.** Distribució espectral segons els colors del LED.

### Compostos de fabricació del LED

Per veure de manera general quins compostos conformen el semiconductor del LED, hem representat en la *Taula 1* on també es relaciona amb el color de llum que emet. Cal destacar que l'elecció del compost és essencial per la longitud d'ona que generarà.

<i>Compost</i>	<i>Color</i>
Arsenur de gal·li (GaAs)	Infraroig
Arsenur de gal·li i alumini (AlGaAs)	Vermell i infraroig
Arsenur fosfori de gal·li (GaAsP)	Vermell, taronja i groc
Nitrur de gal·li (GaN)	Verd
Fosfur de gal·li (GaP)	Verd
Selenur de zinc (ZnSe)	Blau

Nitrur de gal·li i indi (InGaN)	Blau
Carbur de silici (SiC)	Blau
Diamant (C)	Ultraviolat

**Taula 1.** Compostos del LED segons el color de la llum que emet.

### Elecció del LED pel sistema optomètric

Analitzant les condicions que necessita el NADH, pel nostre projecte seria ideal l'elecció d'un LED amb la longitud d'ona que ens proporciona un de color blau o un ultraviolat per tal d'ajustar-se al espectre sensible del NADH que estem buscant. El problema d'aquest tipus de components és que són cars i que, en el cas del ultraviolat, poden resultar nocius per la visió. Per tant, per raons de disponibilitat i de preu, en els tests inicials i els prototips de l'instrument de mesura, usarem un LED amb unes qualitats pròximes als models anteriors. La longitud d'ona més pròxima a la que estem buscant seria la que engloba la llum visible, del espectre electromagnètic. Per determinar el funcionament bàsic d'un prototip ja ens servirà un LED que treballi en aquesta zona. Usarem un LED de color verd, amb un encapsulat de plàstic, el més comú, tal i com hem descrit en l'apartat anterior.

#### 2.6.1.2 Fotodíode de silici

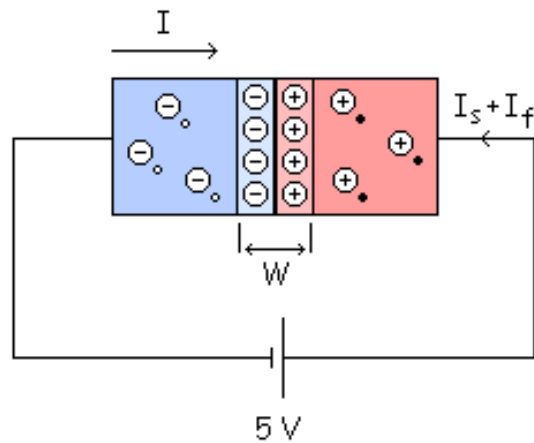
Els fotodíodes de silici són dispositius semiconductors sensibles als fotons de la llum. Aquests dispositius, en funció de la incidència de la llum, són capaços de generar un flux de corrent en un circuit extern, proporcional a la potència lumínica que li incideix.

L'ús més comú d'aquests dispositius és en aplicacions que es necessita detectar la presència o absència de quantitats de llum, tot i que també poden ser calibrats per a mesuraments més precisos per a potències amb intensitats lumíniques per sota d' $1 \text{ pW/cm}^2$  o per sobre de  $100 \text{ mW/cm}^2$ . Aquests fotodíodes de silici s'utilitzen en aplicacions tan diverses com l'espectroscòpia, la fotografia, la instrumentació analítica, sensors de posició òptics, comunicacions òptiques, instruments mèdics, entre altres.

#### Funcionament d'un fotodíode

Aquest dispositiu electrònic bàsicament és basa en una unió PN amb una regió intrínseca no dopada col·locada entre les dues zones fortament dopades. Aquesta estructura crea una zona de càrrega espacial que serveix per separar els parells electró-forat fotogenerats al incidir sobre ell una senyal òptica.

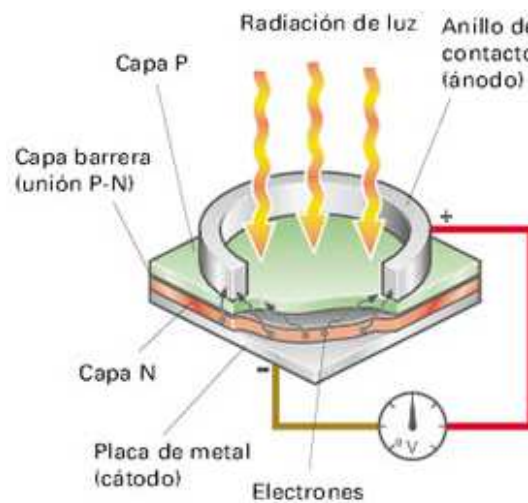
Aquesta absorció òptica és una característica del semiconductor basada en que quan és il·luminat, els fotons de llum incident seran absorbits pel semiconductor fent que els electrons de l'estructura cristal·lina s'excitin. Si l'energia del fotó és major a l'energia de la banda prohibida, del semiconductor en qüestió, els electrons seran empesos a la banda de conducció deixant forats lliures en els llocs que ocupaven a la banda de valència. Per tant, es creen parells d'electró - forat generant un corrent de portadors que fluirà pel circuit extern al que estigui connectat el fotodíode.



**Figura 11.** Esquema bàsic de funcionament d'un fotodíode.

Per a un correcte funcionament, el fotodíode es polaritza inversament, de manera que quan s'il·lumina i absorbeixi llum la característica tensió corrent canviarà i el corrent invers s'incrementarà degut a la generació d'un fotocorrent provocat per l'augment de portadors. Aquest corrent es mantindrà aproximadament constant dins d'un rang de tensió.

En la *Figura 12*, es pot observar l'estructura general que té un fotodíode on es pot veure la capa P i la capa N i entremig la zona intrínseca no dopada. També es representa la posició de l'ànode i el càtode.



**Figura 12.** Esquema d'un fotodíode dividit en parts.

### Compostos de fabricació d'un fotodíode

Com en el cas anterior del dispositiu LED, el material emprat en la fabricació d'un fotodíode és un factor crític per definir les seves propietats. El que defineix el material de composició és a quin rang de longituds d'ona serà sensible el fotodíode. Entre els compostos més comuns tenim:

<i>Compost</i>	<i>Longitud d'ona que són més sensibles</i>
Silici (Si)	Entre 190 i 1100 nm (Llum visible)
Germani(Ge)	Entre 800 i 1900 nm (Llum infraroja)
Indi gal·li arsènic (InGaAs)	Entre 800 i 2600 nm
Sulfur de plom (PbS)	Entre 1000 i 9900 nm
Fosfur de gal·li (GaP)	Entre 190 i 1100 nm (Llum visible)

**Taula 2.** Diferents materials de composició d'un fotodíode.

### Recursos útils del fotodíode pel sistema optomètric

Les característiques que ens han fet elegir un fotodíode són les següents:

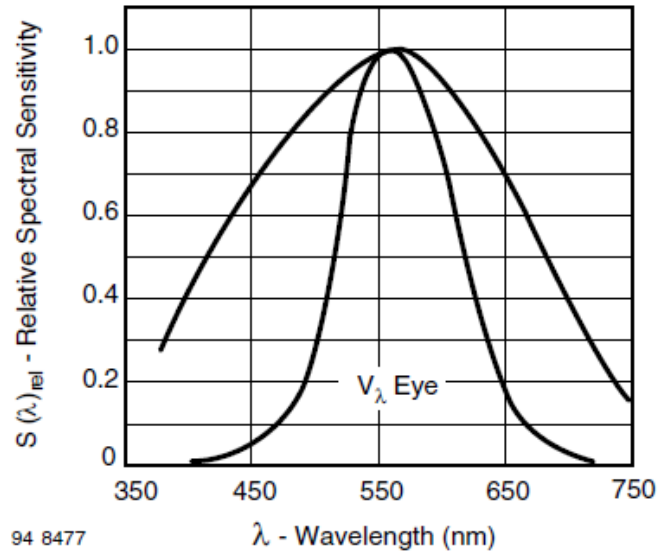
- Mostra una linealitat de resposta excel·lent respecte a una llum incident.
- Podem trobar un fotodíode que l'ample espectral del qual s'ajusti al espectre del LED emissor.
- Presenta un baix nivell de soroll.
- Els fotodíodes de silici comprenen les longituds d'ona de la llum visible.
- Poca variació enfront de la temperatura en els casos de que l'espectre estigui comprès dins del que entenem com a llum visible.
- Es poden trobar dispositius compactes, lleugers i de llarga duració.

### Elecció del fotodíode pel sistema optomètric

Hem d'estudiar les característiques del dispositiu fotosensible per veure si s'adapta al nou ús que li volem donar en el nostre sistema optomètric. En el cas anterior ja hem definit una font emissora de llum que és un LED verd. Aquest LED ens genera una radiació lumínica a una longitud d'ona concreta, la que més s'aproxima a les condicions que busquem pel NADH. Amb aquestes premisses, hem de buscar un fotodíode que sigui especialment sensible a la longitud d'ona que genera el LED, per així poder formar un tàndem entre els dos dispositius i crear la cèl·lula del sensor.

Després de buscar entre diferents tipus de dispositius, hem triat un fotodíode de silici definit com BPW21R de la marca Vishay, pel prototip del sistema optomètric. La informació l'hem extret del full de característiques del fotodíode. Aquest dispositiu es destaca per: una bona linealitat a la sortida respecte el senyal d'entrada, una sensibilitat alta, un baix corrent en fosc i un encapsulat compacte, hermètic i resistent. Una característica de fabricació d'aquest fotodíode és que la finestreta, per on incideix la llum, està equipada amb un filtre corrector per captar millor la resposta espectral de la llum verda. És una qualitat extra que fa que s'adeqüi a la emissió que fa el nostre LED verd. El dispositiu, i el filtre verd que conté, es pot veure en la *Figura 14*.

Si analitzem les característiques de sensibilitat que té el fotodíode elegit observem el rang de longituds d'ona, on es dispositiu és més sensible. En la imatge de la *Figura 13*, on hi ha una captura de la gràfica de sensibilitat de fotodíode, podem veure que és sensible a les longituds d'ona que comprèn la llum visible, entre les quals, també hi ha la llum verda. Amb això comprovem que la llum que emetrà el LED podrà ser captada sense cap problema pel fotodíode.



**Figura 13.** Característiques de sensibilitat del fotodíode.

Altres característiques important que ens aporta aquest fotodíode és que el podem alimentar dins de les mateixes tensions que alimentaríem el LED. Per altra banda el consum no és massa elevat. Una de les aplicacions que defineix el fabricant, és que està dissenyat per a formar part d'un sensor per a fins de mesurament de color.



**Figura 14.** Fotodíode utilitzat en el sistema optomètric.

### 2.6.1.3 Multímetre

Després d'analitzar els components que conformaran el sensor, veiem que durant el desenvolupament dels assaigs de verificació i per obtenir valors directes que extraurem del fotodíode necessitarem un aparell de mesura. Per obtenir els paràmetres de tensió, intensitat i resistència, utilitzarem un multímetre. Els multímetres són instruments de mesura bàsics en qualsevol laboratori de mesures elèctriques. Aquests elements es caracteritzen per la seva capacitat de poder mesurar diferents magnituds, en concret, són capaços d'actuar com a voltímetres amperímetres i ohmímetres, entre altres.

Els multímetres es poden classificar a dins de dos grans grups: els analògics i els digitals. Els multímetres analògics estan basats en un dispositiu electromecànic que causa el moviment d'una agulla al llarg d'una escala numèrica segons el valor de la variable que es mesura. Es destaca per tenir un sistema continu ("analògic") de marcació. Els multímetres digitals estan basats en el mostreig i digitalització del senyal a mesurar i es distingeixen fàcilment per tenir un sistema de marcació, de la variable que es mesura,

digital. En la actualitat la utilització d'un multímetre digital és la més generalitzada per tot tipus de mesures.

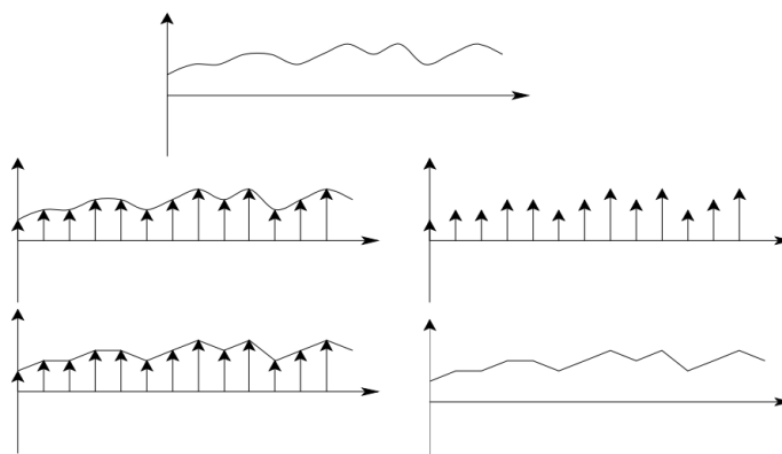
### Avantatges del multímetre digital

El multímetre digital es caracteritza per presentar el seu valor en una pantalla alfanumèrica. En aquest projecte utilitzarem un multímetre d'aquest tipus ja que presenten una sèrie d'avantatges enfront dels analògics:

1. L'exactitud dels mesuradors digitals és molt major que la que podem obtenir en els seus equivalents analògics.
2. Els errors de traducció de l'agulla o d'equivocació en l'elecció de les diferents escales és eliminat.
3. La presentació numèrica del resultat accelera la lectura.
4. La precisió és major conforme augmenta el nombre de dígit, ja que també augmentem bits de mostreig.
5. Posseeixen proteccions enfront de la sobrecàrrega i la polaritat inversa.

### Funcionament dels multímetres digitals

La base dels multímetres digitals és la conversió analògic-digital (convertidors A/D) de les magnituds contínues (tensió, corrent) a una magnitud digital. En aquesta conversió és "pren" una sèrie de mostres del senyal analògic a mesurar en determinats intervals de temps.



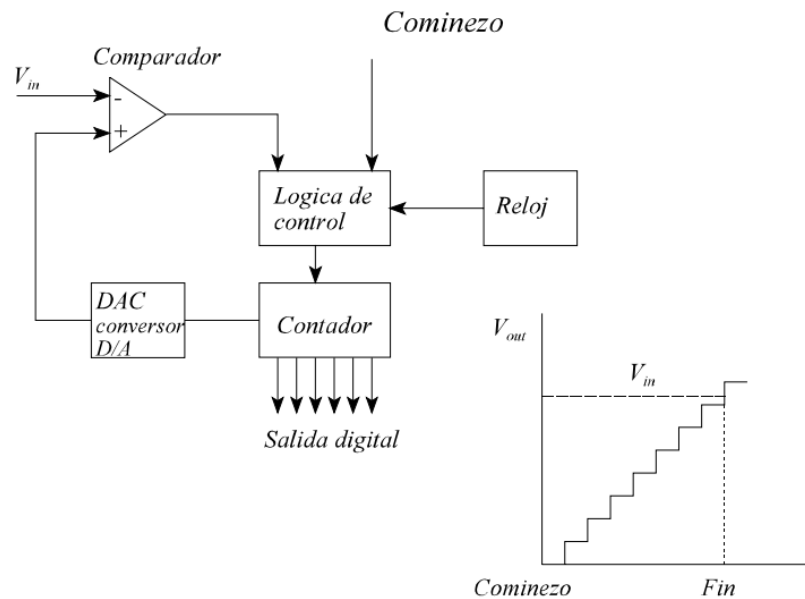
**Figura 15.** Digitalització d'un senyal analògic de tensió i posterior reconstrucció.

En la imatge es pot identificar un senyal analògic, la seva digitalització i posterior reconstrucció.

El primer pas per la digitalització d'un senyal és la presa de mostres (una mostra és el valor que pren el senyal en un determinat instant de temps), a intervals fixos de temps. El valor d'aquests intervals tenen una gran importància. Com més petits siguin els intervals de mostreig major serà la precisió i millor serà la reconstrucció del senyal. No obstant, a major mostreig el volum d'informació creix. És necessari doncs, trobar un equilibri entre la grandària d'aquest interval de mostreig i el volum d'informació que s'obté, ja que a més informació més capacitat de càlcul del microprocessador necessitarem. Per a fer la aproximació correcta existeix el teorema de Nyquist que relaciona l'ample de banda del senyal amb la màxima grandària del interval per poder reconstruir el senyal amb exactitud.

A continuació, les mostres preses són quantificades (se'ls assigna una valor dins d'un interval) és a dir, si els intervals de quantificació van de 0,1 en 0,1 i una mostra real té un

valor d'1,67 V, de forma digital, a aquest valor se li assigna 1,7 V. Per definir fins a les centèsimes els intervals de quantificació haurien de ser de 0,01. Aleshores si que podríem tenir un valor de 1,67 V. En la *Figura 16* es pot observar un esquema de blocs d'un circuit digitalitzador de tensió.



**Figura 16.** Circuit esquemàtic per la digitalització de la tensió.

En la gràfica de la *Figura 16* es pot veure com treballa el convertidor. Quan arriba el senyal de començament, el senyal d'entrada és comparada amb la sortida d'un convertidor digital/analògic (DAC).

La sortida del convertidor digital/analògic comença amb un zero i és incrementada una unitat amb cada pols del rellotge. Mentre que l'entrada  $V_{in}$  sigui major que la sortida del DAC, el comparador produeix un senyal de sortida que permet a la lògica de control alimentar amb pols de rellotge al comptador, perquè aquest pugui seguir incrementant la seva sortida. Al moment que la sortida del DAC és major que  $V_{in}$ , la sortida del comparador canvia i la lògica de control atura els polsos de rellotge que alimenten al comptador. En aquest moment la sortida del comptador representa l'entrada  $V_{in}$  en format digital. Una vegada que el valor digital és obtingut el sistema és inicialitzat per començar un nou compte.

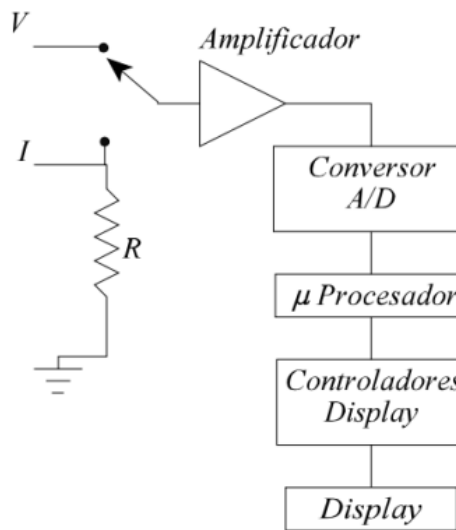
### Característiques dels multímetres digitals

La precisió d'un mesurador digital és usualment major que la d'un mesurador analògic, però les especificacions donades pel fabricant poden ser difícils d'entendre. Hi ha tres conceptes que fan referència a la precisió del multímetre digital, aquests són la resolució, l'error constant i l'error proporcional.

- **La resolució** es defineix com el valor més petit que el multímetre pot mesurar. Els dígitos de l'instrument han de ser capaços de mostrar la resolució real del instrument.
- **L'error constant** és l'error inherent a l'instrument i que és constant per tot el rang operatiu del mateix. Aquest error se sol expressar en funció del nombre de dígitos o com un percentatge de fons d'escala de l'aparell.
- **L'error proporcional** és un error que és proporcional a la magnitud mesurada, és expressat en funció del percentatge de la magnitud mesurada.

La majoria dels fabricants expressen la precisió del mesurador com a combinació dels errors constants i proporcionals. Per exemple, tenim un mesurador de 4 dígits i el fabricant dóna una especificació de  $\pm 0,01\%$  de lectura i de  $\pm 1$  dígits de precisió, si la lectura obtinguda és de 5,000 V el màxim error és de  $0,01\%$  de  $5 + 0,001$  V o 0,0015 V.

Una altra de les característiques que diferencia als mesuradors digitals davant dels analògics, és que la magnitud bàsica de mesura és la tensió, així doncs, el mesurador digital bàsic és el voltímetre. Per aconseguir un amperímetre a partir d'un voltímetre simplement caldria introduir un resistor R de valor conegut. D'aquesta manera mesurant la caiguda de tensió a la resistència i aplicant la llei d'Ohm es pot conèixer el valor de corrent que circula per ell. En la *Figura 17* es pot veure un diagrama de blocs de com aconseguir un amperímetre a partir d'un voltímetre.



**Figura 17.** Disseny d'un amperímetre a partir d'un voltímetre.

Si ens fixem únicament amb el voltímetre, els fabricants solen incloure altres especificacions addicionals:

- **Impedància d'entrada** és la impedància amb la qual carrega el voltímetre al circuit de mesura. Aquesta és independent de l'escala.
- **Velocitat de lectura** és el nombre de vegades per segon que el voltímetre és capaç de llegir la tensió (cal recordar que el voltímetre triga un cert temps a llegir digitalitzar i presentar la informació).

#### Elecció de l'instrument de mesura pel sistema optomètric

En aquest projecte és necessari un voltímetre, ja que la sortida del sensor que estem dissenyant surt un valor en forma de tensió. Tot i això, en alguns casos serà necessari mesurar valors de resistència, intensitats i inclús capacitats.

Per aquesta raó, i per la disponibilitat en el laboratori, en el desenvolupament d'aquest projecte s'ha pensat en la utilització d'un multímetre digital.

En el moment de fer les proves en l'equip de mesura dissenyat, només és necessari un voltímetre, ja que el sistema ja no necessitarà tantes funcions com les que ens ofereix un multímetre.

El model de mesurador digital utilitzat és el Multímetre digital MD-200B del fabricant Promax. En la *Figura 18* es pot observar el model descrit:



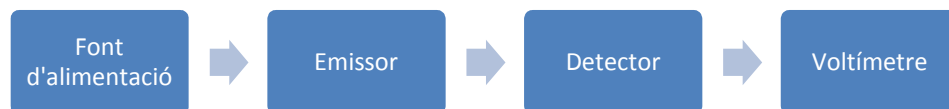
**Figura 18.** Multímetre digital MD-200B.

### 3 Anàlisi d'un sistema fotomètric de mesures

Després d'analitzar les especificacions tècniques necessàries pel sistema que volem crear i buscar els dispositius que més s'hi aproximen, ara analitzarem el funcionament real i la reacció d'aquests elements per veure'n la viabilitat.

#### 3.1 Sistema 1: Comprovació de la resposta dels elements bàsics del sensor

Per comprovar el funcionament es comença creant un sistema bàsic optomètric compost pels elements del diagrama de blocs de la *Figura 19*:



**Figura 19.** Diagrama de blocs del sistema inicial.

- **Font d'alimentació:** El sistema està connectat a una font d'alimentació en continua de 5 V.
- **Emissor:** En aquest bloc es contempla l'element emissor que és un LED de llum verda i una resistència en sèrie.
- **Detector:** Engloba el circuit detector format pel fotodíode i una resistència que definirà la caiguda de tensió que mesurarem a la sortida.
- **Voltímetre:** És l'instrument de mesura que utilitzarem en els tests per visualitzar la tensió que hi ha al resistor del detector.

Aquest sistema manté alimentat un LED a una tensió constant fent que circuli una intensitat d'aproximadament 20 mA. Aquesta intensitat fa que el díode emeti una llum constant.

Paral·lelament tenim un fotodíode instal·lat a una distància concreta del LED emissor que també està alimentat a 5 V. Segons les especificacions tècniques, es pot connectar a altres tensions però per facilitar nostra usarem la tensió del circuit que ja tenim.

Es connecta de manera que el càtode estigui a la alimentació positiva i l'ànode a terra, per propiciar la polarització inversa. Entremig de la connexió del ànode i el negatiu i connectarem una resistència en sèrie que serà la que transformarà la intensitat generada pel fotodíode en tensió, per la relació d'Ohm. Transportant el voltatge d'aquesta resistència a un voltímetre podrem veure la resposta del sistema.

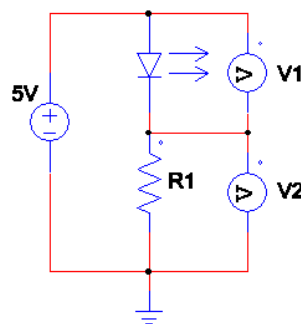
Un cop desenvolupat el sistema, es tracta d'introduir mostres amb diferents absorbàncies entremig de l'emissor i el receptor. Com que es té una font lluminosa constant, la variació d'absorció de llum esta relacionada amb les mostres que posem entremig.

De manera que si introduïm mostres amb valors graduals de transmitància (per tant també d'absorbància), de més pas de llum a menys, el detector mesurarà la diferència d'intensitats lumíniques, les quals, estan relacionades amb l'absorció de la mostra i podrem comprovar si s'obté una resposta lineal, per poder dissenyar una possible aplicació en un prototip.

### 3.1.1 Càlculs inicials

Per fer el primer assaig calcularem uns valors aproximats de les resistències que conformen els dos circuits.

#### Circuit emissor



**Figura 20.** Circuit emissor del sistema.

La resistència d'aquest circuit és important ja que junt amb el díode es crea un divisor de tensió de la font. La tensió al resistor determinarà la intensitat que circula pel díode, i així mateix la intensitat lumínica.

La intensitat màxima que pot assumir el díode en corrent directe és de 25 mA. Per mantenir els marges de seguretat definirem una intensitat màxima de 20 mA. Per aquesta intensitat necessito una tensió de 3,3 V al LED tal i com defineix la gràfica V/I que proporciona el fabricant del LED.

Aleshores la tensió necessària al resistor serà:

$$\begin{aligned}
 V_{in} &= 5 \text{ V}; V_1 = 3,3 \text{ V} \\
 V_2 &= 5 - 3,3 = 1,7 \text{ V} \\
 V_2 &= 1,7 \text{ V}
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

Per la llei d'Ohm obtenim:

$$R_1 = \frac{1,7 V}{20 mA} = 85 \Omega \quad (3.2)$$

Aquest seria el valor de resistència ideal, per a què passin 20 mA pel LED. No tenim exactament aquest valor estandarditzat de resistència que busquem, per tant, com el sistema ens permet una certa tolerància prendrem un altre valor que s'aproximi a les condicions, per així prescindir d'un element més com és un potenciòmetre.

Entre els valors normalitzats de resistors disponibles, elegirem:

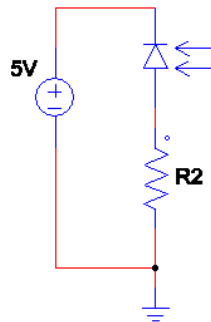
$$R_1 = 120\Omega.$$

Comprovem com afectaria el valor elegir calculant la intensitat del díode LED:

$$I = \frac{1,7 V}{120\Omega} = 14,2 mA \quad (3.3)$$

La intensitat es manté dins dels paràmetres de seguretat i hem augmentat una mica el valor de la resistència, fet positiu pel que fa el consum. S'ha de tenir en compte que el resistor pel prototip té una tolerància del 5%.

Circuit receptor



**Figura 21.** Circuit receptor del sistema.

En aquest cas per a obtenir el valor exacte de resistència que es necessita, simplement hem observat els valors màxims que hi ha al full de característiques i hem buscat un valor que li anés bé. S'ha optat per un valor de resistència de  $R_2 = 2,7 k\Omega$ , amb una tolerància del 5%.

### **3.1.2 Resultats i discussió de l'assaig del sistema 1**

S'ha muntat el circuit, amb els elements descrits, en una placa de proves i hem connectat el sistema a la font d'alimentació. Per reduir errors inicials, l'hem deixat funcionar durant cinc minuts per tal de que s'estabilitzi. Per evitar fluctuacions i falses lectures del sensor s'ha fet l'experiment en una sala amb poca llum.

Un cop realitzades les diferents proves hem obtingut:

**Sense llum:** Després d'esperar uns 5 minuts per a què s'estabilitzi, s'ha pogut comprovar que si el LED no emet llum el fotodíode no detecta intensitat lumínica. La tensió al resistor és igual a 0 V.

**Amb tota la llum:** Amb el LED encès a ple rendiment sense cap filtre entremig, ha donat un valor de 1,6 mV de tensió de sortida. És una tensió molt petita però ja es pot identificar que hi ha una reacció per part del fotodíode.

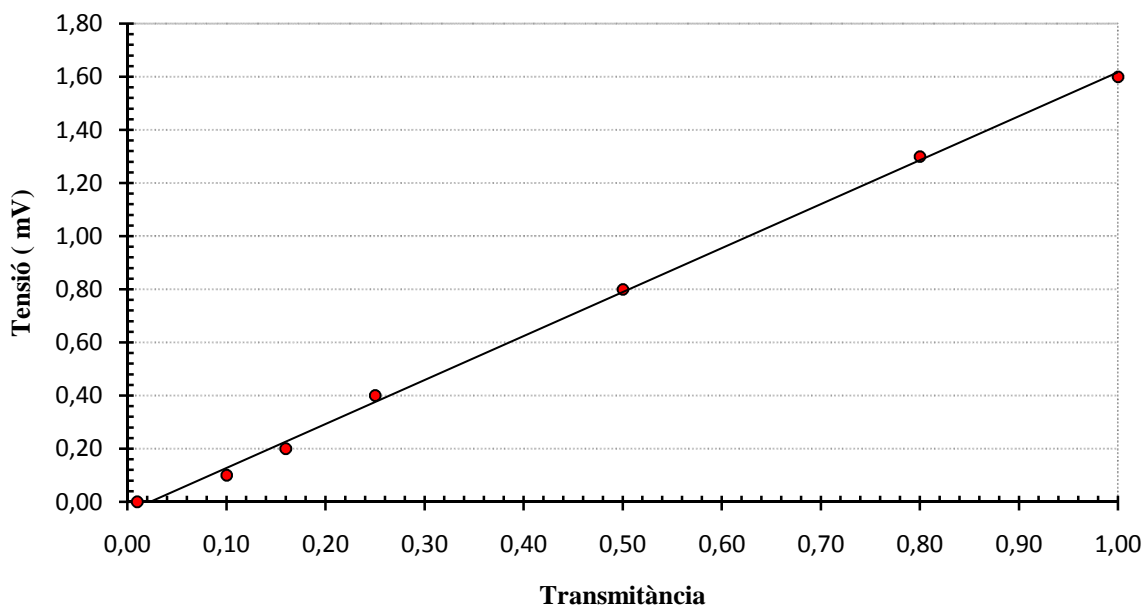
**Set de filtres:** Per determinar si hi ha una progressió lineal hem introduït filtres fotogràfics entremig del emissor i del receptor els quals tenen una transmitància coneguda. A la *Taula 3* podem veure els valors de tensió de sortida en funció de la transmitància dels filtres introduïts. La descripció d'aquests filtres la veurem en l'apartat següent.

Transmitància del filtre (%)	Tensió de sortida (mV)
100	1,6
80	1,3
50	0,8
25	0,4
16	0,2
10	0,1
1	0
0	0

**Taula 3.** Valors de tensió del primer experiment amb filtres.

Un cop tenim els valors, els representarem a la gràfica de la *Figura 22* per veure la relació de la tensió amb la transmitància de cada filtre.

### Tensió de sortida del primer experiment



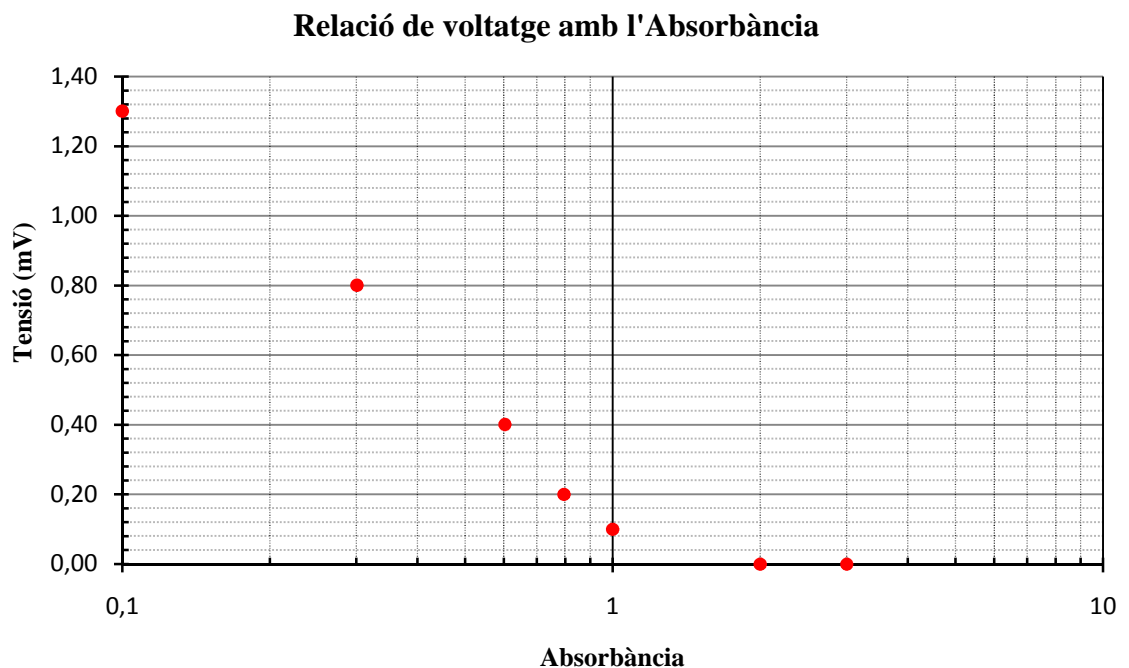
**Figura 22.** Relació de la tensió amb la transmitància del primer experiment.

En aquest primer assaig del sistema, pels resultats representats en la gràfica de la *Figura 22*, podem observar que es té una resposta favorable tal i com busquem i tot indica que el sistema pot ser linealitzat.

Veiem que a mesura que augmenta la transmitància dels diferents filtres, la tensió de sortida també ho fa i de forma escalonada. A més transmitància, més pas de llum, la tensió és més alta ja que el fotodíode capta més llum, genera més intensitat i per tant es tradueix a més tensió al resistor. A menys transmitància, hi ha poca llum i la tensió a la sortida serà més petita.

Per veure si els punts obtinguts tenen una relació entre ells hem introduït una tendència lineal que corrobora que la distribució dels punts segueix una mínima linealitat. Tot i això podem observar que hi ha punts que difereixen i això vol dir que hi ha desviacions de tensió. Aquestes desviacions són provinents d'errors i afectaran a la mesura de la transmitància, afectant a la sensibilitat del conjunt. S'hauran de solucionar per aconseguir una bona sensibilitat.

Per poder veure si hi ha una relació acceptable amb l'absorbància, es passa la transmitància a absorbància a partir de la relació anteriorment descrita i obtenim la gràfica de la *Figura 23* que relaciona el voltatge de sortida amb l'absorbància:



**Figura 23.** Relació de la tensió de sortida amb l'absorbància de l'experiment.

En aquest cas, tal i com podem veure en la gràfica de la *Figura 23*, a més absorbància vol dir que el filtre es queda més percentatge de llum i per tant, el valor de tensió de sortida serà menor. Es pot verificar que el punt màxim de tensió de sortida, correspon a quan hi ha un filtre que té poca absorbància (o transmitància alta) i es queda poc percentatge de la llum que la travessa. A mesura que s'introdueixen filtres amb més absorbància, el filtre es queda més percentatge de llum, i es va reduint la tensió de sortida. La resposta és de caràcter logarítmic i cal destacar que una desviació de tensió elevada es pot traduir en un error important, determinant així la sensibilitat del sistema.

Un cop realitzat el primer experiment podem determinar que tenim una reacció favorable i que el sistema pot ser sotmès a estudi per tal de treure'n alguna aplicació per a

un instrument de mesura fiable. Tot i això, destaquem que la viabilitat del sistema passa per reduir les desviacions de la sortida per obtenir una precisió acceptable.

### **3.2 Estudi per les millores del sistema 1**

En el primer experiment hem determinat un comportament favorable pel que fa la resposta del sensor. Tenim una resposta aproximadament lineal, que percep les variacions de la llum segons l'absorbància i de forma estable. Malgrat tot, falta comprovar si el sensor pot formar part d'un instrument de mesura, verificant que les dades obtingudes siguin verdaderes, si més no, poder determinar quant difereixen de la realitat.

Per altra banda per poder utilitzar les dades obtingudes del sistema s'ha de tractar el senyal de sortida, per exemple amplificar-la, rectificar-la... i això vol dir que tot el sistema estarà sotmès a canvis i evolucions per millorar-lo. Per consegüent es fa necessari comprovar si la modificació afecta positivament, o no, a la sensibilitat i determinar la qualitat de l'instrument.

Per poder fer la comprovació d'aquestes dades necessitem crear unes metodologies de test. Aquestes ens serviran per poder fer un anàlisi de les diferents proves des del mateix punt de vista per determinar les millores i sobretot quantificar-les. En els següents apartats es definiran aquestes estratègies de verificació.

#### **3.2.1 Assaigs i metodologia de test**

Per a poder fer uns assaigs efectius hem de determinar una fórmula per poder-los fer sempre iguals. Com hem pogut veure en l'experiment inicial, una de les gràfiques més representatives ha estat la que relaciona el voltatge de sortida amb la transmitància. Realment el que ens interessa és trobar el valor d'absorbància per després poder calcular la concentració de la mostra. Però sabem que existeix una relació logarítmica entre l'absorbància i la transmitància, el qual amb un dels dos es pot calcular l'altre.

Determinar la gràfica de la tensió en funció de la transmitància és més representativa i senzilla d'obtenir, aleshores definim que per observar el comportament i les desviacions del sistema, el nostre eix principal serà la gràfica de la tensió en funció de la transmitància.

Per poder fer els assaigs i verificacions evitant fer servir provetes que contenen líquids amb les diferents concentracions, utilitzarem filtres fotogràfics amb l'absorbància (i la transmitància) coneguda. Aquests filtres són els mateixos que hem utilitzat en el experiment inicial, ja que hem vist que el seu ús simplifica molt la realització dels tests.

Aquests filtres òptics, coneguts com a filtres de densitat neutra, venen en uns formats de 75 mm x 75 mm, dissenyats principalment per a tècniques de fotografia. El seu funcionament es basa en una làmina plàstica que té la capacitat de deixar passar més o menys quantitat de llum, o és el mateix, absorbeix menys o més quantitat de llum. Aquest grau de pas de llum està calibrat i identificat amb una absorbància de la qual es pot determinar una transmitància concreta. En la *Figura 24*, podem veure un exemple del format dels filtres fotogràfics que hem utilitzat.



Figura 24. Filtres fotogràfics utilitzats en el test.

Amb aquests filtres podem determinar un set de mostres escalades dins d'un rang entre el 0 % i el 100 % de pas de llum i realitzar un estudi acurat ja que sabem exactament la transmissió i l'absorbència que té cada mostra. Posteriorment es podrà extrapolar a una concentració real.

La codificació que donarem als filtres és la següent:

Codi de filtre	Transmissió (%)	Absorbència
SF (Sense filtre)	100	0
F1	80	0,10
F2	50	0,30
F3	25	0,60
F4	16	0,80
F5	10	1,00
F6	1	2,00
F7	0,1	3,00
FO (Filtre opac)	0	“opac”(seria infinit)

Taula 4. Codificació des filtres amb els valors d'absorbència i transmissió corresponents.

En les Taula 4, identificarem els filtres amb el codi presentat. Aquests filtres generen una distribució de mostres al llarg de tot el rang que defineix el sistema. Per poder-ho adaptar al sistema de mesura i per facilitar en el moment de fer l'assaig, hem dividit els filtres i classificat per ordre de transmissió. En la Figura 25, es pot veure la distribució obtinguda.



**Figura 25.** Filtres classificats per a fer els tests.

Un com hem vist quines mostres utilitzarem, hem de definir com es farà la metodologia de realització de tests.

S'aniran fent les proves i muntatges que es creguin convenientes i en cada nou canvi aplicat al sistema, s'haurà de fer una comprovació. Es posaran tots els filtres, d'un en un, entre l'emissor i el receptor i es determinarà en cada cas, el valor de tensió del resistor del fotodíode.

Aquesta mesura es repetirà quatre vegades per a cada filtre i es construirà una taula de valors per calculant-ne la mitjana. Amb els resultats obtinguts es determinaran les desviacions de cada punt respecte les mitjanes per calcular la precisió del sistema en cada cas i tenir una evolució de tots els canvis. Aquestes tandes de test es faran en diferents condicions lumíniques, a diferents hores del dia, i es variarà l'ordre d'introducció dels filtres, tan ascendent com descendent, per poder tenir un rang d'actuació més real i avaluar si hi ha errors d'histèresi.

#### Dispositiu de lectura de mostres

Un cop hem determinat la metodologia dels tests, falta dissenyar un prototip de mesura provisional que s'utilitzarà per a fer les proves. Com hem comentat, els tests es basen en col·locar els diferents filtres entre l'emissor i el receptor, sempre de la mateixa manera i amb el mateix angle, mantenint-lo en la màxima foscor possible. Per aquesta raó, hem dissenyat un prototip que té implementat una sistema poka-yoke<sup>3</sup> que ens evita realitzar tests de forma errònia, per així evitar errors innecessaris a les mesures.

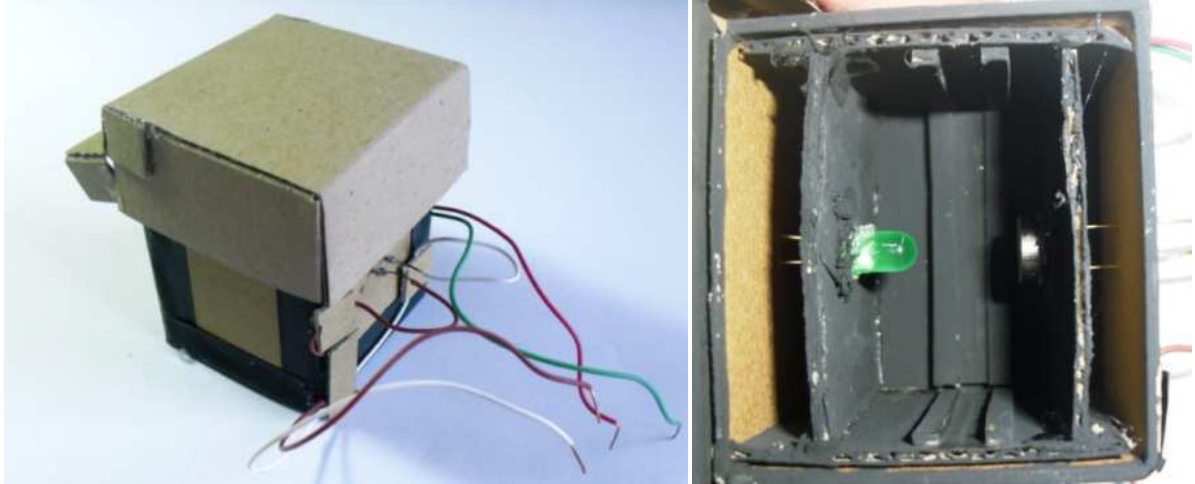
Aquest dispositiu consisteix en una caixa de cartró de 40x40x50 mm amb una tapa, on totes les arestes estan aïllades amb pegament termofusible i cinta adhesiva negra per tal d'evitar la infiltració de la llum.

L'interior d'aquesta caixa està recoberta amb pintura negra per evitar el màxim la reflexió. També hi ha dues parets que subjecten el dispositiu emissor i el receptor a una distancia fixada a 10 mm. Entremig dels dos dispositius, hi ha unes guies que permeten posicionar el suport de mostres sempre equidistants al lector i mantenint el mateix angle d'incisió.

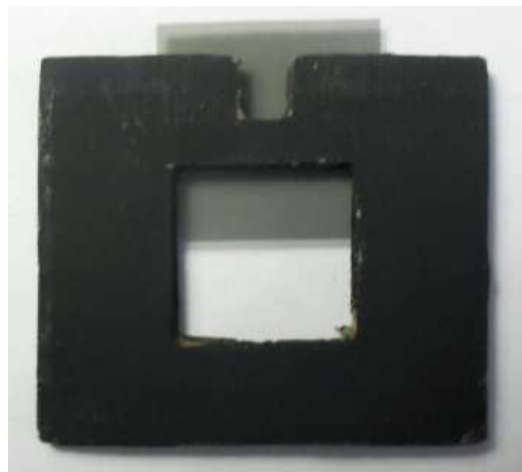
---

<sup>3</sup> Un sistema **poka-yoke** és una tècnica de qualitat que s'aplica amb el fi d'evitar errors en la operació d'un sistema. Un exemple és el connector d'un USB que no permet connectar-lo al revés.

Aquest suport també està realitzat de cartró i té una pestanya superior per poder introduir els filtres de 20x20 mm de forma ràpida. Tot això és necessari per evitar tocar el filtre amb els dits per no malmetre'l. La connexió dels dispositius amb el banc de proves es realitza a través d'uns cables de coure marcats amb la polaritat correcta.



**Figura 26.** Imatge exterior i interior del dispositiu de lectura de mostres.



**Figura 27.** Suport de les mostres en forma de filtre fotogràfic de 20x20 mm.

### **3.2.2 Caracterització de l'instrument i càlcul d'errors**

El sistema que volem desenvolupar és un instrument de mesura. N'hi ha de dues classes:

- Instruments de mesura per comparació.
- Instruments de mesura per deflexió.

Un instrument de mesura per comparació, està constituït per un sistema balancejat, que compara la magnitud a mesurar amb un patró unitat i un indicador de zero. Una de les característiques principals és que són instruments que presenten una major precisió inherent.

Un instrument de mesura per deflexió, està constituït per un transductor que capta la magnitud física a mesurar, la converteix en una variable de mesura que es condiciona, processa i transmet fins a una escala indicativa de la mesura. Degut a aquest tractament del

senyal, per la multiplicació d'un guany, l'atenuació pot ser que afecti en la precisió del instrument.

En el cas del nostre projecte s'està analitzant un instrument de mesura per deflexió. Per una part tenim el transductor que és el sistema emissor - receptor desenvolupat, i per l'altra hi ha el voltímetre que s'utilitza com instrument de mesura de la tensió del resistor de sortida.

En fases de desenvolupament es pot determinar que hi ha dos sistemes separats, el sensor i un voltímetre que per si sol ja és un instrument de mesura. Després en el desenvolupament del prototip introduïrem unes millores per tal de que tot el prototip respongui com a un instrument de mesura complet.

En tot sistema d'instrumentació electrònica es cometen errors en la mesura, i evidentment en l'instrument desenvolupat també n'hi haurà. Es tracta de determinar quins són aquests errors, quantificar-los i comprovar si estan dins dels paràmetres establerts que ha de tenir el prototip.

Les característiques més importants que hem de tenir en compte d'un instrument per poder-lo descriure són els següents:

- **Rang:** És l'interval operatiu de l'instrument expressat en unitats de magnitud.
- **Span:** És l'abast, el fons d'escala.
- **Resolució:** És el valor més petit, significatiu o no, que es pot mesurar. Ve donat per una conta, grau o divisió, quan el rang seleccionat és el menor possible.
- **Sensibilitat:** És el pendent que defineix la recta de l'instrument. Aquest pendent és la mínima variació que pot ser apreciada en la indicació sobre l'escala de lectura de l'aparell per unitat de magnitud mesurada, que l'ha provocada.

En els experiments d'adequació del sistema s'utilitza un voltímetre de laboratori, com el descrit anteriorment. Aquest com a instrument de mesura que és, també està definit amb aquestes característiques i evidentment també ens proporciona un error en les mesures. Tot i això s'ha buscat un instrument que tingués unes qualitats més bones que el propi sensor, d'aquesta manera l'error que ens introdueix el voltímetre és conegut i es pot tenir com a sostre d'error.

La focalització està en quantificar les qualitats del sensor i posteriorment del conjunt. Per tant, en cada experiment i set de proves es determinaran els següent paràmetres:

### **Desviació de voltatge ( $\Delta V$ )**

Després de fer els quatre tests es farà la mitjana de totes les mesures de tensió que hem obtingut en cada filtre. Restarem la mitjana amb cadascun dels quatre valors dels diferents tests i ens quedarem amb el resultat més elevats. Aquesta desviació pot ser superior o inferior.

Per exemple: a partir de quatre valors de tensió obtenim una mitjana de 1,65 V. Es compara la mitjana amb tots els valors obtinguts i s'identifica el que difereix, podria ser 1,70 V. Es pren la diferencia dels dos valors que seria 0,05 V. En aquest cas és positiu però tan si és cota superior com inferior es considera valor absolut i sempre s'agafa el més gran, fent que la desviació sigui de  $\pm 0,05 V$ , en el cas del exemple.

### **Rang de l'instrument (R)**

Per poder determinar el rang de l'instrument hem d'observar el valor de tensió que s'obté quan no emet llum l'emissor i el valor quan no hi ha filtre i el fotodíode rep tota la

llum. D'aquesta manera es pot determinar el valor mínim i el valor màxim per poder veure els rang d'actuació i inclús, traçar una recta.

### **Sensibilitat de l'instrument (S)**

Per poder determinar la sensibilitat hem de trobar el pendent de la recta característica de l'instrument. Es calcula el pendent a partir de l'equació d'una recta que es forma de la unió de dos, o més punts. Concretament el punt de tensió on hi ha la màxima incidència de llum i el punt de tensió on hi ha la mínima incidència. La equació de la recta és la següent:

$$V_R = V_{R_o} + m(T_{màx} - T_{min}) \quad (3.4)$$

Els valors de la qual es defineixen com:

$V_R$ : El valor màxim de tensió que s'obté a màxima recepció de llum (Rang superior).

$V_{R_o}$ : El valor mínim de tensió que s'obté a mínima recepció de llum (Rang inferior).

$m$ : Correspon al valor del pendent de la recta.

$T_{màx}$ : El valor de la transmitància màxim.

$T_{min}$ : El valor de la transmitància mínim.

Per determinar el pendent aïllem la  $m$  de la equació anterior i es determina:

$$m = \frac{V_R - V_{R_o}}{(T_{màx} - T_{min})} \quad (3.5)$$

El pendent de la recta correspon a la sensibilitat,  $m = S$ , i les unitats que se'n extreuen són V/%.

### **Resolució de l'instrument ( $\Delta T$ )**

Aquesta resolució és determina com el valor més petit que es pot mesurar amb l'instrument. És calcula utilitzant els valors de desviació de voltatge i sensibilitat anteriorment calculats. Es defineix de la forma següent:

$$\Delta T = \frac{\Delta V}{S} \quad (3.6)$$

Per tant, correspon al quocient entre la desviació de voltatge i la sensibilitat. El resultat vindrà donat com a % de transmitància.

La Taula 5 mostra un resum de les unitats:

Paràmetres	Abreviació	Unitats
Desviació de voltatge	$\Delta V$	V
Rang de l'instrument	R	V
Sensibilitat de l'instrument	S	V/%
Resolució de l'instrument	$\Delta T$	%

Taula 5. Resum de les abreviacions i unitats.

En la discussió de cada prova anirem definint tots aquests paràmetres per anar veient si les millores del sistema són representatives o no.

### 3.3 Sistema 2: Influència de les resistències a la sortida

Un cop hem implementat la metodologia dels tests de verificació desenvoluparem les possibles millores. Començarem analitzant la influència de la resistència que hi ha connectada en sèrie amb el fotodíode, per determinar si la variació té alguna afectació directa sobre el resultat.

Analitzant el cas, la intensitat generada pel fotodíode al rebre la radiació lumínica passa pel resistor, i per la llei d'Ohm es pot determinar una tensió en funció de la intensitat. Aparentment amb aquesta relació podem observar que la variació d'aquest resistor pot influir en el valor de tensió mesurat.

L'objectiu principal és aportar la màxima resolució a l'instrument final, per tant, s'ha de trobar un valor de resistència que sigui capaç d'aprofitar el màxim les capacitats del fotodíode, que el faci treballar dins de les corbes d'accionament i que no arribi a saturar-lo. D'aquesta manera comencem a exprimir totes les possibilitats des del inici en tots i cadascun dels elements.

Inicialment, gràcies al full de característiques del fotodíode, hem determinat que amb resistències per sota dels 1,5 k $\Omega$  no aporten una bona solució ja que no el fan treballar en la seva regió correcta. Desestimem l'opció de reduir la resistència.

Amb el test inicial de funcionament que hem fet del sistema es pot veure que la resistència provada aportava una resposta aproximadament lineal, però el valor de tensió de sortida és molt petit. Com que a partir d'aquest valor de resistència se sap que el fotodíode condueix correctament, es pot augmentar el valor de resistència per veure'n la reacció sempre i quan, no s'arribi a un valor de resistència massa elevat que saturi el detector. Farem tests amb diferents resistències per veure'n l'evolució.

Dins del rang hem analitzat diferents valors de resistència. El rang inferior que influeix en la resposta l'hem determinat en el test inicial, amb un valor de resistència de 2,7 k $\Omega$  pero ara realitzarem una bateria de tests per tal de determinar-ne la sensibilitat i altres paràmetres. Posteriorment també farem els test a una resistència més elevada, concretament de 3,9 k $\Omega$  i compararem els resultats.

### 3.3.1 Resultats i discussió de l'assaig del sistema 2

#### 3.3.1.1 Resistència de 2,7 kΩ

Aquesta resistència correspon a la calculada en el test inicial. Farem l'anàlisi més exhaustiu que en el primer test ja que s'ha obtingut una bona sortida i per veure què és el màxim que ens pot oferir. En la *Taula 6*, podem veure els valors de tensió de sortida de cada test i la mitjana calculada de tots respecte els diferents filtres.

Filtres	Test 1 (mV)	Test 2 (mV)	Test 3 (mV)	Test 4 (mV)	Mitjana (mV)
SF	1,60	1,70	1,70	1,60	1,65
F1	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30
F2	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
F3	0,30	0,40	0,40	0,40	0,38
F4	0,20	0,20	0,30	0,20	0,23
F5	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
F6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

**Taula 6.** Valors de tensió de sortida i mitjana de cada test amb R=2,7 kΩ.

Un cop es determinem els valors de tensió de sortida i la mitjana, procedim a calcular les desviacions de tensió de tots els casos per extreure'n el cas crític.

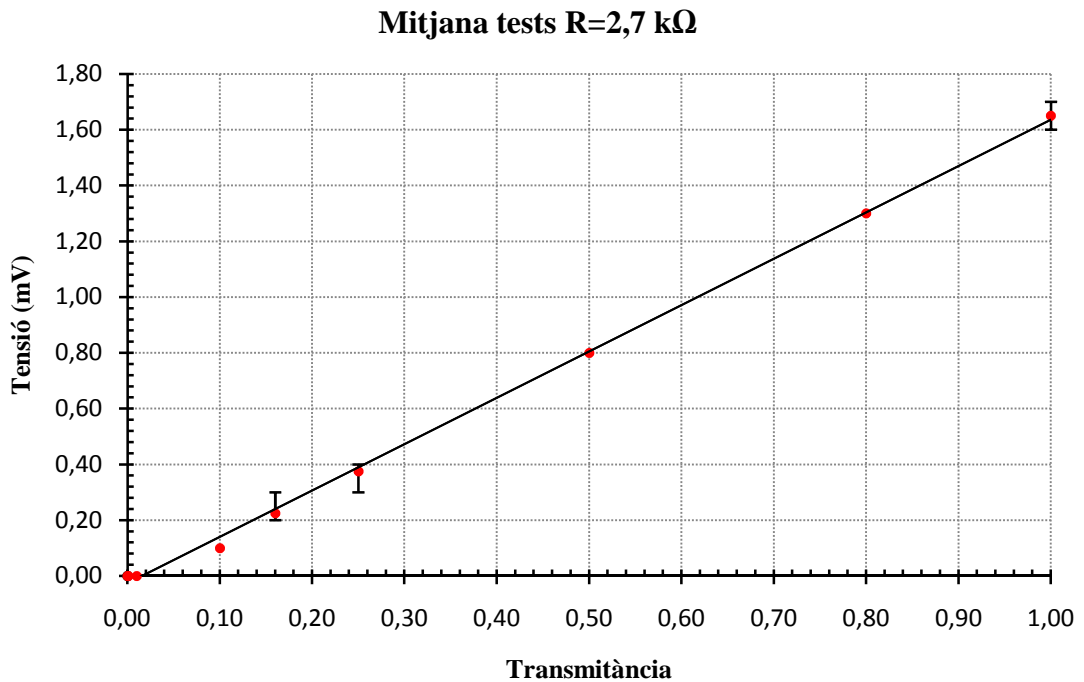
Per a calcular les desviacions superiors i inferiors que apareixen en cada filtre, hem agafat els valors màxims de tensió dels tests, tan els superiors com els inferiors, i els hem restat amb el valor de la mitjana dels 4 tests. Amb aquest càlcul podem determinar les desviacions màximes superiors i inferiors en valor absolut.

Un cop hi ha les desviacions obtingudes de cada filtre, extraurem el valor més elevat per tal de determinar el punt crític que serà determinant pel càlcul de les característiques del sistema. En la *Taula 7* es poden veure els filtres amb les desviacions superiors i inferiors.

Filtres	Mitjana (mV)	Desviació (mV)	
		Superior	Inferior
SF	1,65	0,05	0,05
F1	1,30	0,00	0,00
F2	0,80	0,00	0,00
F3	0,38	0,03	0,08
F4	0,23	0,08	0,03
F5	0,10	0,00	0,00
F6	0,00	0,00	0,00
F7	0,00	0,00	0,00
FO	0,00	0,00	0,00
<b>Cas crític de desviació</b>		0,08	

**Taula 7.** Mitjana, desviacions i cas crític de desviació del sistema 2 amb R=2,7 kΩ .

Per analitzar els resultats, hem realitzat la gràfica de la *Figura 28*, on representem la mitjana de cada punt de tots els tests. Per veure la influència de les desviacions, també hem agregat les línies d'error que simbolitzen les desviacions superiors i inferiors que hem calculat en la *Taula 7*.



**Figura 28.** Mitjana amb les desviacions i tendència lineal del sistema 2 amb R=2,7 kΩ.

A partir de les dades de la gràfica determinem els següents paràmetres:

#### Desviació de voltatge

Es determina que el pitjor cas de desviació del sistema és de 0,08 mV. Pels càlculs posteriors la definirem de  $\pm 0,08 \text{ mV}$ .

#### Rang de l'instrument

Els rangs de valors de tensió que acoten el sistema són:

$$V_R(T_{m\grave{a}x} = 100\%) = 1,65 \text{ mV}$$

$$V_R(T_{min} = 0\%) = 0 \text{ mV}$$

#### Sensibilitat de l'instrument

Per determinar la sensibilitat calcularem l'equació de la recta:

$$V_R = V_{R_0} + m(T_{m\grave{a}x} - T_{min}) \quad (3.7)$$

$$1,65 \text{ mV} = 0 + m(100 - 0) \quad (3.8)$$

S'obté el pendent aïllant la  $m$  de l'equació (3.8), com en l'equació (3.5):

$$m = \frac{1,65 \cdot 10^{-3} - 0}{100 - 0} = 16,5 \cdot 10^{-6} \quad (3.9)$$

$$S = 16,5 \cdot 10^{-6} V/\%$$

### Resolució de l'instrument

Amb els valors extrets de la desviació de voltatge i els de l'equació (3.9) obtenim:

$$\Delta T = \frac{\Delta V}{S} = \frac{0,08 \text{ mV}}{16,5 \cdot 10^{-6} V/\%} \quad (3.10)$$

$$\Delta T = 4,85\% \approx 5\%$$

<b>Resum paràmetres</b>	<b>R=2,7 kΩ</b>
<b>Desviació de voltatge <math>\Delta V</math></b>	$\pm 0,08 \text{ mV}$
<b>Rang de l'instrument R</b>	De 0 a 1,65 mV
<b>Sensibilitat de l'instrument S</b>	$16,5 \cdot 10^{-6} V/\%$
<b>Resolució de l'instrument <math>\Delta T</math></b>	5%

**Taula 8.** Resum dels paràmetres del sistema 2 amb R=2,7 kΩ.

En aquesta primera prova amb el resistor de 2,7 kΩ podem veure un comportament acceptable de la resposta del sistema. En aquest cas, tenim més informació que el primer experiment realitzat. Per la *Taula 7* extraïem la informació d'un rang de diferents tests amb condicions diverses que ens ajuden a veure que el comportament de l'instrument es manté bastant estable en condicions reals d'ús.

Si analitzen els resultats d'un sol test apareixen unes desviacions molt elevades. Això és degut a que qualsevol inclemència exterior afecta en el moment de la mesura. Per evitar aquestes desviacions es fa la mitjana de tots els tests i aquest error disminueix. El fet que siguin tant elevades pot ser perquè la tensió de sortida és tant petita, que qualsevol fluctuació altera molt la sortida tenint un sistema poc estable. Per altra banda amb els filtres que tenen una absorbència elevada no es capta tensió i el valor de sortida és zero reduint el camp d'actuació de l'instrument.

Pel que fa la representació dels valors mitjos de la gràfica de la *Figura 28*, veiem que si els uníssim amb una trajectòria lineal, tindria una bona aproximació ja que la mitjana dels punts no difereix en excés. Tot i això, les desviacions de tensió en alguns punts són elevades fet que pot influir molt en el moment de calcular l'absorbència.

En la mateixa gràfica, podem veure que els errors més elevats es concentren en els valors de tensió obtinguts en el F3 i F4 corresponents a valors de transmitància entre el 16 i 25 %, i per valors elevats de transmitància del 80 %. Això ens indica que l'instrument té

poca resolució quan hi ha poc pas de llum, i quan n'hi ha molt, respectant els valors intermedis tot i que també presenten fluctuacions.

Aquestes desviacions de tensió, probablement influiran en una incertesa elevada en el cas que hi haguessin concentracions petites i elevades, reduint el camp d'actuació de l'instrument.

Per englobar tots els errors trobats, determinarem com el cas crític de tot el sistema el valor de desviació màxima de tensió que és de  $\pm 0,08$  V, definint-la pel càlcul dels paràmetres.

En el moment de calcular els paràmetres hem vist que aquesta desviació crítica ha influït molt. Tot i que aquesta desviació pot semblar petita, si la comparem amb el rang de l'instrument que estem treballant, fa que sigui molt elevat influint directament en la resolució que la posiciona gairebé en el 5%. Aquest valor és massa elevat, doncs s'ha de treballar en millorar-lo.

### 3.3.1.2 Resistència de 3,9 k $\Omega$

Un cop avaluat el resistor del primer test introduïm un altre amb un valor de resistència més elevat. Per veure si aporta millores significatives al sistema anterior. Un cop realitzats els tests, en la *Taula 9* podem veure els valors de tensió de sortida de cada test i el càlcul de la mitjana de tots respecte els diferents filtres.

<b>Filtres</b>	<b>Test 1 (mV)</b>	<b>Test 2 (mV)</b>	<b>Test 3 (mV)</b>	<b>Test 4 (mV)</b>	<b>Mitjana (mV)</b>
<b>SF</b>	24,90	24,60	24,80	24,60	24,73
<b>F1</b>	20,10	19,70	19,80	19,80	19,85
<b>F2</b>	12,60	12,30	12,50	12,40	12,45
<b>F3</b>	6,30	6,20	6,20	6,20	6,23
<b>F4</b>	4,20	4,10	4,20	4,10	4,15
<b>F5</b>	2,50	2,40	2,40	2,40	2,43
<b>F6</b>	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
<b>F7</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>FO</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

**Taula 9.** Valors de tensió de sortida i mitjana de cada test del sistema 2 amb R=3,9 k $\Omega$ .

Calcularem les desviacions superiors i inferiors de cada test restant els valors màxims, tan superiors com inferiors, de la mitjana igual que en el cas anterior. Les veurem representades a la *Taula 10*.

Amb les desviacions de tensió calculades en podem extreure el cas més elevat definint-lo com el cas crític de tot el sistema.

Filtres	Mitjana (mV)	Desviació (mV)	
		Superior	Inferior
SF	24,73	0,17	0,13
F1	19,85	0,25	0,15
F2	12,45	0,15	0,15
F3	6,23	0,08	0,02
F4	4,15	0,05	0,05
F5	2,43	0,07	0,03
F6	0,30	0,00	0,00
F7	0,00	0,00	0,00
FO	0,00	0,00	0,00
<b>Cas crític de desviació</b>		0,25	

Taula 10. Mitjana, desviacions i cas crític de desviació del sistema 2 amb R=3,9 k $\Omega$ .

Amb els resultats del test representats a les taules anteriors, hem realitzat una representació, en la *Figura 29*, de la mitjana de cada test amb unes barres d'error que representen les desviacions de tensió que hi ha en cada punt.

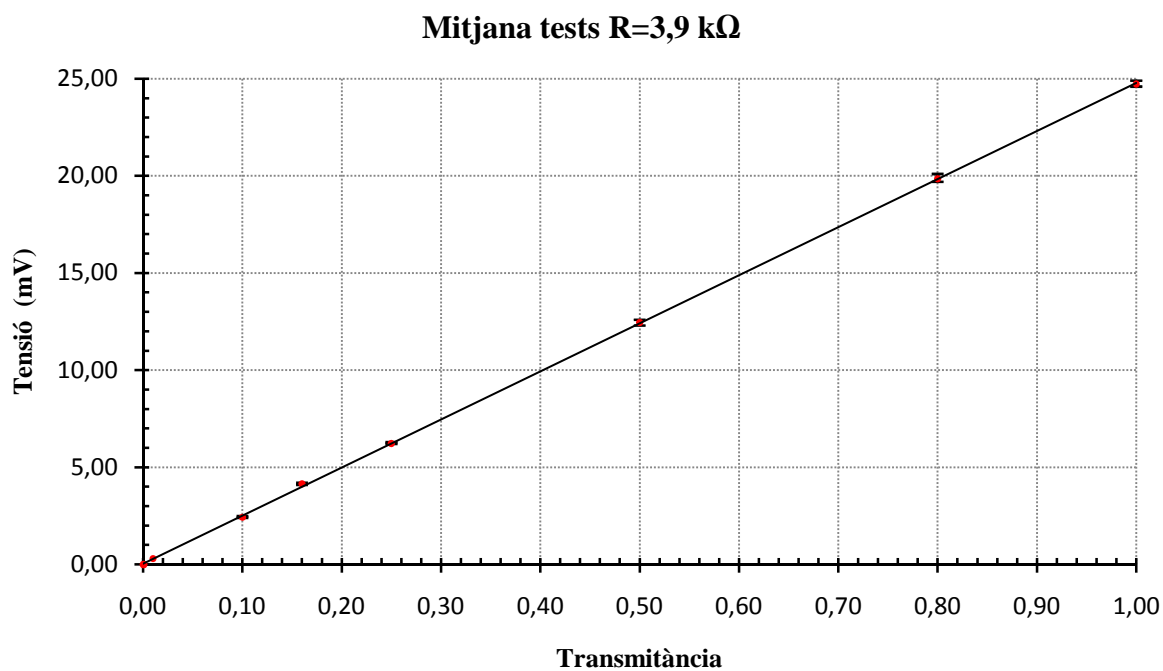


Figura 29. Mitjana amb les desviacions i tendència lineal del sistema 2 amb R=3,9 k $\Omega$ .

A partir de les dades de la gràfica, calcularem els paràmetres:

#### Desviació de voltatge

Es determina que el pitjor cas de desviació del sistema és de 0,25 mV, aproximadament 0,3 mV. Es definirà una tolerància de  $\pm 0,3$  mV en els càlculs posteriors.

### Rang de l'instrument

Els rangs de valors que acoten el sistema són:

$$V_R(T_{m\grave{a}x} = 100\%) = 24,73 \text{ mV}$$

$$V_R(T_{min} = 0\%) = 0 \text{ mV}$$

### Sensibilitat de l'instrument

Per determinar la sensibilitat es calcula a partir de l'equació (3.5) de la recta:

$$\begin{aligned} V_R &= V_{R_0} + m(T_{m\grave{a}x} - T_{min}) \\ 24,73 \text{ mV} &= 0 + m(100 - 0) \end{aligned} \quad (3.11)$$

S'obté el pendent aïllant la m de l'equació (3.11):

$$\begin{aligned} m &= \frac{24,73 \cdot 10^{-3} - 0}{100 - 0} = 2,47 \cdot 10^{-4} \\ S &= 2,47 \cdot 10^{-4} \text{ V/\%} \end{aligned} \quad (3.12)$$

### Resolució de l'instrument

Amb els valors obtinguts de la desviació i els calculats de la sensibilitat s'obté:

$$\begin{aligned} \Delta T &= \frac{\Delta V}{S} = \frac{0,3 \text{ mV}}{2,47 \cdot 10^{-4} \text{ V/\%}} \\ \Delta T &= 1,21\% \end{aligned} \quad (3.13)$$

<b>Resum paràmetres</b>	<b>R=3,9 kΩ</b>
<b>Desviació de voltatge ΔV</b>	±0,3 mV
<b>Rang de l'instrument R</b>	De 0 a 24,73 mV
<b>Sensibilitat de l'instrument S</b>	2,47 · 10 <sup>-4</sup> V/%
<b>Resolució de l'instrument ΔT</b>	1,21%

**Taula 11.** Resum dels paràmetres del sistema 2 amb R=3,9 kΩ.

En aquesta prova, el nou resistor amb un valor de 3,9 kΩ, hem observat que la linealitat no s'ha alterat i que inclús ha millorat sobretot en els extrems de transmitància petita i gran, tal i com es veu en la gràfica de la *Figura 29*.

Tot i que encara apareixen error de linealitat, s'han vist disminuïts amb aquesta millora. La mitjana de tots els punts queda més acotada fent que s'obtingui una resposta més pròxima a la representació lineal introduïda a la gràfica.

Pel que fa les desviacions s'han vist disminuïdes sobretot en els punts que en la prova anterior eren crítics. Ara podem veure que les desviacions màximes es mouen entre  $\pm 0,3$  mV, localitzades en nivells de transmitància elevats. A transmitàncies mitges, entre 50 i el 10 %, obtenim uns valors de desviació acceptables, tot i que ens guiarem amb el pic màxim.

Pel que fa les característiques de l'instrument podem veure que la desviació de voltatge ha augmentat considerablement respecte l'altre test, però també ha augmentat el rang gairebé fins els 25 mV, fet que fa que la resolució de l'instrument millori fins al 1,21%. Tot i que la desviació s'ha extret del pitjor cas, el sistema ens ofereix un valor que ja s'aproxima al que s'està buscant per a un instrument de mesura d'aquest tipus.

### 3.3.1.3 Discussió dels resultats dels assaigs

Com a conclusió d'aquesta primera prova, podem determinar que augmentar la resistència, fins a cert punt per no saturar el sistema, ens aporta una millora substancial ja que redueix les fluctuacions i augmenta el rang de tensió de sortida, el qual dona marge a una millor resolució. En vista dels resultats, definirem com a valor adequat el de 3,9 k $\Omega$  com a resistor del sistema i seguirem introduint millores en la línia d'engrandir el rang i reduir les desviacions de tensió, ja que influeix directament amb la sensibilitat.

## 3.4 Sistema 3: Amplificació del senyal de sortida

Un com hem analitzat les millores dels elements passius del sensor, és el moment de tractar el senyal aportat pel sensor i amplificant-lo de manera que ens pugui donar un rang més gran i amb menys desviacions per així obtenir una millor precisió. Ara, en aquest nou plantejament definirem un diagrama de blocs com el següent:



**Figura 30.** Diagrama de blocs del sistema 3.

Les parts que defineixen aquest bloc són les descrites anteriorment en la *Figura 19*, introduint un nou bloc abans del voltímetre. Aquest bloc es defineix com:

- **Amplificació:** Serà el procediment d'amplificar l'amplitud del senyal obtingut del sensor.

Per a realitzar aquesta amplificació del senyal de sortida del sensor utilitzarem un amplificador operacional que és un dispositiu electrònic (normalment en forma de circuit integrat) que té dues entrades i una sortida. La sortida és la diferència de les dues entrades multiplicada per un factor A anomenat guany, virtualment (o idealment) infinit.

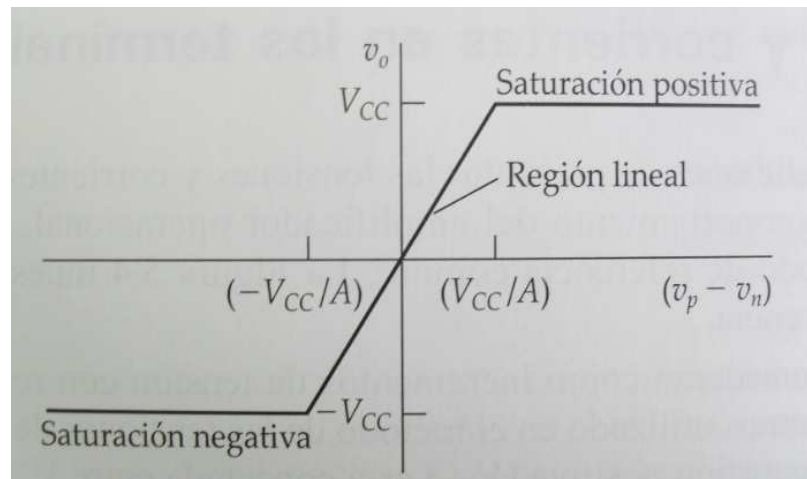
Utilitzarem aquest tipus de dispositiu per varies raons. En primer lloc el podem utilitzar com a un bloc dins d'un circuit més complex de manera que el podem considerar com una caixa negra amb els terminals d'entrada i sortida. En segon lloc, podem combinar l'amplificador operacional amb resistències per tal de que l'amplificador treballi en zona lineal i poder realitzar operacions varies molt útils, com per exemple canvis d'escala, sumes, restes, canvis de signe i comparacions. Finalment, si introduïm bobines i condensadors el sistema es pot utilitzar per dissenyar circuits integradors i diferenciadors.

### 3.4.1 Estudi previ d'un amplificador operacional

Un amplificador operacional és molt versàtil i pot tenir moltes aplicacions. Pot tenir aplicacions lineals com per exemple fonts de corrent controlades per tensió (inversora, no inversora, Howland), fonts de tensió controlades per corrent, conversió digital/analògic, amplificadors de corrent i amplificador d'instrumentació. Per altra banda un amplificador operacional també pot tenir aplicacions no lineals com comparadors, comparadors per histèresi, rectificadors, detectors de pic, entre d'altres.

En el moment d'amplificar el senyal hem de triar quina és la millor combinació que necessita per tal de definir l'estructura. En un moment inicial deixarem de banda amplificadors operacionals que treballen en zona no lineal, més endavant ja hi treballarem. En el moment que ens ocupa, necessitem que l'amplificador operacional treballi en zona lineal.

El comportament en els terminals de l'amplificador operacional com a element de circuit lineal està caracteritzat per una sèrie de restriccions relatives a les tensions i als corrents de l'entrada. La restricció de la tensió es dedueix de la característica de transferència de tensió que descriu com varia la tensió de sortida en funció de les tensions d'entrada,  $V_p - V_n$ . Aquesta transferència de la tensió d'un amplificador operacional es pot veure representada en la *Figura 31*.



**Figura 31.** Corba característica d'un amplificador operacional

El amplificador operacional mostra tres regions diferents d'operació. Quan la magnitud de la diferència de tensió d'entrada ( $|V_p - V_n|$ ) és petita, l'amplificador operacional es comporta com a un dispositiu lineal ja que la tensió de sortida és una funció lineal de les tensions d'entrada. Fora d'aquesta regió lineal, és a dir, per a valors superiors a  $+V_{cc}$  o  $-V_{cc}$  la sortida del amplificador operacional es satura i l'amplificador operacional es comporta com a un dispositiu no lineal.

Per a obtenir l'amplificació del senyal de sortida del detector, cal que l'amplificador operacional funcioni en règim lineal, és a dir: la tensió de sortida ha de ser proporcional a la tensió d'entrada.

En els càlculs considerarem que tenim un amplificador operacional ideal, és a dir, amb un guany idealment infinit. Amb aquestes premisses podem determinar un curtcircuit virtual on les restriccions de tensió són:

$$V_p = V_n \quad (3.14)$$

i les restriccions de corrent són:

$$i_p = i_n = 0 \quad (3.15)$$

Un cop hem analitzat el comportament de l'amplificador operacional, treballant en regió lineal, hem de trobar la relació de guany per tal d'amplificar la sortida de la manera que volem. Aquest factor és fruit d'una combinació de resistències, on podem obtenir un guany concret per tal de tenir un canvi d'escala mantenint la linealitat.

Aquestes combinacions de resistències no es realitzen de forma aleatòria, hem d'analitzar quin tipus d'estructura amplificadora anirà millor en el sistema, i calcular els valors de les resistències que necessitarem per poder obtenir un bon guany i definir-lo segons ens interessi.

Hi ha diferents tipus d'estructures amplificadores que podem realitzar. Entre les més comunes hi ha:

- Circuit amplificador inversor
- Circuit amplificador sumador
- Circuit amplificador no inversor
- Circuit amplificador diferencial

En un instant inicial hi ha combinacions d'estructures amplificadores que ja no cal que implementem degut a que no estan enfocades en l'ús que volem, com per exemple el circuit amplificador sumador. Aquest circuit ens aporta una tensió de sortida que és la suma canviada d'escala i de signe de les tensions aplicades a la entrada del amplificador.

L'altre estructura que desestimem és el circuit amplificador diferencial. Aquesta configuració dona una tensió de sortida proporcional a la diferència existent entre les dues tensions que hi ha als terminals d'entrada. No ens aporta la solució que es vol per amplificar el senyal, tot i que pot ser una bona opció per a condicionar un senyal.

Finalment ens queden dues estructures amplificadores de senyal que són el circuit inversor i el no inversor que aporten una solució al problema plantejat. Després de realitzar diferents comprovacions hem vist que l'estructura inversora en el nostre cas no ens aporta una solució òptima ja que requeriria tractaments posteriors. Per aquesta raó definim que la millor opció és una estructura del circuit amplificador no inversor.

### 3.4.2 Càlcul del circuit amplificador del sistema

Per tal de poder configurar l'estructura no inversora de forma física hem de determinar els valors de les resistències per poder aconseguir un guany determinat.

En un instant inicial es defineix aquesta configuració:

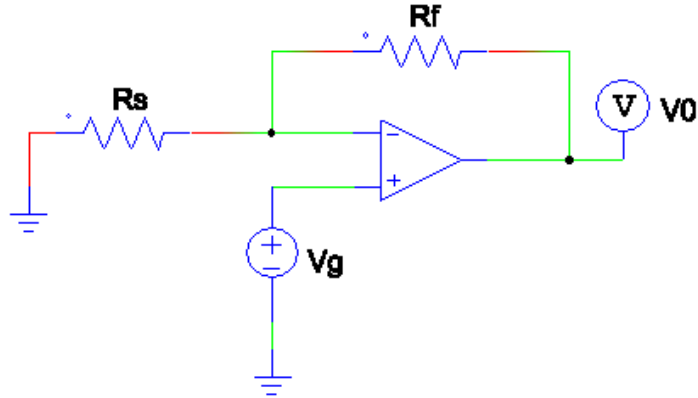


Figura 32. Configuració no inversora del sistema amplificador.

El sistema conta amb un amplificador operacional, connectat en configuració no inversora. També compta amb dos resistors ( $R_s$  i  $R_f$ ), la combinació dels quals, defineix el guany. Un dels dos resistors, el  $R_f$ , realitza la realimentació negativa entre la sortida i la entrada inversora de l'amplificador operacional. Per l'entrada no inversora s'introdueix el senyal provinent del sensor.

En els càlculs es considerarà que es té un amplificador operacional ideal. Amb un curtcircuit virtual on les restriccions de tensió són les de l'equació (3.14), i les restriccions de corrent són les de l'equació (3.15).

Determinem l'equació d'una estructura no inversora com:

$$\left(1 + \frac{R_f}{R_s}\right) V_g = V_0 \quad (3.16)$$

Volem definir un guany aproximadament de  $A=100$ , i per aconseguir-ho fixem un valor de resistència coneguda de  $R_s = 10 \text{ k}\Omega$ . Es defineix aquest valor perquè és estàndard, i obtenim:

$$\left(1 + \frac{R_f}{10 \text{ k}}\right) = \frac{V_0}{V_g} = 100 \quad (3.17)$$

Aïllant el valor de  $R_f$  de l'equació (3.17), determinem que el valor del resistor és:

$$R_f = 990 \text{ k}\Omega$$

Per aconseguir aquest valor faria falta l'ús de varis resistors junt amb un potenciómetre. Per tal d'intentar reduir el nombre de components proposem utilitzar un resistor amb un valor de  $1 \text{ M}\Omega$ , és més elevat però pot funcionar.

En aquest cas el guany seria:

$$\frac{V_0}{V_g} = A = \left(1 + \frac{1M\Omega}{10k}\right) = 101 \quad (3.18)$$

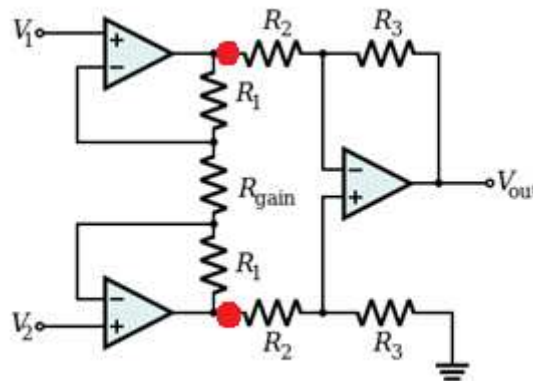
Tenint en compte les toleràncies dels resistors ens donarà un guany molt aproximat al que necessitem. Un cop analitzat fem el muntatge en una placa de proves amb resistors THT<sup>4</sup> per fer les proves d'influència sobre el sensor.

### 3.4.3 Plantejament amb un amplificador d'instrumentació

Un amplificador d'instrumentació és un dispositiu creat a partir d'amplificadors operacionals. La funció principal és oferir una tensió de sortida,  $V_0$ , proporcional a la diferència de voltatges de l'entrada ( $V_1$  i  $V_2$ ).

Les característiques principals d'aquest amplificador és que presenta una alta impedància d'entrada. També té un gran rebuig al node comú, la tensió de sortida no depèn del node comú (que pot tenir tensions paràsites), solament depèn de la diferència de les tensions d'entrada. Finalment el guany de voltatge des de l'entrada diferencial a la sortida es pot aconseguir de manera molt precisa i estable, tot i estar en entorns hostils, a través de modificar el valor d'una resistència.

Està format per dues etapes. L'etapa pre-amplificadora, representada a l'esquerra dels punts vermells de la *Figura 33* i a la dreta l'etapa diferencial. Aquesta configuració dona una tensió de sortida proporcional a la diferència existent entre les dues tensions que hi ha als terminals d'entrada.



**Figura 33.** Circuit esquemàtic d'un amplificador operacional de instrumentació.

Aquest tipus d'amplificador instrumental s'utilitza en sistemes de mesura que el senyal que es vol mesurar és molt feble i a vegades ho és més inclús que el soroll extern. Aquest és capaç de distingir entre la tensió d'entrada (la que es mesura) i la tensió provinent dels sorolls i que simplement amplifiqui la que es vol mesurar. Es pot utilitzar en aplicacions mèdiques o en altres tipus d'instruments de mesura. En el nostre cas en particular, aparentment no tenim aquest problema així que per a fer l'amplificació de la

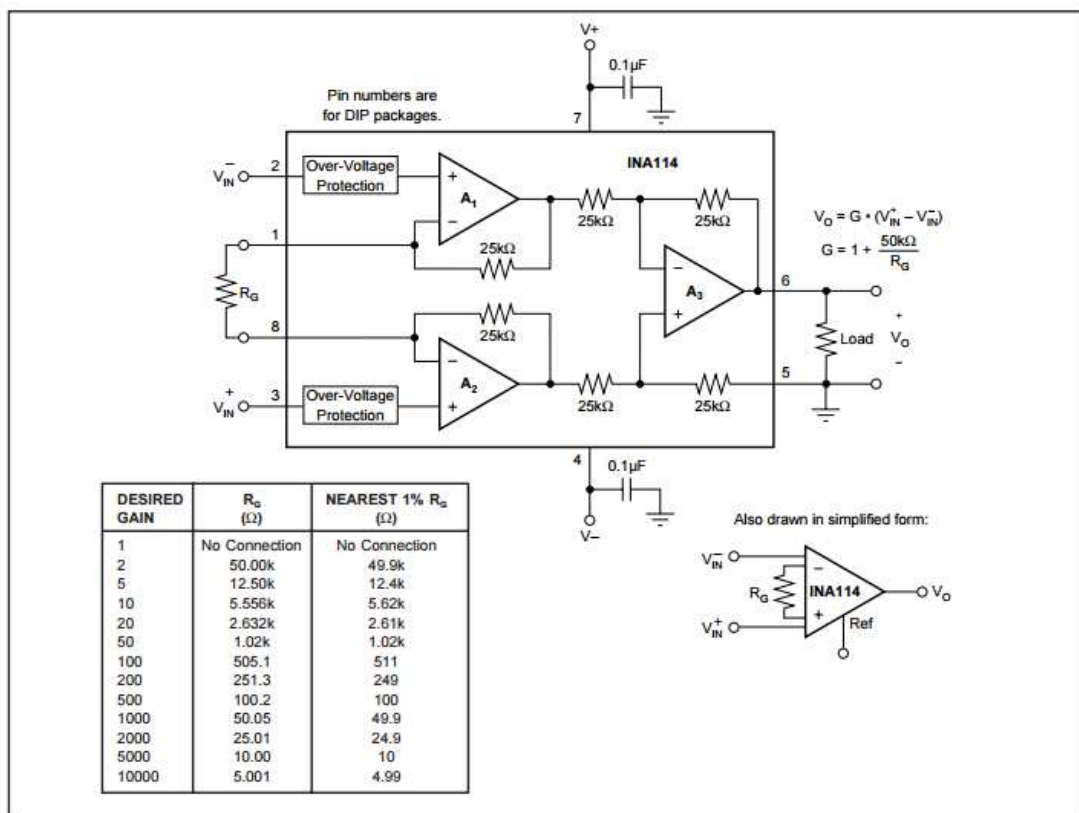
<sup>4</sup> Tecnologia d'orificis passants, més coneguda per les sigles en anglès **THT** (*Through-Hole Technology*).

tensió de sortida utilitzarem un únic amplificador operacional, per la seva facilitat. En els experiments es comprovarà si funciona.

En el cas que no fos el més adient ja buscaríem la solució amb un amplificador d'instrumentació. Aquest procediment seria més costós ja que un amplificador d'aquest tipus té una entrada diferencial, és a dir  $V_1$  i  $V_2$ , tal i com podem veure en la *Figura 33*. Això vol dir que per aplicar-ho al nostre sistema necessitaríem introduir per  $V_1$  el valor de tensió, del resistor, a la sortida del fotodíode, i a  $V_2$  hauríem d'introduir una tensió de referència que calcularíem a partir d'un divisor de tensió. Aquesta referència ha de ser estable. Amb la diferència de  $V_1$  i  $V_2$  obtindriem el valor diferencial que es busca i amplificaríem segons el guany que volguéssim.

Aquest amplificador d'instrumentació es pot dissenyar de dues maneres, a partir de variis dispositius electrònics com serien tres amplificadors operacionals i resistors, o es pot obtenir amb un circuit integrat que ja té tots els elements. En el cas que es volgués implementar s'optaria per un amplificador d'instrumentació integrat comercial com seria el INA114. Aquest dispositiu tan sols s'han d'introduir les dues tensions diferencials per cada pin d'entrada i obtenim la sortida amplificada per un altre pin. Per realitzar el guany ho fem a partir d'un resistor  $R_g$  amb el valor corresponent segons l'amplificació desitjada.

Per poder saber el valor de  $R_g$  necessari per a obtenir un guany concret es pot fer de diverses maneres. La manera més fàcil és analitzar el que ens diu el full de característiques del dispositiu. En la *Figura 34* tenim una secció del full de característiques de Texas instrument del INA114 on es pot veure tota la informació necessària per definir aquest guany.



**Figura 34.** Full de característiques INA114.

Tenim la funció que defineix el guany, i una taula que ens relaciona el guany amb valors de  $R_g$  calculats. Simplement és elegir la  $R_g$  segons el guany que vulguem, i introduir la resistència trobada, tal i com defineix el dibuix.

Una altre forma de calcular el guany és de forma analítica. Podem dividir el circuit en tres zones, una per a cada amplificador que conforma el amplificador d'instrumentació, i aplicar-li superposició, considerant que els amplificadors operacionals són ideals.

Després de fer els càlculs obtindríem les següents tensions d'entrada:

$$v_1 = \left(1 + \frac{25 \text{ k}\Omega}{R_g}\right) V_{IN}^- - \frac{25 \text{ k}\Omega}{R_g} V_{IN}^+ \quad (3.19)$$

$$v_2 = \left(1 + \frac{25 \text{ k}\Omega}{R_g}\right) V_{IN}^+ - \frac{25 \text{ k}\Omega}{R_g} V_{IN}^- \quad (3.20)$$

Substituïm  $v_1$  i  $v_2$  a l'equació amb  $v_o$  i obtenim:

$$v_o = v_2 - v_1 \quad (3.21)$$

$$v_o = (v_2 - v_1) \left(1 + \frac{2 \times 25 \text{ k}\Omega}{R_g}\right) \quad (3.22)$$

On la tensió diferencial i el guany estaria definit per:

$$v_d = (v_2 - v_1) \quad (3.23)$$

$$G = \left(1 + \frac{50 \text{ k}\Omega}{R_g}\right) \quad (3.24)$$

A partir d'això ja podem calcular el valor de  $R_g$  per obtenir el guany que es vulgui. Per exemple per obtenir un guany de 10 i de 100, obtenim un valor de  $R_g$  de 5,56 k $\Omega$  i de 505,1  $\Omega$  respectivament. Amb aquest anàlisi, apart d'obtenir el valor de  $R_g$  concret, també hem comprovat que és equivalent al que ens ofereix el full de característiques, fent que els dos mètodes siguin vàlids.

Un dels objectius que ens marcàrem en el desenvolupament d'aquest nou sistema, és obtenir una mesura equiparable a un instrument professional amb elements de baix cost, i aquest dispositiu representa un cost bastant elevat. Tot i això hem valorat els pros i els contres i finalment hem determinat que pel sistema que volem realitzar amb la resolució que estem buscant estaríem utilitzant un dispositiu per sota de les seves possibilitats, malgastant recursos que podrien anar bé per altres elements.

Per tant, abans d'utilitzar un dispositiu amb tantes bones prestacions, volem esgotar totes les possibilitats amb l'ús d'un amplificador operacional normal per poder determinar fins a quin punt podem realitzar un instrument de mesura amb dispositius més senzills, per

si es poden equiparar en altres instruments. Malgrat la nostra decisió, hem volgut presentar que també és possible l'ús d'aquest amplificador d'instrumentació. Reservarem el procediment per incloure'l en prototips posteriors si s'escau.

### 3.4.4 Experiments amb amplificadors operacionals

Un cop hem definit l'estructura del circuit amplificador que necessitem i hem analitzat les diferents opcions que tenim, realitzarem experiments amb l'amplificador real per veure el comportament amb sensor.

#### Amplificador operacional UA741

Comencem elegint pel experiment, un operacional comú i molt barat, el UA741. Es fa un experiment inicial per veure si realment es pot desestimar l'opció d'introduir un amplificador operacional d'instrumentació com el del apartat anterior, de manera que per senzill que sigui l'operacional si actua correctament ja podem tirar per aquest camí i descartar l'altre.

Per a fer l'experiment utilitzarem la mateixa pauta de test utilitzada anteriorment, per poder veure la influència al sistema del component, per valorar si és beneficiosa o no i sobretot quantificar-ho amb valors concrets. En un instant inicial pot semblar agosarat utilitzar un operacional com aquest però s'ha de comprovar ja que si funciona i tenim uns resultats de precisió emmarcats dins del rang que estem buscant pot ser una bona opció.

Inicialment tenim l'amplificador operacional connectat en una placa de proves on està alimentat amb una font que aporta un tensió simètrica de  $\pm 5$  V, amb la combinació de resistències anteriorment calculades. Un cop hem estabilitzat el sistema comencem a prendre valors de la tensió de sortida.

En la *Taula 12*, podem veure els valors de tensió de sortida amplificada obtinguda de cada test i la mitjana de tots respecte els diferents filtres.

Filtres	Test 1 (V)	Test 2 (V)	Test 3 (V)	Test 4 (V)	Mitjana (V)
<b>SF</b>	2,39	2,40	2,40	2,36	2,39
<b>F1</b>	1,93	1,92	1,93	1,90	1,92
<b>F2</b>	1,22	1,22	1,22	1,20	1,22
<b>F3</b>	0,62	0,61	0,61	0,61	0,61
<b>F4</b>	0,40	0,41	0,42	0,41	0,41
<b>F5</b>	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
<b>F6</b>	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
<b>F7</b>	0,03	0,02	0,03	0,02	0,03
<b>FO</b>	0,04	0,02	0,03	0,03	0,03

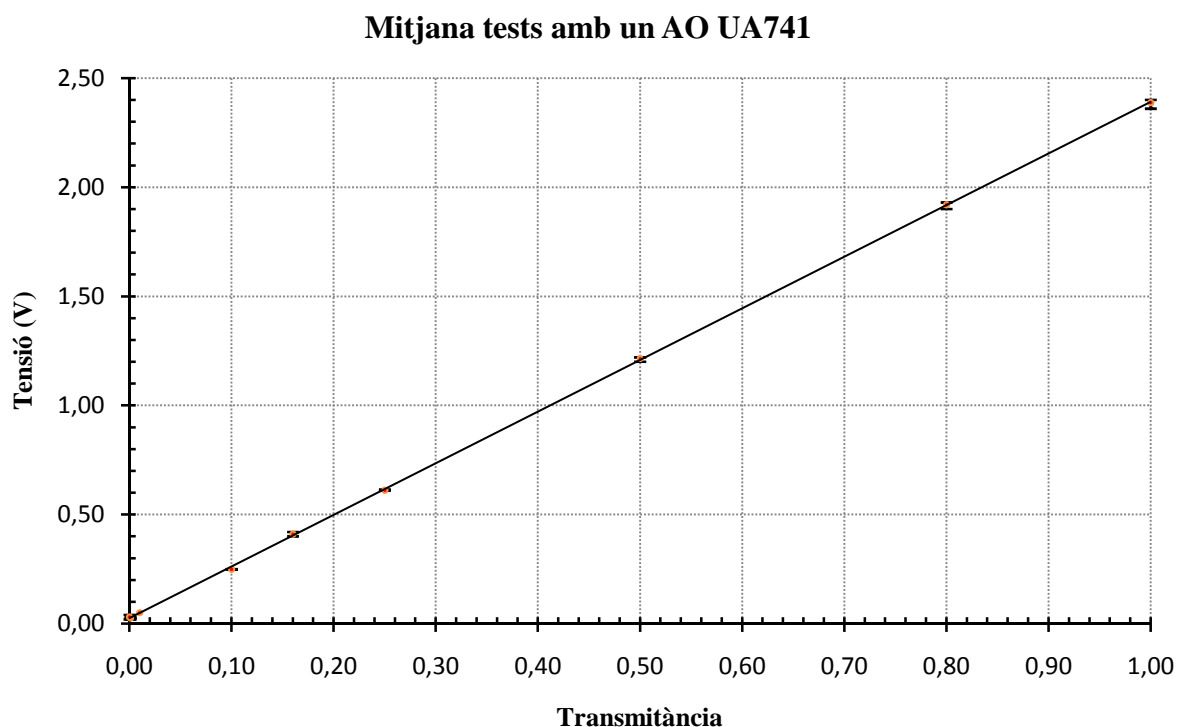
**Taula 12.** Valors de tensió de sortida i mitjana de cada test del sistema 3 amb AO UA741.

De la mateixa manera que en els casos anteriors, un cop calculats els valors de les mitjanes de tensió de sortida, procedim a calcular les desviacions màximes, tan superiors com inferiors, de tots els casos. A la *Taula 13*, veurem tots els valors i n'extraurem el cas més crític per a realitzar els càlculs.

Filtres	Mitjana (V)	Desviació (V)	
		Superior	Inferior
SF	2,39	0,01	0,03
F1	1,92	0,01	0,02
F2	1,22	0,00	0,02
F3	0,61	0,00	0,00
F4	0,41	0,01	0,01
F5	0,25	0,00	0,00
F6	0,05	0,00	0,00
F7	0,03	0,01	0,01
FO	0,03	0,01	0,01
<b>Cas crític de desviació</b>		0,03	

**Taula 13.** Mitjana, desviacions i cas crític de desviació del sistema 3 amb l'AO UA741.

Per poder veure una representació gràfica de la mitjana dels diferents tests amb el operacional, presentem la gràfica de la *Figura 35*, que ens dona una representació esquemàtica per veure a simple vista els resultats de cada test, comparats amb una representació de la tendència lineal, i les línies d'error que simbolitzen les desviacions de tensió en cada punt.



**Figura 35.** Mitjana amb les desviacions i tendència lineal del sistema 3 amb un AO UA741.

Amb els valors obtinguts de la gràfica, calcularem els paràmetres:

### Desviació de voltatge

Podem determinar que el pitjor cas de desviació del sistema és de 0,03 V. Definirem que la desviació serà de  $\pm 0,03V$ , pels càlculs posteriors.

### Rang de l'instrument

Els rangs de valors de tensió que acoten el sistema són:

$$V_R(T_{m\grave{a}x} = 100\%) = 2,39 \text{ V}$$

$$V_R(T_{min} = 0\%) = 0,029 \text{ V}$$

### Sensibilitat del instrument

Per determinar la sensibilitat es calcula l'equació de la recta:

$$V_R = V_{R_0} + m(T_{m\grave{a}x} - T_{min}) \quad (3.25)$$

$$2,39 = 0,029 + m(100 - 0)$$

S'obté el pendent aïllant la m de l'equació anterior:

$$m = \frac{2,39 - 0,029}{100 - 0,029} = 23,62 \cdot 10^{-3} \quad (3.26)$$

$$S = 23,62 \cdot 10^{-3} V/\%$$

### Resolució de l'instrument

Amb els valors calculats s'obté:

$$\Delta T = \frac{\Delta V}{S} = \frac{0,03 \text{ V}}{23,62 \cdot 10^{-3} V/\%} \quad (3.27)$$

$$\Delta T = 1,27\%$$

<b>Resum paràmetres</b>	<b>AO UA741</b>
<b>Desviació de voltatge <math>\Delta V</math></b>	$\pm 0,03 \text{ V}$
<b>Rang de l'instrument <b>R</b></b>	De 0,029 a 2,39 mV
<b>Sensibilitat de l'instrument <b>S</b></b>	$2,473 \cdot 10^{-4} V/\%$
<b>Resolució de l'instrument <math>\Delta T</math></b>	1,27%

**Taula 14.** Resum dels paràmetres del sistema 3 amb un AO UA741.

En aquest assaig s'ha involucrat un amplificador operacional que forma part d'una estructura formada per un conjunt de resistències amb l'objectiu d'amplificar un senyal provinent del sensor. Recordem que aquest senyal prové de la resistència anteriorment avaluada amb un valor de 3,9 k $\Omega$ . L'objectiu principal és mantenir o millorar la precisió que es tenia.

Inicialment pel resultats obtinguts en les *Taules 12 i 13* es pot veure que la variable de tensió de sortida ha estat amplificada, a més a més, pròxim al guany calculat. En el test amb les resistències es tenia una tensió de sortida a una  $T = 100\%$  de 24,60 mV, i en el test de l'amplificador operacional aquesta tensió de sortida és de 2,36 V, donant un guany de 96, pròxim al calculat de 100 i que es manté pràcticament inalterable en tots els filtres.

Amb aquesta comprovació queda ben definida l'estructura de resistències fent innecessària la introducció d'un potenciòmetre per corregir el guany.

Un altre millora ha estat que al augmentar la tensió de sortida ha augmentat el rang i en detriment han disminuït les desviacions de tensió, tal i com es pot veure en la *Figura 35*, on les línies d'error es tornen molt petites en comparació amb el conjunt. Això propícia que en valors de transmitància pròxims a 0, el sistema ara és capaç d'obtenir una resposta en tensió. Aquest fet genera una linealitat més bona i una caracterització més precisa del conjunt, ja que hi ha sensibilitat en transmitàncies baixes, i es manté en les mitges com en el cas anterior.

Amb aquesta primera prova hem vist que els resultats obtinguts en l'experiment amb un amplificador operacional són millors que els esperats i hem pogut determinar que el camí de millora va per aquí. Aquest nou plantejament ens fa desestimar, de moment, l'ús d'un amplificador operacional d'instrumentació.

Tot i la bona reacció, estar clar que el UA741 no és una bona opció degut a que les desviacions encara són elevades i sobretot que té mancances físiques pel nostre sistema com per exemple que necessita una alimentació que sigui simètrica, un problema important per a un prototip a piles. Seguirem buscant altres opcions dins de la família.

### Tria d'altres models d'amplificadors operacionals

A partir dels resultats anteriors hem d'intentar buscar un amplificador que millori les condicions al anterior per reduir la desviació que pugui produir el propi element i comprovar si es pot millorar la precisió final del prototip.

En el mercat hi ha multitud d'amplificadors operacionals tots ells vàlids amb molts encapsulats, infinitat d'opcions, qualitats, fabricants... A l'hora de buscar un amplificador operacional, i en general qualsevol dispositiu electrònic, s'ha de buscar segons el que es necessita. Sempre hi ha un dispositiu amb unes prestacions molt bones, però si el sistema al que el vols introduir no les té no cal invertir diners en aquest dispositius.

En el cas del nostre sistema volem acotar fins a on és capaç d'arribar, parlant de precisió, tanmateix l'amplificador operacional que busquem ha d'intentar complir una sèrie de requisits mínims aprofitant el màxim les prestacions que ens aporta.

Per a caracteritzar l'amplificador operacional que necessita el sistema definirem necessitats preferents per així tenir uns referents a mode de sedàs per a fer una tria més acurada.

Necessitats principals del nostre amplificador operacional:

- **Alimentació rail-to-rail:** El sistema necessita una tensió d'alimentació en continua amb uns màxims determinats, però ja que busquem un nou amplificador operacional, estaria bé que es pugues utilitzar una tensió no simètrica, és a dir, *rail-to-rail*. D'aquesta manera el podríem alimentar igual que el LED i el fotodíode, i no seria necessari ni fonts, ni circuits externs per la inversió de tensió per alimentar simètricament a  $\pm 5$  V com en el cas del UA741.
- **Low noise:** La característica "low noise", baix soroll, va inclosa dins del full de característiques del dispositiu i es pot definir com el valor mínim que és capaç d'amplificar. Pel sistema que desenvolupem, aquesta característica és molt important sobretot en els valors de transmitància inferiors ja que el fotodíode percep poca llum i per tant poca intensitat generarà. Ha de tenir un valor baix.
- **Low offset:** Aquesta característica es definiria com la diferència de voltatge DC entre les entrades. El ideal seria que fos zero, però en la realitat si la entrada és zero a la sortida apareix un valor residual. Per consegüent esta bé buscar un que sigui baix.
- **Slew rate:** És un efecte no lineal del amplificador i seria com la incapacitat d'un amplificador per seguir variacions ràpides del senyal d'entrada. Aquest factor no és vital pel nostre sistema ja no que treballa a alta freqüència, ni necessita resposta molt immediata, tot i així pot ser un punt de referència.
- **Preu:** És el factor gairebé més determinant. En aquest cas és farà referència amb els preus unitaris molt allunyats dels preus que costarien si es comprassin en grans quantitats.

Altres qualitats també són importants però si aquests paràmetres descrits s'aproximen al que es busca altres qualitats ja van implícites. En la *Taula 15* es poden veure alguns exemples d'amplificadors operacionals.

AO	Alimentació	Rail-to-Rail	Low noise	Low offset	SR	Preu <sup>5</sup>
TLC2272	5 V	Si	9 nV	2500 $\mu$ V	3,6 V/ $\mu$ s	1,72 €
LT1677	22 V	Si	4,5 nV	60 $\mu$ V	2,5 V/ $\mu$ s	4,08 €
OPA140	20 V	Si	5,1 nV	120 $\mu$ V	20 V/ $\mu$ s	3,77 €
LMP7702	5 V	Si	9 nV	220 $\mu$ V	0,9 V/ $\mu$ s	3,15 €
OPI184	5 V	Si	3,9 nV	65 $\mu$ V	4 V/ $\mu$ s	3,22 €
<b>TS922IN</b>	<b>14 V</b>	<b>Si</b>	<b>9 nV</b>	<b>900 <math>\mu</math>V</b>	<b>1,3 V/<math>\mu</math>s</b>	<b>1,53 €</b>

**Taula 15.** Diferents amplificadors operacionals i les seves característiques.

Finalment després d'analitzar varis amplificadors operacionals s'ha optat pel TS922IN del fabricant ST microelectronics. S'ha elegit aquest perquè en general té unes característiques aproximades al que es busca. Té una alimentació del tipus Rail-to-Rail, com es pot veure en la *Taula 15*, però a més es pot alimentar en un rang de 2,7 V a 12 V. L'únic que és una mica elevat, és el voltatge d'offset, tot i que no influirà massa ja que el

<sup>5</sup> Preus del mes de març de 2015 extrets de l'empresa RS, distribuïdor de productes electrònics.

podrem eliminar. Un altre valor afegit és el preu que resulta més econòmic que els altres i en grans quantitats molt més.

Hi ha altres dispositius que també anirien bé degut a les seves qualitats, però de moment realitzarem el test amb aquest dispositiu.

Fem el muntatge del nou amplificador operacional sobre una placa de proves. Farem servir la mateixa combinació de resistències per aconseguir una estructura no inversora, ja que res ha canviat. Inicialment, l'amplificador operacional anirà alimentat a 5 V amb una font continua, la mateixa que alimenta al LED i el fotodíode.

### 3.4.5 Resultats i discussió de l'assaig del sistema 3

Un cop fetes les proves de funcionament i d'esperar una estona a que el circuit s'estabilitzi es procedeix a realitzar el test de verificació.

En la *Taula 16* es mostren els valors de tensió obtinguts en el test del nou amplificador operacional:

<b>Filtres</b>	<b>Test 1 (V)</b>	<b>Test 2 (V)</b>	<b>Test 3 (V)</b>	<b>Test 4 (V)</b>	<b>Mitjana (V)</b>
<b>SF</b>	2,68	2,67	2,67	2,65	2,67
<b>F1</b>	2,23	2,24	2,22	2,22	2,22
<b>F2</b>	1,52	1,53	1,52	1,51	1,52
<b>F3</b>	0,94	0,94	0,93	0,93	0,94
<b>F4</b>	0,75	0,75	0,74	0,74	0,74
<b>F5</b>	0,59	0,59	0,58	0,58	0,58
<b>F6</b>	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38
<b>F7</b>	0,36	0,36	0,35	0,35	0,36
<b>FO</b>	0,36	0,36	0,35	0,35	0,35

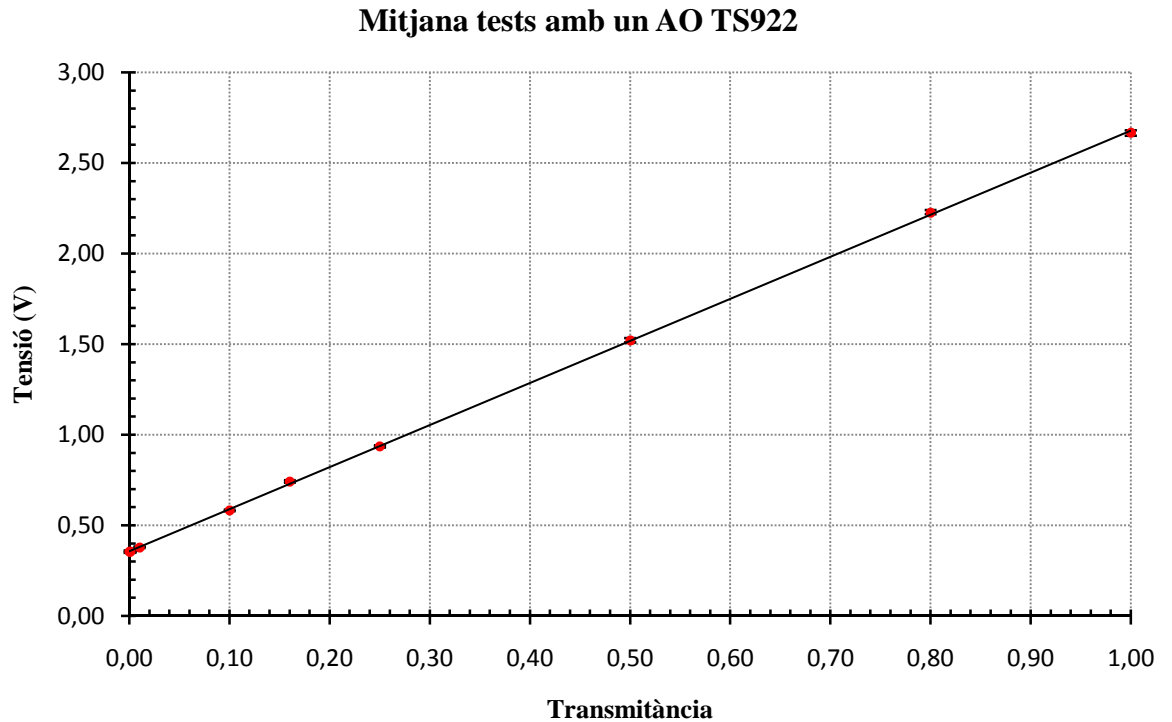
**Taula 16.** Valors de tensió de sortida i mitjana de cada test del sistema 3 amb l'AO TS922IN.

De la mateixa manera que en els casos anteriors, es procedeix a calcular les desviacions de tots els casos per extreure'n el cas més crític.

<b>Filtres</b>	<b>Mitjana (V)</b>	<b>Desviació (V)</b>	
		<b>Superior</b>	<b>Inferior</b>
<b>SF</b>	2,67	0,01	0,02
<b>F1</b>	2,22	0,02	0,01
<b>F2</b>	1,52	0,01	0,01
<b>F3</b>	0,94	0,01	0,01
<b>F4</b>	0,74	0,01	0,01
<b>F5</b>	0,58	0,00	0,00
<b>F6</b>	0,38	0,01	0,00
<b>F7</b>	0,36	0,00	0,00
<b>FO</b>	0,35	0,01	0,01
<b>Cas crític de desviació</b>		0,02	

**Taula 17.** Mitjana, desviacions i cas crític de desviació del sistema 3 amb l'AO TS922IN.

En la *Figura 36* podem veure un gràfic representant la mitjana amb les desviacions de cada punt i la tendència lineal.



**Figura 36.** Mitjana amb les desviacions i tendència lineal del sistema 3 amb un AO TS922IN.

Amb els resultats obtinguts de la gràfica determinem els paràmetres següents:

Desviació de voltatge

Es determina que el pitjor cas de desviació del sistema és de 0,02 V. Definirem una desviació de  $\pm 0,02$  V, en els càlculs posteriors.

Rang de l'instrument

Els rangs de valors que acoten el sistema són:

$$V_R(T_{m\grave{a}x} = 100\%) = 2,67 \text{ V}$$

$$V_R(T_{min} = 0\%) = 0,35 \text{ V}$$

Sensibilitat de l'instrument

Per determinar la sensibilitat es calcula l'equació de la recta:

$$V_R = V_{R_0} + m(T_{m\grave{a}x} - T_{min}) \tag{3.28}$$

$$2,67 = 0,35 + m(100 - 0)$$

S'obté el pendent aïllant la m:

$$m = \frac{2,67 - 0,35}{100 - 0} = 23,20 \cdot 10^{-3} \quad (3.29)$$

$$S = 23,20 \cdot 10^{-3} V/\%$$

### Resolució l'instrument

Amb els valors calculats s'obté:

$$\Delta T = \frac{\Delta V}{S} = \frac{0,02 V}{23,20 \cdot 10^{-3} V/\%} \quad (3.30)$$

$$\Delta T = 0,86\%$$

<b>Resum paràmetres</b>	<b>TS922IN</b>
<b>Desviació de voltatge <math>\Delta V</math></b>	0,02 V
<b>Rang de l'instrument R</b>	De 0,35 a 2,67 mV
<b>Sensibilitat de l'instrument S</b>	$23,2 \cdot 10^{-3} V/\%$
<b>Resolució de l'instrument <math>\Delta T</math></b>	0,86%

**Taula 18.** Resum dels paràmetres del sistema amb un AO TS922IN.

A partir de les proves realitzades al nou amplificador operacional elegit, el TS922IN, es pot fer una comparació amb l'anterior el UA741. Les prestacions d'aquest nou amplificador operacional (rail to rail, rang d'alimentació més ample...) són molt més bones que les del anterior. En els resultats hem vist que no hi ha hagut una variació molt gran, per tant el sistema no ha empitjorat sinó que s'ha mantingut respecte l'altre.

El rang del instrument es manté semblant tot i que es veu una resposta lleugerament més estable en el sistema i es manté una amplificació més constant en tots els filtres. La desviació de tensió té un pic elevat a transmissàncies altes però té una tendència decreixent a mesura que disminueix la transmissància, semblant al cas anterior, fet positiu pel sistema.

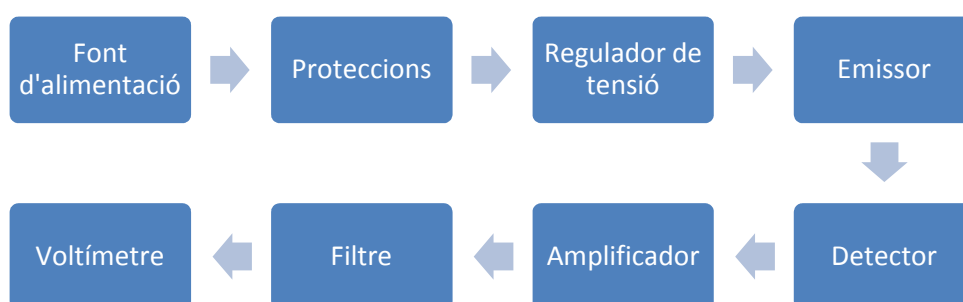
Una característica a destacar és que quan hi ha el filtre opac apareix una tensió de 0,35 V en els dos amplificadors. Això es deu a que hi ha un corrent de foscó relativament elevat, que abans no teníem. Aquest corrent pot ser fruit dels errors que introdueixen els amplificadors o de l'electrònica del circuit. Aquesta tensió ara marcarà el nostre 0 de l'instrument, quan no hi hagi llum.

Aquesta reducció de les desviacions fruit de la millora de prestacions ha augmentat la resolució situant-se al 0,86% de valor mínim de tolerància que l'instrument pot llegir. Es localitzaria al 1% fent acceptable la resposta del sistema.

Finalment en aquesta prova el sistema es quedarà implementat amb l'amplificador operacional TS922IN per les seves avantatges tècniques i per les petites millores en el resultat.

### 3.5 Sistema 4: Prototip de sistema final

En els apartats anteriors hem fet proves focalitzades en el sensor, per tal de determinar la màxima precisió que és capaç d'aportar-nos. Un cop tenim desenvolupat el cor del instrument, hem d'introduir diferents elements electrònics com reguladors de tensió, interruptors, filtres... per tal d'aconseguir un prototip de producte que es pugui vendre, amb unes condicions mínimes. En la *Figura 37* es pot veure el diagrama de blocs amb les noves implementacions que s'afegeixen al de la *Figura 30*.



**Figura 37.** Diagrama de blocs del sistema 4.

Un cop està tota l'electrònica implementada hem de comprovar els valors finals que és capaç de mostrar-nos l'instrument, determinar l'afectació dels components i precisar les característiques del prototip. Per això, després d'introduir els nous elements hem fet varis tests de funcionament.

#### 3.5.1 Resultats i discussió de l'assaig del sistema 4

Un cop realitzat el muntatge damunt d'una placa de proves, es farà el mateix procediment que en els apartats anteriors.

En la *Taula 19* es mostren els diferents valors de tensió dels tests que sortiria de l'instrument, el que veurà el voltímetre o el dispositiu lector:

Filtres	Test 1 (V)	Test 2 (V)	Test 3 (V)	Test 4 (V)	Mitjana (V)
<b>SF</b>	2,74	2,75	2,71	2,71	2,73
<b>F1</b>	2,28	2,25	2,25	2,25	2,26
<b>F2</b>	1,58	1,56	1,56	1,55	1,56
<b>F3</b>	0,99	0,97	0,98	0,97	0,98
<b>F4</b>	0,80	0,78	0,78	0,78	0,79
<b>F5</b>	0,65	0,62	0,62	0,62	0,63
<b>F6</b>	0,44	0,42	0,43	0,42	0,43
<b>F7</b>	0,42	0,40	0,42	0,39	0,41
<b>FO</b>	0,42	0,40	0,41	0,38	0,40

**Taula 19.** Valors de tensió de sortida i mitjana de cada test del prototip.

Un cop calculades les mitjanes de tots els tests calcularem les desviacions de tensió superiors i inferiors. Per calcular-les agafem el valor més gran i més petit del conjunt de test d'un mateix filtre i ho restem de la mitjana. Obtindrem dues columnes, tal com podem

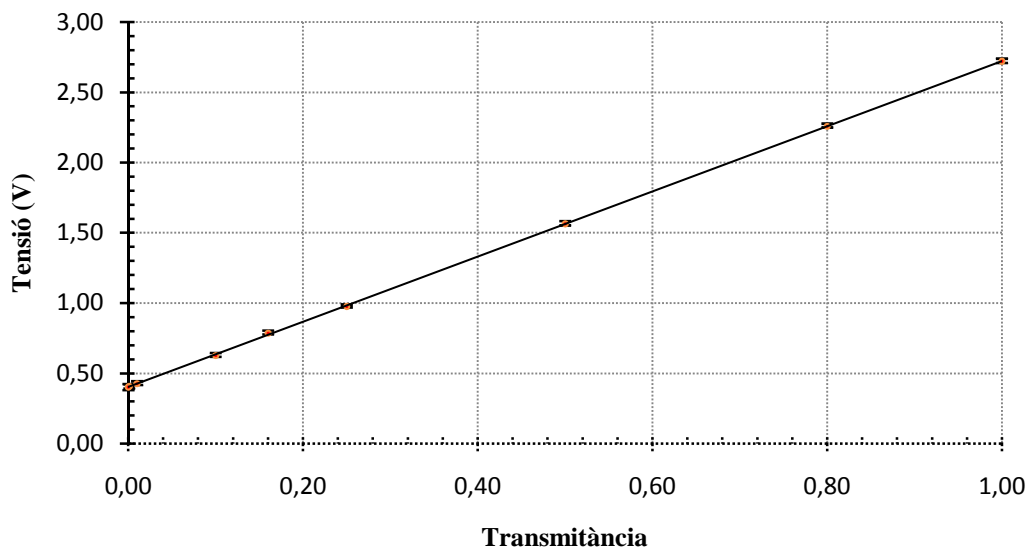
veure en la *Taula 20*, amb els valors absoluts corresponents a les desviacions, de les quals extraurem el cas crític.

Filtres	Mitjana (V)	Desviació (V)	
		Superior	Inferior
SF	2,73	0,02	0,02
F1	2,26	0,02	0,01
F2	1,56	0,02	0,01
F3	0,98	0,01	0,01
F4	0,79	0,02	0,01
F5	0,63	0,02	0,01
F6	0,43	0,02	0,01
F7	0,41	0,01	0,02
FO	0,40	0,02	0,02
<b>Cas crític de desviació</b>		0,02	

**Taula 20.** Mitjana, desviacions i cas crític de desviació del prototip.

Hem representat la mitjana de tots els valors obtinguts en cada punt dels tests en la gràfica de la *Figura 38*, juntament amb les barres d'error característiques de cada punt.

### Mitjana tests prototip electrònic



**Figura 38.** Mitjana amb les desviacions i tendència lineal del prototip.

Un cop hem vist les gràfiques determinarem els paràmetres definitius que tindria el prototip:

#### Desviació de voltatge

Es determina que el pitjor cas de desviació del sistema és de 0,02 V. Per tenir un marge, definirem una desviació de  $\pm 0,02V$ , en els càlculs posteriors.

### Rang de l'instrument

Els rangs de valors que acoten el sistema són:

$$V_R(T_{m\grave{a}x} = 100\%) = 2,73 \text{ V}$$

$$V_R(T_{min} = 0\%) = 0,40 \text{ V}$$

### Sensibilitat de l'instrument

S'obté el pendent aïllant la m de l'equació de la recta anteriorment descrita:

$$m = \frac{2,73 - 0,40}{100 - 0} = 23,30 \cdot 10^{-3} \quad (3.31)$$
$$S = 23,30 \cdot 10^{-3} \text{V/\%}$$

### Resolució de l'instrument

Amb els valors calculats s'obté:

$$\Delta T = \frac{\Delta V}{S} = \frac{0,02 \text{ V}}{23,30 \cdot 10^{-3} \text{V/\%}} \quad (3.32)$$
$$\Delta T = 0,86\%$$

<b>Resum paràmetres</b>	<b>Prototip</b>
<b>Desviació de voltatge <math>\Delta V</math></b>	$\pm 0,02 \text{ V}$
<b>Rang de l'instrument R</b>	De 0,4 a 2,73 V
<b>Sensibilitat de l'instrument S</b>	$23,3 \cdot 10^{-3} \text{V/\%}$
<b>Resolució de l'instrument <math>\Delta T</math></b>	0,86%

**Taula 21.** Resum dels paràmetres del prototip.

En aquests nous tests realitzats al prototip final podem veure que no hi ha hagut gaire variació. Tot i la introducció de nous elements al sistema, les característiques són semblants, així mateix es comprova que no hi ha hagut una influència en el funcionament del sistema.

S'han millorat les desviacions evitant fonts d'error com fluctuacions de la font i aquest fet s'ha notat en el moment de fer els tests, ja que donaven uns valors més estables i invariants, tal i com es pot veure en la *Figura 38* que els errors han quedat distribuïts de manera equitativa en tots els trams sense grans pics, tal i com vèiem en els tests inicials, fent que el valor màxim de desviació sigui de 0,02V.

A partir de la gràfica de la *Figura 38* es pot determinar que s'ha mantingut la linealitat del sistema en funció de la transmitància, millorant la precisió dels valors mitjos i

mantenint les desviacions amb valors més elevats en les transmissibilitats altes i baixes, que és on es focalitzen els punts crítics del sistema.

La *Taula 21* ens aporta la descripció de les característiques finals de l'instrument on s'ha arribat a obtenir una precisió del 0,86%, un valor molt millor que el inicial del 5%. Estaríem parlant de que si el prototip mesura una transmissibilitat del 1% seria del  $1 \pm 0,85\%$ , uns paràmetres que aparentment s'aproximen a la precisió per l'ús al que li volem donar.

Un cop hem analitzat els resultats de l'instrument comparant-lo amb el mateix mètode utilitzat en els altres experiments, ara toca valorar el resultat final.

L'instrument que estem dissenyant, ens ha de servir per mesurar la concentració d'un compost en concret, i fins ara en tots els tests hem utilitzat la transmissibilitat perquè era equivalent al que es buscava. Ara amb aquest últim test, volem comprovar si aquesta equivalència es tradueix en un bon resultat pel que fa la lectura de concentracions.

Per començar, calcularem els valors d'absorbància proporcionals al valor de transmissibilitat obtingut en els tests. Per a obtenir el valor d'absorbància, utilitzarem la relació, anteriorment descrita, amb la transmissibilitat. En la *Taula 22* podem veure els filtres, amb la seva absorbància equivalent i el valor de tensió de sortida de l'instrument.

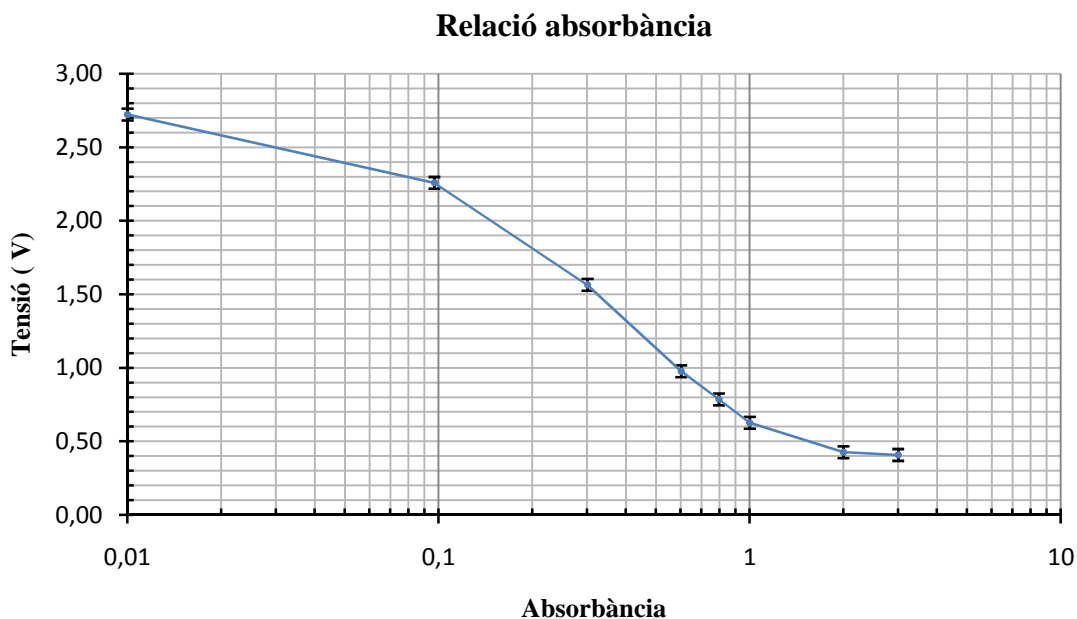
<b>Transmissibilitat</b>	<b>Absorbància</b>	<b>Tensió (V)</b>
<b>SF</b>	0,00	2,73
<b>F1</b>	0,10	2,26
<b>F2</b>	0,30	1,56
<b>F3</b>	0,60	0,98
<b>F4</b>	0,80	0,79
<b>F5</b>	1,00	0,63
<b>F6</b>	2,00	0,43
<b>F7</b>	3,00	0,41
<b>FO</b>	indeterminat	0,40

**Taula 22.** Absorbància en funció de la tensió de sortida.

Cal determinar que SF correspon al límit superior on es considera la màxima transmissibilitat de l'instrument i FO és on es considera el límit inferior, el qual és on hi ha la mínima transmissibilitat. El valor de transmissibilitat exacte del darrer no es pot determinar i es considera que és molt pròxim a 0 de manera que l'absorbància seria molt elevada.

A simple vista veiem que el filtre amb el valor màxim de transmissibilitat, F1, correspon al valor mínim d'absorbància i la màxima de tensió de sortida. Seria equivalent a que quan el fotodíode està exposat a una il·luminació elevada, hi ha una major captació de llum que es tradueix en una tensió elevada, tanmateix representaria que la mostra tindria una absorbància molt petita. En el cas contrari, a menor transmissibilitat, l'absorbància seria molt elevada i aniria fins l'infinit, tenint una tensió de sortida molt més petita.

Si amb els valors de la *Taula 22*, representem una relació de l'absorbància en funció de la tensió de sortida, ens quedarà una gràfica com la de la *Figura 39*.



**Figura 39.** Relació de l'absorbància amb la tensió de sortida del prototip.

En la gràfica de la *Figura 39* podem veure la localització dels punts d'absorbància segons el valor de tensió de sortida. Per fer-ne una visualització més clara de la tendència que seguirien els punts, simplement els unim amb rectes.

En el gràfic també hem introduït el barres d'error amb la desviació màxima que són els 0,02 V del sistema 4, ja que al tenir una resposta logarítmica el error ens pot afectar molt més sobre la precisió de l'instrument.

Analitzant aquesta representació lineal de la gràfica veiem que el pendent que hi ha entre els valors d'absorbància de 0,01 a 0,1 seria poc pronunciat o gairebé pla. Aquest correspondria a valors de transmitància elevats, entre el 100% i el 80%. Aquesta regió de treball per a analitzar un compost i extreure'n la concentració la desestimariem, degut a que no s'aproxima a la resposta lineal amb el pendent que estem buscant. Ens trobem el mateix en el cas d'absorbàncies elevades a partir de 1, corresponents a transmitàncies baixes, inferiors del 10%. En aquest cas la resposta tampoc no tindria el pendent que busquem fent que l'error de lectura fos molt elevat i no gaire fiable.

Finalment cal fixar-se en la part central de la gràfica, definit entre el rang de 0,1 a 1 corresponent a unes transmitàncies per sobre del 10% i per sota del 80%. En aquest cas el resultat ha estat una tendència molt lineal, molt semblant a la tendència que mantenia la transmitància amb la tensió de sortida, tot i que de forma inversa. Les mesures preses en aquest rang, ens oferiran una lectura proporcional a la concentració del compost a analitzar. Per consegüent definirem que el millor comportament de l'instrument es pot trobar en aquest rang d'actuació tot i que s'analitzarà en els estudis posteriors.

#### Determinació de la desviació en l'absorbància

Un cop tenim determinat gràficament el possible rang amb la millor resposta de la tensió respecte la sortida, hem de fer una estimació de la desviació exacte que obtindríem en la mesura de l'absorbància en cadascun de les mesures realitzades.

Hem determinat que l'instrument té una desviació màxima de 0,02 V de tensió a la sortida. Aquesta desviació es tradueix en una resolució de l'instrument del 0,86%. Per tal de

comprovar que aquesta resolució de l'instrument es verifica en tots els punts mesurats, es calcularà la desviació que correspon a cadascun dels punts dels filtres de la *Taula 22*. Amb aquests valors, i a partir de la recta de calibració de la *Figura 39*, podem trobar els dos valors de transmitància fruit de la desviació.

Per estimar les desviacions de transmitància ens basarem únicament amb els filtres. A la *Taula 22* també apareix el valor de tensió de sortida per a SF i FO, els quals considerem que són els punts de tensió que marquen la cota superior i inferior del rang de l'instrument. Amb aquests valors de transmitància calcularem els d'absorbància. Per fer-ho ho determinariem en cada filtre tal i com es pot veure en l'exemple del procediment següent.

#### Exemple F1

Ens fixem en el F1 de la *Taula 22*, aquest filtre és el primer filtre amb una transmitància del 80 % i té una tensió de sortida de 2,26 V. La tensió amb la desviació de 0,02 V que podem tenir serà:

$$V_{lo} = 2,26 - 0,02 = 2,24 \text{ V} \quad (3.33)$$

$$V_{hi} = 2,26 + 0,02 = 2,28 \text{ V} \quad (3.34)$$

A partir de l'equació de la recta podem calcular com afectaria aquesta desviació a la transmitància i obtindrem:

$$T_{lo} = \frac{\Delta V}{S} = \frac{2,24 - 0,4}{23 \cdot 10^{-3}} = 80 \% \quad (3.35)$$

$$T_{hi} = \frac{\Delta V}{S} = \frac{2,28 - 0,4}{23 \cdot 10^{-3}} = 81,7 \% \quad (3.36)$$

La comprovació, amb la definida a l'instrument, de la desviació màxima seria:

$$\frac{T_{lo} - T_{hi}}{2} = 0,85 \approx 0,9 \% \quad (3.37)$$

Amb la transmitància inferior i superior trobarem el valor d'absorbància que li correspon a cadascun. Relacionem el valor de transmitància elevat amb el valor d'absorbància petit, tal i com es defineix en la relació.

Els valors d'absorbàncies són:

$$\Delta_{lo} = -\log_{10}(0,817) = 0,088 \quad (3.38)$$

$$\Delta_{hi} = -\log_{10}(0,80) = 0,097 \quad (3.39)$$

Amb els resultats anteriors podem calcular la desviació màxima en l'absorbància que tindríem amb el valor de tensió de sortida que ens proporciona l'instrument:

$$\Delta A = \frac{(A_{hi} - A_{lo})}{2} = 0,005 \quad (3.40)$$

En els altres filtres es realitzaria de la mateixa manera. En la *Taula 23* podem veure la resolució de transmitància i d'absorbància que tindria l'instrument, segons la resposta de tensió amb les seves desviacions de cada filtre.

<b>Filtres</b>	<b>Absorbància</b>	<b>Tensió (V)</b>	<b>Resolució transmitància (%)</b>	<b>Resolució absorbància</b>
<b>F1</b>	0,10	2,26	0,9	0,005
<b>F2</b>	0,30	1,56	0,9	0,005
<b>F3</b>	0,60	0,98	0,9	0,015
<b>F4</b>	0,80	0,79	0,9	0,02
<b>F5</b>	1,00	0,63	0,9	0,04
<b>F6</b>	2,00	0,43	0,9	0,71
<b>F7</b>	3,00	0,41	1	0,48

**Taula 23.** Resolució de l'instrument per la transmitància i l'absorbància.

En la *Taula 21* de característiques de l'instrument ja havíem definit la resolució de la transmitància, que era de 0,86 %. Com que és necessari calcular les noves transmitàncies a partir de la desviació de la tensió, hem aprofitat i hem comprovat que efectivament els càlculs realitzats són els correctes i en gairebé tots els filtres ens dona la mateixa resolució.

Cal destacar el F7, ens dona una resolució de transmitància més elevada. Pot donar error degut a que el valor de tensió que aporta a la sortida de l'instrument pot estar molt pròxim al que proporciona el corrent fosc definit a la *Taula 22* com FO. Al fer els càlculs dona una resolució de gairebé el 1 %.

Pel que fa les absorbàncies, degut a la relació logarítmica, per a valors de transmitància petita (absorbància gran) surt una desviació d'absorbància molt elevada, concretament a partir d'una transmitància del 25 % la  $\Delta A$  ja està al voltant de 0,02. En les transmitàncies elevades (absorbància petita) la desviació és menor, aportant un valor pròxim al que busquem. Es manté una  $\Delta A$  de 0,005 en valors superiors al 80 % fins al 50 % aproximadament. Aquest es podria definir com a rang útil de l'instrument on la resolució de l'absorbància és millor. Podem veure-ho en color vermell a la *Taula 23*.

#### Determinació de la desviació en la concentració

Hem vist que les desviacions de tensió afecten a la resolució de la transmitància i també a l'absorbància. Com que l'objectiu de l'instrument és la mesura de la concentració també hem de fer referència a com afecten aquestes desviacions a la lectura d'una concentració determinada.

Tal com hem vist en la introducció, concretament en la relació que mostra l'equació (2.10), la concentració és igual al producte de l'absorbància per un factor concret, segons les condicions de l'assaig. Aquestes condicions són les que es tenen quan es fa un assaig amb les diferents concentracions dins de les provetes, amb els paràmetres descrits.

Per tal facilitar el procés de verificació, considerarem que tenim unes mostres amb els paràmetres (volum final, volum total, longitud d'ona...) que requeriria l'experiment. Aquestes mostres les introduïm a l'instrument i ens donen uns valors d'absorbància concrets. Simularem que aquests valors, són els valors d'absorbància que obtenim dels filtres dels experiments anteriors, amb les desviacions calculades. A partir de l'equació (2.11) puc trobar el valor del factor que els relaciona. Aquest factor considerem que és de 0,87. És el que utilitzarem en les comprovacions següents.

Hem vist que el millor rang de l'instrument on teníem una  $\Delta A$  de 0,005 anava dels valors superiors al 80 % fins al 50 % de transmissió. Fora d'aquest rang la resolució empitjorava. Aquesta resolució la considerem acceptable perquè el full de característiques del test enzimàtic, que ens descriu el fabricant, ens recomana que l'instrument de mesura ha de tenir una resolució pròxima a aquest valor.

Els valors que van per sobre del 80 % de transmissió els desestimarem, seguint la recomanació del fabricant del test, ja que marca que el valor mínim d'absorbància que ha de tenir un instrument ha de ser de 0,1, equivalent a una transmissió del 80 %. Per tant, el rang del nostre instrument es mourà entre les transmissions del 80 al 50 %, corresponent a unes absorbàncies de 0,1 i 0,3 respectivament.

Dins d'aquest rang tenim una resolució de  $\Delta A$  de 0,005, per determinar quina resolució en concentració obtindríem, en el cas d'un experiment real, ho podem calcular a partir de la equació (2.10) de la concentració, on tenim:

$$\begin{aligned}C &= 0,87 \cdot \Delta A \\C &= 0,87 \cdot 0,005 \\C &= 0,004 \text{ g/l}\end{aligned}\tag{3.41}$$

Podem veure que en el rang que hem definit òptim pel nostre instrument, obtenim una resolució de la concentració de 0,004 g/l. Aquesta és la desviació màxima que obtindríem en el nostre instrument fent-lo treballar en el rang acotat.

#### Comprovació de la desviació en la concentració d'un test real

Un cop determinada la resolució de l'instrument, en matèria de la concentració, volem determinar si aquesta resolució afecta en la presa de mesures que es requerien en un test enzimàtic específic per l'àcid màlic. Tal com ens defineix el fabricant del test, la quantitat d'àcid màlic dissolt en la mostra d'estudi, utilitzada en l'assaig, ha d'estar acotada entre 1  $\mu\text{g}$  com a mínim i 35  $\mu\text{g}$  com a màxim, tenint en compte que fem les mesures a 365 nm de longitud d'ona.

Aquesta seria la quantitat mínima i màxima que hi hauria en la mostra de vi a estudi que té un volum de 0,100 ml. Aquesta està inclosa dins dels 2,200 ml de volum final de la mostra d'estudi. La preparació de les mostres està descrita en l'apartat de "*Com preparar les mostres d'un test enzimàtic*".

Si calculem les concentracions que impliquen aquestes quantitats en els volums descrits, tenim com a concentració superior d'àcid màlic:

$$\frac{35 \mu g}{0,100 ml} = \frac{35 \cdot 10^{-6} g}{0,1 \cdot 10^{-3} l} = 0,35 g/l \quad (3.42)$$

I com a concentració inferior:

$$\frac{1 \mu g}{0,100 ml} = \frac{1 \cdot 10^{-6} g}{0,1 \cdot 10^{-3} l} = 0,01 g/l \quad (3.43)$$

Aquestes serien les concentracions mínimes i màximes que contindrien les mostres seguint el procediment de preparació que defineix el fabricant. Per tant el nostre instrument ha de ser capaç, tot i les desviacions, de tenir una resolució suficient per a mesurar aquestes concentracions.

El cas de concentració inferior és de 0,01 g/l, i la resolució de l'instrument envers la concentració és de 0,004 g/l. Podem veure que la resolució és suficient per mesurar els rangs de valors que ens podem trobar en un assaig d'aquest tipus. Cal remarcar que els resultats són per un compost en concret, en altres casos podria variar.

### **3.5.2 Experiment amb concentracions: Material i procediment**

Per a fer aquest experiment utilitzarem un colorant lila industrial, el qual farem una dissolució mare dissolent 1 g de colorant en 1000 ml d'aigua. Aquest colorant ens aportarà la funció d'absorció que estem buscant. Posteriorment diluirem la mostra mare amb diferents percentatges d'aigua per aconseguir que la concentració també es dilueixi. Tenim doncs una mostra mare sense diluir, que la anomenarem mostra al 100 %. Una altra mostra amb una proporció d'una part de la mostra mare i una part d'aigua, anomenada mostra al 50 %. Finalment una altra mostra amb una proporció d'una part de mostra mare i quatre d'aigua, anomenada mostra al 80 %. També tindrem una mostra al 0% de dissolució mare, que consisteix en l'aigua sense colorant, i un filtre opac.

Amb la mostra d'aigua definirem el blanc, la cota inferior de concentració que serà el nostre 0, i amb el filtre totalment opac definirem el sostre superior, la nostra màxima d'absorbància. Entremig hauria d'haver-hi les diferents dissolucions proporcionals entre elles per tal que es pugui detectar un funcionament correcte.

El procediment per l'obtenció de les mostres és la introducció del percentatge de mostra de colorant dins d'una proveta i la diferència fins a 10 ml, omplir-la d'aigua. Per exemple per la dissolució al 50 % són 5 ml de mostra mare i 5 ml d'aigua, i així en els altres casos.

#### Materials:

- Mostra mare feta de colorant industrial segons concentració determinada.
- Una mostra d'aigua abans d'introduir el colorant.
- 2 mostres diluïdes.
- Filtre opac.
- 3 pipetes d'un sol ús.
- 2 provetes per l'espectròmetre.
- Guants de làtex.
- Paper absorbent.
- Prototip de l'instrument de mesura.



**Figura 40.** Material per fer les concentracions de colorant.

### 3.5.3 Resultats i discussió del experiment amb concentracions

Un cop tenim les dissolucions preparades les introduïm dins de provetes quadrades especials per a un espectròmetre i procedim a introduir-les dins del nostre instrument de mesura. Repetim el procediment un total de quatre vegades amb cada concentració i obtenim una taula de valors amb les tensions de sortida de l'instrument, *Taula 24*, on calculem la mitjana com en els tests anteriors.

Mostres	Test 1 (V)	Test 2 (V)	Test 3 (V)	Test 4 (V)	Mitjana (V)
<b>Blanc</b>	2,51	2,50	2,53	2,52	2,52
<b>Mostra 20 %</b>	2,22	2,21	2,21	2,21	2,21
<b>Mostra 50 %</b>	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97
<b>Mostra 100%</b>	0,54	0,54	0,54	0,55	0,54

**Taula 24.** Resultats de tensió de l'experiment amb concentracions de colorant.

Si calculem les desviacions de tensió a partir dels resultats i les mitjanes, podem determinar el cas crític d'aquest test tal i com podem veure en la *Taula 25*.

Filtres	Mitjana (V)	Desviació (V)	
		Superior	Inferior
<b>Blanc</b>	2,52	0,02	0,01
<b>Mostra 20 %</b>	2,21	0,01	0,00
<b>Mostra 50 %</b>	0,97	0,00	0,00
<b>Mostra 100%</b>	0,54	0,00	0,00
<b>Opac</b>	0,44	0,00	0,00
<b>Cas crític de la desviació</b>		0,02	

**Taula 25.** Desviacions superiors i inferiors de l'experiment amb concentracions.

Podem veure que la desviació crítica de l'instrument es manté tal i com havíem definit en les característiques de l'instrument, hem verificat que en un test amb dissolucions es manté, i obtinc els mateixos resultats que en la teoria.

Una de les mancances que té aquest experiment és que no podem definir una gràfica que relaciona la tensió amb la transmitància, com en els casos anteriors, ja que no coneixem la transmitància exacte que tenen les nostres mostres. El que si sabem és la concentració que hi ha dissolta en cada mostra, i entre elles hi ha una proporcionalitat que, encara que no sigui el compost que volem analitzar, ens pot aportar informació de l'efectivitat de l'instrument. L'avaluació s'ha de definir en base dels resultats obtinguts.

Hem realitzat una mesura a un blanc, és a dir aigua sense colorant, i a un la mostra mare la del 100 % de concentració. Aquests valors ens definarien el rang superior de transmitància i el rang inferior. En base a això, les transmitàncies de les concentracions haurien d'estar en aquest rang i de forma proporcional, segons la concentració que tenen.

Aquesta transmitància la hem de mesurar a partir dels valors de tensió que obtenim de l'instrument. Ho determinarem aïllant la transmitància de l'equació de la recta que relacionaria la tensió de sortida amb la transmitància, la qual ja en coneixem el pendent,  $m$ , que és el que hem extret del nostre instrument i la tensió de fosc. Ens quedaria:

$$T = \frac{V_{mostra} - V_{if}}{m} \quad (3.44)$$

Si introduïm els valors concrets obtinguts en els test a l'equació (3.44) tenim:

$$\text{Blanc} \quad T_1 = \frac{2,51 - 0,4}{23 \cdot 10^{-3}} = 87,4 \pm 0,86\% \quad (3.45)$$

$$\text{Mostra 20 \%} \quad T_2 = \frac{2,21 - 0,4}{23 \cdot 10^{-3}} = 78,7 \pm 0,86\% \quad (3.46)$$

$$\text{Mostra 50 \%} \quad T_3 = \frac{0,97 - 0,4}{23 \cdot 10^{-3}} = 24,8 \pm 0,86\% \quad (3.47)$$

$$\text{Mostra 100\%} \quad T_4 = \frac{0,54 - 0,44}{23 \cdot 10^{-3}} = 6,1 \pm 0,86\% \quad (3.48)$$

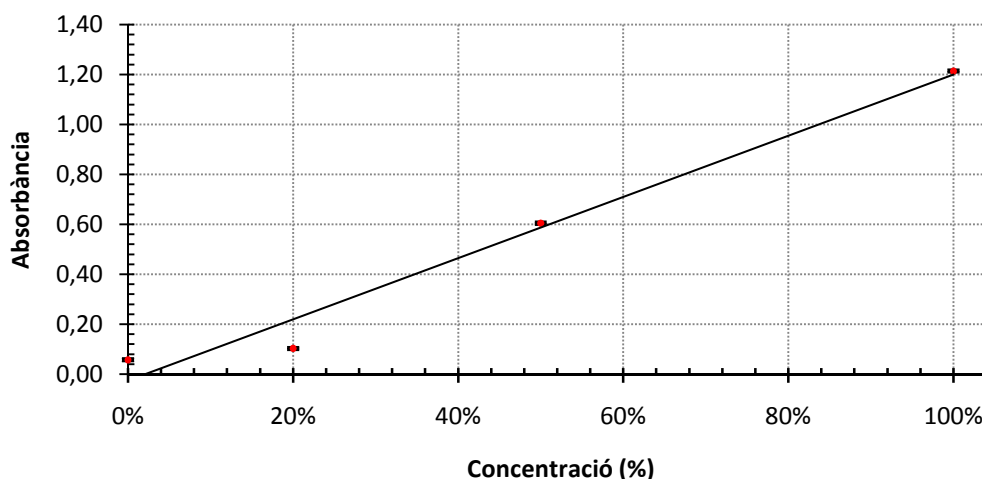
A partir dels valors de transmitància que hem obtingut podem determinar els valors d'absorbància amb els càlculs anteriorment descrits. Aleshores tindrem un valor de transmitància, segons la tensió de sortida, i un valor d'absorbància. Aquests estan relacionats a la concentració introduïda en les dissolucions. En la *Taula 26*, podem veure els valors de transmitància obtinguts amb el seu equivalen amb absorbància, i amb la concentració.

Transmitància	Absorbància	Concentració (g/l)
0,87	0,06	0
0,79	0,10	0,2
0,25	0,61	0,5
0,06	1,21	1

**Taula 26.** Transmitància, absorbància i concentració de l'experiment.

Amb els valors de la *taula 26* realitzem un gràfic, com el de la *Figura 48*, que relacioni l'absorbància amb el percentatge de concentració que té la mostra.

## Experiment amb concentracions



**Figura 41.** Relació del percentatge de la concentració amb l'absorbància.

A partir dels càlculs veiem que els valors de transmissió disminueixen a mesura que augmenten les concentracions, i ho fan de manera proporcional. A partir de la mostra al 100 % i del blanc, podem definir el valor màxim i el valor mínim respectivament.

Amb aquest gràfic de la *Figura 41*, podem veure que hi ha una tendència creixent ja que augmenta l'absorbància a mesura que augmenta el percentatge de concentració. Recordem que el valor d'absorbància l'hem calculat a partir de la transmissió, i aquest a partir de la tensió de sortida de l'instrument. Aquest fet ens assegura que l'instrument ens fa una bona mesura de l'absorbància. També comprovem que la suposició inicial que hem fet de la relació entre la tensió de sortida i el corrent fotogenerat, en funció de la llum que incideix el sensor, és correcte i es demostra en aquest test.

Una altre observació que es pot fer és que l'instrument no necessita calibració, simplement definint el rang en cada moment de prendre una mesura ell ja pren la referència i amb això ja podem determinar les altres mesures a partir del pendent dels dos punts.

Podem veure a partir de l'experiment amb concentracions reals, l'instrument ens proporciona unes bones mesures, proporcionals a la quantitat de compost dissolt a la mostra. Per altra banda, comprovem i verifiquem la suposició inicial de funcionament. L'estudi conclou amb uns resultats optimistes, tot i que el sistema de prova està realitzat amb uns dispositius que no són els ideals. Si es planteja utilitzar un emissor LED ultraviolat amb el fotosensor adient els resultats de les mesures podrien ser més acurats.

## 4 Disseny del sistema

### 4.1 Requeriments bàsics pel prototip

Un cop hem comprovat el funcionament del sensor dissenyat pel sistema, el que pretenem és exportar el concepte a un prototip de sistema de mesura per poder-ho comercialitzar. Per tal de que això sigui viable, el prototip ha de complir una sèrie de requisits tan des de la part electrònica com de la part mecànica.

#### 4.1.1 Necessitats mecàniques

Per tal que l'instrument compleixi les utilitats pel qual es dissenya, necessita proveir-se d'unes característiques mecàniques específiques, com les següents:

- El prototip ha de tenir una mida compacte per poder ser transportat i emmagatzemat en un estoig o maleta.
- Necessita tenir un espai, dins de la cambra del sensor, per a posar provetes. Aquest espai ha de ser especial per contenir una proveta de mides estàndard i amb un sistema poka-yoke que eviti una posició incorrecta de la mateixa.
- L'espai on hi ha el sensor ha d'estar aïllat de la llum exterior per evitar la infiltració que faria falses lectures. També s'ha d'evitar la reflexió interna de la llum.
- Es necessita un suport pel LED i pel fotodíode que els mantingui fixos, deixant una distància, entre ells, constant de 10 mm.
- És necessària una comunicació exterior del sistema per aportar la informació dels valors obtinguts als usuaris.
- Seria aconsellable que el sistema disposés d'un suport per a provetes a la carcassa exterior. Seria per contenir els blancs i les mostres mentre es realitzen els assaigs enzimàtics.
- Una funcionalitat senzilla per l'usuari.
- Protecció a la humitat i condicions ambientals adverses.

#### 4.1.2 Necessitats de hardware

Per poder definir un dispositiu electrònic, apart dels elements necessaris pel sensor i l'amplificació del senyal, necessita altres elements i requeriments. Aquests són els següents:

- El sistema ha de poder alimentar-se amb una pila, de 9 V, o a través d'una font d'alimentació externa.
- Podria tenir l'opció d'alimentar-se a través d'un USB si l'interfase requereix un ordinador.
- En cas que l'instrument vagi amb una pila de 9 V, necessita una protecció per evitar malmetre el circuit en cas de connectar la pila amb la polaritat invertida.
- S'ha d'introduir un dispositiu d'accionament per engegar i parar el circuit.
- S'ha d'alimentar l'emissor, el fotodíode i els amplificadors en corrent continua, no fluctuant i de 5 V.
- Tots els elements electrònics han d'estar alimentats a una tensió entre 0 i 5 V.
- La PCB del circuit ha de ser compacta i reduïda.
- LCD o USB per la sortida d'informació del sistema.

## 4.2 Condicionament del hardware

Per poder solucionar les necessitats del hardware necessitem altres dispositius electrònics de condicionament, apart dels que formen el nucli del sensor. Aquestes aplicacions tindran principalment la funció de protecció del sistema, condicionament del senyal, per millorar-ne la precisió, i inclús millora en la comoditat de l'ús.

### 4.2.1 Característiques tècniques dels elements introduïts per les millores

Les millores que hem introduït a l'instrument són les següents:

#### - Millores en el sistema d'alimentació

Un dels avantatges d'aquest prototip és que volem que sigui un instrument que es pugui utilitzar en ambients molt diversos, des d'un laboratori fins al mig d'un camp de cultiu. Per aquesta raó una de les coses que eren imprescindibles era estudiar l'alimentació del prototip i fer-ho de la manera més còmoda possible.

Com que ha de ser un dispositiu portable hem optat per implementar un sistema d'alimentació amb una pila de 9 V. Aquesta solució ens aporta la tensió necessària pel sistema i ens dona l'avantatge de no necessitar una connexió directa a la xarxa elèctrica.

#### - Tensió d'alimentació constant

Per tal de poder mantenir una tensió constant de 5 V en les alimentacions dels amplificadors operacionals i mantenir una alimentació continua al emissor i receptor feia necessari la introducció d'un regulador de tensió. El que ens proporciona és una estabilitat d'alimentació encara que hi hagi fluctuacions en la font.

El dispositiu que hem utilitzat és un regulador de tensió LM7805C de Texas instruments. El que ens ofereix aquest dispositiu és una tensió de sortida de 5 V (amb una desviació màxima superior de 5,2 V i inferior de 4,8 V), amb una alimentació que no ha de superar els 35 V. Com que s'alimenta a 9 V és correcte tot i que si ho fes a 12 V també. Pel que fa la temperatura en que pot operar esta entre els 0°C i els 70°C. De moment per les aplicacions que volem és correcte. Tot i això hem adquirit un dissipador adaptable per evitar que, en cas de treballar a major tensió, es malmeti el dispositiu.

El dispositiu proporcionat per les proves, té un encapsulat T0-220, semblant al que tenen els transistors mosfet. El dispositiu té tres pins, un és l'entrada, l'altre el comú i finalment la sortida regulada a 5 V.

Per millorar les característiques del dispositiu hem afegit un condensador electrolític a la sortida de 0,1  $\mu$ F tal i com recomana el full de característiques del dispositiu per estabilitzar la sortida de la tensió continua.

#### - Protecció del circuit

En aquest apartat introduïm les millores necessàries per evitar que el sistema es faci malbé per inclemències exteriors o per mal ús.

El primer que hem implementat és un sistema per deixar d'alimentar tot el circuit amb un simple interruptor. Hem de tenir en compte que quan s'activi hi haurà un temps de repòs en que l'instrument ha d'estabilitzar-se.

Un altre requeriment necessari és impedir que la pila es pugui connectar en polaritat inversa ja que hi ha elements que són molt sensibles al corrent invers com podrien ser els amplificadors operacionals. Una de les solucions és utilitzar un petit connector, disponible en el mercat, que només encaixa el pol correcte posicionant així el positiu i el negatiu on

perta. Tot i això, per a major protecció, hem introduït un díode just després del interruptor i abans de qualsevol element per tal de protegir el circuit en cas que hi hagi una polaritat invertida. Aquest dispositiu és un díode d'unió PN comú, polaritzat en directa. Amb aquests sistemes el circuit queda protegit de males connexions.

Finalment un altre sistema que s'implementaria, en el moment de fabricació del dispositiu, és la tropicalització<sup>6</sup> de tot el circuit ja que el circuit pot estar al exterior o en ambients amb una humitat elevada. Evitarà que això afecti al rendiment i millorarà la seguretat del circuit.

#### - Millora de la precisió i l'estabilitat

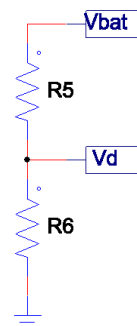
Un requisit molt important per tenir una bona precisió, que hem definit en apartats anteriors, és que el LED ha d'estar alimentat a una tensió constant. Amb un regulador de tensió ja és suficient per evitar les fluctuacions de la font d'alimentació en el cas que siguin superiors, però en el cas que la tensió de la pila disminueixi, degut a que s'esgota, hi pot haver punts en que la tensió no serà de 5 V exactes. Al circuit no li passaria res ja que els amplificadors operacionals, els elements més sensibles, funcionarien igual fins a una tensió de 2 V. El LED, però emetria una intensitat lumínica més reduïda perdent la referència, el qual produiria falses lectures.

Per a solucionar això hem implementat un petit circuit que ens avisarà amb un LED vermell que hem de substituir la pila. No podem evitar que la tensió disminueixi però almenys avisarem a l'usuari de l'estat de la mateixa.

La funció d'aquest circuit és determinar la tensió de la pila, comparar-la amb una tensió de referència i si és inferior activar un LED de color vermell. Aquesta tensió de referència la hem calculat prèviament i és la tensió mínima que assegura el bon funcionament del regulador de tensió, i així mateix el bon funcionament de tot el circuit. Per sota d'aquesta tensió, el circuit continua funcionant però el LED no emet amb totes les garanties.

La tensió que considerem mínima per a que el sistema pugui treballar amb un marge de seguretat òptim és de 6 V. A partir d'aquesta tensió, el regulador pot començar a variar la tensió que proporciona al circuit.

Per tant, per poder tenir una aproximació fem un divisor de tensió perquè ens aporti una consigna per poder comparar. Per a fer els càlculs de les resistències tenim el divisor de tensió de la *Figura 43*.



**Figura 42.** Divisor de tensió per la lectura de la tensió de la bateria.

---

<sup>6</sup> Procés que consisteix en l'aplicació de vernissos especials a la superfície de la placa on hi ha els elements per tal de protegir els pins i les connexions de fenòmens ambientals, com la humitat, pols entre altres.

Per determinar la  $V_d$  definim un divisor de tensió com el següent:

$$V_d = \frac{R_6 \cdot V_{bat}}{R_5 + R_6} \quad (4.1)$$

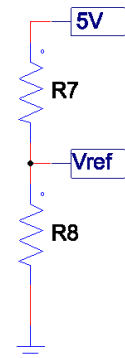
Si volem que  $V_d$  sigui de 2 V en aquest cas, la relació de resistències ha de ser:

$$R_5 = 2R_6 \quad (4.2)$$

Per tant pot ser qualsevol valor de resistència, complint que una sigui el doble que l'altre. Pel disseny del prototip hem triat per  $R_5$ , un valor de 2 k $\Omega$  i per a  $R_6$  un valor de 1 k $\Omega$ . Amb aquest càlcul tenim definit que quan hi hagi 2 V a  $V_d$  significarà que la pila comença a estar en zona crítica.

La tensió de referència que hem d'utilitzar, ha de ser fixa ja que la que varia és  $V_d$  en funció de l'estat de carga de la pila. Per a poder fer aquesta referència utilitzarem un divisor de tensió, com en l'altre cas, però la font seran els 5 V en contínua que té el circuit.

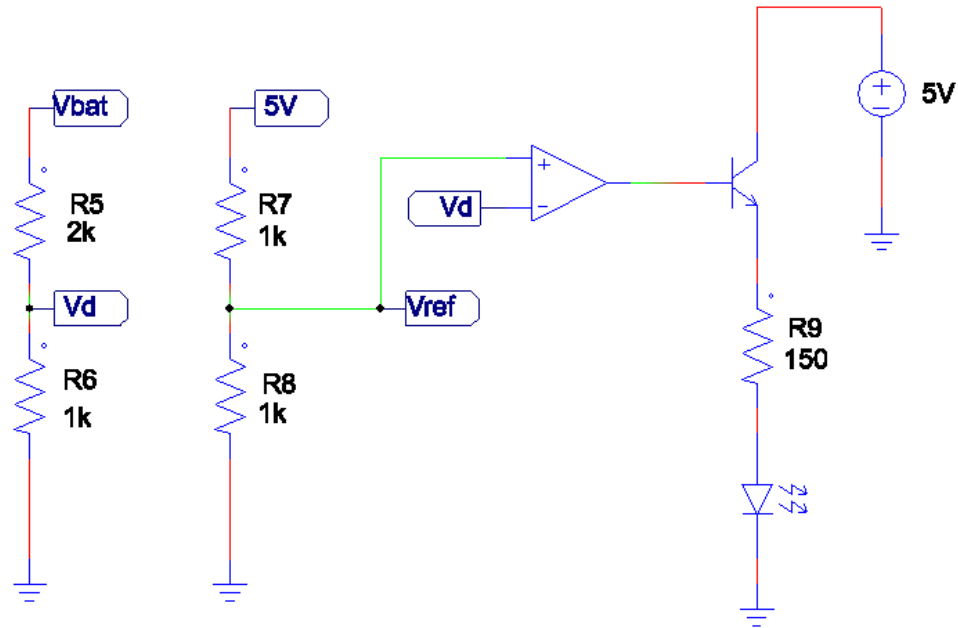
Per determinar la relació de resistències tenim:



**Figura 43.** Divisor de tensió per extreure la tensió de referència.

En l'altre cas hem determinat que la tensió  $V_d$  havia de ser de 2 V. Això és així per tal de facilitar la realització d'una tensió de referència de la manera més fàcil possible. Com que tenim una alimentació de 5 V, simplement amb un divisor de tensió de dues resistències iguals podem dividir aquesta tensió entre 2, aconseguint 2,5 V per a una referència. Per aconseguir-ho en el nostre prototip determinem uns valors de resistència per a  $R_7$  i  $R_8$  d' 1 k $\Omega$ .

Un cop calculades les resistències fem el muntatge final i ens queda com en l'esquema de la *Figura 44*.



**Figura 44.** Circuit d'avís de bateria baixa.

Tenim un amplificador operacional treballant en zona no lineal, amb una configuració de comparador no inversor. Per l'entrada no inversora tenim un senyal que representa la tensió que hi ha a la pila. Per l'entrada inversora tenim una tensió de 2,5 V constant que és una referència de tensió del circuit. Mentre la tensió de la pila sigui superior de 6 V, és a dir superior a 2 V a la  $V_d$ ,  $V_{ref}$  serà més petit i mantindrà l'amplificador amb saturació negativa. En el moment que la tensió de la pila baixi degut a que s'està esgotant, aquesta tensió serà inferior a la de referència, tanmateix l'amplificador operacional estarà en saturació positiva. D'aquesta manera arribarà la tensió suficient a la base del transistor connectat a la sortida del amplificador operacional activant el circuit i deixant passar el corrent cap al LED vermell que emetrà llum.

Un cop dissenyat el sistema ho hem provat amb una font continua disponible en el laboratori, on hem simulat la reducció de tensió que tindria la pila. Aquest sistema ens assegura un correcte funcionament de l'instrument de mesura.

#### 4.2.2 Esquemàtic definitiu del circuit

Un cop tenim definits tots els elements electrònics necessaris del circuit s'ha de realitzar un esquema de connexions amb tots ells per posteriorment poder dissenyar la PCB.

Per a realitzar els esquemàtics hem utilitzat el programa Orcad de l'empresa Cadense. L'Orcad és un programa àmpliament conegut pel disseny de circuits electrònics. Consta de dos blocs bàsics: Una eina per la simulació del comportament de circuits electrònics (PSPICE) i una eina pel disseny de plaques de circuit imprès, PCB, (Layout). Com a pas previ per a la simulació del circuit i el disseny de la PCB és necessari realitzar la captura de l'esquema del circuit que es vol analitzar a partir de l'eina Capture.

Hi ha altres programes pel disseny electrònic com per exemple L'Altium. Hem elegit l'Orcad perquè teníem el programari i disposàvem de tutorials de funcionament.

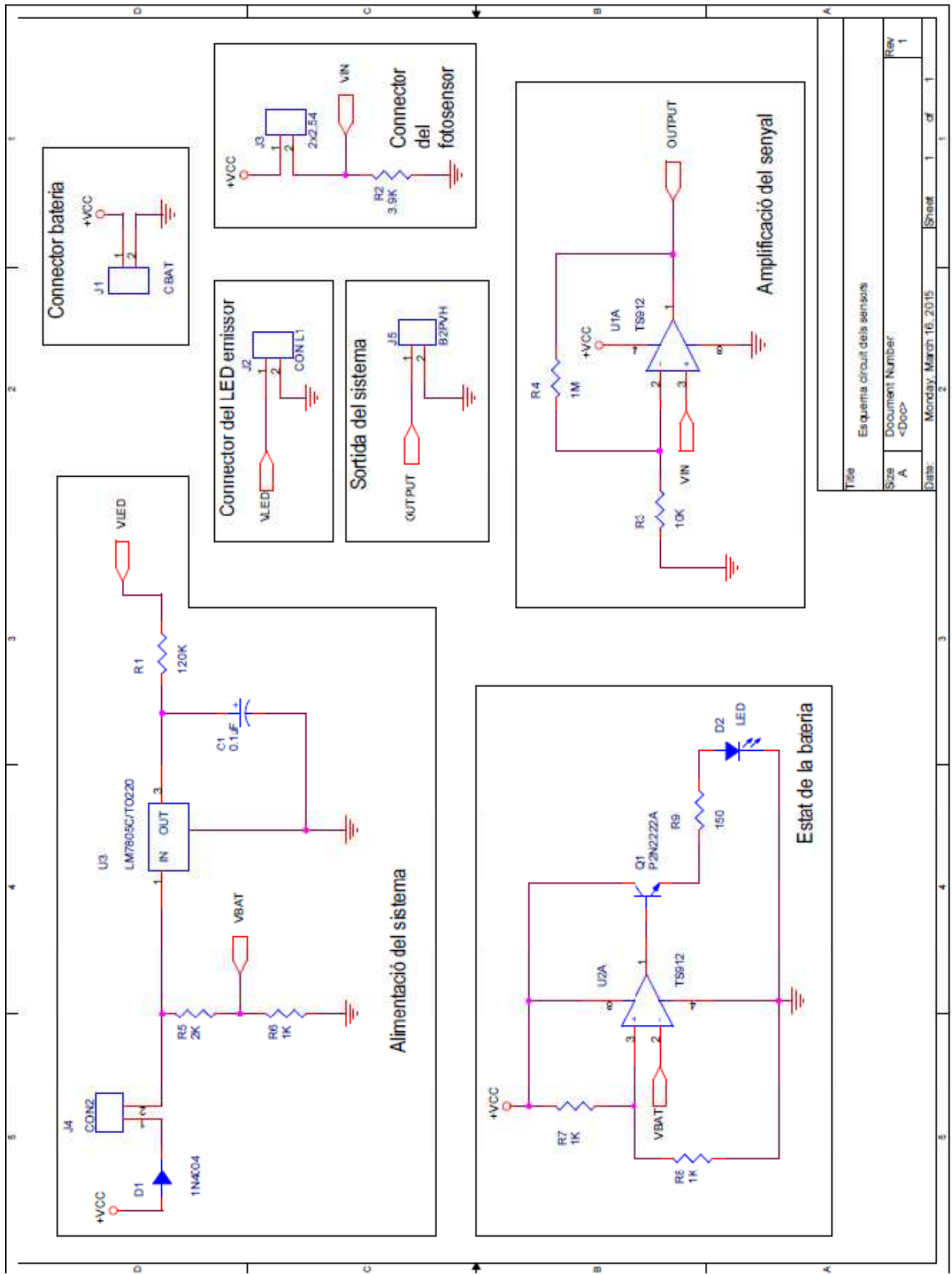
Un cop tenim el programari i hem realitzat proves de funcionament, hem introduït tots els elements necessaris pel nostre prototip, descrits en els apartats anteriors. Un cop

introduïts tots els elements disponibles a la base de dades del programa hem creat els nous esquemàtics pels elements que no estaven a la base de dades. Aquests elements són:

- Els connectors.
- Regulador de tensió.
- Amplificadors operacionals.

Per poder realitzar el seu esquema el que hem fet és elegir un element que si que estes a la base de dades i hem introduït els pins que necessitava. Amb aquest procediment hem pogut dibuixar l'esquemàtic dels elements nous.

Per poder veure de forma general tot l'esquemàtic amb tots els apartats que el componen, hem introduït un plànol amb totes les parts identificades segons el grup que pertanyen.



Title		Esquema circuit dels sensors	
Size	A	Document Number	<Doc>
Date	Monday, March 16, 2015	Sheet	1 of 1
Rev	1		

### 4.3 Disseny de la placa PCB

Un cop tenim dissenyat l'esquemàtic, toca connectar els components elèctricament entre ells per relacionar-los mecànicament i per formar un conjunt més o menys rígid. Per tal de poder-ho realitzar, dissenyarem una placa de circuit imprès (PCB).

Pel nostre prototip utilitzaríem una PCB de dues cares. El material de suport de la placa, definirem que fos FR4, un tipus de fibra de vidre, i l'element conductor que sigui coure. La placa pel sistema final pot ser fabricada amb diferents tècniques, depenent de la quantitat i el preu, tot i això els prototips inicials els faríem amb la tècnica del fresant sobre la placa directament.

En el disseny d'aquesta PCB, destaquem la introducció de connectors en els llocs claus del circuit, definint llocs claus, com el lloc on ha d'anar el LED emissor, el fotodíode receptor, l'interruptor, la pila i la sortida del sistema. Hem fet aquest disseny per poder substituir els dispositius anteriors quan sigui necessari, sense canviar la placa i inclús en noves versions amb la necessitat de dispositius diferents també es puguin adaptar sense haver de dissenyar tota la placa de nou. Per altra banda es fa la connexió a partir de cables on es puguin conduir fins la posició exacta on es volen els dispositius.

Tot i que en les proves de funcionament del prototip, les hem realitzat amb elements THT, per fer un prototip final utilitzarem elements SMD, de muntatge superficial, per tal que la fabricació pugui ser automatitzada, per reducció d'espai i millora del rendiment.

#### 4.3.1 Procediment de confecció de la PCB

Per a fer el disseny i la distribució de les pistes, que uniran els diferents elements, utilitzarem l'eina Layout de programari Orcad com en el cas dels esquemàtics. Abans d'això hem de carregar l'esquemàtic anteriorment dissenyat al Layout, segons ens indica el tutorial.

Un cop carregat l'esquemàtic hem de buscar l'encapsulat que tenen els elements de forma física per tal de poder introduir-los i fer una distribució de tots els elements dins de la placa. Els encapsulats utilitzats són els corresponents a muntatge SMD, alguns ja els tenim definits en la llibreria interna de l'Orcad, d'altres els hem de crear de nou a partir de la informació que ens proporciona el full de característiques corresponent al element.

Un cop definit l'encapsulat de tots els elements hem de fer una distribució d'ells dins de la placa. L'ordre dels elements dins de la placa és decisiu per facilitar després el traçat de pistes i pel rendiment definitiu de la placa.

Al introduir elements en format SMD, hem pogut reduir les dimensions de la placa fins aconseguir una placa rectangular de 50 x 35 mm, adaptable al format que li volíem donar a l'instrument. La subjecció de la placa no esta ven definida, però en el cas que vagi fixada amb cargols a la base, hem pensat en la perforació de la mateixa pels 2 vèrtex diagonals.

Per la distribució de tots els connectors dels elements, com són el de la pila, el l'interruptor, el LED emissor i el fotodíode hem intentat posicionar-los en els punts pròxims on han d'anar i el màxim al exterior de la placa per millorar-ne la connexió. La posició exacta no necessita molta precisió ja que amb els cables de connexió podrem fer la aproximació que sigui necessària.

Per prevenir el circuit dels efectes de la temperatura hem posicionat els elements amb la temperatura més elevada, com és el regulador de tensió, més al exterior possible, per

facilitar-ne la refrigeració i si s'escau adjuntar-hi un dissipador d'alumini en el cas que treballi a tensions més elevades.

Finalment la distribució dels elements com els resistors, s'ha procurat posar-los pròxims a les entrades dels amplificadors operacionals on es necessiten per evitar creuaments en les futures pistes.

Un cop s'han introduït tots els elements i s'han ordenat tal i com hem descrit s'ha procedit a realitzar el traçat de pistes que connectaran els elements entre ells. Per a fer una correcta distribució hem començat traçant les línies de potència i les de GND amb un gruix d'aproximadament 0,8 mm. Pel que fa les línies de senyal i connexió entre les entrades i sortides del operacional s'han reduït els gruixos fins a 0,6 mm i inclús en alguns casos a 0,2 mm per facilitar les connexions. En la *Figura 45* podem veure la distribució dels elements i el traçat de pistes diferenciant-les amb color blau clar per a pistes de la part superior de la placa, on hi ha els elements, i en color vermell senyalant les pistes que passarien per la part inferior de la placa per sota de la capa dels elements.

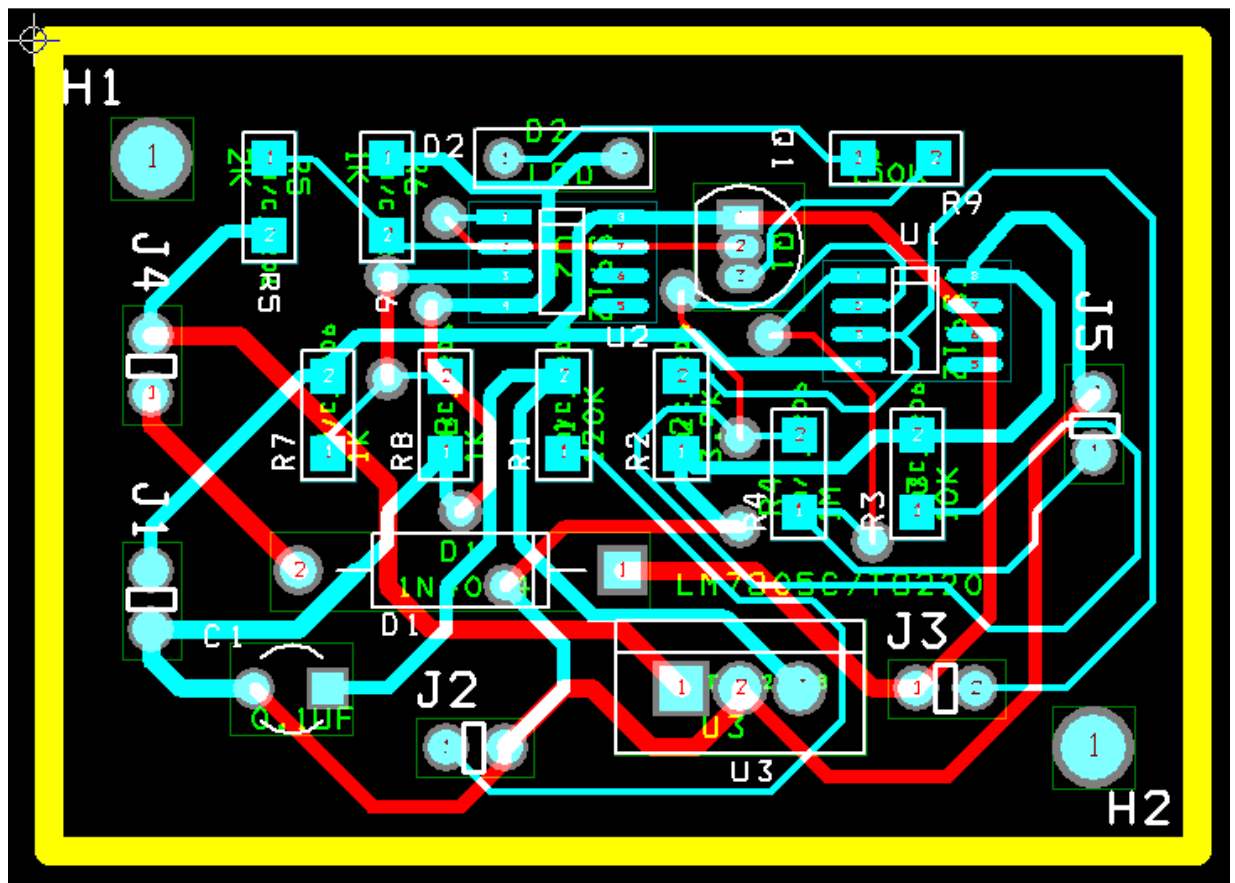
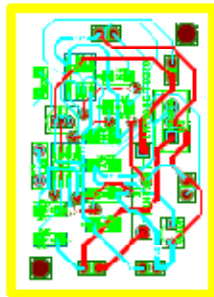


Figura 45. Layout de l'Orcad del projecte per veure el traçat de les pistes.



DRILL CHART				
SYM	DIAM	TOL	QTY	NOTE
+	0.711 mm		11	
x	0.787 mm		7	
o	0.985 mm		10	
□	1.047 mm		2	
■	1.372 mm		3	
⊕	2.794 mm		2	
TOTAL			35	

## 4.4 Pressupost

En aquest pressupost pretenem mostrar el cost aproximat que tindria la realització del projecte, des del plantejament, disseny i confecció d'un prototip. Es veuran representats els materials utilitzats com la mà d'obra invertida.

### 4.4.1 Preus unitaris

Codi	Ud	Descripció	Preu €	
<b>RH001</b>	h	Enginyer electrònic Industrial i Automàtic.	26,00	VINT-I-SIS EUROS
<b>RH002</b>	h	Tècnic de laboratori d'electrònica.	15,00	QUINZE EUROS
<b>HW001</b>	u	Pila alcalina de 9 V.	4,16	QUATRE EUROS amb QUINZE CÈNTIMS
<b>HW002</b>	u	LED de llum UV a una longitud d'ona de 365nm i 3W de consum.	12,50	VINT-I-QUATRE EUROS amb CINQUANTA CÈNTIMS
<b>HW003</b>	u	Fotodíode de llum ultraviolada 365nm.	15,00	QUINZE EUROS
<b>HW004</b>	u	Resistència SMD.	0,01	UN CÈNTIM
<b>HW005</b>	u	Amplificador operacional TS922IN.	1,40	UN EURO amb QUARANTA CÈNTIMS
<b>HW006</b>	u	Transistor NPN.	0,18	DIVUIT CÈNTIMS
<b>HW007</b>	u	Condensador electrolític 0,1µF 35 V.	0,23	VINT-I-TRES CÈNTIMS
<b>HW008</b>	u	Díode rectificador.	0,04	QUATRE CÈNTIMS
<b>HW009</b>	u	Regulador de tensió de 5 V.	0,58	CINQUANTA VUIT CÈNTIMS
<b>HW010</b>	u	Dissipador d'alumini (360-8770).	1,39	UN EURO amb TRENTA NOU CÈNTIMS
<b>HW012</b>	u	Interruptor de palanca.	2,05	DOS EUROS amb CINC CÈNTIMS
<b>HW013</b>	u	LED de llum vermella comú.	0,19	DINOU CÈNTIMS
<b>HW014</b>	u	Connector mascle B2P-VH del fabricant JST.	0,10	DEU CÈNTIMS
<b>HW015</b>	u	Connector femella VHR-2N del fabricant JST.	0,15	QUINZE CÈNTIMS
<b>HW016</b>	u	Accessoris del circuit: Estany de soldadura, petits cables de proves...	7,00	SET EUROS
<b>HW017</b>	u	Prototip de placa de circuit imprès.	50,00	CINQUANTA EUROS
<b>HW018</b>	u	Material per la construcció de la cambra fosca que allotja l'emissor i el receptor.	5,00	CINC EUROS
<b>HW019</b>	u	Filtres fotogràfics de diferents absorbàncies.	9,50	NOU EUROS amb CINQUANTA CÈNTIMS
<b>HW020</b>	u	Accessoris de laboratori com provetes, guants, pipetes, colorant.	3,00	TRES EUROS

#### 4.4.2 Preus descompostos

##### Capítol 01: Estudis previs del sistema

Codi	Quantitat	ud	Descripció	Preu	Subtotal	Import
<b>TP001</b>			<b>Plantejament i organització del projecte.</b> Trobar l'equip de treball organització i distribució de les tasques a realitzar.			
RH001	2,00	h	Enginyer electrònic Industrial i Automàtic gestionant i organitzant les tasques a realitzar.	26,00	52,00	
					Suma de partida	52,00
					Costs indirectes.....2%	1,04
					Total partida	<b>53,40 €</b>
<b>Puja el preu total a la quantitat de CINQUANTA-TRES EUROS amb QUATRE CÈNTIMS.</b>						

Codi	Quantitat	ud	Descripció	Preu	Subtotal	Import
<b>TP002</b>			<b>Recopilació d'informació.</b> Fa referència a buscar tota la informació necessària per a entendre que es fa en un assaig enzimàtic i quines són les necessitats físiques i tècniques que necessitaria l'instrument de mesura a dissenyar.			
RH001	15,00	h	Enginyer electrònic Industrial i Automàtic recopilant informació sobre els assaig enzimàtics, subproductes derivats i raonaments físics.	26,00	390,00	
					Suma de partida	390,00
					Costs indirectes.....2%	7,80
					Total partida	<b>397,80 €</b>
<b>Puja el preu total a la quantitat de TRES-CENTS NORANTA-SET EUROS amb VUITANTA CÈNTIMS.</b>						

Codi	Quantitat	ud	Descripció	Preu	Subtotal	Import
------	-----------	----	------------	------	----------	--------

<b>TP003</b>			<b>Càlcul i disseny del sistema bàsic.</b> Fa referència a buscar la millor solució per trobar un sistema optomètric electrònic sensible capaç d'aportar una bona resolució a l'instrument final.			
RH001	14,00	h	Enginyer electrònic industrial i Automàtic buscant les solucions electròniques per trobar solució al sistema.	26,00	364,00	
				Suma de partida		364,00
				Costs indirectes.....2%		7,28
				Total partida		<b>371,28 €</b>
<b>Puja el preu total a la quantitat de TRES-CENTS SETANTA-UN EUROS amb VINT-I-VUIT CÈNTIMS.</b>						

Capítol 02: Disseny i muntatge del prototip

Codi	Quantitat	ud	Descripció	Preu	Subtotal	Import
<b>TP004</b>			<b>Construcció del dispositiu de lectures de mostres.</b> Construcció del prototip inicial per a poder realitzar els tests de validació del prototip.			
RH001	2,00	h	Enginyer electrònic Industrial Automàtic.	26,00	52,00	
RH002	8,00	h	Tècnic de laboratori.	15,00	120,00	
HW002	1,00	u	LED de llum UV a una longitud d'ona de 365nm i 3W de consum.	12,50	12,50	
HW003	1,00	u	Fotodíode de llum ultraviolada 365nm.	15,00	15,00	
HW018	1,00	u	Accessoris del circuit: Estany de soldadura, petits cables de proves...	7,00	7,00	
HW019	1,00	u	Material per la construcció de la cambra fosca.	5,00	5,00	
			Suma de partida			211,50
			Costs indirectes.....2%			4,23
			<b>Total partida</b>			<b>215,73 €</b>
<b>Puja el preu total a la quantitat de DOS-CENTS QUINZE EUROS amb SETANTA-TRES CÈNTIMS.</b>						

Codi	Quantitat	ud	Descripció	Preu	Subtotal	Import
<b>TP005</b>			<b>Experiments i assaigs amb els prototips dissenyats.</b> Implementació i construcció dels circuits en la placa de proves per comprovar el funcionament dels components i verificació dels resultats que ens aporta.			
RH001	22,00	h	Enginyer electrònic Industrial i Automàtic	26,00	572,00	
RH002	8,00	h	Tècnic de laboratori	15,00	120,00	
HW001	1,00	u	Pila alcalina de 9 V	4,16	4,16	
HW004	9,00	u	Resistència SMD	0,01	0,09	
HW005	3,00	u	Amplificador operacional TS922IN	1,40	4,20	
HW006	1,00	u	Transistor NPN	0,18	0,18	
HW007	1,00	u	Condensador electrolític 0,1µF 35 V	0,23	0,23	
HW008	1,00	u	Díode rectificador	0,04	0,04	
HW009	1,00	u	Regulador de tensió de 5 V	0,58	0,58	
HW010	1,00	u	Dissipador d'alumini (360-8770)	1,39	1,39	
HW012	1,00	u	Interruptor de palanca	2,05	2,05	
HW013	1,00	u	LED de llum vermella comú	0,19	0,19	
HW020	1,00	u	Accessoris de laboratori com provetes, guants, pipetes, colorant	3,00	3,00	
				Suma de partida		708,11
				Costs indirectes.....2%		14,16
				<b>Total partida</b>		<b>722,27 €</b>
<b>Puja el preu a la quantitat de SET-CENTS VINT-I-DOS EUROS amb VINT-I-SET CÈNTIMS.</b>						

Codi	Quantitat	ud	Descripció	Preu	Subtotal	Import
<b>TP006</b>			<b>Disseny i construcció de la placa de circuit imprès.</b> Realització dels esquemàtics amb el programari adequat, organització i distribució dels elements dins la placa, i construcció de la mateixa soldant els components.			
RH001	9,00	h	Enginyer electrònic Industrial i Automàtic	26,00	234,00	
RH002	8,00	h	Tècnic de laboratori	15,00	120,00	
HW014	5,00	u	Connector mascle B2P-VH del fabricant JST.	0,10	0,50	
HW015	5,00	u	Connector femella VHR-2N del fabricant JST.	0,15	0,75	
HW017	2,00	u	Prototip de placa de circuit imprès	50,00	100,00	
				Suma de partida		455,25
				Costs indirectes.....2%		9,11
				<b>Total partida</b>		<b>464,36 €</b>
<b>Puja el preu total a la quantitat de QUATRE-CENTS SEIXANTA-QUATRE EUROS amb TRENTA-SIS CÈNTIMS.</b>						

Capítol 03: Documentació

Codi	Quan.	ud	Descripció	Preu	Subtotal	Import
<b>TP007</b>			<b>Documentació.</b> Documentar de forma escrita tota la informació del procés de disseny, els resultats finals de les mostres i la viabilitat del prototip en una memòria.			
RH001	60,00	h	Enginyer electrònic Industrial i Automàtic	26,00	1560,00	
				Suma de partida		1560,00
				Costs indirectes.....2%		31,20
				<b>Total partida</b>		<b>1591,20 €</b>
<b>Puja el preu total a la quantitat de MIL CINQ-CENTS NORANTA-UN EUROS amb VINT CÈNTIMS.</b>						

#### 4.4.3 Resum pressupost per tasques

Codi	Descripció	Preu	Import
<b>Capítol 01 Estudis previs del sistema</b>			
TP001	<b>Plantejament i organització del projecte.</b> Trobar el equip de treball organització i distribució de les tasques i a realitzar.	53,40	53,40
TP002	<b>Recopilació d'informació.</b> Fa referència a la búsqueda de tota la informació necessària per a entendre que es fa en un assaig enzimàtic i quines són les necessitats físiques i tècniques que necessitaria e l'instrument de mesura a dissenyar.	397,80	397,80
TP003	<b>Càlcul i disseny del sistema bàsic.</b> Fa referència a la búsqueda de la millor solució per trobar un sistema optomètric electrònic sensible capaç d'aportar una bona resolució a l'instrument final.	371,28	371,28
<b>Total del capítol 01: Estudis previs del sistema</b>			<b>822,48 €</b>
<b>Capítol 02: Disseny i muntatge del prototip</b>			
TP004	<b>Construcció del dispositiu de lectures de mostres.</b> Construcció del prototip inicial per a poder realitzar els tests de validació del prototip.	215,73	215,73
TP005	<b>Experiments i assaigs amb els prototips dissenyats.</b> Implementació i construcció dels circuits en placa de proves per comprovar el funcionament dels components i verificació dels resultats que ens aporta.	572,00	572,00

<b>TP006</b>	<b>Disseny i construcció de la placa de circuit imprès.</b> Realització dels esquemàtics amb el programari adequat, organització i distribució dels elements dins la placa, i construcció de la mateixa soldant els components.	464,36	464,36
<b>Total del capítol 02: Disseny i muntatge del prototip</b>			<b>1252,09 €</b>

### **Capítol 03: Documentació**

---

<b>TP007</b>	<b>Documentació.</b> Documentar de forma escrita tota la informació del procés de disseny, els resultats finals de les mostres i la viabilitat del prototip en una memòria.	1591,20	1591,20
<b>Total del capítol 03: Documentació</b>			<b>1591,20 €</b>

#### 4.4.4 Resum del pressupost total

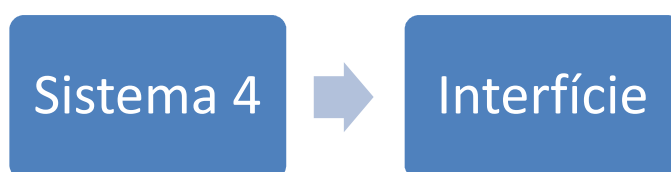
Capítol	Resum	Import	%
C 01	Estudis previs del sistema	822,48	22,44
C 02	Disseny i muntatge del prototip	1252,09	34,16
C 03	Documentació	1591,20	43,41
<b>Total execució i material</b>		<b>3.665,77 €</b>	
13,00 %	Despeses generals	476,55	
6,00 %	Benefici industrial	219,95	
<b>Total pressupost contractat</b>		<b>4.362,27 €</b>	
21,00 %	IVA	916,08	
<b>Total pressupost general</b>		<b>5278,38 €</b>	

**Puja el pressupost general a la quantitat de CINCO MIL DOS-CENTS SETANTA-VUIT EUROS amb TRENTA-VUIT CÈNTIMS.**

## 5 Millores del sistema

En els apartats anteriors hem desenvolupat un sistema capaç d'obtenir una resposta en forma de variable electrònica, una tensió, que és proporcional a l'absorbància que té una mostra amb un contingut de compost dissolt. Aquest primer disseny ens aporta un prototip que realitza el funcionament bàsic d'adquisició de dades, però com tot dispositiu electrònic sempre està en evolució i s'han de plantejar noves millores per tal que en les futures actualitzacions del producte es reparin els errors i es millorin les prestacions.

En la *Figura 46* podem veure el diagrama de blocs que podria conformar l'estat actual del nostre sistema:



**Figura 46.** Esquema de l'adaptació del sistema 4.

**Sistema 4:** Aquest bloc inclouria tots els sistemes definits en els apartats de desenvolupament. Del sistema 4 en sortiria una tensió proporcional a l'absorbància que té una mostra després de realitzar un assaig enzimàtic.

**Interfície:** En aquest apartat s'inclourien totes les millores i modificacions del sistema que aportarien noves prestacions al prototip d'instrument de mesura. Aquestes prestacions van enfocades a l'interfície entre l'usuari i l'instrument.

Moltes d'aquestes aplicacions es basen en aportar la informació que ens proporciona l'instrument de manera més clara i entenedora a l'usuari que manipuli l'instrument de mesura. Concretament són sistemes que ens traduiran el senyal electrònic del sensor en la informació que estem buscant com l'absorbància o la transmitància o inclús calcular directament la concentració del compost que es busca. Per poder realitzar aquestes millores necessitem hardware especialitzat que contingui un microprocessador capaç de realitzar càlculs per a obtenir aquesta informació. També ha de poder controlar una pantalla LCD per mostrar valors o electrònica extra per comunicar l'instrument de mesura amb un altre dispositiu com és un ordinador o un dispositiu mòbil.

Veient la necessitat que hi ha de comunicar el nostre sensor amb un dispositiu capaç de tractar les dades que ens proporciona, el següent pas que toca realitzar és comprovar que el sistema dissenyat, sistema 4, es pot acoblar en un dispositiu integrat que contingui un microprocessador per tal de poder implementar les futures millores. Per poder-ho fer hem pensat utilitzar un sistema que integra el microprocessador i l'electrònica adjunta, molt usat en el camp de l'educació i del desenvolupament. El dispositiu s'anomena Arduino. Aquesta aplicació ens permetrà realitzar càlculs concrets, connectar el sensor amb altres dispositius, comprovar-ne el funcionament i veure-l'hi les mancances. Tot això per tal de millorar-les i que el sistema pugui seguir evolucionant.

## 5.1 Arduino

Necessitem un sistema que ens permeti realitzar les simulacions d'adaptació del sistema desenvolupat per tal de comprovar el seu funcionament. L'Arduino és un sistema integrat que en permetrà realitzar aquest tipus de comprovacions.

L'objectiu principal és canviar el voltímetre, amb el qual visualitzàvem la resposta de l'instrument en forma de tensió, per l'Arduino. Es tracta de digitalitzar el senyal analògic de tensió que ens proporciona el sensor per tal d'obtenir la mateixa resposta en Volts.

### 5.1.1 Descripció del dispositiu

L'Arduino és una plataforma hardware lliure, basada en una placa electrònica amb un microprocessador i un entorn de desenvolupament, dissenyada per facilitar l'ús de l'electrònica en multitud de projectes multidisciplinaris.

El hardware consisteix en una placa electrònica amb un microprocessador Atmel AVR (família de microprocessadors RISC del fabricant nord americà Atmel) i varis ports d'entrada/sortida analògics i digitals que ens permeten obtenir informació del entorn i controlar multitud d'actuadors com llums i motors, per desenvolupar projectes interactius i autònoms.

El software consisteix en un entorn que implementa el llenguatge de programació propi basat en el llenguatge de programació d'alt nivell *Processing*<sup>7</sup> que és similar al C++ i el carregador d'arrencada que és executat en la placa.

Els microprocessadors més utilitzats són l'Atmega168, l'Atmega328, Atmega1280 i Atmega8, degut a la seva senzillesa i baix cost permetent el desenvolupament de múltiples dissenys. Podem programar el microprocessador mitjançant el llenguatge de programació i l'entorn de desenvolupament per a realitzar les diferents opcions que vulguem. També pot ser connectat a software tal com Adobe Flash, Processing, Max/MSP, Pure Data.

L'Arduino té multitud de models amb diferents característiques enfocat a varies aplicacions com l'Arduino UNO, Arduino Mega, Arduino Pro, Arduino Ethernet, Arduino Fio, entre molts altres models. Podem adquirir la placa que el conforma, comprant el model directament al proveïdor oficial d'Arduino, o muntant-la a mà ja que podem disposar de la llista de components i esquemàtics electrònics. Pel que fa l'entorn de desenvolupament lliure es pot integrar descarregant-lo gratuïtament de la pagina del mateix proveïdor.

### 5.1.2 Plaques d'Arduino

L'empresa proveïdora ens ofereix molts dissenys de plaques d'Arduino, per a diferents accions. De totes aquestes opcions, pel projecte, ens hem decantat per utilitzar la placa Arduino UNO. Aquesta és una petita placa de 50x75 mm que conté un microprocessador Atmega328, amb les entrades i sortides analògiques disposades en diferents pins. També inclou electrònica diversa com reguladors de tensió, condensadors per tal de controlar l'alimentació i la comunicació a través de USB. A través d'aquesta connexió ens permet comunicar el microprocessador amb el PC per tal de programar-lo i utilitzar-lo. L'alimentació pot ser a través del propi USB o a partir d'una alimentació externa.

---

<sup>7</sup> Llenguatge de programació i entorn de desenvolupament integrat de codi obert basat en Java, de fàcil utilització i que serveix com a medi per l'ensenyament i producció de projectes multimèdia i interactius de disseny digital.

En la imatge de la *Figura 47* podem veure la vista frontal de la placa d'Arduino UNO amb la distribució dels diferents elements que la componen.



**Figura 47.** Imatge frontal de la placa d'Arduino UNO

### Característiques de la placa d'Arduino UNO

En la *Taula 27* podem veure les especificacions generals.

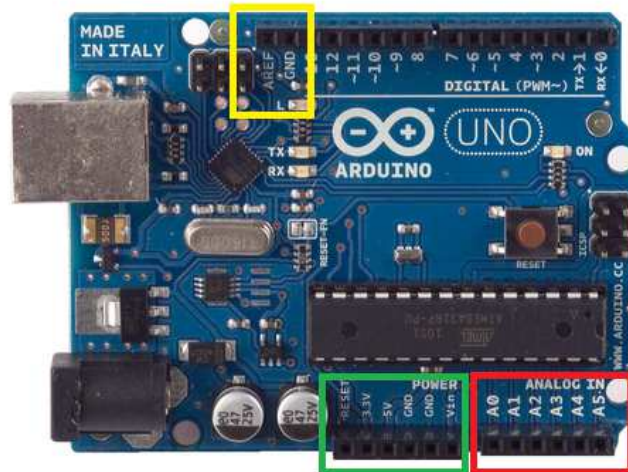
<b>Microprocessador</b>	ATmega 328
<b>Voltatge d'entrada extern</b>	7-12 V
<b>Alimentació per USB</b>	Ok
<b>Voltatge del sistema</b>	5 V
<b>Freqüència de rellotge</b>	16 MHz
<b>Nombre d'entrades i sortides digitals</b>	14
<b>Entrades analògiques</b>	6
<b>PWM</b>	6
<b>UART</b>	1
<b>Memòria Flash</b>	32 kb
<b>Carregador</b>	Optiboot
<b>Interfase de programació</b>	USB via ATmega 8U2

**Taula 27.** Especificacions d'un Arduino UNO.

Apart de les especificacions tècniques generals, hem localitzat les característiques d'elements puntuals com pot ser el funcionament del ADC (resolució, temps de conversió, rang de treball), del full de característiques que ens proporciona el fabricant. Per altra banda com l'usuari es pot dissenyar les seves plaques, el fabricant subministra l'esquemàtic del circuit, fet que ens facilita entendre la distribució i connexió dels elements.

## Pins i connexions específiques

Durant la descripció i en la *Figura 48*, hem pogut veure que hi ha molts pins de connexió, que ens serveixen d'entrada o sortida per adquirir dades o per controlar qualsevol acció que requereixi el procés. En el desenvolupament de la nostra prova no utilitzem tots els pins de connexió. Per tant, definirem els que utilitzem. En la *Figura 49* podem veure la mateixa imatge que la placa de la *Figura 48*, però amb els pins que utilitzem seleccionats en diferents colors.



**Figura 48.** Placa Arduino UNO amb la selecció de pins.

En el rectangle de color vermell, hi ha els pins que són la connexió a les entrades analògiques. Aquests ens permeten introduir un valor analògic extern. En el nostre cas utilitzarem una d'aquestes entrades (A3) per introduir el valor analògic del nostre instrument de mesura. Posteriorment l'ADC del microprocessador el podrà digitalitzar.

En el rectangle verd, hi ha tots els pins de connexió referents a alimentacions, GND, resets, entre altres. El microprocessador ja està alimentat, doncs aquests pins són per poder-los utilitzar en l'aplicació que es vol controlar. En el nostre cas, utilitzem el pin de GND, connectant-lo en paral·lel al de l'instrument per tenir la mateixa referència. Per altra banda també es pot utilitzar el pin de 3 V o de 5 V, per fer les referències de tensió que posteriorment comentarem.

En el rectangle de color groc, hi ha un pin que anomenem AREF. Aquest pin ens serveix per introduir una referència externa de tensió per definir el màxim per l'ADC del microprocessador. Per defecte la referència que utilitza l'ADC, és la tensió d'alimentació del microprocessador que és de 5 V. La tensió de referència introduïda, en cap cas ha de superar el màxim de 5 V, i en el moment de realitzar el software, s'ha d'indicar a partir d'una funció específica que li diu al processador el tipus de referència que tindrà.

## Entorn de treball

Les petites proves que es faran de codi han estat realitzades amb una aplicació de software especial. Aquest software que ens el proporciona la pròpia empresa de l'Arduino. En la mateixa pàgina web del producte podem descarregar-lo. Aquest programa ens permet realitzar les proves de codi, verificar-lo, compilar-lo i comunicar-se amb la placa a través del USB per tal de fer-ne una simulació real.

Per poder desenvolupar el codi del programa es requereix estudiar les diferents funcions que existeixen en l'àmbit de l'Arduino, ja que utilitza un codi específic. Aquest no és un codi complex, ja que les funcions són a alt nivell i classificades en blocs d'ús. Són similars al llenguatge de programació C++. Tot i això, requereix un temps per entendre-ho i poder-ho programar correctament. El sistema mostra moltes possibilitats, degut a la seva versatilitat, però simplement utilitzarem les que requereixi el petit codi que volem desenvolupar.

### **5.2 Característiques de la medició analògica amb l'Arduino**

Tal i com hem vist, la placa d'Arduino ens pot aportar unes característiques molt bones al nostre sistema sensor, donant-nos eines per treure'n el màxim rendiment possible. Una de les feines que hem de fer amb la placa del sistema és realitzar una mesura de tensió analògica i convertir-la en un valor digital. Per tal d'adaptar el sistema desenvolupat a una placa amb aquestes característiques s'han d'estudiar els requeriments bàsics per a fer aquesta conversió, trobant la millor solució.

El que farà l'Arduino és prendre un senyal analògic i, a partir de l'ADC del microprocessador, assignar-li un valor de forma digital, quantificar-lo. Per a fer aquesta transformació, s'han de determinar les característiques que requereix aquesta conversió analògica - digital per fer-la correctament. Abans de veure les adaptacions necessàries del sistema, veurem els diferents punts a tenir en compte a l'hora de fer una conversió d'aquest tipus. També analitzarem com es fa amb l'ADC del microprocessador que tenim. Ho dividirem en tres parts:

- Resolució del convertidor
- Temps de conversió
- Rang de treball

#### Resolució del convertidor

El procediment de passar un senyal analògic a un senyal digital s'anomena procés de quantificació. Aquest procés consisteix en convertir un senyal, que per naturalesa és continu i sense talls (senyal analògic), a una dada discreta que solament pot prendre uns certs valors. Aquesta quantitat de valors discrets en els que un ADC pot traduir un senyal analògic a un digital es coneix com a resolució. Aquesta resolució normalment és mesurada en base al número de bits que l'ADC té a la seva sortida. Aquest número de bits representa la quantitat màxima de valors discrets, o de passos, que pot tenir un ADC. La resolució necessària depèn molt de l'aplicació que es vol realitzar. Hi ha sistemes que amb un convertidor ADC de 8 bits ja és suficient i d'altres que en necessiten molts més.

El convertidor ADC que disposem, té una resolució de 10 bits. Aquest convertidor pot tenir  $2^{10} = 1024$  valors diferents a la seva sortida. El que això vol dir, és que els voltatges analògics que obtinguem de l'instrument, al ser convertits, tindran una resolució màxima en tensió (considerant una tensió màxima de 5 V a la sortida) de  $5/1024 = 4,88 \times 10^{-3} V$ . Aquesta serà la diferència mínima de tensió que hi pot haver entre dos valors digitals mesurats.

Per adquirir les dades de tensió del nostre instrument de mesura no necessitem una resolució molt elevada, ja que volem obtenir un senyal de tensió continu. Així que amb el convertidor AD disponible en l'Arduino UNO, que és de 10 bits, ens resulta més que suficient. En aquest cas ens faltaria una sèrie d'adaptacions hardware per filtrar només la continua i millorar la resposta del senyal de sortida per facilitar que l'ADC ens porti el senyal continu correctament.

### Temps de conversió

La conversió d'un senyal analògic al seu equivalent en valor digital no és instantani, això significa que el convertidor tarda un cert temps (encara que sol ser molt petit) a realitzar el procés de conversió. Aquest fet ens limita el nombre de conversions que pot realitzar un ADC en una unitat de temps. Aquest nombre de conversions per unitat de temps es coneix com a freqüència de mostreig.

Podem entendre aquest paràmetre doncs, com la precisió del convertidor en el temps. Si tenim un ADC amb un temps de conversió més elevat, serà més lent i obtindrà menys mostres de valors per unitat de temps. La freqüència de mostreig màxima d'un ADC es calcula a partir de l'inversa del temps de conversió.

Igual que el paràmetre de la resolució, no podem definir que una freqüència de mostreig sigui bona o dolenta depèn molt de l'aplicació i concretament de com de ràpid canviï el valor analògic que volem mesurar. Per exemple per a mesurar la temperatura ambiental, els valors a mesurar no canviarà fins passats uns minuts per tan un ADC que tardi un segon en realitzar la conversió no donarà cap problema. Si per contra volem convertir a digital un senyal de so, un segon de temps de conversió és massa per fer la conversió i poder capturar les freqüències del so.

Una forma simple d'elegir un ADC és que la freqüència de mostreig sigui com a mínim el doble de la freqüència del senyal que volem convertir (Aquesta relació la podem obtenir del teorema de mostreig de Nyquist-Shannon). Si per exemple es vol mesurar un senyal que oscil·la a 60 Hz, necessitem un ADC que pugui prendre un mínim de 120 mostres per segon.

Segons el full de característiques del microprocessador ATmega 328P, el que té l'Arduino UNO, el temps de conversió varia entre 13 i 260  $\mu$ s. Això implica una freqüència de mostreig teòrica entre 3,8 kHz i 76,9 kHz. Tot i això sabem que el microprocessador no és tant ràpid per assolir aquesta freqüència de mostreig teòrica. Amb aquest valors veiem que amb aquesta freqüència de conversió del ADC disponible, encara que sigui més petita, pot convertir el senyal que ens aporta en nostre instrument sense cap problema ja que el senyal analògic que volem analitzar no varia tan ràpidament. En les adaptacions de hardware i software tindrem en compte aquesta freqüència ja que ens ajudarà a analitzar el senyal de forma correcta.

### Rang de treball

La tercera característica que hem de tenir en compte en el moment d'elegir un ADC és el rang de voltatges/corrents que accepta a la seva entrada. Això és imprescindible per evitar malmetre l'ADC. L'única forma de saber quin és el rang de l'ADC és consultant el full de característiques del microprocessador. Allí trobarem els rangs dels valors de tensió i corrent acceptats a la entrada i les toleràncies.

En el nostre cas, amb un microprocessador ATmega 328P, el rang de tensió d'entrada de l'ADC està entre 0 V i  $V_{cc}$  (5 V). Controlar que el rang de sortida de tensió de l'instrument de mesura estigui dins d'aquest rang serà molt important per no malmetre el

microprocessador. L'instrument ens proporciona una tensió de sortida que pot variar entre un valor mínim de 0,4 V a un valor màxim de 2,7 V. Aquestes tensions s'adeqüen dins del rang de tensions que accepta e l'ADC, per tan podrà fer la conversió. El que es farà és estudiar les eines que ens dona l'Arduino per definir el millor rang de treball i obtenir-ne el màxim rendiment. En l'apartat posterior podrem observar les adaptacions.

### ***5.2.1 Adaptació del hardware***

Un cop hem vist els requeriments per a realitzar una medició analògica, convertint-la en un senyal digital, analitzarem les modificacions de hardware que haurien de tenir els prototips posteriors per tal d'adaptar-se, de la millor manera possible, als requeriments descrits i obtenir-ne el màxim rendiment. Les adaptacions van relacionades a millorar els apartats anteriors i corresponen als punts següents:

- Eliminar les interferències.
- Adequar el rang de treball de tensió.

#### Eliminar les interferències

Aquesta adaptació del hardware no solament és per millorar l'adaptació de l'instrument de mesura a l'aplicació que estem descrivint, sinó que també és necessari per prevenir les interferències en el prototip. Aquestes poden aportar errors que influïrien en la mesura que ens proporciona, per tant s'han de tenir en compte ja que l'instrument pot estar present en diferents ambients amb contaminacions electromagnètiques.

Aquest error es traduiria en que l'instrument no ens aportaria un senyal completament continu sinó, que ens proporciona un senyal amb una oscil·lació a una freqüència indeterminada degut a les interferències exteriors. Si no tenim en compte que hi pot haver aquestes fluctuacions, en la tensió de sortida, i ho analitzem amb un ADC amb la resolució anteriorment descrita, agafant diversos punts que no coincideixin, podem tenir una fluctuació del valor de tensió quan el convertim a digital, degut que el sistema fa un mostreig sobre un senyal amb oscil·lació i no un de continu que, idealment, hauria de tenir l'instrument. Aquestes fluctuacions les hem detectat sobre el dispositiu on experimentàvem, i com que és un prototip sabem que aquestes fluctuacions són molt més elevades que les que tindria l'instrument real, tot i això s'ha de definir un mètode per evitar-les.

És important reduir-ho al màxim des de la part de hardware. Tot i que a partir del software també hi ha maneres de solucionar aquest problema, com ja veurem en l'apartat següent. Per poder condicionar el senyal de sortida de l'instrument utilitzarem uns circuits electrònics anomenats filtres, els quals ens permeten el pas de senyals elèctriques en un rang de freqüències determinades i impedeix el pas de la resta.

Per poder elegir el filtre que millor ens vagi pel nostre sistema hem de determinar quina ha de ser la banda de pas i quina ha de ser la banda atenuada per poder emmarcar les freqüències que volem dels senyals que ens sortiran del instrument. Per evitar qualsevol de les interferències ambientals que hi pugui haver, definirem que la banda de pas sigui per a freqüències inferiors a 10 Hz, per evitar així possibles fluctuacions provinent de la xarxa elèctrica, atenuant les freqüències superiors. El sistema que utilitzarem és un filtre actiu passabaix. Utilitzarem un filtre actiu, en contraposició del passiu, ja que ens aporta els següents avantatges:

- Pot proporcionar-nos un guany (que podem predeterminar).
- Proporciona un aïllament a una determinada freqüència.

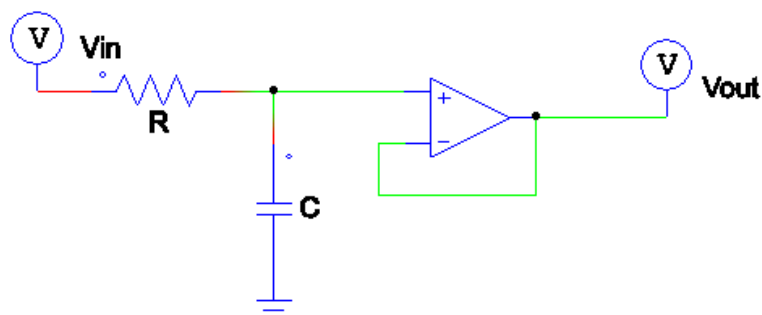
- Es poden posar varis filtres en cascada.
- Podem evitar l'ús de bobines ja que són més cares.

Aquest tipus de solució ens aportarà un aïllament de les freqüències elevades, tal i com fa un filtre passabaix passiu, però apart, podrem amplificar el senyal de sortida que en adaptacions posteriors ens pot anar molt bé. Tot i les avantatges dels filtres actius també, hem d'analitzar els desavantatges per veure si es poden adaptar al nostre sistema. Aquests són els següents:

- Estan limitats pel soroll i l'ample de banda dels amplificadors operacionals.
- Els amplificadors operacionals necessiten una alimentació.

Veient els desavantatges podem veure com ho adaptariem al nostre sistema. Com que ja utilitzem amplificadors operacionals el que es pot fer, és introduir-ne d'altres amb el mateix encapsulat, o mirar encapsulats que continguin 2 o més amplificadors operacionals dins del circuit integrat. D'aquesta manera, només caldrà introduir els elements passius com són el condensador i els resistors.

La primera opció que estudiarem és utilitzar un filtre passabaix actiu de primer ordre. Aquest tipus de filtre ens aporta la mateixa finalitat que un filtre passabaix passiu, però apart, gràcies als amplificadors operacionals, també podem obtenir una ressonància, un factor Q (el factor de qualitat, és un paràmetre que defineix la qualitat d'un sistema oscil·lant) més elevat sense l'ús de bobines i un guany en potència. Ens pot resultar efectiu per l'aplicació que li volem donar. Considerarem un filtre passabaix com el que tenim representat en la *Figura 49*.



**Figura 49.** Filtre actiu passabaix de primer ordre.

Podem veure que hi ha una part composta per un resistor i un condensador que té l'estructura general que tindria un filtre passabaix passiu, però el que el diferencia és la introducció del amplificador operacional. En aquest esquema, l'amplificador, està funcionant com a seguidor de tensió, ja que l'estructura amplificadora és de guany 1. En un filtre el més important és el valor de les bandes, fent que el valor del guany sigui irrellevant a baixes freqüències. Per tan, podem afirmar que la resposta en freqüència, havent-hi un guany o no, és equivalent. Com que no influeix si es volgués obtenir un guany en la tensió de sortida es podria crear una estructura no inversora combinat resistors amb l'amplificador operacional.

Considerant el filtre passabaix, obtenim la següent funció de transferència:

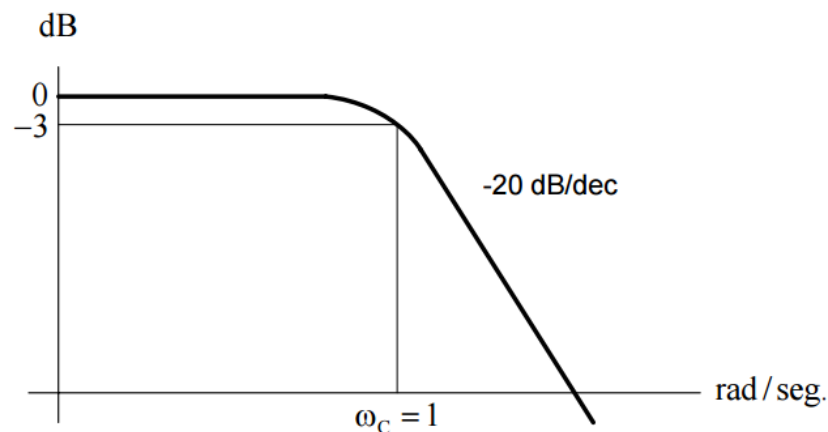
$$H(s) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{s + \frac{1}{RC}} = \frac{1}{RCs + 1} \quad (5.1)$$

Sabent que la  $\omega_t$  del filtre és  $\frac{1}{RC}$  i que aquesta la podem definir com  $\omega_t = 2 \cdot \pi \cdot f_t$ , igualant les  $\omega_t$  i aïllant la  $f_t$ , podem trobar la freqüència de tall que obtenim d'aquest filtre. Aquesta freqüència de tall determina el valor de la freqüència a partir de la qual filtraríem el senyal d'entrada. En l'equació següent ho podem veure:

$$f_t = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot RC} \quad (5.2)$$

A freqüències superiors a la de tall, l'amplitud de la sortida es reduirà amb un pendent de -20 dB/dècada, degut a que és un filtre de primer ordre on tan sols hi ha un pol. En la *Figura 50* podem veure la resposta en freqüència del mòdul de l'amplitud d'un filtre passabaix de primer ordre. Amb aquesta relació si assignem una determinada freqüència de tall, a partir de la qual volem atenuar, podem trobar els valors de R i C necessaris per dissenyar el filtre.

Per exemple en el cas del nostre filtre volem eliminar freqüències superiors a 10 Hz. Podem calcular els elements passius necessaris a partir de l'equació 5.2. Definim el valor concret del condensador a 10  $\mu$ F, per facilitar el disseny del filtre. Aïllant R de l'expressió anterior podem calcular el valor de resistència que necessitem, que és de 1591,5  $\Omega$ . Per aconseguir aquest valor seria necessari un resistor i un potenciòmetre.



**Figura 50.** Resposta en freqüència del mòdul de l'amplitud d'un filtre passabaix de primer ordre.

Aquest plantejament de filtre passabaix de primer ordre ens podria servir per a millorar la resposta del prototip. Si comparem la resposta en freqüència d'aquest amb la d'un filtre passabaix ideal, veiem que la transició de la banda de freqüències que es vol deixar passar i la que es vol eliminar no és massa abrupta, sinó que té un determinat pendent. Aquest pendent depèn directament del nombre d'ordre del filtre, que es defineix a partir del nombre de pols del sistema. Això és un fet a considerar si es vol millorar aquesta transició.

Si es vol millorar el filtre presentat, optimitzant el guany i la fase del filtre, serà necessari obtenir una funció de transferència amb dos pols complexos, és a dir, desenvolupar un filtre de segon ordre. La funció de transferència que hem utilitzat pel filtre passabaix no ens serveix per a generar pols complexos conjugats. Necessitaríem una ret

formada per bobines, condensadors i resistors amb el problema que, per a freqüències baixes, l'inductor hauria de ser massa gran. Per això és necessari l'ús de filtres actius.

La funció de transferència d'un filtre passabaix actiu de segon ordre, normalitzant-la dividint pel guany la funció de transferència, és el següent:

$$H(s) = \frac{1}{s^2 + \left(\frac{1}{Q}\right)s + 1} \quad (5.3)$$

Resolvent el polinomi del denominador podem trobar els pols complexos conjugats en funció del factor Q.

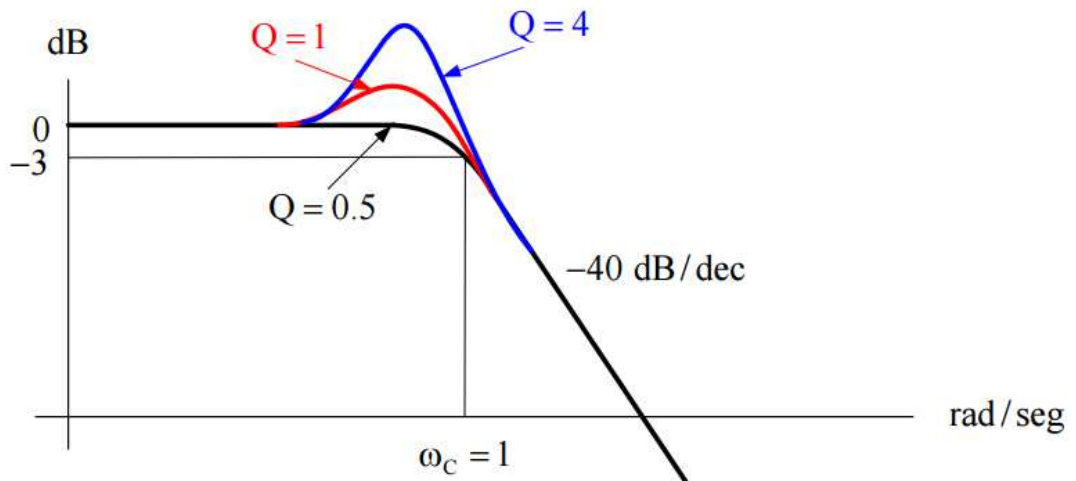
$$\frac{1}{2Q} \pm j \frac{1}{2Q} \sqrt{4Q^2 - 1} \quad (5.4)$$

On s'ha de complir que:

$$4Q^2 - 1 \geq 0 \quad (5.5)$$

Per tant,  $Q \geq 0,5$ .

En la *Figura 51* podem veure la resposta en freqüència del mòdul de l'amplitud d'un prototip de filtre passabaix de segon ordre.



**Figura 51.** Resposta en freqüència del mòdul de l'amplitud d'un prototip de filtre passabaix de segon ordre.

En aquest cas podem veure que a mesura que augmenta el valor de Q, un factor de disseny, apareix un pic d'amplitud creixent en la resposta en freqüència. Per altra banda, veiem que la resposta d'un filtre de segon ordre s'aproxima més a la resposta que tindria un filtre ideal, ja que el pendent de -40 dB/dec és el doble que no pas el filtre de primer ordre. Amb això la transició és més abrupta.

En definitiva si el primer filtre no funciona es pot introduir un filtre passabaix de segon ordre el qual podem veure que la resposta freqüencial es veu millorada notablement. En el cas de voler obtenir un filtre de major ordre tan sols caldrà posar en cascada varies etapes. D'estructures que realitzin aquest sistema n'hi ha de molts tipus, cadascuna indicada per un tipus d'acció. Tenim els filtres Sallen-key, Butterworth, Chebyscheff, entre d'altres.

Una estructura que ens serviria pel nostre prototip podria ser la que té el filtre Sallen-key, ja que es caracteritza per ser un dels filtres actius més simples. Per tenir un exemple esquemàtic de l'estructura amb la distribució dels elements per aconseguir un filtre passabaix, tal i com necessitaríem, amb un Sallen-key seria la següent:

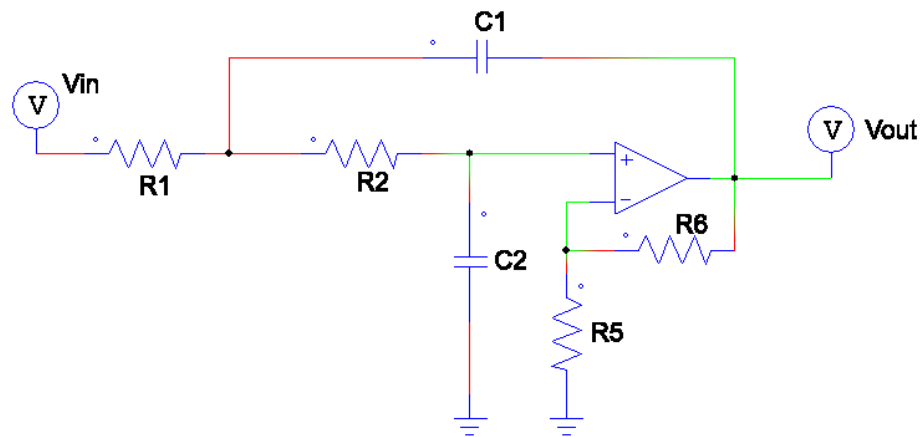


Figura 52. Estructura filtre passabaix Sallen-key.

Considerant el guany de l'amplificador, format pels resistors R5 i R6 com a valor A, la funció de transferència d'un filtre passabaix Sallen-key seria:

$$H(s) = \frac{A}{R_1 R_2 C_1 C_2} \frac{1}{s^2 + s \left( \frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 C_2} (1 - A) \right) + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (5.6)$$

Podem extreure:

$$\omega^2 = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \quad (5.7)$$

$$\alpha \omega = \frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 C_2} (1 - A) \quad (5.8)$$

Amb aquestes equacions podem determinar els valors dels elements passius segons les condicions que volem. Amb aquests valors podem obtenir una resposta en freqüència semblant a la ideal que hem representat en la Figura 51. Definit la freqüència de tall que volem i  $\alpha$  (factor d'esmoreïment) podem calcular la  $\omega$ . Posteriorment podem definir un mateix valor per als dos condensadors i determinar les resistències.

Finalment, per veure altres opcions de filtres, també hi ha una solució comercial. En el mercat existeixen filtres integrats amb les condicions que busquem. Un exemple, el LTC1062, seria utilitzar un filtre passabaix Butterworth de 5è ordre amb una freqüència de tall a 10 Hz. Aquest filtre a l'augmentar d'ordre la resposta freqüencial es veurà millorada, tal i com hem pogut veure en el pas d'un filtre passabaix de primer ordre a un de segon ordre.

Amb aquests càlculs i mostra de dispositius, podem definir una altra solució possible al filtre passabaix de primer ordre que hem definit anteriorment. Les tres propostes són totalment vàlides, simplement, ens quedàrem amb la que millor s'adaptés al sistema de mesura que es desenvolupa, segons les prestacions, resposta i preu.

### Adequar el rang de treball de tensió

Tal i com hem definit anteriorment la resolució del nostre ADC està limitada a un nombre de passos predefinits pel fabricant. En el cas que el senyal de sortida de l'instrument tingui un valor menor al voltatge d'alimentació, aleshores el rang de valors que podem utilitzar es redueix, i per tant, reduïm la precisió. Per veure-ho més clar explicarem un exemple amb el nostre cas en particular.

El senyal que obtenim del nostre instrument varia entre 0,4 i 2,7 V. Si calculem la grandària de pas per cada valor utilitzant, segons la tensió de referència de l'alimentació (5 V) tal i com es defineix per defecte tenim:

$$\frac{5 \text{ V}}{1024} = 0,005 \approx 5 \text{ mV} \quad (5.9)$$

Si en canvi utilitzem un voltatge de referència més pròxim al rang del valor que volem analitzar tenim:

$$\frac{2,7 \text{ V}}{1024} = 0,0026 \approx 2,6 \text{ mV} \quad (5.10)$$

Podem veure que la grandària de pas es redueix a la meitat, utilitzant com a valor màxim de voltatge un més pròxim al mesurat. Així augmentem la precisió, ja que els passos tenen menys diferència de tensió.

Aquesta adaptació es pot fer amplificant el senyal de la sortida fins aproximar-lo a la tensió de referència de 5 V que utilitza l'Arduino, o introduir una referència de tensió analògica de 3 V, que definirà aquest valor màxim de referència i ens servirà per millorar la precisió.

En el apartat anterior hem definit l'estructura del filtre passabaix que necessitaríem pel sistema. Hem vist que la particularitat d'un filtre passabaix actiu, apart d'aportar un aïllament de freqüències concretes, ens pot amplificar el senyal de sortida sense que aquest afecti a la resposta en freqüència, a baixes freqüències. Aprofitant aquesta acció, el que podem fer és amplificar el senyal de sortida del nostre instrument, a partir del amplificador operacional, per tal de obtenir un valor de tensió de sortida pròxim als 5 V. Així podem millorar la precisió dels valors mesurats.

Per fer aquesta amplificació utilitzarem una estructura no inversora tal i com hem utilitzat en els apartats de disseny del sensor. Aquesta estructura ens aportarà un guany pròxim a 2, per poder doblar la sortida de tensió. Si ens fixem en l'amplificador operacional de la *Figura 52*, els elements estan posicionats com a un estructura no inversora, on el guany es defineix:

$$A = 1 + \frac{R_6}{R_5} \quad (5.11)$$

Si els valors de  $R_5$  i  $R_6$  són iguals aconseguirem el guany que busquem. Definirem els valors de resistència bastant elevats per a què tinguem una baixa intensitat. Podrien ser uns valors de resistència de 56 k $\Omega$ .

Amb aquesta adaptació aconseguim un filtre passabaix i apart amplifiquem el senyal per tal d'adaptar-lo a la tensió de referència que busquem. Ara tenim una tensió de sortida del nostre instrument pròxim a 5 V. Si apart d'aquesta amplificació definim que la tensió de referència externa sigui la d'alimentació del nostre amplificador operacional del instrument (pròxim als 5 V), i l'introduïm al pin de AREF, fem que les petites fluctuacions encara afectin menys ja que la referència estarà emmarcada entre el GND i la  $V_{cc}$  del circuit que analitzem.

La segona opció que hem plantejat en un inici, requereix tenir una tensió de referència fixa que es pot realitzar amb un divisor de tensió o a partir de la referència de 3 V que té la paca de l'Arduino. Aquesta tensió de referència la utilitzarem com un voltatge de referència extern. Introduint aquesta tensió externa al pin AREF del microprocessador, podem canviar la tensió de referència, fent que es calculi la grandària de pas entre el GND i la tensió de referència del nostre instrument, millorant així la precisió.

### 5.2.2 Adaptació del software

Un cop plantejades les adaptacions de hardware, mirarem les possibilitats de millora del sistema a partir de les adaptacions via software. Aquest apartat podria ser molt extens ja que a través del software i amb una electrònica similar a la que té un Arduino, es poden fer multitud de modificacions que aportarien molt de valor al conjunt del prototip.

Es podria alliberar el prototip del voltímetre i definir el rang del instrument eliminant els offsets per acabar de calibrar-lo. Per altra banda, part de la millora es centraria en l'interfície amb l'usuari de manera que podríem mostrar els valors d'absorbància, transmitància i concentració de forma directa sense fer la transformació des de la tensió. Totes aquestes dades les podríem mostrar en una pantalla LCD, o transmetre-ho a un PC, controlat tot pel mateix microprocessador i electrònica adjacent juntament amb els software adient.

Amb tota la possibilitat d'evolució i millores que podem obtenir a partir d'un sistema com aquest implementat amb un software adient, s'obra la porta a proposar un altre projecte que es tractés simplement a realitzar la millora de l'interfície amb l'usuari donant un valor extra al producte desenvolupat.

Per deixar acotat el prototip del sensor, el que intentarem és definir la manera que a partir del software, poder obtenir un valor de tensió digital. Aquest valor l'obtindrem a partir de la conversió analògica del senyal de sortida de l'instrument de mesura. D'aquesta manera obtindrem el valor que obteníem amb el voltímetre però a partir d'un sistema amb

un microprocessador com és l'Arduino. Amb això ja deixem el sistema d'obtenció de mesures apunt per a sistemes de control d'aquest tipus, podent desenvolupar qualsevol de les interfícies que es plantegin per a futurs prototips.

### Procediment i explicació del codi

El que farem serà desenvolupar un petit codi que prengui un valor de tensió analògica a la sortida del instrument i, a partir de l'ADC, obtingui un valor discret que el quantifiqui. Posteriorment amb la resolució que tenim amb l'ADC, definit en els apartats anteriors, podem saber quina tensió correspon a cadascun dels valors discrets i trobar el valor de tensió real que correspondria. També introduïrem eines que ens serviran per millorar el valor de la tensió d'entrada en el cas que el hardware no acabis de fer-ho. Per comprovar el valor ho farem visualitzant el canal sèrie a través del ordinador, per veure el que realment enviaria.

El codi general desenvolupat és el següent:

```
(1)#include <SoftwareSerial.h> //llibreria per la comunicació sèrie.
(2)#include <math.h> //llibreria pels càlculs matemàtics.

(3)void setup() {
(4)Serial.begin(9600); // velocitat del canal sèrie.
(5)analogReference(EXTERNAL); //referència de tensió externa.
(6)          }
(7)void loop() {
(8)int valsensor=0;//variable que contindrà el valor discretitzat de
tensió un cop feta la conversió.
(9)valsensor=analogRead(A3); //obtenim el valor de tensió analògica
i posteriorment es fa la conversió amb l'ADC.
(10)delay(10); //introduïm un retard per assegurar que la conversió
té suficient temps.
(11)float voltatge=valsensor*(4.98/1023.0); // obtenció del valor de
tensió en volts.
(12)int a=0;
(13)float suma,mitjana;
//obtenció de la mitjana de 99 valors de tensió obtinguts.
(14)for(a=0;a<99;a++){
(15)          suma=suma+valsensor;
(16)          }
(17)mitjana=suma/99;
(18)Serial.println(mitjana); // mostrar per pantalla el valor de la
mitjana de la tensió.
(19)Serial.println(" ");
(20)delay(877); //retard abans d'obtenir una altre sèrie de valors
(21)}
```

Vist el codi de manera general, comentarem les parts més importants o amb característiques especials que requereixen una certa definició.

Seguint l'ordre d'execució del codi, a la línia (5) podem trobar una funció anomenada "*analogReference(EXTERNAL);*". Aquesta funció té un interès especial perquè ens permet obtenir una tensió de referència externa, en contra de la que l'Arduino té per defecte, que és de 5 V. La tensió de referència que utilitzarem en el sistema és la tensió en que alimentem l'amplificador operacional que es manté a un valor estable pròxim als 5 V. Aquesta tensió la introduïm dins del pin AREF del microprocessador. Si definim una tensió de referència externa, és molt important aquesta funció ja que avisa al software que hi ha una altre tensió de referència i que la prengui del pin AREF. Si no es fa pot portar problemes al sistema.

A la línia (9) del codi assignem el valor que obtindrem, un cop feta la conversió de l'ADC. Aquesta funció directament pren un valor de tensió analògica i fa la conversió a digital, quantificant-lo. El valor que s'obté és aquesta quantificació en funció de la tensió analògica presa. Prenem aquest valor de tensió analògica connectant la sortida de l'instrument al pin 3 de la placa, específic per l'introducció de senyals analògics. En aquest punt s'ha de tenir especial cura en la connexió dels cables ja que el moviment, o el fals contacte, altera significativament la lectura donant moltes fluctuacions.

A la línia (10), hi ha un retard. Aquest retard simplement serveix per verificar que hem donat suficient temps al convertidor AD per quantificar el valor de tensió analògica de l'entrada.

A la línia (11) del codi, fem la transformació de la quantificació a un valor de tensió que ha de ser representatiu de l'analògic que captem. L'operació de dins del parèntesis és la resolució que surt de cada valor discret, en funció de la tensió de referència de l'alimentació del sistema. A la variable "voltatge" obtindrem aquest valor de tensió proporcional a la mesurada.

De la línia (12) a la (17) del codi, el que fem és declarar i realitzar una mitjana de 99 valors de tensió obtinguts. Amb aquest valor el que fem és obtenir el valor més aproximat de tensió eliminant els errors que no filtrés la part de hardware. Ens assegurem que la tensió que es mostra sigui contínua. En les línies posteriors de codi simplement utilitzem les funcions que sens defineix per poder mostrar en la pantalla del canal sèrie aquestes variables que hem definit.

El codi presentat fa la mateixa funció que el voltímetre que hem utilitzar anteriorment per a fer les proves de funcionament. Evidentment el software pot evolucionar de moltes formes diferents per tal d'aportar més prestacions al sistema. En aquest apartat, juntament amb el desenvolupament anterior, queda el sistema optoelectrònic preparat per a una connexió amb un sistema compost per un microprocessador, definint el sensor com una caixa negra amb una sortida de tensió dins d'un rang, el qual es pot adaptar per calcular-ne les variables.

### 5.3 Futures millores

Apart de les millores que hem presentat en l'apartat anterior n'hi ha d'altres que s'implementarien en el moment del disseny del producte final, o s'anirien adaptant depenent de la resposta del consumidor. Alguna d'aquestes millores s'ha detectat en el moment del disseny, i és important numerar-les per implementar-les en projectes posteriors.

Aquestes són les millores que es podrien implementar:

#### Tipus hardware

- Aconseguir una estructura compacte de la localització del sensor per tal d'eliminar la infiltració de radiació electromagnètica.

La localització on hi ha l'emissor i el fotodíode que hem utilitzat en les proves, és un prototip realitzat de manera experimental, el qual, li manquen juntes d'estanquitat per evitar la infiltració de la llum. En el moment del disseny del prototip seria important controlar aquest punt.

- Adaptació del sistema a altres compostos a partir del sistema que es té.

Veien la resposta que té el sistema envers a el compost concret que hem analitzat, es podria extrapolar a altres compostos provinents d'un assaig enzimàtic. Estudiant les propietats específiques del compost es podria desenvolupar un sistema sensible a aquest. El sistema electrònic està dissenyat perquè simplement es canviï l'emissor i el receptor sense alterar tota l'electrònica.

- Millora de la alimentació.

Si analitzem l'alimentació d'un Arduino és a través d'un USB. Seria interessant poder modificar l'alimentació del prototip per tal d'alimentar-se amb la mateixa font que l'Arduino. També hi hauria la possibilitat d'analitzar una alimentació a 12 V, ja que el sistema esta preparat per fer-ho.

- Reduir sorolls electromagnètics que absorbeix l'instrument.

Intentar reduir el màxim les afectacions de les radiacions electromagnètiques del exterior amb filtres o aïllaments específics, per evitar fluctuacions en el moment de fer les mesures.

#### Tipus software

- Avís del temps d'espera abans de realitzar les mesures.

És important per esperar que el sistema s'estabilitzi. Simplement es tractaria de fer esperar a l'usuari un minut en el moment que s'engegui l'instrument.

- Desenvolupament d'una interfície de comunicació amb l'usuari.

Es podria fer de moltes maneres: A traves d'una pantalla LCD, PC, dispositius mòbils... i que l'usuari es pogués comunicar amb l'instrument a partir de botons o una pantalla tàctil.

- Càlculs dels paràmetres de forma directa.

Tal i com hem vist en els apartats anteriors per a determinar les relacions entre transmitància i absorbència o entre absorbència i concentració és necessari la realització de diferents càlculs, ja siguin logarítmics o simples multiplicacions. Per tant, es tracta de desenvolupar l'interfície que realitza aquests procediments.

Totes aquestes millores i moltes més que es podrien introduir aportaran millors prestacions al disseny de prototips posteriors, obtenint l'objectiu inicial de tenir un producte funcional, i degut a la seva especialització, econòmic.

## 6 Conclusions i valoració personal

L'objectiu principal d'aquest TFG ha estat estudiar i dissenyar un prototip d'un sistema fotomètric capaç de determinar la quantitat d'àcid màlic que hi ha en una mostra de vi. Després de realitzar el projecte es pot concloure que aquest sistema es pot dissenyar i que a més ens aportaria valors de resolució equiparables a un instrument de mesura comercialitzat, sent viable la seva producció i a una fracció del cost.

La indústria alimentària té unes necessitats molt clares de controls de qualitat sobre els seus productes. Aquesta necessitat obra la porta a introduir un sistema que permeti fer aquests controls de manera ràpida eficaç i també més econòmica. Analitzant quines són les tècniques i els controls que es fa en un procés concret com és el vi, hem vist que part d'aquests controls es basen en l'anàlisi de compostos dissolts en el producte, la concentració dels quals ens indicarà una qualitat, necessitat, o error del producte i del procés de fabricació.

Per analitzar els compostos clau, es fa mitjançant els assaigs enzimàtics. Aquests assaigs ens aporten un producte, després d'una reacció enzimàtica concreta, que és estequiomètric al compost a analitzar i que a més té unes propietats físiques concretes, que poden ser analitzades. Aquesta propietat és l'absorbància de la llum en una certa longitud d'ona. L'absorbància ens permet calcular la concentració del compost, i també es relaciona amb la llum que incideix i travessa la mostra. Aquesta relació ja es coneixia amb la llei de Beer-Lambert, i per aquest fet ja hi ha instruments capaços d'analitzar aquests valors d'absorbància.

Aquests instruments permeten fer l'anàlisi en molts compostos diferents, però tenen un preu molt elevat. El plantejament que vam fer és estudiar les necessitats d'un compost concret, amb les necessitats que hauria de tenir l'instrument per poder-lo analitzar i detectar segons la relació de la llum. Amb això hem aconseguit tenir un instrument exclusiu per a un compost amb la precisió necessària i a una fracció del cost que requereix un espectrofotòmetre de laboratori. Amb aquesta idea podem cobrir moltes de les necessitats de la indústria alimentària.

La consideració inicial que vam fer en el desenvolupament de l'instrument és crear un dispositiu optoelectrònic format per un díode emissor i un fotodíode detector, components que normalment no s'utilitzen per aquest fi però que destacant les seves característiques podríem treure'n el màxim partit. Al inici vam considerar que la tensió de sortida del resistor del fotodíode és proporcional a la intensitat de la llum incident al receptor. Al llarg de les proves hem vist que així ha estat i que és clarament proporcional. Complint aquesta condició ens permet simplificar molt el sistema de mesura i de retruc abaratir el producte mantenint les condicions de resolució prescrites.

En la primera prova del sistema bàsic hem obtingut resultats optimistes que ens permeten seguir desenvolupant i millorant el sistema. Una de les primeres millores del sistema ha estat estudiar la resistència de la sortida del fotodíode. Podem concloure que aquesta té influència en el rang de tensió de sortida del sistema. Augmentat el valor de la resistència, ha permès aprofitar al màxim les capacitats del fotodíode fent-lo treballar dins

de les corbes d'accionament i que no arribi a saturar-se. Aquest augment del rang s'ha traduït en una millora substancial de la sensibilitat de l'instrument.

Seguint la tendència d'augmentar el rang de tensió per millorar la resposta, hem implementat el sistema d'amplificació. Després d'analitzar la possibilitat d'un sistema format per un amplificador d'instrumentació, ens hem decantat per l'ús d'un amplificador operacional únic amb una estructura no inversora. Les proves realitzades en un UA741 ens ha mostrat una millora en la resolució de l'instrument amplificant el rang de tensió de sortida segons el guany estipulat fent que el cos de l'instrument millorés en sensibilitat. Tot i això hem destacat les mancances físiques que té aquest amplificador operacional i hem buscat un altre, el T2922IN, que ens aportes unes millors prestacions, mantenint o millorant els resultats del anterior.

Un cop implementat el sistema, amb el nou amplificador, hem introduït tots els altres dispositius electrònics que ens milloraven aspectes de seguretat i resposta de l'instrument. Finalment, el prototip resultant ens aporta uns valors molt bons, tenim un rang de sortida millorat que en el primer sistema, i hem aconseguit una resolució en transmitància, del 0,86%.

Després d'analitzar els resultats sobre l'absorbància i la concentració d'un compost, podem concloure que en el rang útil de l'instrument podem obtenir una resolució en absorbància del 0,005. Aquest valor és el que es requereix per a obtenir una mesura en un assaig enzimàtic. Després de fer la comprovació en concentració, la resolució que tenim de l'instrument és de 0,004 g/l, essent el valor mínim mesurable. Amb aquest resultats podem veure que, teòricament, l'instrument és capaç d'obtenir uns valors de mesura equivalents als d'un instrument professional.

En el test en concentracions de colorant real hem pogut comprovar la veracitat dels resultats teòrics desenvolupats. Podem concloure a partir dels resultats, que la resposta de tensió de l'instrument és proporcional a l'absorció de la mostra, demostrant així la suposició inicial que hem fet de la relació entre la tensió de sortida i el corrent fotogenerat, en funció de la llum que incideix el sensor, és correcta. Per altra banda podem veure que l'instrument no necessita una calibració, es pot fer a partir del blanc i de la mostrà a màxima concentració que es disposa en l'assaig definint, entre els dos punts, la corba de l'instrument de mesura.

En l'apartat de disseny hem pogut localitzar tots els elements necessaris, i definir-los en un esquema. Amb això hem pogut dissenyar una placa PCB que conté tots els dispositius electrònics i a més té unes mides i una funcionalitat específica pel nostre instrument. Per altra banda, tal i com esta dissenyat, ens permet adaptar-hi diferents emissors i detectors, fent que el sistema pugi extrapolar-se a anàlisis d'altres compostos.

El pressupost del desenvolupament i disseny d'un prototip ens aporta una idea, econòmica, del que podria costar aquest prototip. Tot i que estem parlant de xifres aproximades, podem concloure que el sistema de mesura tindria una viabilitat econòmica si ho comparem amb els sistemes que hi ha actualment en el mercat. El pressupost de desenvolupament resulta més econòmic que algun dels instruments que hi ha a la venda.

Veient la versatilitat i les possibilitats de l'instrument hem volgut transportar la resposta que obtenim i introduir-la dins d'un sistema capaç de traduint-la i obtenir la informació de forma directa, apart, aportar-nos prestacions extres al sistema. Per fer-ho hem pensat en un Arduino, equipat amb un microprocessador i unes eines adequades ens permet adaptar aquesta resposta al fi que es voldria. Podem concloure que després de realitzar-se millores en la qualitat del senyal de sortida, a partir de diferents mètodes,

podríem introduir la resposta al sistema i tractar-la. Ho hem obtingut dissenyant un voltímetre amb l'Arduino on ens mostra la mateixa resposta en tensió que ens oferia el voltímetre que hem realitzat en les proves del sistema. D'aquesta manera podem concloure que el sistema està preparat per acoblar-se en un sistema com és l'Arduino obrint la porta moltes millores en relació a l'interfície de l'instrument amb l'usuari.

Durant l'evolució del projecte queda demostrada la possible viabilitat d'un sistema de mesura capaç d'obtenir una mesura de concentració dissolta en un líquid, i que a més es pot implementar en un sistema econòmic i fiable.

## Índex d'il·lustracions

<b>Figura 1.</b> Esquema del procés de fabricació del vi. ....	6
<b>Figura 2.</b> Recipients d'acer inoxidable on es fa la primera fermentació. ....	7
<b>Figura 3.</b> Refractòmetre analògic.....	10
<b>Figura 4.</b> Pics d'absorció ultraviolada de les dues formes del NAD. ....	14
<b>Figura 5.</b> Progressió entre diluït i concentrat d'una mostra líquida com és el vi. ....	18
<b>Figura 6.</b> Espectrofotòmetre de feix simple.....	21
<b>Figura 7.</b> Esquema bàsic d'un espectròmetre de feix simple.....	22
<b>Figura 8.</b> Esquema de funcionament d'un díode LED.....	24
<b>Figura 9.</b> Imatge d'un díode LED comú. ....	25
<b>Figura 10.</b> Distribució espectral segons els colors del LED. ....	26
<b>Figura 11.</b> Esquema bàsic de funcionament d'un fotodíode.....	28
<b>Figura 12.</b> Esquema d'un fotodíode dividit en parts.....	28
<b>Figura 13.</b> Característiques de sensibilitat del fotodíode.....	30
<b>Figura 14.</b> Fotodíode utilitzat en el sistema optomètric.....	30
<b>Figura 15.</b> Digitalització d'un senyal analògic de tensió i posterior reconstrucció...	31
<b>Figura 16.</b> Circuit esquemàtic per la digitalització de la tensió.....	32
<b>Figura 17.</b> Disseny d'un amperímetre a partir d'un voltímetre.....	33
<b>Figura 18.</b> Multímetre digital MD-200B. ....	34
<b>Figura 19.</b> Diagrama de blocs del sistema inicial. ....	34
<b>Figura 20.</b> Circuit emissor del sistema.....	35
<b>Figura 21.</b> Circuit receptor del sistema. ....	36
<b>Figura 22.</b> Relació de la tensió amb la transmitància del primer experiment.....	37
<b>Figura 23.</b> Relació de la tensió de sortida amb l'absorbància de l'experiment. ....	38
<b>Figura 24.</b> Filtres fotogràfics utilitzats en el test.....	40
<b>Figura 25.</b> Filtres classificats per a fer els tests.....	41
<b>Figura 26.</b> Imatge exterior i interior del dispositiu de lectura de mostres. ....	42
<b>Figura 27.</b> Suport de les mostres en forma de filtre fotogràfic de 20x20 mm. ....	42
<b>Figura 28.</b> Mitjana amb les desviacions i tendència lineal del sist. 2 i $R=2,7\text{ k}\Omega$ . ...	47
<b>Figura 29.</b> Mitjana amb les desviacions i tendència lineal del sist 2 i $R=3,9\text{ k}\Omega$ . ....	50
<b>Figura 30.</b> Diagrama de blocs del sistema 3. ....	52
<b>Figura 31.</b> Corba característica d'un amplificador operacional.....	53
<b>Figura 32.</b> Configuració no inversora del sistema amplificador.....	55

<b>Figura 33.</b> Circuit esquemàtic d'un amplificador operacional de instrumentació. ...	56
<b>Figura 34.</b> Full de característiques INA114. ....	57
<b>Figura 35.</b> Mitjana amb les desviacions i tendència lineal amb un AO UA741. ....	60
<b>Figura 36.</b> Mitjana amb les desviacions i tendència lineal amb un AO TS922IN. ....	65
<b>Figura 37.</b> Diagrama de blocs del sistema 4. ....	67
<b>Figura 38.</b> Mitjana amb les desviacions i tendència lineal del prototip. ....	68
<b>Figura 39.</b> Relació de l'absorbància amb la tensió de sortida del prototip. ....	71
<b>Figura 40.</b> Material per fer les concentracions de colorant. ....	76
<b>Figura 41.</b> Relació del percentatge de la concentració amb l'absorbància. ....	78
<b>Figura 42.</b> Divisor de tensió per la lectura de la tensió de la bateria. ....	81
<b>Figura 43.</b> Divisor de tensió per extreure la tensió de referència. ....	82
<b>Figura 44.</b> Circuit d'avís de bateria baixa. ....	83
<b>Figura 45.</b> Layout de l'Orcad del projecte per veure el traçat de les pistes. ....	87
<b>Figura 46.</b> Esquema de l'adaptació del sistema 4. ....	98
<b>Figura 47.</b> Imatge frontal de la placa d'Arduino UNO. ....	100
<b>Figura 48.</b> Placa Arduino UNO amb la selecció de pins. ....	101
<b>Figura 49.</b> Filtre actiu passabaix de primer ordre. ....	105
<b>Figura 50.</b> Resposta en freqüència d'un filtre passabaix de primer ordre. ....	106
<b>Figura 51.</b> Resposta en freqüència d'un filtre passabaix de segon ordre. ....	107
<b>Figura 52.</b> Estructura filtre passabaix Sallen-key. ....	108

## Índex de taules

<b>Taula 1.</b> Compostos del LED segons el color de la llum que emet. ....	27
<b>Taula 2.</b> Diferents materials de composició d'un fotodíode. ....	29
<b>Taula 3.</b> Valors de tensió del primer experiment amb filtres. ....	37
<b>Taula 4.</b> Codificació dels filtres amb els valors d'A i T corresponents. ....	40
<b>Taula 5.</b> Resum de les abreviacions i unitats. ....	45
<b>Taula 6.</b> Valors de tensió de sortida i mitjana de cada test amb $R=2,7\text{ k}\Omega$ . ....	46
<b>Taula 7.</b> Mitjana, desviacions i cas crític del sistema 2 amb $R=2,7\text{ k}\Omega$ . ....	46
<b>Taula 8.</b> Resum dels paràmetres del sistema 2 amb $R=2,7\text{ k}\Omega$ . ....	48
<b>Taula 9.</b> Valors de tensió de sortida i mitjana de cada test del amb $R=3,9\text{ k}\Omega$ . ....	49
<b>Taula 10.</b> Mitjana, desviacions i cas crític de desviació amb $R=3,9\text{ k}\Omega$ . ....	50
<b>Taula 11.</b> Resum dels paràmetres del sistema 2 amb $R=3,9\text{ k}\Omega$ . ....	51

<b>Taula 12.</b> Valors de tensió de sortida i mitjana de cada test amb AO UA741.....	59
<b>Taula 13.</b> Mitjana, desviacions i cas crític de desviació amb l'AO UA741. ....	60
<b>Taula 14.</b> Resum dels paràmetres del sistema 3 amb un AO UA741. ....	61
<b>Taula 15.</b> Diferents amplificadors operacionals i les seves característiques.....	63
<b>Taula 16.</b> Valors de tensió de sortida i mitjana de cada test amb l'AO TS922IN. ...	64
<b>Taula 17.</b> Mitjana, desviacions i cas crític de desviació amb l'AO TS922IN. ....	64
<b>Taula 18.</b> Resum dels paràmetres del sistema amb un AO TS922IN. ....	66
<b>Taula 19.</b> Valors de tensió de sortida i mitjana de cada test del prototip.....	67
<b>Taula 20.</b> Mitjana, desviacions i cas crític de desviació del prototip.....	68
<b>Taula 21.</b> Resum dels paràmetres del prototip. ....	69
<b>Taula 22.</b> Absorbància en funció de la tensió de sortida.....	70
<b>Taula 23.</b> Resolució de l'instrument per la transmitància i l'absorbància. ....	73
<b>Taula 24.</b> Resultats de tensió de l'experiment amb concentracions de colorant.....	76
<b>Taula 25.</b> Desviacions superiors i inferiors de l'experiment amb concentracions...	76
<b>Taula 26.</b> Transmitància, absorbància i concentració de l'experiment. ....	77
<b>Taula 27.</b> Especificacions d'un Arduino UNO. ....	100

## Bibliografia

### Introducció

- Wikipèdia. *Fermentación del vino*. [Consulta en línia] Enciclopèdia digital [Data de consulta: 05-02-2015] [Accés gratuït]  
< [http://es.wikipedia.org/wiki/Fermentaci%C3%B3n\\_del\\_vino](http://es.wikipedia.org/wiki/Fermentaci%C3%B3n_del_vino)>.
- Wikipèdia. *Fermentación alcohólica*. [Consulta en línia] Enciclopèdia digital [Data de consulta: 05-02-2015] [Accés gratuït]  
< [http://es.wikipedia.org/wiki/Fermentaci%C3%B3n\\_alcoh%C3%B3lica](http://es.wikipedia.org/wiki/Fermentaci%C3%B3n_alcoh%C3%B3lica)>.
- Aprende a catar vino. *Imatge de Bodegas Valleyglesias*. [Consulta en línia] Article digital [Data de consulta: 05-02-2015] [Accés gratuït]  
< <https://aprendeacatarvino.wordpress.com/category/bodegas/>>.
- Wikipèdia. *Fermentació malolàctica*. [Consulta en línia] Enciclopèdia digital [Data de consulta: 06-02-2015] [Accés gratuït]  
< [http://es.wikipedia.org/wiki/Fermentaci%C3%B3n\\_malol%C3%A1ctica](http://es.wikipedia.org/wiki/Fermentaci%C3%B3n_malol%C3%A1ctica)>.
- Wikipèdia. *Àcid màlic*. [Consulta en línia] Enciclopèdia digital [Data de consulta: 06-03-2015] [Accés gratuït]  
< [http://es.wikipedia.org/wiki/%C3%81cido\\_m%C3%A1lico](http://es.wikipedia.org/wiki/%C3%81cido_m%C3%A1lico)>.
- www.diccionari.cat. *Definició inocular*. [Consulta en línia] Diccionari digital [Data de consulta: 06-03-2015] [Accés gratuït]  
< <http://www.diccionari.cat/lexicx.jsp?GECART=0077575>>.
- Wikipèdia. *Controls de qualitat*. [Consulta en línia] Enciclopèdia digital [Data de consulta: 07-03-2015] [Accés gratuït]

- < [http://ca.wikipedia.org/wiki/Control\\_de\\_qualitat](http://ca.wikipedia.org/wiki/Control_de_qualitat)>.
- www.dicsa.com. *Refractòmetre de mà*. [Consulta en línia] Article digital [Data de consulta: 09-03-2015] [Accés gratuït]  
< [http://www.dicsa.com/tienda/product\\_info.php?products\\_id=57](http://www.dicsa.com/tienda/product_info.php?products_id=57)>.
  - www.vinotec.com. *Procediment d'assaig àcid màlic*. [Consulta en línia] Article digital [Data de consulta: 010-03-2015] [Accés gratuït]  
< [http://www.vinotec.com/wp-content/uploads/2013/10/megazyme\\_acido\\_malico.pdf](http://www.vinotec.com/wp-content/uploads/2013/10/megazyme_acido_malico.pdf)>.
  - www.r-biopharm.com. *L-Malic àcid UV-method*. [Consulta en línia] Article digital [Data de consulta: 10-03-2015] [Accés gratuït]  
<<http://www.r-biopharm.com/products/food-feed-analysis/constituents/enzymatic-analysis/roche-yellow-line/item/1-malic-acid>>.
  - www.r-biopharm.com. *Tests de diagnòstics*. [Consulta en línia] Article digital [Data de consulta: 10-03-2015] [Accés gratuït]  
< <http://www.r-biopharm.com/es/sobre-r-biopharm>>.
  - Roche España. *Proveïdor de tests de diagnòstics*. [Consulta en línia] Article digital [Data de consulta: 10-03-2015] [Accés gratuït]  
< <http://www.roche.es/>>.
  - ww.megazyme.com. *Anàlisis del vi*. [Consulta en línia] Article digital [Data de consulta: 03-04-2015] [Accés gratuït]  
< <http://www.megazyme.com/select-an-industry/wine-analysis>>.
  - Wikipèdia. *Acetobàcter*. [Consulta en línia] Enciclopèdia digital [Data de consulta: 03-04-2015] [Accés gratuït]  
< <http://ca.wikipedia.org/wiki/Acetob%C3%A0cter>>.
  - Wikipèdia. *Enzims*. [Consulta en línia] Enciclopèdia digital [Data de consulta: 04-04-2015] [Accés gratuït]  
< <http://es.wikipedia.org/wiki/Enzima>>.
  - Wikipèdia. *NAD*. [Consulta en línia] Enciclopèdia digital [Data de consulta: 05-04-2015] [Accés gratuït]  
<[http://es.wikipedia.org/wiki/Nicotinamida\\_adenina\\_dinucle%C3%B3tido#Propiedades\\_f\\_C3.ADsicas\\_y\\_qu.C3.ADmicas](http://es.wikipedia.org/wiki/Nicotinamida_adenina_dinucle%C3%B3tido#Propiedades_f_C3.ADsicas_y_qu.C3.ADmicas)>.
  - www.coenzima.com. *Coenzims NAD i NADH*. [Consulta en línia] Article digital [Data de consulta: 05-04-2015] [Accés gratuït]  
< [http://www.coenzima.com/coenzimas\\_nad\\_y\\_nadh](http://www.coenzima.com/coenzimas_nad_y_nadh)>.
  - www.romerlabs.com. *Anàlisis enzimàtics en aliments*. [Consulta en línia] Article digital [Data de consulta: 05-04-2015] [Accés gratuït]  
< <http://www.romerlabs.com/es/knowledge/enzymatic-food-analysis/>>.
  - Wikipèdia. *Llei de Beer-Lamber*. [Consulta en línia] Enciclopèdia digital [Data de consulta: 06-04-2015] [Accés gratuït]  
< [http://es.wikipedia.org/wiki/Ley\\_de\\_Beer-Lambert](http://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_Beer-Lambert)>.
  - www.umh.es. *Transmitància, absorbància i llei de Lamber-Beer*. [Consulta en línia] Article digital [Data de consulta: 06-04-2015] [Accés gratuït]  
<[http://repositorio.innovacionumh.es/Proyectos/P\\_22CursoMateriales/Miguel\\_Angel\\_Sogorb/Wimba/Espectroscopia\\_05.htm](http://repositorio.innovacionumh.es/Proyectos/P_22CursoMateriales/Miguel_Angel_Sogorb/Wimba/Espectroscopia_05.htm)>.
  - www.diccionari.cat. *Definició absorbància*. [Consulta en línia] Diccionari digital [Data de consulta: 07-04-2015] [Accés gratuït]  
< <http://www.diccionari.cat/lexicx.jsp?GECART=0000764>>.
  - Wikipèdia. *Transmitància*. [Consulta en línia] Enciclopèdia digital [Data de consulta: 08-04-2015] [Accés gratuït]  
< <http://es.wikipedia.org/wiki/Transmitancia>>.
  - www.iuma.ulpgc.es. *Dispositius Optoelectrònics*. [Consulta en línia] Article digital [Data de consulta: 09-04-2015] [Accés gratuït]

- <[http://www.iuma.ulpgc.es/~jrsendra/Docencia/dispositivos\\_optoelectronicos/download/teoria/apuntes/curso00-01.pdf](http://www.iuma.ulpgc.es/~jrsendra/Docencia/dispositivos_optoelectronicos/download/teoria/apuntes/curso00-01.pdf)>.
- Wikipèdia. *Spectrofotometria*. [Consulta en línia] Enciclopèdia digital [Data de consulta: 10-04-2015] [Accés gratuït]  
< <http://en.wikipedia.org/wiki/Spectrophotometry>>.
  - www.rsc.org. *Pràctica per construir un espectrofotòmetre*. [Consulta en línia] Article digital [Data de consulta: 11-04-2015] [Accés gratuït]  
< [http://www.rsc.org/images/EiC-05\\_2007-spectrophotometer\\_tcm18-214788.pdf](http://www.rsc.org/images/EiC-05_2007-spectrophotometer_tcm18-214788.pdf)>.
  - Wikipèdia. *Espectrofotòmetre* [Consulta en línia] Enciclopèdia digital [Data de consulta: 15-04-2015] [Accés gratuït]  
< <http://ca.wikipedia.org/wiki/Espectrofot%C3%B2metre>>.
  - www.directindustry.es. *Espectrofotòmetre d'un sol feix de llum* [Consulta en línia] Article digital [Data de consulta: 16-04-2015] [Accés gratuït]  
< <http://www.directindustry.es/prod/shimadzu-europa/product-25210-56997.html>>.
  - www.quirumed.com. *Espectrofotòmetres UV/Visible*. [Consulta en línia] Article digital [Data de consulta: 17-04-2015] [Accés gratuït]  
<<http://www.quirumed.com/es/laboratorio/espectrofotometria/espectrofotometros-uv-visible>>.
  - Wikipèdia. *LED*. [Consulta en línia] Enciclopèdia digital [Data de consulta: 18-04-2015] [Accés gratuït]  
< <http://es.wikipedia.org/wiki/Led>>.
  - www.osram.es. *Colors de la llum d'un LED*. [Consulta en línia] Article digital [Data de consulta: 20-04-2015] [Accés gratuït]  
<[http://www.osram.es/osram\\_es/noticias-y-conocimiento/led-home/conocimiento-profesional/basicos-led/colores-de-la-luz/index.jsp](http://www.osram.es/osram_es/noticias-y-conocimiento/led-home/conocimiento-profesional/basicos-led/colores-de-la-luz/index.jsp)>.
  - www.icmm.csic.es. *Díodes semiconductors*. [Consulta en línia] Article digital [Data de consulta: 21-04-2015] [Accés gratuït]  
< [http://www.icmm.csic.es/fis/gente/josemaria\\_albella/electronica/3%20Uni%F3n%20P-N.pdf](http://www.icmm.csic.es/fis/gente/josemaria_albella/electronica/3%20Uni%F3n%20P-N.pdf)>.
  - www.dirtragemag.com. *Diagrama de funcionament d'un LED*. [Consulta en línia] Article digital [Data de consulta: 22-04-2015] [Accés gratuït]  
< <http://dirtragemag.com/see-light-intro-led-technology/>>.
  - www.casadelled.com. *Full de característiques d'un LED verd*. [Consulta en línia] Article digital [Data de consulta: 23-04-2015] [Accés gratuït]  
< <http://www.casadelled.com.ar/ZL-504G0CA10.pdf>>.
  - Wikipèdia. *Fotodíode*. [Consulta en línia] Enciclopèdia digital [Data de consulta: 24-04-2015] [Accés gratuït]  
< <http://es.wikipedia.org/wiki/Fotodiodo>>.
  - www.ehu.eus. *Dispositius optoelectrònics*. [Consulta en línia] Article digital [Data de consulta: 25-04-2015] [Accés gratuït]  
< [http://www.sc.ehu.es/sbweb/electronica/elec\\_basica/tema5/Pagina5.htm](http://www.sc.ehu.es/sbweb/electronica/elec_basica/tema5/Pagina5.htm)>.
  - www.itlalaguna.edu.mx. *Fotodíode*. [Consulta en línia] Article digital [Data de consulta: 25-05-2015] [Accés gratuït]  
<[http://www.itlalaguna.edu.mx/Academico/Carreras/electronica/opteca/OPTOPDF2\\_archivos/UNIDAD2TEMA3.PDF](http://www.itlalaguna.edu.mx/Academico/Carreras/electronica/opteca/OPTOPDF2_archivos/UNIDAD2TEMA3.PDF)>.
  - www.alliedelec.com. *Imatge Fotodíode verd*. [Consulta en línia] Article digital [Data de consulta: 26-04-2015] [Accés gratuït]  
< <http://www.alliedelec.com/vishay-small-signal-opto-products-ssp-bpw21r/70061725/>>.
  - www.vishay.com/. *Full de característiques BPW21R*. [Consulta en línia] Article digital [Data de consulta: 27-04-2015] [Accés gratuït]  
< <http://www.vishay.com/docs/81519/bpw21r.pdf>>.

- www.aficionadosalamecanica.net. *Esquema parts fotodiode*. [Consulta en línia] Article digital [Data de consulta: 27-04-2015] [Accés gratuït]  
< <http://www.aficionadosalamecanica.net/can-most-bus.htm>>.
- Wikipèdia. *Aparell de mesura*. [Consulta en línia] Enciclopèdia digital [Data de consulta: 28-04-2015] [Accés gratuït]  
< [http://ca.wikipedia.org/wiki/Aparell\\_de\\_mesura](http://ca.wikipedia.org/wiki/Aparell_de_mesura)>.
- www.ugr.es. *Multímetre*. [Consulta en línia] Article digital [Data de consulta: 29-04-2015] [Accés gratuït]  
< <http://electronica.ugr.es/~amroldan/asignaturas/curso04-05/ftc/pdf/aparatos.pdf>>.
- www.testequipmentdepot.com. *Full de característiques Multímetre*. [Consulta en línia] Article digital [Data de consulta: 01-05-2015] [Accés gratuït]  
< <http://www.testequipmentdepot.com/promax/pdf/md-200b.pdf>>.
- Wikipèdia. *Poka-yoke*. [Consulta en línia] Enciclopèdia digital [Data de consulta: 01-05-2015] [Accés gratuït]  
< <http://es.wikipedia.org/wiki/Poka-yoke>>.
- www.unican.es. *Instrumentació electrònica*. [Consulta en línia] Article digital [Data de consulta: 01-05-2015] [Accés gratuït]  
< [http://www.ctr.unican.es/asignaturas/instrumentacion\\_5\\_it/iec\\_3.pdf](http://www.ctr.unican.es/asignaturas/instrumentacion_5_it/iec_3.pdf)>.
- www.ti.com. *Full de característiques INA114*. [Consulta en línia] Article digital [Data de consulta: 01-05-2015] [Accés gratuït]  
< <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina114.pdf>>.
- www.ti.com. *Full de característiques UA741*. [Consulta en línia] Article digital [Data de consulta: 01-05-2015] [Accés gratuït]  
< <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ua741.pdf>>.
- Llibre: James W.Nilsson, Susan A. Riedel, CIRCUITOS ELÉCTRICOS, Pearson educación S.A, Madrid 2005.
- Apunts: Pedro Iñiguez Galbete, INSTRUMENTACIÓ ELECTRÓNICA, URV, Tarragona 2013.

### ***Disseny del sistema***

- moodle.urv.cat. Disseny de circuits electrònics en suport PCB. [Consulta en línia] Article digital [Data de consulta: 10-05-2015] [Accés restringit]  
< [http://moodle.urv.cat/moodle/pluginfile.php/1163515/Exemple\\_PCB.pdf](http://moodle.urv.cat/moodle/pluginfile.php/1163515/Exemple_PCB.pdf)>.
- moodle.urv.cat. Disseny d'equips electrònics. [Consulta en línia] Article digital [Data de consulta: 10-05-2015] [Accés restringit]  
<[http://moodle.urv.cat/moodle/pluginfile.php/116602/0/disseny\\_equips\\_electronics.pdf](http://moodle.urv.cat/moodle/pluginfile.php/116602/0/disseny_equips_electronics.pdf)>.
- Moodle.urv.cat. Normes PCB DEEA. [Consulta en línia] Article digital [Data de consulta: 03-05-2015] [Accés restringit]  
< <http://moodle.urv.cat/moodle/pluginfile.php/1167315/content/0/NormesPCB.pdf>>.
- www.orcad.com. Orcad Capture. [Consulta en línia] Pàgina web de l'empresa Cadense [Data de consulta: 03-05-2015] [Accés gratuït]  
< <http://www.orcad.com/products/orcad-capture/overview>>.
- www.orcad.com. Orcad PCB Designer. [Consulta en línia] Pàgina web de l'empresa Cadense [Data de consulta: 03-05-2015] [Accés gratuït]  
<<http://www.orcad.com/products/orcad-pcb-designer/overview>>.
- Wikipèdia. Orcad. [Consulta en línia] Enciclopèdia digital [Data de consulta: 03-05-2015] [Accés gratuït]  
< <http://en.wikipedia.org/wiki/OrCAD>>.
- www.mouser.com. *Full de característiques amplificador TS922, TS922A*. [Consulta en línia] Article digital [Data de consulta: 03-05-2015] [Accés gratuït]

- < <http://www.mouser.com/ds/2/389/CD00001188-250028.pdf>>.
- www.jst.com. *Full de característiques B2P-VH*. [Consulta en línia] Article digital [Data de consulta: 03-05-2015] [Accés gratuït]  
< <http://www.jst-mfg.com/product/pdf/eng/eVH.pdf> >.
- www.ti.com. *Full de característiques LM7805C*. [Consulta en línia] Article digital [Data de consulta: 03-05-2015] [Accés gratuït]  
< <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm7805c.pdf>>.
- www.rs.com. Portal inicial . [Consulta en línia] Pàgina web distribuïdor productes electrònics [Data de consulta: 03-05-2015] [Accés gratuït]  
< <http://es.rs-online.com/web/>>.
- www.rs.com. *Pila 9V Alcalina*. [Consulta en línia] Pàgina de catàleg [Data de consulta: 03-05-2015] [Accés gratuït]  
< <http://es.rs-online.com/web/p/pilas-9-voltios/3869997/>>.
- www.rs.com. *Interruptor de palanca*. [Consulta en línia] Pàgina de catàleg [Data de consulta: 09-05-2015] [Accés gratuït]  
< <http://es.rs-online.com/web/p/interruptores-de-palanca/7347066/>>.
- www.diccionari.cat. *Definició tropicalització*. [Consulta en línia] Diccionari digital [Data de consulta: 09-05-2015] [Accés gratuït]<  
< <http://www.diccionari.cat/lexicx.jsp?GECART=0138183>>.
- www.moodle.urv.cat. *Exemple documents bàsics del pressupost*. [Consulta en línia] Article digital [Data de consulta: 09-05-2015] [Accés restringit] <  
< <http://moodle.urv.cat/moodle/mod/folder/view.php?id=1389896>>.

### ***Millores del sistema***

- Arduino. *Arduino homepage*. [Consulta en línia] Pàgina web de la empresa de l'Arduino [Data de consulta: 10-05-2015] [Accés gratuït]  
< <http://www.arduino.cc/>>.
- Wikipèdia. *Arduino*. [Consulta en línia] Enciclopèdia digital [Data de consulta: 11-05-2015] [Accés gratuït]  
< <http://es.wikipedia.org/wiki/Arduino>>.
- Arduino. *Descarga del software d'Arduino*. [Consulta en línia] Pàgina web de l'empresa de l'Arduino [Data de consulta: 11-05-2015] [Accés gratuït]  
< <http://www.arduino.cc/en/Main/Software>>.
- Arduino. *Referència del llenguatge de programació*. [Consulta en línia] Article digital [Data de consulta: 11-05-2015] [Accés gratuït]  
< <http://www.arduino.cc/en/Reference/HomePage>>.
- Wikipèdia. *Processing*. [Consulta en línia] Enciclopèdia digital [Data de consulta: 04-05-2015] [Accés gratuït]  
< <http://es.wikipedia.org/wiki/Processing>>.
- Arduino. *Arduino UNO*. [Consulta en línia] Article digital [Data de consulta: 12-05-2015] [Accés gratuït]  
< <http://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>>.
- Arduino. *Arduino UNO, Reference desing*. [Consulta en línia] Article digital [Data de consulta: 05-05-2015] [Accés gratuït]  
< [http://www.arduino.cc/en/uploads/Main/Arduino\\_Uno\\_Rev3-schematic.pdf](http://www.arduino.cc/en/uploads/Main/Arduino_Uno_Rev3-schematic.pdf)>.
- Arduino. *Tutorial exemples*. [Consulta en línia] Article digital [Data de consulta: 29-05-2015] [Accés gratuït]  
< <http://www.arduino.cc/en/Tutorial/HomePage>>.
- Atmel Corporation. *Datasheet microcontroller ATmega328P*. [Consulta en línia] Article digital [Data de consulta: 29-05-2015] [Accés gratuït]

<[http://www.atmel.com/images/Atmel-8271-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega48A-48PA-88A-88PA-168A-168PA-328-328P\\_datasheet\\_Complete.pdf](http://www.atmel.com/images/Atmel-8271-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega48A-48PA-88A-88PA-168A-168PA-328-328P_datasheet_Complete.pdf)>.

- Blog fuenteabierta.teubi.co. *El convertidor Análogo-Digital en Arduino*. [Consulta en línia] Article digital [Data de consulta: 29-05-2015] [Accés gratuït]  
< <http://fuenteabierta.teubi.co/2013/04/el-convertidor-analogo-digital-en.html>>.
- www.ulpgc.es. *Informació de filtres actius*. [Consulta en línia] Article digital [Data de consulta: 29-05-2015] [Accés gratuït]  
< <http://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/29/29861/filtros.pdf>>.
- www.hu.es. *Anàlisis i disseny de filtres actius*. [Consulta en línia] Article digital [Data de consulta: 29-05-2015] [Accés gratuït]  
< [http://www.uhu.es/dario.garcia/Tema\\_6.pdf](http://www.uhu.es/dario.garcia/Tema_6.pdf)>.

\*Algunes de les imatges reproduïdes i seccions de text en aquest projecte estan sota llicència “creative commons”.