

Aquest treball està subjecte - excepte que s'indiqui el contrari- en una llicència de Reconeixement-NoComercial-SenseObraDerivada 2.5 Espanya de Creative Commons. Podeu copiar-lo, distribuir-lo i transmetre'l públicament sempre que citeu l'autor i l'obra, no es faci un ús comercial i no es faci còpia derivada. La llicència completa es pot consultar en <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/es/deed.es>.

Enginyeria Tècnica de Telecomunicacions, especialitat en Telemàtica

DISSENY D'UN SISTEMA D'AVUACIÓ DE LA INTEGRITAT ESTRUCTURAL

Gustau Zariquiey i Esteva
Tutor: Asier Ibeas Hernández

CURS 2010-11 (Febrer)

Índex

1. Introducció.....	5
2. Estudi teòric del problema plantejat.....	15
3. Etapa amplificadora.....	26
4. Circuit de decisió i activació d'alarma.....	32
5. Disseny del layout.....	36
6. Valoració econòmica d'un prototip.....	46
7. Conclusions.....	51
Bibliografia.....	53
Annexos.....	56

Índex de Figures

Fig.1: Biga i possibles deformacions.....	5
Fig.2: Diagrama de blocs del sistema global.....	7
Fig.3: Tasques del diagrama de Gantt.....	11
Fig.4: Orientació de les galgues.....	17
Fig.5: Relació entre tensió mecànica i deformació $(x,y)=(\epsilon,\sigma)$	17
Fig.6: Disposició de les galgues per pal·liar l'efecte tèrmic i duplicar la sensibilitat.....	19
Fig.7: Estructura del Pont de Wheatstone.....	22
Fig.8: Pont amb quatre galgues.....	23
Fig.9: Amplificador diferencial.....	26
Fig.10: Ponts de Wheatstone i amplificadors diferencials.....	27
Fig.11: Circuit valor absolut.....	28
Fig.12: Valor absolut i comparador.....	29
Fig.13: Comparador analògic.....	33
Fig.14: Esquemàtic definitiu.....	34
Fig.15: Sirena acústica.....	35
Fig.16: Sirena lluminosa.....	35
Fig.17: Exemple de grup de components.....	38
Fig.18: <i>Layout</i> definitiu.....	41
Fig.19: Cara <i>top</i> del layout.....	42
Fig.20: Cara <i>bottom</i> del layout.....	43
Fig.21: Configuració del fitxer <i>definitiu.top</i>	44

Índex de Taules

Taula 1: Planificació de tasques.....	8-9-10
Taula 2: Probabilitat-Efecte dels riscos.....	11
Taula 3: Valors resistius en funció de la deformació.....	21
Taula 4: Valors de tensió a la sortida del pont en funció de la deformació.....	29
Taula 5: Simulació de tres possibles situacions.....	31
Taula 6: Relació de preus dels components (Farnell).....	47
Taula 7: Relació de preus dels components (Cetronic).....	47
Taula 8: Relació de preus dels components (Onda Radio).....	48
Taula 9: Relació de preus dels components (Mouser Electronics).....	48
Taula 10: Relació de preus dels components (Reid Technology).....	48
Taula 11: Preu dels components i de la placa.....	49
Taula 12: Preu total del Projecte.....	50

1. Introducció

Amb aquest document, presentem el desenvolupament sencer del Treball Final de Carrera (TFC), començant amb una breu descripció i més endavant entrant en detalls tècnics de la solució proposada. D'entrada farem una descripció general del projecte per situar el lector i a continuació mostrem la planificació temporal i els riscos existents i les possibles solucions que haurem de prendre per al correcte desenvolupament del mateix. Després, mostrem la solució al problema plantejat i en fem una valoració econòmica. Per acabar, exposem les conclusions i amb la bibliografia i els annexos documentem les fonts d'informació consultades.

El que persegueix aquest TFC és el disseny d'un sistema que avaluï la integritat estructural d'una biga a través d'uns sensors anomenats galgues extensomètriques. Aquestes, varien les seves propietats elèctriques quan el material sobre el qual estan muntades pateix una deformació: així, podrem mesurar una variació de la forma de la biga i tractar-la com qualsevol altra magnitud elèctrica.

A la Figura 1 presentem una biga teòrica, de secció rectangular, per entendre quines deformacions pot patir.

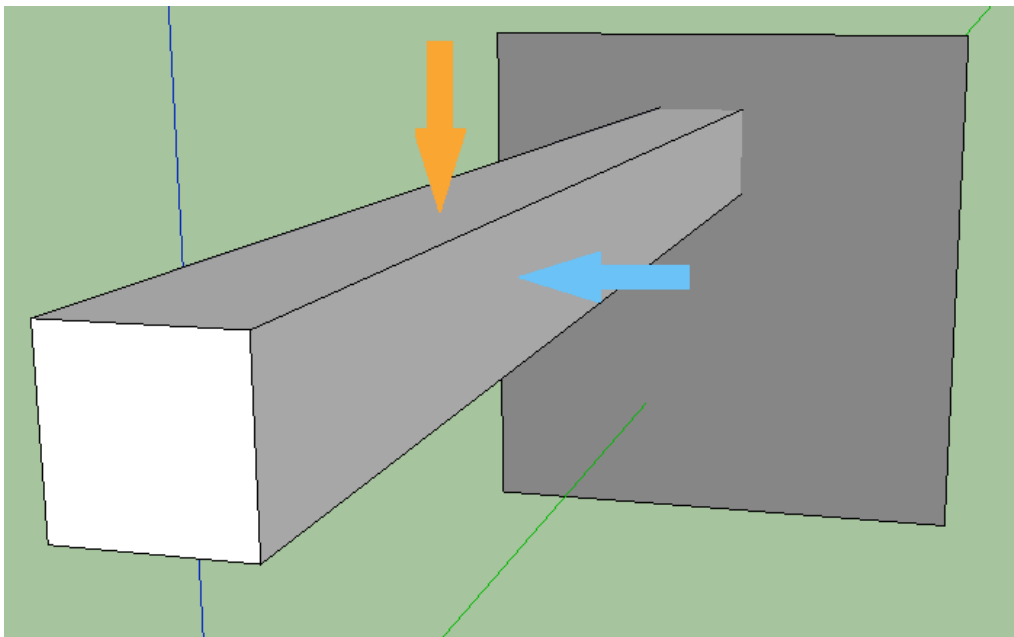


Fig.1: Biga i possibles deformacions

Existeix una possible deformació vertical (indicada amb una fletxa taronja) que podria ser conseqüència del pes d'un camió de gran tonatge i una altra relacionada amb l'esforç horitzontal que podria aparèixer per culpa del vent, senyalada amb una fletxa de color blau. Les dues fletxes marquen les direccions de les deformacions potencials però poden manifestar-se en els dos sentits possibles (amunt o avall, en el cas vertical, o cap a la dreta o l'esquerra, en el cas horitzontal). Com que això suposa un perill per a la seguretat de la biga i de les persones que puguin haver-hi al seu entorn, el sistema que

desenvolupem en aquest Projecte monitoritza aquestes deformacions per tal de poder avisar del perill, mitjançant alarmes.

Per començar el disseny del sistema d'avaluació, primer haurem de documentar-nos sobre els tipus i models de galgues existents actualment i posteriorment fer un disseny del sistema de mesura a través d'una estructura elèctrica molt coneguda, anomenada Pont de Wheatstone (el qual detecta molt fàcilment una variació de resistència i permet fer-ne l'avaluació a la sortida del circuit), [1].

Serà necessari, també, amplificar el senyal per tal que aconseguixi un ordre de magnitud més gran i poder-lo tractar sense patir pel soroll elèctric. A partir d'aquí, ja podem activar un circuit d'alarma en el cas que la deformació de la biga comprometi la integritat estructural.

Per finalitzar el disseny caldrà completar-lo amb un entregable anomenat *gerber*, que és un format de fitxer a partir del qual es fabrica la placa elèctrica de qualsevol circuit. Aquest és el destí material d'aquest Treball Final de Carrera: l'obtenció d'un fitxer que reuneixi la solució al problema plantejat.

A l'apartat 1.2, exposarem els objectius que persegueix aquest document i també el projecte i al 1.3 descriurem el sistema que resoldrà el problema plantejat. El quart i cinquè apartats tracten la planificació de totes les tasques imprescindibles per a poder desenvolupar el projecte fins al final, els riscos associats i possibles solucions que podem adoptar. Després, al 1.6, llistem els materials necessaris i al 1.7 estructurem el treball.

1.2 Objectius

Els objectius d'aquest document són presentar la solució que resoldrà l'enunciat proporcionat, a partir del disseny d'una placa que reuneixi un estudi i un desenvolupament fonamentat en els conceptes i estratègies apreses durant la carrera. Es tracta de dissenyar un circuit des de bon principi, amb dos requeriments: utilitzar un tipus de sensor concret (la galga extensomètrica, que explicarem més endavant al punt 2) per mesurar la deformació que pateix una biga en volada i fer servir Ponts de Wheatstone.

En concret, els objectius del projecte són:

1.- Analitzar les possibles deformacions de la biga, els tipus de galgues existents i les magnituds de treball d'aquests components electrònics: fet això, podem dissenyar el circuit de mesura que ens proporcionarà una magnitud elèctrica fruit de la deformació.

2.- Dissenyar l'etapa amplificadora: hem d'aconseguir que la magnitud elèctrica anterior tingui un valor suficientment alt per no ser alterada pel soroll elèctric.

3.- Dissenyar el circuit discriminador: ens permetrà saber si la deformació soferta és obvia, digna de ser tinguda en compte o preocupant. En els dos últims casos, el circuit haurà de generar una sortida que el següent bloc aprofitarà.

4.- Dissenyar el mòdul d'alarma: encarregat d'activar una alarma si rep el corresponent senyal del circuit previ.

5.- Passar a ordinador els dissenys anteriors per obtenir una simulació i acabar dissenyant la PCB (*Printed Circuit Board*, la placa resultant que estarà llesta per fabricar i funcionar).

Finalment, malgrat que no és l'última tasca, sinó que s'ha d'anar construint a cada pas, el redactat d'una memòria deixarà plasmat tot el procés d'investigació i l'acompanyarà un vídeo enregistrat que aportarà una explicació oral del treball.

1.3 Descripció del sistema

A la Figura 2 mostrem un diagrama de blocs on s'hi identifiquen les diverses parts de què consta el disseny per facilitar una visió global de les fases del desenvolupament del projecte.

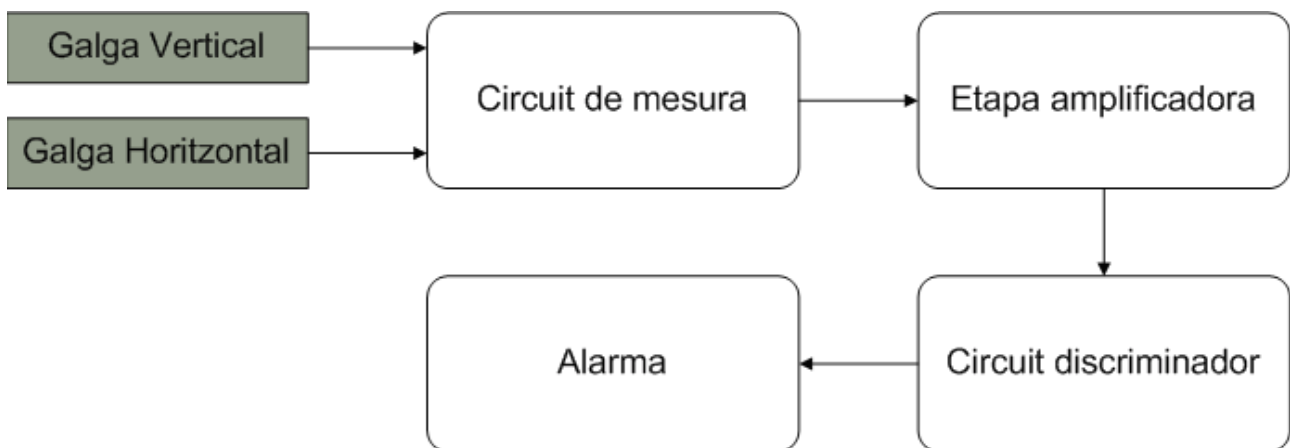


Fig.2: Diagrama de blocs del sistema global

Breument, describim què fa cadascun dels blocs anteriors i en demostrem la viabilitat:

- ◆ Les galgues: sensibles a deformacions de la biga, [2]. Per col·locar-les amb garantia, caldrà usar un adhesiu potent especial amb aquesta finalitat. D'aquesta manera ens assegurem que no es desprenguin i falsifiquin el resultat o en donin un d'erroni. Amb aquest bloc assolirem aproximadament la meitat del primer objectiu.
- ◆ El circuit de mesura basat en el Pont de Wheatstone, [1]: és una estructura sensible a les variacions de resistència elèctrica i que proporciona resultats fidels a la realitat mesurada. El valor de sortida és una tensió proporcional a la deformació mesurada, de manera que si la sortida és nul·la, indica el correcte estat del material estudiat. Amb aquest segon bloc assolirem per complet el primer objectiu.

◆ L'etapa amplificadora: encarregada d'adaptar i d'amplificar el senyal que surt del circuit de mesura a les necessitats del circuit discriminador, [3]. Es basarà en amplificadors operacionals perquè són circuits integrats molt versàtils i fàcils de configurar, fet que facilita el disseny. Aquesta part correspon completament amb el segon objectiu, aquí ja tindrem els dos primers objectius assolits.

◆ El circuit discriminador: activarà l'alarma en cas que sigui necessari a partir d'un simple comparador lògic entre un valor prefixat i la senyal provinent de l'amplificador: si se supera el llindar establert, segons els requeriments per la integritat de la biga, s'activarà una sortida per encendre l'alarma. Equival a obtenir per complet l'objectiu 3.

◆ L'alarma: serà activada pel circuit discriminador si existeix un risc per la biga, segons dos rangs de deformació. En el cas que la biga s'hagi malmès molt i comporti un risc per la seguretat, l'alarma serà visual i auditiva, mentre que si la deformació ha estat lleu i es pot arreglar fent manteniment de l'estructura, l'indicador serà només visual. Arribats aquí, ja tindrem els 4 objectius inicials aconseguits.

El cinquè, i últim, objectiu ens permetrà implementar físicament el sistema, atès que és el resultat del correcte assoliment de tots els altres i es presenta en forma d'entregable.

1.4 Planificació

En aquest punt del present document planificarem el desenvolupament del Treball Final de Carrera, des d'un punt de vista temporal. En primer lloc, ens cal llistar totes les tasques necessàries, tenint en compte el seu cost temporal, i després fixarem fites que marquin la correcta evolució del projecte i que ens serviran com a referència durant tot el període de vigència per situar-nos i saber en quin estat es troba el Treball.

A la Taula 1, mostrem el que creiem que serà el procés de realització del Treball Final de Carrera, tot i que pot ser modificat si alguna tasca es veu dificultada o canvia l'entorn de treball i cal reestructurar-lo. Al final de la descripció hi ha la previsió d'hores de dedicació. Les tasques emmarcades en verd són fites temporals que marquen un compliment obligatori del calendari (exposat després de la taula).

Tasca	Descripció	Tasca requisit
1	Inici de la PAC1: lectura de l'enunciat, del pla docent de l'assignatura i prendre un primer contacte amb el Tutor. [3h]	

Tasca	Descripció	Tasca requisit
2	Cerca d'informació: (2.1) documentar-se sobre les galgues extensomètriques i sobre els diagrames de planificació temporal per fer-se una idea inicial de les eines de treball. Mentrestant, (2.2) anar redactant la bibliografia per deixar documentades totes les cerques interessants realitzades. [25h]	
3	Estudi de les galgues extensomètriques aplicades a la mesura de la deformació: possibles circuits de mesura, correcció (o minimització) d'errors. [17h]	2
4	Primer contacte amb el OpenProj , programari utilitzat per a fer el diagrama de Gantt. [3h]	
5	Planificació: previsió de tasques i d'hores de feina per cadascuna. [3h]	
6	Realització del diagrama de Gantt. [6h]	4
7	Assistència a la trobada presencial amb el Tutor. [6h, comptant el temps de desplaçament]	
8	Retocar detalls comentats a la trobada. [4h]	7
9	Entrega de la PAC1.	3, 6 i 8
10	Inici de la PAC2: lectura de l'enunciat. [3h]	
11	Correcció dels períodes entre tasques en funció de la correcció de la PAC1. [2h]	9
12	Primer contacte amb el programari de disseny de circuits necessari. Documentació. [5h]	
13	Dissenyar el circuit (per blocs). [2h]	
14	Dissenyar internament els blocs amb detall: mesura de les deformacions, etapa amplificadora, circuit discriminador i mòdul d'alarmes. [20h]	
15	Correcció prèvia amb el Tutor. [1h]	
16	Passar els circuits a ordinador amb el programari corresponent. [4h]	14
17	Entrega PAC2.	
18	Correcció de la PAC2 i retoc del que correspongui. [2h]	
19	Escollir programari editor de <i>layouts</i> i simular el circuit. [10h]	

Tasca	Descripció	Tasca requisit
20	Dissenyar el <i>layout</i> i generar el <i>gerber</i> . [15h]	19
21	Entrega PAC3.	20
22	Redactar memòria: recollir els passos seguits des de la tasca 1 i afegir-hi les conclusions. [40h]	7, 16 i 21
23	Fer una prèvia correcció. [4h]	22
24	Enregistrament del vídeo expositiu de durada màxima de vint minuts. [20h]	
25	Entrega TFC.	23 i 24

Taula 1: Planificació de tasques

Compromisos personals: s'han de tenir en compte pel que fa a la indisponibilitat:

- ◆ Dissabte 2 d'abril de 2011: bateig de la filla d'un cosí. Dinar i berenar familiar. La celebració serà a Berga i no es podran dedicar hores al treball durant tot el cap de setmana.
- ◆ Del dissabte 16 d'abril al diumenge 17 d'abril de 2011: sortida amb bicicleta. Indisponibilitat absoluta.

Dates de compliment obligatori: les entregues d'altres treballs de la UOC:

- ◆ Dilluns 23 de maig de 2011: lliurament PAC4 de Sistemes telemàtics i lliurament de la PAC4 de Xarxes i Serveis. Encavalcament amb pràctica de Seguretat i Xarxes de computadors.
- ◆ Dissabte 28 de maig de 2011: lliurament de la pràctica de Seguretat i Xarxes de Computadors.

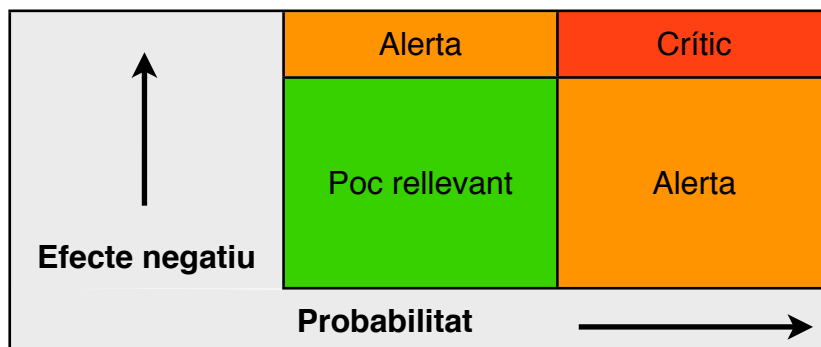
A la Figura 3 presentem la taula amb les tasques del Projecte. El diagrama de Gantt l'hem tret a partir d'aquí però per motius estètics no l'hem afegit perquè les tasques duren poc temps i el diagrama general queda segmentat. Malgrat això, a la imatge següent podem veure-hi les dates d'inci i final de cada tasca, les hores de feina (expressades en dies, establerts aquests de vuit hores) i les dependències entre elles.

	📌	Nombre	Duración	Inicio	Terminado	Predecessores
1		Inici de la PAC1	0,375 days	2/03/11 14:00	2/03/11 17:00	
2	📌	☐ Cerca d'informació	3,125 days	3/03/11 9:00	4/03/11 10:00	
3	📌	Documentació	3,125 days	3/03/11 9:00	4/03/11 10:00	
4	📌	Redactat bibliografia	2,5 days	3/03/11 9:00	4/03/11 5:00	3
5	📌	Estudi galgues	2,125 days	5/03/11 1:00	5/03/11 18:00	4
6	📌	Primer contacte amb OpenProj	0,375 days	7/03/11 8:00	7/03/11 11:00	
7	📌	Planificació	0,375 days?	11/03/11 16:00	11/03/11 19:00	
8	📌	Diagrama de Gantt	0,75 days	11/03/11 19:00	12/03/11 1:00	7
9	📌	Trobada Presencial	0,75 days	12/03/11 2:00	12/03/11 8:00	
10	📌	Retocar Pla de Treball	0,5 days	12/03/11 8:00	12/03/11 12:00	9
11	📌	Entrega PAC1	0,125 days	15/03/11 12:00	15/03/11 13:00	
12	📌	Inici de la PAC2	0,375 days	16/03/11 7:00	16/03/11 10:00	
13	📌	Correcció PAC1	0,25 days	16/03/11 9:00	16/03/11 11:00	12
14	📌	Primer contacte amb SW disseny	0,625 days	18/03/11 9:00	18/03/11 14:00	
15	📌	Disseny per blocs del circuit	0,25 days	4/04/11 8:00	4/04/11 10:00	
16	📌	Disseny circuit amb detalls	21,125 d...	4/04/11 16:00	11/04/11 17:00	
17	📌	Correcció prèvia PAC2	19,125 d...	5/04/11 8:00	11/04/11 17:00	
18	📌	Passar circuits a ordinador	16,125 d...	6/04/11 8:00	11/04/11 17:00	16FS+2 days
19	📌	Entrega PAC2	0 days	12/04/11 15:00	12/04/11 15:00	
20	📌	Inici de la PAC3	0 days?	13/04/11 8:00	13/04/11 8:00	
21	📌	Correcció PAC2	0,25 days	18/04/11 8:00	18/04/11 10:00	
22	📌	Escollir SW disseny circuit	1,25 days	19/05/11 6:00	19/05/11 16:00	
23	📌	Disseny layout + gerber	1,875 days	20/05/11 8:00	20/05/11 23:00	22FS+2 days
24	📌	Entrega PAC3	0 days?	24/05/11 8:00	24/05/11 8:00	
25	📌	Redacció memòria	5 days?	27/05/11 0:00	28/05/11 16:00	
26	📌	Correcció prèvia	0,5 days?	30/05/11 8:00	30/05/11 12:00	25FS+5 days
27	📌	Enregistrament vídeo	2,5 days?	2/06/11 11:00	3/06/11 7:00	
28	📌	Entrega TFC	0 days	6/06/11 15:00	6/06/11 15:00	27FS+10 days

Fig.3: Tasques del diagrama de Gantt.

1.5 Anàlisi de riscos i plans de contingència

Com en tot projecte de mitjana durada existeixen riscos que poden no afectar, afectar poc o tenir una implicació directa amb el possible i no desitjable fracàs. Cal valorar, per cadascun d'ells, la probabilitat d'aparició i l'efecte que poden tenir. Els que haurem de tenir molt en compte i contra els quals haurem d'actuar amb la màxima rapidesa són els d'alta probabilitat i d'efecte negatiu. A la taula 2 hi veiem la representació gràfica del que acabem d'exposar: de menys a més (pel que fa a l'efecte i a la probabilitat) augmenta l'atenció que hi haurem de dedicar.



Taula 2: Probabilitat-Efecte dels riscos

Els llistem a continuació i proposem un pla de contingència: la solució o la mesura que més minimitzi l'efecte que pugui tenir el risc. Les preocupants són les imprevisibles.

1.5.1 Malaltia **(Crític)**

En el cas que l'autor pateixi una malaltia greu que l'impedeixi treballar amb l'ordinador, el treball es veuria greument afectat perquè no seria possible l'entrega.

Pla de contingència: recuperar les hores, fent sessions extraordinàries.

1.5.2 Impossibilitat de disposar de l'ordinador personal **(Crític)**

En el cas que hi hagi un robatori, un problema informàtic que suposi el no funcionament de l'aparell o qualsevol altre motiu que impossibiliti l'ús del mateix, el treball es veuria molt afectat perquè és difícil aconseguir un ordinador Apple provisional sense haver-lo de comprar. També inclosa la pèrdua dels documents que es van redactant i generant al llarg de tot el TFC.

Pla de contingència: intentar aconseguir un ordinador amb sistema operatiu *MAC OS* o aprofitar els documents existents que puguin ser oberts amb un altre sistema operatiu i realitzar còpies de seguretat constantment per evitar perdre hores de dedicació.

1.6 Materials necessaris

Per a resoldre el projecte encarregat ens farà falta suport informàtic, documentació, cooperació amb el tutor i tot un conjunt de recursos que englobem en humans, temporals i materials.

1.6.1 Recursos humans

Per a enllestir la tasca assignada cal dedicar-hi hores, incloses dins els recursos humans destinats a resoldre l'enunciat.

Comptem tant les de l'autor com les del consultor que fa seguiment del desenvolupament del treball com les dels companys d'aula que, amb una interacció indirecta al Fòrum de l'assignatura, aporten documentació i aclariments sobre el tema que s'està tractant.

1.6.2 Recursos temporals

Aquests, són el conjunt d'hores (en global dies o setmanes) dedicades a la resolució del projecte.

Hi són incloses les hores dedicades a la documentació, la trobada presencial amb el Tutor i qualsevol gestió dedicada al desenvolupament del Treball.

1.6.3 Recursos materials

Per a realitzar les diverses tasques del present document, hem fet servir tot un seguit d'aparells i programaris que llistem a continuació:

◆ *Programaris de lliure distribució*

- [Open Proj](#): gestor i planificador de projectes. Utilitzat per a planificar el Projecte i extreure'n el Diagrama de Gantt.
- [Firefox](#): navegador web, per cercar informació, mantenir contacte amb el Tutor i entregar les PACs.
- [TINA-TU](#): eina per realitzar esquemàtics de circuits electrònics i simulacions que ha permès dissenyar i simular el circuit per obtenir la solució definitiva.
- [Adobe Reader](#): distribució gratuïta que permet llegir documents en format PDF (*Portable Document Format*).
- [Eagle \(CadSoft\)](#): editor de *layout*, permet crear la placa de circuit imprès i generar els fitxers "gerbers" per enviar-ho a fabricar. Versió 5.11.0.
- [Google Sketchup](#): programari de modelatge en 3D per dibuixar la biga.

◆ *Programaris distribuïts amb llicència de pagament*

- [Pages](#), del Sistema Operatiu Macintosh (*MAC OS*): redactor de textos
- [Numbers](#) (*MAC OS*): fulla de càlcul
- [Grapher](#) (*MAC OS*): permet escriure equacions i fer gràfics
- [Microsoft Office Visio Professional 2003](#): (*Windows*) dibuix vectorial (realització de diagrames de flux, diagrames UML, diagrames de blocs, etc)

◆ *Aparells electrònics*

- [Calculadora Casio fx-100MS](#)
- [Ordinador Apple MacBook Pro](#) (amb SSOO MAC)
- [Ordinador Dell Inspiron 6000](#) (amb SSOO Windows)

1.7 Estructura del Treball Final de Carrera

El Treball Final de Carrera consta de set capítols i de dos annexos que recullen l'estudi teòric del problema plantejat i la solució pràctica que s'ha adoptat. Comença amb una introducció i continua amb el mètode de mesura que s'utilitza. Posteriorment s'expliquen amb detall les diverses parts que componen el disseny proposat com a solució i els passos intermitjos que permeten passar d'un dibuix sobre paper a una placa preparada per funcionar. Finalment, amb les conclusions es resumeixen les expectatives assolides i la visió global del Projecte un cop acabat i la bibliografia permet recuperar les fonts consultades. Als annexos hi ha les característiques tècniques de la galga extensomètrica i dels components reals fets servir i el pressupost en línia de l'empresa escollida per fabricar un prototip de la placa, en el cas que es portés a la pràctica el disseny. A continuació descrivim breument el contingut de cadascun d'ells.

A l'apartat 2 es fa un estudi tèoric del problema plantejat i de les propietats de les galgues extensomètriques, així com del comportament d'un circuit constituït per Ponts de Wheatstone [1].

Al punt 3 es dimensiona l'etapa amplificadora que va a continuació dels Ponts de Wheatstone.

A l'apartat 4 es resol la decisió d'activar l'alarma i es proposen dos blocs indicadors de perill. Aquest apartat resol per complet el disseny teòric del circuit que demana l'enunciat.

Al punt 5 hi ha l'explicació de què és i com s'aconsegueixen els *gerbers*, uns fitxers amb la informació necessària per enviar a fabricar una placa de circuit imprès amb el nostre disseny.

Al punt 6 calculem el preu del Projecte, comptant els materials i els recursos humans destinats.

A les conclusions analitzem el Treball un cop acabat, resumint els problemes i solucions que han anat apareixent durant tot el desenvolupament.

Finalment, a la bibliografia llistem totes les fonts consultades de les quals hem agafat informació per afegir-les al Treball i als annexos adjuntem les característiques tècniques dels components electrònics utilitzats i el pressupost del que costaria fabricar tres unitats de la placa dissenyada.

2. Estudi teòric del problema plantejat

En aquest capítol, reunim l'anàlisi teòric de les parts del disseny descrites a l'apartat 1.3 "Descripció del sistema". Per començar, farem una explicació de les galgues extensomètriques des d'un punt de vista teòric, als apartats 2.1 fins al 2.5. A continuació, a l'apartat 2.6 en veurem aplicacions i al 2.7 explicarem quin circuit farem servir per a la mesura.

2.1 Definició de galga extensomètrica

Les galgues extensomètriques (en anglès *strain gauge*) són components electrònics que se solen classificar com sensors perquè són sensibles als canvis de forma i de volum del material sobre el qual estan col·locades (habitualment alumini, acer o formigó), quan aquest es veu deformat per una força. A un nivell superior, també es classifiquen com a cèl·lules de càrrega, que alhora són transductors: dispositius que transformen una magnitud en una altra. En el nostre cas, els transductors mesuren la variació percentual de longitud ($\Delta L/L$) o extensió que pateix un material quan se li aplica una força o tensió i la transformen a una magnitud resistiva.

Quan una força modifica la forma d'una biga la galga també es deforma, fet que fa variar les seves propietats resistives perquè pateix l'**efecte piezoresistiu**. En alguns encenedors actuals, a partir d'una deformació produïda quan apremem el botó es genera una diferència de potencial (tensió elèctrica que veiem en forma d'espurna); llavors es diu que el material experimenta un **efecte piezoelèctric**. Aquesta propietat pren el seu nom de pressió-resistivitat o pressió-electricitat, en funció del cas: la pressió passa a ser electricitat o resistència elèctrica, o a l'inrevés, [2].

La clau per avaluar la deformació que pugui tenir el material a estudiar rau en aprofitar aquesta variació de la resistència elèctrica de la galga: un Pont de Wheatstone ens permetrà aprofitar aquest fenomen perquè és un circuit que basa el seu comportament en trencar un equilibri quan varia una de les resistències que el componen; ho veurem a l'apartat 2.7 "Circuit de mesura" amb més detall.

2.2 Tipus de galgues extensomètriques i funcionament

Principalment n'existeixen de dos tipus: de metàl·liques i de semiconductores. Les primeres són aliatges de coure i ferro, platina i silicialista o platí, generalment, i les segones es construeixen a partir de silici o germani, [3].

El funcionament és el mateix en tots els casos: un cop estan instal·lades sobre el material que es vol estudiar, varien les seves propietats elèctriques (el valor resistiu) en funció de la deformació soferta. El valor resistiu d'una galga (R_g) ve determinat per quatre paràmetres:

✦ **Ro, resistència nominal.** Valor resistiu (Ω) que té el component elèctric sense patir cap deformació, és a dir quan la tensió mecànica que rep (σ , explicada més avall) és nul·la.

✦ **K, factor de galga.** Sensibilitat (adimensional), variació percentual de la resistència elèctrica, respecte la variació percentual de longitud (ó deformació).

$$K = (\Delta R/R_0) / (\Delta L/L_0) \quad (1)$$

És a dir: relació que hi ha entre la variació de resistència elèctrica (respecte l'original, o nominal) i el canvi de longitud de la galga (respecte l'original). Aquesta dada ens la proporciona el fabricant del component i sol ser d'un valor aproximat de 2 (en galgues metà·liques) i d'entre 50 a 200 en les semiconductores.

✦ **E, Mòdul de Young o elàstic.** Constant elàstica, pròpia de cada material, que relaciona la deformació amb la tensió aplicada sobre el material, [4].

✦ **σ , tensió mecànica.** Pressió que rep el material estudiat, s'expressa en N/m^2 .

L'equació que permet saber el valor resistiu d'una galga, tenint en compte els paràmetres anteriors, és la següent:

$$R_g = R_0 \cdot [1 + (K/E) \cdot \sigma] \quad (2)$$

Tal i com està definida la relació (2), quan la pressió és nul·la ($\sigma=0$), $R_g=R_0$. En el moment en què es comença a aplicar una tensió (que provoca un allargament), el resultat final és un augment de la R_g , mentre que si la deformació és negativa (redueix la mida de la biga i, per tant, de la galga) l'aportació fa que la R_g disminueixi el seu valor.

2.3 Limitacions de funcionament

Les propietats d'alguns components electrònics es veuen afectades per les condicions meteorològiques de l'entorn, sobretot pel que fa a la temperatura, i requereixen que el dispositiu treballi en un rang concret de valors. En els dos subapartats següents exposem les limitacions de les galgues extensomètriques.

2.3.1 Sensibilitat a la temperatura i a l'autoescalfament

Les galgues extensomètriques són especialment sensibles a la temperatura. Per eliminar aquest efecte, la nostra proposta és col·locar una galga de característiques idèntiques sobre la mateixa superfície d'estudi, però desviada 90° respecte la primera: d'aquesta manera, la deformació no l'afectarà però la temperatura sí, i per igual que a l'altra galga i aconseguim compensar l'efecte tèrmic perquè no ens afecti a les mesures.

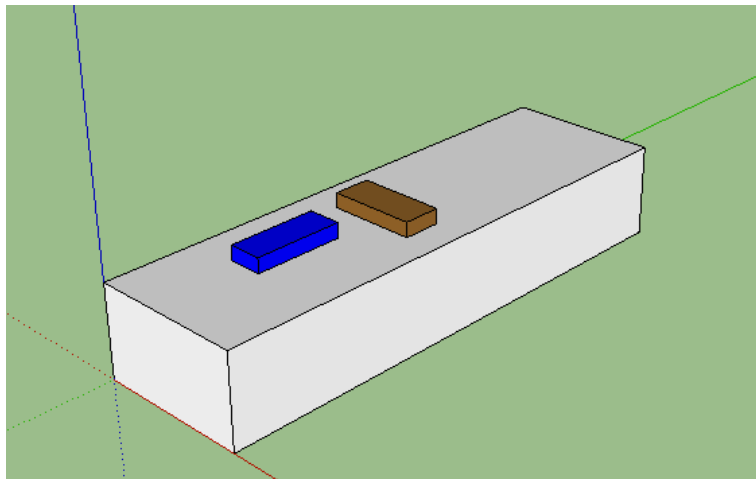


Fig.4: Orientació de les galgues

La galga de color blau de la Figura 4 és la que mesura la deformació de la biga, mentre que la de color marró ens minimitza l'efecte tèrmic.

Un altre problema que ens podem trobar és l'autoescalfament que pateixen els components elèctrics quan pel seu interior hi circula corrent elèctric: contra aquest fenomen no hi podem fer res, sempre haurem de comptar amb un error de mesura (per petit que sigui) produït pel propi funcionament del circuit.

2.3.2 Marge elàstic

Atès que tractem amb un component electrònic fet de materials metàl·lics, hem de tenir en compte que les deformacions que pot patir tenen un límit, abans no siguin irreparables. Si les condicions de treball de la galga es troben dins l'anomenada "zona lineal" no hem de patir, perquè recuperarà la seva forma quan desaparegui la tensió. A la Figura 5 podem veure la variació relativa de longitud dels materials dúctils, quan se'ls aplica una tensió σ . Prenem ϵ =deformació.

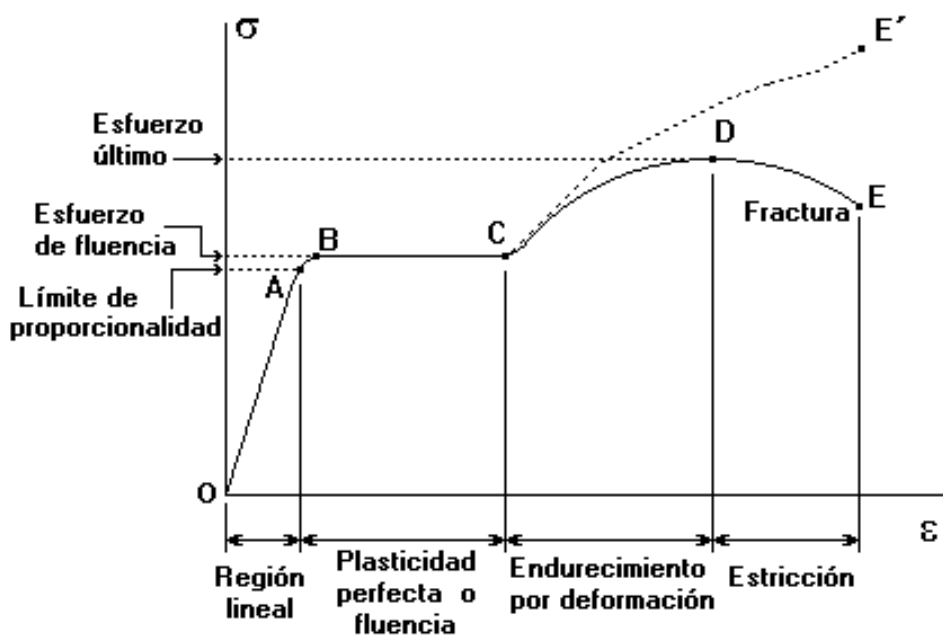


Fig.5: Relació entre tensió mecànica i deformació $(x,y)=(\epsilon,\sigma)$. Imatge extreta de [5].

A la Figura 5 es veuen diferenciades les regions dels diversos comportaments d'un material dúctil quan li és aplicat un esforç: com més dúctil sigui un material, més aguantarà un esforç abans de trencar-se. Per norma ens interessarà treballar a la regió lineal (elàstica, des de l'origen fins al punt "A") perquè el material no queda deformat per sempre, recupera la seva forma quan desapareix l'esforç.

2.4 Muntatge i distribució espacial

En aquest apartat analitzem com adherir les galgues a l'objecte d'estudi i com distribuir-les físicament. A l'hora de col·locar les galgues sobre la biga ens farà falta un adhesiu amb unes propietats característiques i una aplicació concreta.

2.4.1 Propietats de l'adhesiu

- ◆ **Molt fort:** ha de suportar l'adhesió de la galga sense trencar-se.
- ◆ **Amb un coeficient de deformació semblant al del material de la biga:** per no emmascarar els resultats i que la deformació produïda sobre la biga sigui transmesa fidelment a la galga.
- ◆ **Resistent a la intempèrie:** per aguantar les inclemències del temps i els canvis substancials de temperatures durant les quatre estacions meteorològiques de l'any.

2.4.2 Procés d'aplicació de l'adhesiu

Un dels requisits que exigeix el muntatge és fer-lo en unes determinades condicions meteorològiques. Els adhesius agafen fort quan absorbeixen humitat de l'aire, sobretot quan aquesta es troba entre un 30 i un 80%. Amb menys humitat, el procés d'adhesió es retrassa i fins i tot es pot arribar a aturar; amb més percentatge el procés es completa correctament però la vida útil del material adhesiu queda reduïda.

Pel que fa al gruix de la cola, és recomanable fer capes fines per un millor assecat i esperar unes vint-i-quatre hores per assegurar que ha acabat el procés.

2.4.3 Distribució espacial de les galgues

A l'hora de decidir la disposició de les galgues a la biga hem de tenir en compte les dues direccions potencials de mesura i el remei contra l'efecte de la temperatura explicat a l'apartat 2.3.1. Les haurem de col·locar a la meitat de la biga perquè en els extrems (unió amb la columna, paret o element constructiu que sigui) és on menys es notarà la tensió. Si suposem una biga de secció rectangular com la mostrada a la Figura 1, dues de les cares estan relacionades amb la deformació vertical i dues amb la horitzontal. Analitzem només una de les dues direccions possibles de deformació, la vertical, ja que l'altre segueix el mateix raonament.

El nostre objectiu és obtenir informació de la deformació vertical i, per aquest motiu, aquests sensors han d'estar situats a les dues cares horitzontals de la biga. Tal com hem

mostrat a la Figura 4, la galga ha d'estar orientada en la direcció de màxima deformació possible, és a dir, longitudinalment i no transversalment: com la de color blau.

Per tenir més detall de mesura proposem duplicar el nombre de galgues: si en posem una a la part superior (com mostrem a la Figura 6) i una a la part inferior alineada verticalment amb la primera, la de dalt mesurarà la tensió i la de baix la compressió que pateix la biga, per igual. D'aquesta manera, multipliquem per dos la sensibilitat.

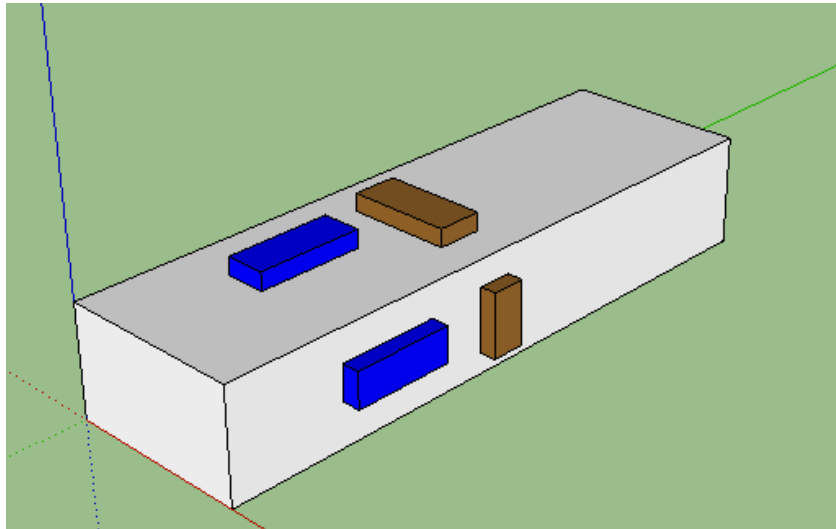


Fig.6: Disposició de les galgues per pal·liar l'efecte tèrmic i duplicar la sensibilitat

A la Figura 6 veiem que per cada cara de la biga necessitem dues galgues, una activa (la que mesura la deformació) i una altra de passiva (que compensa l'efecte de la temperatura), és a dir vuit galgues en total. Les dues cares de la biga que no es mostren a la figura anterior són completament iguals.

2.5 Característiques

Com a avantatges destaquen les seves reduïdes dimensions i la immunitat als camps magnètics, la qual cosa facilita la seva aplicació en construccions en entorns industrials on hi sol haver força soroll de tot tipus (magnètic, tèrmic i elèctric).

Per contra, tenen els inconvenients de generar a la sortida del circuit on estan inserides un senyal feble (explicat a l'apartat següent) i de requerir un manteniment de la instal·lació per culpa del deteriorament de l'adhesiu que les manté unides al material.

2.6 Aplicació a la mesura de deformacions

Un cop descrits els paràmetres que marquen el valor resistiu d'una galga extensomètrica a l'apartat 2.2, treballem amb ells per arribar a l'expressió final que ens indicarà quant varia la resistència, en funció de la força aplicada. Prenem (1) i canviem el denominador pel seu equivalent: $\Delta L/L_0$ = variació de longitud normalitzada o allargament unitari ϵ .

$$K = (\Delta R/R_0) / (\Delta L/L_0)$$

$$K = (\Delta R/R_0) / \varepsilon$$
$$\Delta R = K \cdot R_0 \cdot \varepsilon \quad (3)$$

L'equació (3) és l'expressió clau en aquest treball, la base a partir de la qual podem dissenyar el circuit de mesura perquè descriu el comportament resistiu de la galga. Notem que $\Delta R = R_{\text{deformada}} - R_0$, és a dir podem expressar l'equació (3) de la següent manera:

$$\Delta R = R_{\text{deformada}} - R_0 = K \cdot R_0 \cdot \varepsilon$$
$$R_{\text{deformada}} = R_0 + K \cdot R_0 \cdot \varepsilon$$
$$R_{\text{deformada}} = R_0(1 + K \cdot \varepsilon) \quad (4)$$

És fàcil identificar l'equació (1) en la demostració anterior, són expressions equivalents. Tenint en compte (4) i que ε té uns límits (la deformació és limitada, tant per allargament com per escurçament), acotem a continuació els valors que pot prendre $R_{\text{deformada}}$, a partir dels valors límit d' ε . Ignorant el signe, quan la biga s'allargui (fruit d'una tensió) ε prendrà un valor igual al que prendria si la biga s'escurcés, és a dir:

$$|\varepsilon_{\min}| = |\varepsilon_{\max}| \quad (5)$$

A l'equació 5 veiem el mòdul, però ens falta definir el signe d' ε . Prenent la definició (del principi de l'apartat 2.6) $\varepsilon = \Delta L/L_0$, el signe vindrà determinat per $\Delta L = L_{\text{deformada}} - L_0$ i pot ser tant positiu com negatiu (en funció de si la longitud final és major, o menor respectivament, que la longitud nominal de la galga). A partir d'aquí, ens hem de fixar en les característiques tècniques de la galga concreta que farem servir per saber quant es pot arribar a allargar o a contraure.

En estructures com ara les bigues, la llargada d'un element s'anomena *llum*. Segons la recomanació Eurocode [6] (que fixa el límit admissible de deformacions en funció del material i l'estructura utilitzada i el defineix com la *llum* de l'element dividit per una constant) cada material té una deformació màxima permesa: Eurocode 2 és per construccions de formigó; Eurocode 3 és per l'acer; Eurocode 4 és pel formigó armat, etc. En el nostre cas prendrem l'Eurocode 1 perquè és el genèric, i igualment vàlid, el qual agafa com a límit de deformació:

$$\text{màxima deformació} = \Delta L = \text{llum}/150 \quad (6)$$

tant per deformacions verticals com horitzontals, [7].

Per trobar ε , ens cal dividir (6) per la *llum* de la biga:

$$\varepsilon_{\text{MAX}} = \Delta L / L$$
$$\varepsilon_{\text{MAX}} = [\text{llum}/150] / \text{llum}$$
$$\varepsilon_{\text{MAX}} = 1/150 \quad (7)$$

Llavors, el rang de valors no crítics que comprèn ε és $\varepsilon \in (-6,67 \cdot 10^{-3}, 6,67 \cdot 10^{-3})$.

2.6.1 Selecció de la galga real

Després d'una cerca exhaustiva hem optat per escollir el model **LEA-06-W125E-350/3R** (el *datasheet*, o full de característiques, de la qual podem trobar a l'Annex

1) de la marca Micro-Measurements perquè respon a un rang de temperatures de treball gran (de 0°C a 83°C) i està pensada per condicions meteorològiques desfavorables i per aguantar situacions de treball amb oli, aigua i altres materials que la podrien deteriorar. El límit inferior de 0°C pot ser un impediment en funció de la localització geogràfica on s'instal·li el disseny perquè a molts indrets de Catalunya (per posar un exemple d'on podria fer-se servir aquest sistema) és freqüent registrar temperatures inferiors a 0°C, fet que impediria l'ús d'aquest circuit durant els mesos de fred. El límit superior no és cap impediment perquè és pràcticament impossible assolir aquestes temperatures.

Al *datasheet* veiem que la galga té un factor de galga $K=2$ i una resistència nominal de 350Ω . Amb tot això, podem trobar el rang de valors que pot prendre la resistència de la galga a partir de (4), abans no haguem d'activar cap alarma:

Si $\varepsilon > -6,67 \cdot 10^{-3}$, llavors $R_{galga} = 350 \cdot (1 - 2 \cdot 6,67 \cdot 10^{-3}) = 345,33\Omega$.

Si $\varepsilon < 6,67 \cdot 10^{-3}$, llavors $R_{galga} = 350 \cdot (1 + 2 \cdot 6,67 \cdot 10^{-3}) = 354,67\Omega$.

Els valors crítics comencen quan $R_g \geq 354,67\Omega$: un augment de $4,67\Omega$ respecte 350Ω , és a dir, un 1,33% respecte el valor nominal.

En el raonament que fem a continuació només contemplem la galga que augmenta la seva resistència elèctrica, ja que la galga complementària variarà per igual el seu valor, però en negatiu (restant la variació de la resistència nominal). Les deformacions que produiran una situació d'alerta seran les produïdes per una variació de resistència d'entre un 0,9% i un 1,32%. Agafem el 0,9% perquè el rang de valors d'alerta suposi un una tercera part aproximadament dels valors no contemplats com a crítics ni acceptables. El 0,9% de 350Ω són $3,15\Omega$, que sumats al valor nominal donen una $R_g > (353,15)\Omega$. Per tant, el rang d'alerta és $353,15\Omega \leq R_g < 354,67\Omega$.

Per últim, entre $353,15\Omega$ i 350Ω considerem que la deformació és acceptable. Agafant els mateixos valors de variació amb signe negatiu, obtenim els rangs de valors de l'última columna de la Taula 3 ("Variació negativa").

A la taula següent mostrem classificats els valors de resistència, en funció de si provenen d'una deformació acceptable, d'una situació d'alerta o d'una de crítica.

Deformació	Valor resistiu de la galga	
	Variació positiva	Variació negativa
Acceptable	$350\Omega \leq R_g < 353,15\Omega$	$350\Omega \geq R_g > 346,85\Omega$
Alerta	$353,15\Omega \leq R_g < 354,67\Omega$	$346,85\Omega \geq R_g > 345,33\Omega$
Crítica	$R_g \geq 354,67\Omega$	$R_g \leq 345,33\Omega$

Taula 3: Valors resistius en funció de la deformació

A la Taula 3 podem veure-hi els valors resistius que poden prendre les galgues, calculats a partir del percentatge de variació respecte el valor de resistència nominal. La deformació es manifestarà augmentant el valor d'una galga i disminuint el valor de la

galga complementària (detallat i argumentat a l'explicació de la Figura 8), per això hi ha dos valors a la Taula 3.

2.7 Circuit de mesura

L'objectiu que tenen els circuits de mesura és el de convertir una magnitud real mesurada en una altra magnitud que permet ser tractada amb més facilitat o amb més coneixement, en el nostre cas donar un valor de tensió elèctrica a partir d'una deformació física. A continuació presentem l'esquema elèctric d'un circuit basat en un Pont de Wheatstone i n'expliquem el funcionament.

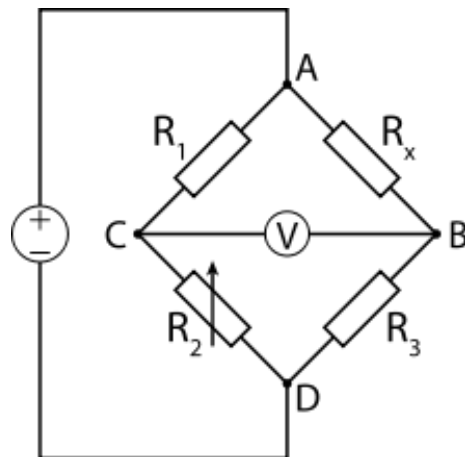


Fig.7: Estructura del Pont de Wheatstone. Imatge extreta de [1]

Veiem que el circuit consta de quatre resistors. Si suposem que coneixem els valors de R_1 i R_3 , llavors tenim com a incògnita R_x . La relació R_1/R_2 ha de ser igual a R_x/R_3 , per tal d'obtenir $V_{out}=0V$ (entre els nodes B i C): això es produirà quan el corrent sigui igual a les dues branques, llavors R_2 ens servirà per ajustar el valor necessari i trobar R_x .

Treballem amb les Lleis de Kirchhoff:

$$V_{out} = V_{BC} = V_{BD} - V_{CD} = V_B - V_D - (V_C - V_D) = V_B - V_C \quad (8)$$

És a dir, la tensió de sortida és la diferència entre els dos punts mitjans del pont, per això quan es troba en equilibri (perquè totes les resistències prenen igual valor), la tensió a la sortida és 0V.

Per la branca de R_x (cap a R_3) suposem I_1 i per la branca de R_1 (cap a R_2) suposem I_2 .

$$I_1 = V_{in}/(R_x + R_3) \quad (9)$$

$$I_2 = V_{in}/(R_1 + R_2) \quad (10)$$

Ara substituïm (9) i (10) a la següent expressió:

$$V_{BD} = I_1 \cdot R_3 = V_{in} \cdot R_3 / (R_x + R_3) \quad (11)$$

$$V_{CD} = I_2 \cdot R_2 = V_{in} \cdot R_2 / (R_1 + R_2) \quad (12)$$

$$V_{BC} = V_{BD} - V_{CD} = V_{in} \cdot [R_3 / (R_x + R_3) - R_2 / (R_1 + R_2)] \quad (13)$$

El pont estarà en equilibri quan $V_{BC}=0V$ i, si partim de (13), això implica: o bé que $V_{in}=0V$ (no té sentit partir d'entrada nul·la) o bé que la resta de l'expressió (13) és igual a 0.

$$\begin{aligned}
 R_3/(R_X+R_3) &= R_2/(R_1+R_2) \\
 R_3 \cdot (R_1+R_2) &= R_2 \cdot (R_X+R_3) \\
 R_3 \cdot R_1 + R_3 \cdot R_2 &= R_2 \cdot R_X + R_2 \cdot R_3 \\
 R_3 \cdot R_1 &= R_2 \cdot R_X \\
 \boxed{R_X} &= \frac{R_1 \cdot R_3}{R_2}
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

Veiem que el principi de funcionament és que mentre els resistors mantinguin la proporció entre ells, el pont roman en equilibri ($V_{out}=0V$). Si substituïm els resistors per galgues enganxades a materials sotmesos a pressions i forces, quan aquests es deformin provocaran que les galgues variïn el seu valor resistiu i podrem detectar-ho a la sortida del pont amb una variació de V_{out} . Serà molt petita, donades les petites variacions de resistència que tenen les galgues, però ho podem solucionar fàcilment amb una etapa amplificadora tal com explicarem al punt 3.

Per tal de no perdre informació a l'hora de mesurar les deformacions que pugui patir la biga en volada, recordem la distribució explicada al punt 2.4.3: un pont per cada direcció de mesura. D'aquesta manera tindrem una precisió màxima i podrem, com hem comentat abans, minimitzar l'efecte tèrmic. El procediment de mesura serà igual per cadascuna de les direccions fem servir un sol disseny serà vàlid per les dues mesures que volem.

El primer que necessitem és un Pont de Wheatstone com el teòric que hem definit a l'inici d'aquest apartat 2.7 però substituïnt els resistors per galgues extensomètriques. Atès que per cada direcció de deformació que volem mesurar hi tenim quatre galgues implicades, la solució ens resulta fàcil: dues per tenir una gran sensibilitat (actives) i dues per eliminar l'efecte tèrmic (passives).

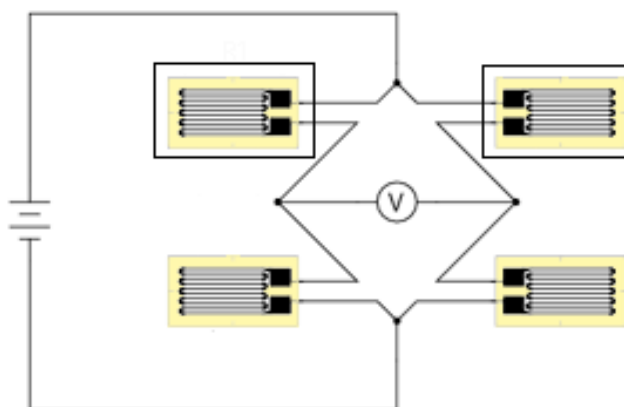


Fig.8: Pont amb quatre galgues. Imatge original extreta de [8] i manipulada.

A la Figura 8 veiem com aniran col·locades les galgues: les dues actives aniran a la part superior (les que estan emmarcades amb un requadre negre), i les dues passives a la part inferior. D'aquesta manera, i seguint la nomenclatura de la Figura 7, una deformació

que faci augmentar la resistència R_1 que, ahora, farà disminuir la resistència R_X pel raonament de tensió-compressió explicat al punt 2.4.3, provocarà una variació de la sortida V_{out} proporcional (dues vegades) a aquesta deformació. Les resistències R_2 i R_3 compensen l'efecte de la temperatura, no afecten al resultat numèric directament.

Si tenim en compte que, en repòs, totes les galgues tenen el mateix valor resistiu, les resistències de la Figura 7 són totes iguals, és a dir: $R_1=R_2=R_3=R_X=R$. Llavors recuperem (8) $V_{out}=V_B-V_C$ i busquem V_B i V_C .

$$\begin{aligned}V_B &= V_A - I_1 \cdot R_X \\ V_C &= V_A - I_2 \cdot R_1, \quad \text{on } V_A = V_{in} \\ V_{out} &= V_{in} - I_1 \cdot R_X - (V_{in} - I_2 \cdot R_1) \\ V_{out} &= I_2 \cdot R_1 - I_1 \cdot R_X\end{aligned}\tag{15}$$

Ara, suposem una variació ΔR a les resistències R_1 i R_X : tal com hem comentat anteriorment, R_1 augmenta de valor ΔR ohms, mentre que R_X disminueix el seu valor per igual, és a dir $-\Delta R$ ohms. Llavors, substituïm R_1 per $(R+\Delta R)$ i R_X per $(R-\Delta R)$ i ens queda:

$$V_{out} = I_2 \cdot (R+\Delta R) - I_1 \cdot (R-\Delta R)\tag{16}$$

$$I_1 = V_{in} / (R_X + R_3) = V_{in} / (R - \Delta R + R) = V_{in} / (2R - \Delta R)\tag{17}$$

$$I_2 = V_{in} / (R_1 + R_2) = V_{in} / (R + \Delta R + R) = V_{in} / (2R + \Delta R)\tag{18}$$

Llavors, recuperem (16) i queda:

$$V_{out} = \frac{V_{in} \cdot (R + \Delta R)}{2R + \Delta R} - \frac{V_{in} \cdot (R - \Delta R)}{2R - \Delta R}\tag{19}$$

L'equació (19) reflexa l'efecte que té la variació de valor de dues resistències a la sortida del pont: la tensió de sortida és la resta de dos termes. El primer d'ells, contempla un augment del valor resistiu de R_1 i el segon terme contempla la disminució del valor resistiu de R_X . El terme que suma és major i el terme que resta és menor i, al restar-se, el resultat final conté "dues vegades" aquesta variació de resistència. Com a exemple, si dibuixem una ratlla al terra i fem una passa a l'esquerra, haurem recorregut " x " metres. Si fem una passa a la dreta (respecte la ratlla), haurem recorregut " x " metres. En total, des de lluny, hem recorregut dues passes, és a dir, $2x$ metres.

Amb això obtenim la deformació en una de les dues direccions, serà el mateix per l'altra. Com que la variació de resistència pot ser negativa (recordem (4), (5) i (6)), serà necessari calcular el valor absolut de les tensions de sortida del pont perquè d'aquesta manera ens serà més senzill comparar-la amb un lliniar establert de signe positiu. Com ja hem comentat, el següent pas serà comparar aquestes dues magnituds positives amb els llinars corresponents de deformació i finalment decidir si cal activar l'alarma.

El següent punt del Treball correspon al tercer bloc de la Figura 2 mostrada anteriorment: l'etapa amplificadora, la qual ens permetrà afegir un guany de tensió als valors de sortida que proporcioni el pont per poder treballar amb tensions properes a l'alimentació del circuit i reduir l'efecte del soroll tèrmic i elèctric. Per tant, dissenyarem

l'amplificació dels senyals d'acord amb un rang de valors que ens minimitzi els problemes de soroll i que ens maximitzi la precisió a l'hora de comparar la tensió amb el llindar de seguretat.

3. Etapa amplificadora

En aquest apartat dimensionem la part del circuit encarregada d'adaptar la sortida dels ponts de Wheatstone, per poder-la tractar més fàcilment, a través d'amplificadors diferencials. Amb el circuit de la Figura 8 obtenim una tensió elèctrica proporcional a la deformació que ha patit la biga i que ha estat transmesa a la galga. Atès que hem duplicat el circuit, tenim dos senyals elèctrics: un per cada possible deformació. És necessari adaptar i comparar aquestes dues magnituds amb els llindars que ens indicaran si la deformació és negligible, acceptable o crítica. Això ho farem a través d'amplificadors operacionals, que són circuits actius que tenen un guany potencial infinit i que solen estar integrats, de manera que és fàcil i ràpid muntar-los i treballar-hi sense massa configuracions.

Els amplificadors operacionals tenen dues entrades i per aquest motiu treballen amb valors diferencials (no absoluts): entre el terminal d'entrada positiu i el negatiu hi ha una tensió que rep el nom de "Vd" (tensió diferencial) i que és igual a la resta entre ambdues entrades. Per configurar el guany només cal fixar els valors de les resistències externes, tal i com expliquem a continuació de la Figura 9.

Per convertir la mesura diferencial del pont a un valor de sortida unidimensional, els amplificadors operacionals quan treballen en mode diferencial requereixen d'un circuit bàsic com el de la Figura 9:

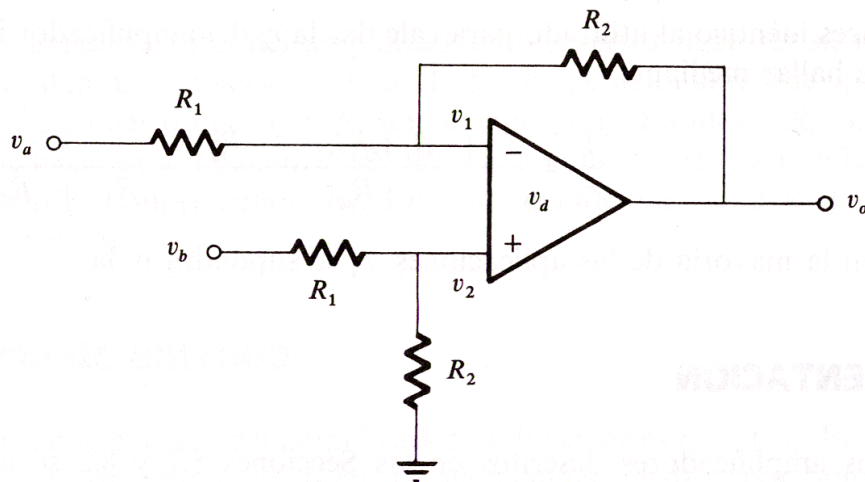


Fig.9: Amplificador diferencial, [9] pàgina 396.

Abans d'analitzar el circuit de la Figura 9, és important remarcar que la impedància d'entrada d'un amplificador operacional sol ser molt gran (idealment es considera propera a ∞ , malgrat normalment se sol prendre $1\text{M}\Omega$, perquè molts models comercials estan caracteritzats per aquest valor, [1]), per la qual cosa no afecta al circuit que tingui anteriorment (en el nostre cas el Pont de Wheatstone), si aquest té resistències de valor baix. El fet que hi hagi les resistències R_1 i R_2 (de la Figura 9) entre el pont i l'amplificador operacional provoca que el pont vegi una impedància equivalent de valor $R_1 + R_2 // Z_i$ (on les dues barres volen dir "paral·lel" i Z_i és la impedància d'entrada de l'operacional), és a dir que la impedància equivalent que veurà el pont serà poc més gran que R_1 . Malgrat això, el corrent que entra a l'amplificador operacional és pràcticament nul, per això es considera

que té una impedància d'entrada molt elevada. Analitzem ara el circuit de la Figura 9 seguint el Teorema de la Superposició, [10, pàgina 174]: analitzant el circuit per parts, suposant les entrades independents (i nul·les) i finalment sumant les contribucions parcials de cada entrada.

Prenent $V_a=0V$ i estudiant V_b :

$$\begin{aligned} V^+ &= V^- = V_b \cdot R_2 / (R_1 + R_2) \\ V_{Ob} &= V^+ (R_1 + R_2) / R_1 = V_b \cdot R_2 / (R_1 + R_2) \cdot (R_1 + R_2) / R_1 \\ V_{Ob} &= V_b \cdot R_2 / R_1 \end{aligned}$$

Prenent $V_b=0V$ i estudiant V_a :

$$V_{Oa} = (-R_2 / R_1) \cdot V_a$$

Sumant els resultats anteriors:

$$\begin{aligned} V_o &= V_{Ob} + V_{Oa} \\ V_o &= V_b \cdot R_2 / R_1 + (-R_2 / R_1) \cdot V_a \\ V_o &= (V_b - V_a) \cdot R_2 / R_1 \end{aligned} \quad (20)$$

L'equació (20) ens diu que la sortida de l'amplificador és una constant multiplicada per la resta de les dues entrades, on la constant és el guany que vulguem tenir i es defineix amb la relació de resistències R_2/R_1 . A continuació de la Figura 10 expliquem com hem definit el guany en el nostre cas concret.

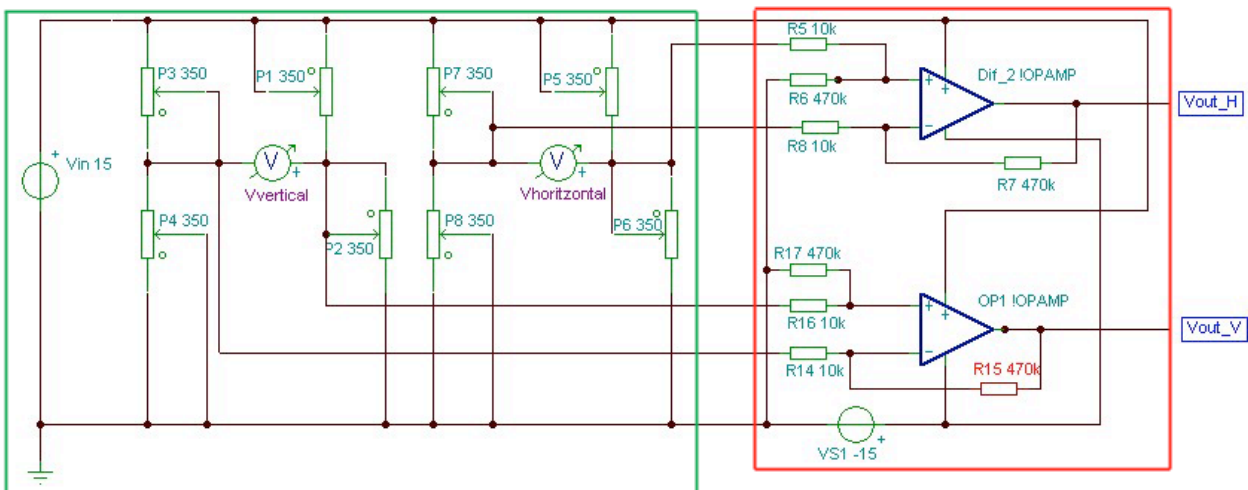


Fig.10: Ponts de Wheatstone i amplificadors diferencials

A la Figura 10 s'hi poden veure els dos ponts de Wheatstone (emmarcats amb verd) simulats amb potenciòmetres perquè el programari d'esquemàtics utilitzat (TINA-TU, de *Texas Instruments*) no disposa de cap símbol de galga extensomètrica. Veiem els ponts en equilibri (totes les galgues prenen el seu valor resistiu nominal) i a continuació hi tenim els amplificadors diferencials: veiem que la R_1 (de la Figura 9) és igual a $R_5=R_8=R_{14}=R_{16}=10k\Omega$ (de la Figura 10) i també que la R_2 (de la Figura 9) és igual a $R_6=R_7=R_{15}=R_{17}=470K\Omega$ (de la Figura 10). Si recuperem (20), observem que s'ha

configurat un guany de $470K / 10K = 47$ entre l'entrada i la sortida de l'amplificador. Això vol dir que V_{out_H} (i V_{out_V}) són 47 vegades més grans que la diferència entre els dos terminals dels respectius ponts. Amb aquest guany aconseguim que el senyal de sortida de l'amplificador, que és la sortida del pont multiplicada per 47, no arribi a saturar (sigui menor que l'alimentació dels amplificadors operacionals, en el nostre cas $\pm 15V$), de manera que augmentem tant com podem el senyal però no arribem al màxim permès pel circuit. A la Taula 5, situada al final d'aquest apartat, es veuen els diversos valors que caracteritzen el circuit en funció de la deformació mesurada i es pot observar que mai arriben als 15Vdc (teòrics, que a la pràctica poden ser uns 14V) que indicarien un senyal saturat. Així, aconseguim maximitzar el senyal amplificat, sense arribar a saturar-lo.

Un cop tenim convertits els senyals diferencials de sortida dels ponts, i abans de comparar-los amb el llindar de seguretat pel que fa a la deformació, en calculem el valor absolut. D'aquesta manera, podem fixar el llindar de tensió de comparació de signe positiu, i no haver de contemplar les deformacions que provoquin una tensió a la sortida del pont de signe negatiu. Compliquem una mica el circuit però facilitem el procés de comparació.

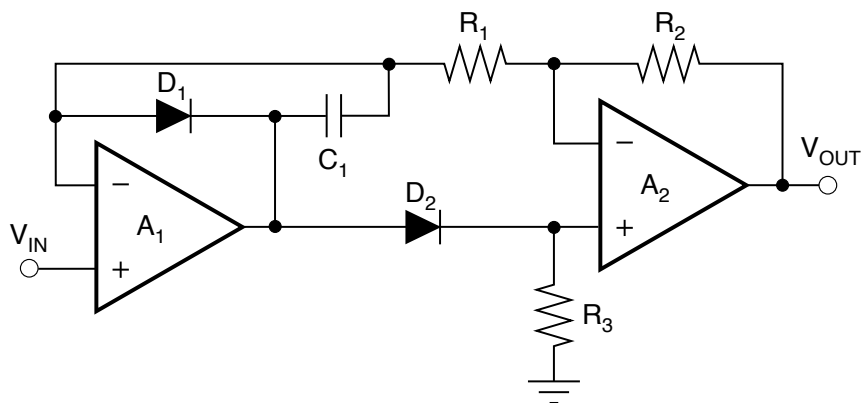


Fig.11: Circuit valor absolut, [11]

A la Figura 11 presentem un circuit dissenyat per *Texas Instruments* que calcula el valor absolut del senyal de l'entrada, deixant a la sortida un senyal sempre positiu. Si el senyal que entra és positiu actua la branca del diode D2 i el circuit és un seguidor de tensió perquè els diodes només permeten el pas del corrent en un sentit (per tant D1 queda tallat). Per contra, si V_{in} és negatiu, actua la branca de D1 i el circuit és un inversor: fixant $R_1=R_2$, el guany és (-1) i $V_{out} = (-1) \cdot V_{in}$, aconseguint una V_{out} positiva.

Arribats a aquest punt comparem els valors de sortida dels Ponts de Wheatstone amb el llindar corresponent a una deformació crítica. Segons els càlculs fets a l'apartat 2.6.1, i mostrats a la Taula 3, els valors resistius de les galgues que equivalen a una deformació perillosa són aquells menors de $345,33\Omega$ ó majors de $354,67\Omega$. Hem simulat aquests valors amb el TINA-TU i hem obtingut una tensió (després de calcular-ne el valor absolut) de 4,66V a la sortida del pont. Aquest és, doncs, el llindar a partir del qual considerarem la situació crítica. Amb el mateix procés, hem obtingut una tensió llindar de 3V per a deformacions acceptables. A la Taula 4 mostrem l'equivalència amb tensió de la Taula 3: els valors que prèn la sortida del pont (V_{vert} =mesura de la deformació vertical) en funció de la deformació de les galgues. Per la deformació horitzontal seria el mateix.

A la Taula 4 podem veure-hi els valors de tensió a la sortida del pont produïts per la deformació: sabem que els valors crítics comencen quan $V_{vert} > 99,22mV$. Aquests valors els hem extret simulant l'esquemàtic amb el programa TINA-TU. Veiem que el comportament és simètric en el cas que la deformació sigui en sentit contrari (en comptes d'una deformació vertical en sentit descendent, fos en sentit ascendent). Hem simulat els valors de resistència de la galga estudiats a la Taula 3 per tenir uns resultats de tensió coherents amb ells, de manera que aquests valors de tensió són els llindars entre les diverses zones de treball: normal, alerta i crítica.

Deformació	Valor de tensió a la sortida del pont	
	Variació positiva	Variació negativa
Acceptable	$0V \leq V_{vert} < 66,93mV$	$0V \geq V_{vert} > -66,93mV$
Alerta	$66,93mV \leq V_{vert} < 99,22mV$	$-66,93mV \geq V_{vert} > -99,22mV$
Crítica	$V_{vert} \geq 99,22mV$	$V_{vert} \leq -99,22mV$

Taula 4: Valors de tensió a la sortida del pont en funció de la deformació

A la Figura 12 mostrem la continuació de la Figura 10: el càlcul del valor absolut i la comparació amb els 3V i 4,66V comentats al paràgraf anterior de la Taula 4.

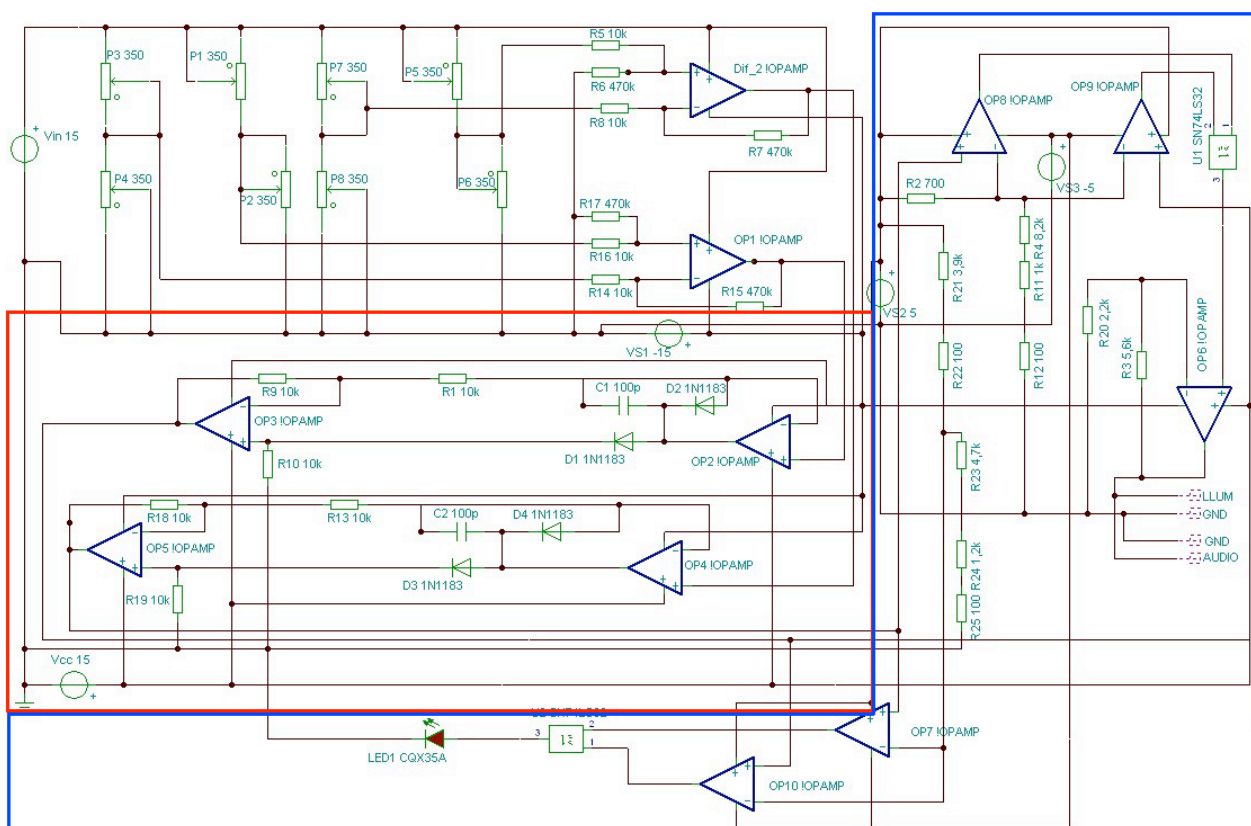


Fig.12: Valor absolut i comparador

Atès que al mercat és difícil trobar fonts de tensió contínua d'un valor poc comú com són els 4,66V, plantejem un divisor de tensió amb 5V a l'entrada: si volem aconseguir-ne 4,65 (perquè amb 4,66 ja s'ha d'activar el comparador), que corresponen a un 93% del valor d'entrada, situem una resistència que equivalgui al 93% del valor total de les resistències del divisor, en el nostre cas, 9,3K Ω . El 7% restant, és una resistència de 700 Ω . De nou, com que no existeixen resistors de valor nominal 9,3K Ω , ajuntem en sèrie tres resistors de valors $R_4=8,2K\Omega$, $R_{11}=1K\Omega$ i $R_{12}=100\Omega$, respectivament.

A la Figura 12 hi veiem els circuits corresponents al circuit de la Figura 11 (emmarcats amb vermell) i a continuació (emmarcat amb blau) la comparació amb els valors llindars. Si recuperem el diagrama de blocs que descriu el sistema (Figura 2), la zona emmarcada amb verd a la Figura 10 equival al primer bloc "Circuit de mesura"; la zona vermella (tant de la Figura 10 com de la 12) constitueix el bloc "Etapla amplificadora" i la zona blava de la Figura 12 comprèn els dos blocs finals "Circuit discriminador" i "Alarma" (aquest últim bloc està constituït pels terminals de sortida del circuit on aniran connectats els dispositius d'alarma).

De la Figura 12, els dos amplificadors operacionals de la part de dalt del requadre blau treballen saturats als valors de polarització perquè són els comparadors amb els 4,66V: donen a la sortida la tensió d'alimentació positiva (+5V), en el cas que l'entrada no inversora sigui major que la inversora (on hi ha el valor de referència), o negativa (-5V) en cas contrari. Van connectats a una porta OR que anomenarem OR 1, per facilitar l'explicació més endavant. Els dos amplificadors de la part inferior són els que comparen amb els 3V corresponents al llindar d'alerta: treballen de la mateixa manera i van connectats a la porta OR 2.

La font d'alimentació que fem servir pel divisor de tensió ens servirà alhora per alimentar els comparadors perquè, d'aquesta manera, la sortida es trobarà entre 0V i 5V i ja estarà adaptada per l'integrat que treballa amb nivells d'alimentació TTL (entre 4,25V i 5,25V). És de la marca Emerson / Astec Power (model **LPT63**) i és estàndard, alimentada amb 230V d'alterna, [12]. La resta del circuit i els operacionals va alimentada amb 15V, que surten de la mateixa font perquè té tres sortides: +15V, -15V i +5V. Pel que fa als -5V negatius que necessita l'operacional comparador, treballem amb un model semblant de la mateixa marca: el **LPT64**, [13].

A continuació els dos senyals que surten dels operacionals comparadors es connecten a l'integrat **SN74LS32**, que conté quatre portes lògiques OR, de les quals en fem servir dues. Amb aquest xip, aconseguim a la sortida un valor lògic actiu (nivell "1") en cas que qualsevol de les dues entrades d'aquella porta valgui "1" lògic.

Per últim, els dos senyals que surten de l'integrat de portes lògiques OR són tractats per separat: el que prové de la comparació amb el nivell de deformació crítica (comparació amb 4,66V, OR 1), passa per un amplificador no inversor de guany de 3,55 per adaptar la sortida de 3,4V als 12V que necessiten les dues alarmes. Aquest valor de guany està configurat amb les resistències de 5,6K Ω i de 2,2K Ω , i amb l'equació que modela el comportament dels amplificadors no inversors: $1 + \text{relació_de_resistències}$. Així, el guany és $1 + 5,6/2,2K = 3,5454 = 3,55$. El senyal que prové de la comparació amb els 3V (que és el llindar de deformació lleu, OR 2), va connectat a un LED indicador de perill:

en cas que la comparació es validi (perquè la deformació existeix i supera el llindar d'alerta), el LED s'encendrà.

Mostrem a continuació una taula resum amb tres casos possibles (quan la deformació és nul·la, quan és acceptable i quan és crítica) i els valors de sortida dels ponts, de l'amplificador, del càlcul el valor absolut i de la sortida de la porta OR corresponent. Cada cas correspon a uns valors resistius de les galgues, per això ho estudiem de la següent manera: si la biga es deforma, una de les galgues actives augmentarà de valor en igual mesura que l'altra disminuirà (pel raonament fet a l'apartat 2.4.3). Hem suposat la deformació en una direcció, entenem que només amb una d'elles la sortida ja es comportarà com hem estudiat.

A la Taula 5 veiem que valors resistius de les galgues que superen el llindar crític (per sota dels $345,33\Omega$ o per sobre dels $354,67\Omega$) provoquen una sortida de 12V que activarà les alarmes. En les dues primeres columnes de resultats, veiem que la sortida pren el mateix valor, malgrat la sortida de les portes OR 1 i 2 és diferent. Això és així perquè la sortida de la porta lògica OR és binària: el valor baix correspon a 250mV i el valor alt a 3,4V, independentment del valor que prenguin les galgues a causa de la deformació. Les entrades que suma la porta OR són les sortides dels dos comparadors (emmarcats amb blau a la Figura 12), que també són de nivell alt o baix i no prenen valors intermitjos. Per tant, el LED indicador de perill lleu s'activarà en el cas de deformació acceptable i crítica, mentre que les alarmes que treballen a 12V s'activaran només en cas de deformació crítica.

	Deformació nul·la (ponts en equilibri)	Deformació acceptable	Deformació crítica
Valor resistiu de les galgues	Galga 1: 350Ω Galga 2: 350Ω	Galga 1: 347Ω Galga 2: 353Ω	Galga 1: 344Ω Galga 2: 356Ω
Tensió a la sortida del pont	$V_d=7,5V-7,5V=0V$	$V_d=7,47V-7,53V=-60mV$	$V_d=7,43V-7,56V=-130mV$
Tensió a la sortida de l'amplificador diferencial	3,5mV	-2,99V (més de 47 vegades -60mV)	-5,99V
Resultat de calcular el valor absolut	2,8mV	2,99V	5,99V
Tensió a la sortida de la porta OR 1	250mV	250mV	3,4V
Tensió a la sortida de la porta OR 2 (tensió del LED)	250mV	3,4V	3,4V
Valor de sortida	886,3mV	886,35mV	12,05V

Taula 5: Simulació de tres possibles situacions

A la Taula 5, “Galga 1” i “Galga 2” fan referència a les dues galgues actives del Pont de Wheatstone corresponent, és a dir, les que estan emmarcades a la Figura 8, que alhora també són les de color blau de la Figura 6. L’augment de valor contemplat a “Galga 2”, respecte el valor nominal, és igual a la disminució de valor de la “Galga 1”, tal com hem argumentat al punt 2.4.3.

Resumint, tenim un circuit que ens dóna a la sortida un senyal amb la informació de la deformació que ha patit la biga en les dues direccions, mesurades aquestes amb igual procediment. Per començar hem partit de la mesura de la deformació amb el Pont de Wheatstone i li hem afegit a continuació un amplificador diferencial per obtenir un resultat absolut. Amb aquesta informació doble, perquè hem estudiat dues deformacions, i sabent que poden tenir signe negatiu en funció del sentit de la deformació, els senyals passen per un bloc que en calcula el seu valor absolut i finalment són comparats i ajuntats per activar l’alarma en cas necessari.

El següent apartat resol la comparació dels senyals i l’activació de l’alarma, en funció dels valors mesurats.

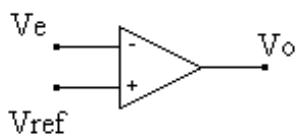
4. Circuit de decisió i activació d'alarma

En el cas que la deformació de la biga superi els llindars establerts caldrà activar una alarma. Considerem dos situacions susceptibles de ser alarmants: un escenari d'alerta, que requerirà fer un seguiment i si cal un manteniment de la biga, i un escenari de perill que comportarà aïllar l'estructura per prevenir accidents.

El llindar a partir del qual es considera que existeix un risc és una variació en tant per cent de la longitud total de la biga. Sabent aquest valor (i sabent a quin valor de tensió correspon a la sortida del nostre circuit tal i com hem calculat i simulat a l'apartat 3) es tracta de comparar el senyal que surti de l'etapa amplificadora amb els llindars. En el cas que la deformació sigui superior al llindar, activarem el senyal de l'alarma corresponent. El nostre circuit reaccionarà activant una alarma en dues situacions diferents: en el cas que la biga pateixi una deformació considerada d'alerta però no crítica, el circuit activarà un LED (*Light Emitting Diode*, diode emissor de llum) de color taronja i en el cas que la deformació entri dins el marge crític, s'activaran una alarma lluminosa i una acústica per avisar del perill.

Com que tenim un Pont de Wheatstone per mesurar la possible deformació vertical i un per la horitzontal, només que una de les dues mesures superi el llindar establert, haurem d'activar l'alarma corresponent. La comparació del valor mesurat (havent-li fet el valor absolut) amb el valor llindar la fem a partir d'un amplificador operacional, configurat en mode comparador.

Aquest és el símbol del comparador:



I aquesta la seva funció, definida per parts:

$$V_e < V_{ref} \rightarrow V_o = -V_{sat}$$

$$V_e \geq V_{ref} \rightarrow V_o = V_{sat}$$

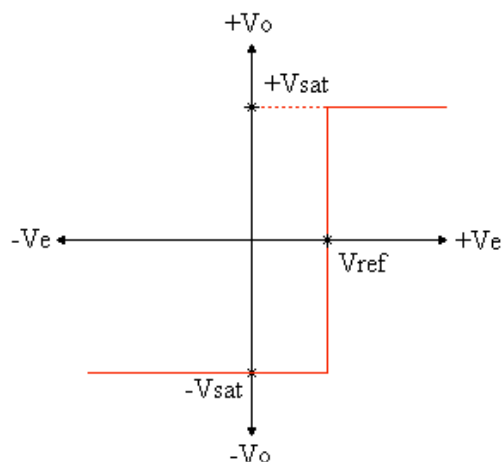


Fig.13: Comparador analògic. Imatge extreta de [14]

El gràfic de la dreta és molt il·lustratiu del seu comportament: si l'entrada (V_e) és major que la tensió de referència (V_{ref}), la sortida val la tensió d'alimentació positiva; en cas contrari, la sortida val la tensió d'alimentació negativa.

4.1 Alarma per situacions d'alerta

Per avisar d'una situació d'alerta, com ja hem comentat al principi de l'apartat, tindrem un LED de color taronja. Proposem utilitzar-ne un de cinc mil·límetres de diàmetre, d'entre 20 i 50 mcd (milicandelas, la unitat de mesura de la llum emesa). Dins del catàleg d'Onda Radio escollim el model **L53ND**. Tenint en compte els càlculs mostrats a la Taula 12, la zona d'alerta comença quan la tensió a la sortida del pont supera els 66,93mV. Aquesta tensió passa per l'amplificador diferencial, de guany 47, per la qual cosa després de l'amplificador, i també després de calcular-ne el valor absolut, tindriem una tensió de $V_{ref}=2,99V$ (que és el valor simulat amb el programa TINA, i que podem prendre com 3V). A partir d'aquest valor, haurem d'encendre el LED.

Un cop sabem el llindar amb el qual comparar, configurem un divisor de tensió per aconseguir aquests 3V a partir dels 5V que ens proporciona la font, que equivalen a un 60% d'aquests 5V. Llavors, proposem una configuració amb una resistència de 4K Ω i una de 6K Ω de la qual penjarem la sortida del divisor. Per aconseguir aquests valors amb resistències de la sèrie E12, una possible solució és fer un sèrie de $(3,9K+100)=4K\Omega$, i un altre sèrie de $(4,7K+1,2K+100)=6K\Omega$ connectat a massa, tal com veiem a la Figura 14. Les resistències que intervenen en aquest divisor són $R_{21}=3,9K\Omega$; $R_{22}=100\Omega$; $R_{23}=4,7K\Omega$; $R_{24}=1,2K\Omega$ i $R_{25}=100\Omega$.

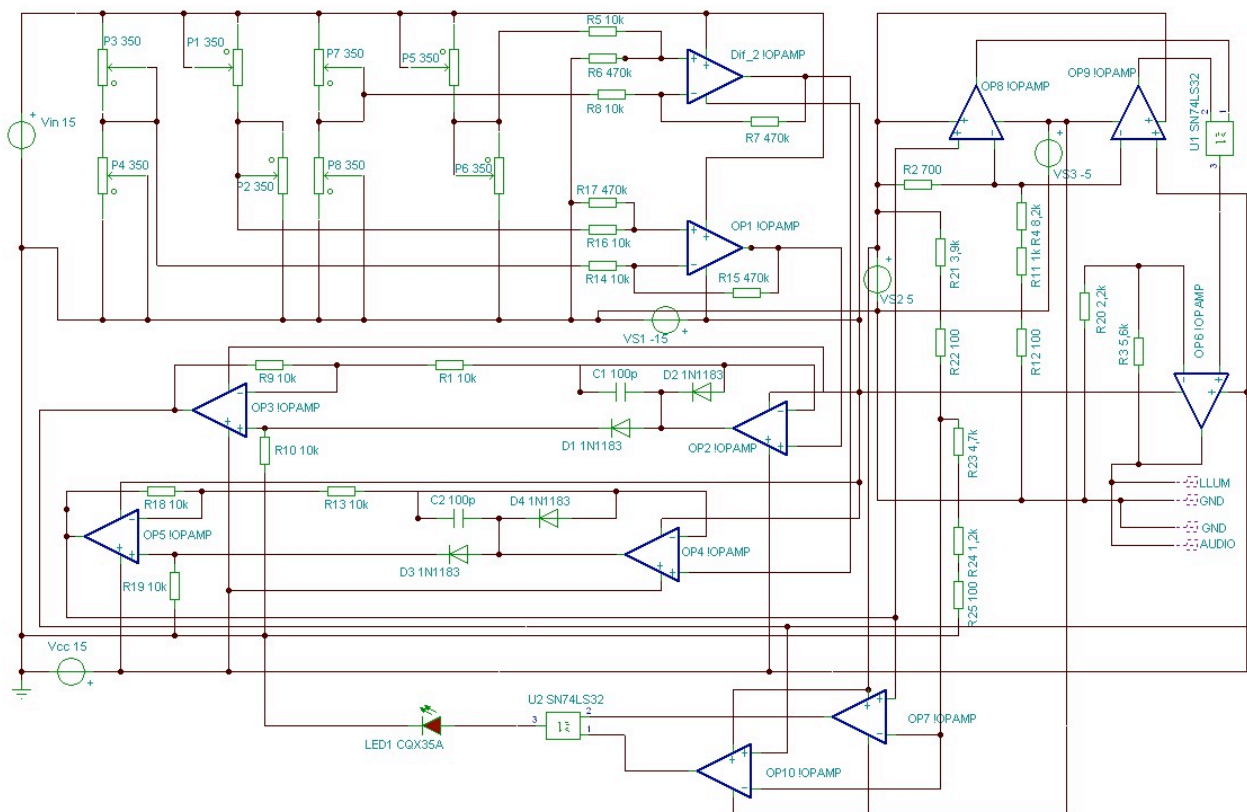


Fig.14: Esquemàtic definitiu.

A la Figura 14 veiem l'esquemàtic definitiu del Projecte. Ens hem de fixar en el comparador de sota de tot: l'entrada negativa dels comparadors (V_{ref} , de la Figura 13) prové del divisor que hem comentat, mentre que l'entrada positiva (la que comparem amb la referència), és la mateixa que la que està connectada als amplificadors operacionals de

la dreta, que expliquem al punt 4.2. A la sortida dels comparadors hi veiem el LED que va directament connectat a massa: com que l'amplificador operacional està alimentat amb $\pm 5V$, la sortida no serà més gran que aquest valor. Amb el programa TINA la sortida simulada ens dona 3,4V i, comptant que la tensió de treball que accepta un LED es troba entre 2 i 4V, no hem de patir pel seu deteriorament. En el cas que el comparador tingui la sortida a nivell alt, el LED estarà encès indicant la zona d'alerta de deformació.

4.2 Alarma per situacions crítiques

Pel que fa a l'alarma en cas de deformacions considerades crítiques, proposem una sirena lluminosa i una altra d'acústica per avisar del perill. Si recuperem la Figura 13, considerem ara $V_{ref}=4,66V$ (explicat al punt 3); en cas que l'entrada superi aquest llindar, la sortida del comparador valdrà la tensió d'alimentació; en cas contrari, la sortida valdrà la tensió d'alimentació negativa. Després d'aquest comparador, hi tenim un amplificador que ens adapta la sortida (que pren 3,4V en nivell alt) a les alarmes que proposem que treballen a 12V i per això l'amplificador dona un guany de 3,55: per obtenir $3,4 \cdot 3,55 = 12,07V$ (que són els 12,05V que ha donat com a resultat la simulació). Els dispositius que farem servir per mostrar el perill seran de tipus acústic, per indicar *in situ* el perill, i lluminosos per poder-ho visualitzar a certa distància.

L'alarma sonora serà una sirena acústica com la de la Figura 15, que la podem aconseguir a través del distribuïdor Cetronic (La Coruña), [15]. No necessita alimentació externa i el seu consum màxim és de 180mA, a 12V. Es pot observar que porta una muntura per facilitar-ne la seva col·locació.



Fig.15: Sirena acústica, [15].

L'alarma visual serà com la mostrada a la Figura 16, present al catàleg del distribuïdor i botiga Onda Radio (Barcelona), [16]. En aquest cas, sí que és necessari alimentar-la amb una entrada entre 8 i 16V de contínua, per la qual cosa podem aprofitar la font usada per la resta del circuit. El seu consum màxim és de 250mA, per la qual cosa no ens hem de preocupar perquè aquests valors no afecten al comportament de la resta del circuit. Tal i com es veu a la Figura 12, la sortida de l'amplificador operacional (de guany 3,55) va connectada directament a les dues alarmes perquè surt directament a 12V, que és el que necessiten els dos dispositius.



Fig.16: Sirena Iluminosa, [16].

Amb el circuit comprès pels ponts, els amplificadors diferencials, el càlcul dels valors absoluts, els comparadors, un últim amplificador i, finalment, les alarmes podem senyalar visualment i acústicament un perill produït per la deformació de la biga que hem estat estudiant durant tot aquest treball.

5. Disseny del layout

Per tal de poder crear els entregables que permetrien fabricar el disseny proposat, ens farà falta escollir un programa editor de *layouts*. Fet això, orientem els esforços d'aquest apartat a assolir el cinquè objectiu enunciat a l'apartat 1.2: l'obtenció del *layout*, que és la distribució física dels components electrònics a la placa, amb el connexionat definit a l'esquemàtic (punt 3 d'aquest Treball).

Per tal d'aconseguir l'últim dels objectius proposats a l'enunciat, contemplats a l'apartat 1.2 d'aquest document, necessitem generar uns fitxers en format *gerber* que ens permetin enviar a fabricar la placa que hem dissenyat en aquest Treball. Amb aquest format de fitxer els fabricants de plaques de circuit imprès poden portar a la pràctica el que nosaltres hem dibuixat com a *layout*. Pel que fa als forats i vies de la placa, en cas que n'hi hagi, és necessari un altre format de fitxer que també farem servir en aquest apartat, concretament al 5.6.7. D'aquesta manera, obtindrem un resultat material en forma de fitxers entregables que culminaran aquest Projecte. En els següents apartats enunciem el programari editor de *layouts* escollit, els components utilitzats i algun comentari rellevant sobre ells, com poden ser les propietats físiques. Finalment, llistem els problemes que ens hem trobat en la realització del *layout* definitiu.

5.1 Programari escollit

El programa escollit és l'[EAGLE](#) (Versió 5.11.0) perquè està disponible pel Sistema Operatiu MAC OS i perquè és un dels proposats a l'enunciat del Treball. No permet importar esquemàtics provinents del TINA-TU (amb el qual hem simulat tots els resultats a l'apartat 2 d'aquest Treball) però hem preferit tornar a construir l'esquemàtic (idèntic) des del mateix EAGLE el *layout* a continuació. L'esquemàtic global i definitiu proposat a l'apartat 2 ja l'hem mostrat a la Figura 14. A partir d'aquest model, en aquest apartat definirem el *layout* per donar per acabat el disseny.

5.2 Tipus de components utilitzats

Actualment, el mercat disposa principalment de dos tipus de components electrònics que poden conviure en un mateix disseny: els anomenats *through hole* ("a través del forat") i els *smd* (*surface mounting device*, component de muntatge superficial). Els primers, són els més antics i els més fàcils d'adquirir perquè les botigues de venda al detall en tenen i perquè es poden comprar a granel i a un preu molt assequible. Per contra, els *smd*, estan més orientats a professionals i a entorns de gran consum, fet que provoca que no totes les botigues on podem trobar components "clàssics" disposin d'aquest tipus de components. Un altre problema és que solen anar en bobines de milers d'unitats, per la qual cosa és una opció poc escollida per usuaris domèstics.

Pel que fa al nostre disseny optem per fer servir els *smd* pels principals avantatges que comentem a continuació:

- ◆ Destaquen les seves reduïdes dimensions i la manca de “potes” (filament que en els components tradicionals serveix per introduir al forat i soldar-los). Poden arribar a ser de 0,4x0,2mm, fet que facilita reduir la mida de la placa.
- ◆ Com que es gasta menys pista perquè els components poden estar més junts entre ells, també es redueix la interferència que pot emetre o rebre la placa, perquè hi ha menys zones de coure repartides per la superfície de la placa.
- ◆ Al reduir la mida del component, també se’n redueix el pes i són molt utilitzats en aplicacions com aviació, productes electrònics per fer esport, etc.

Per contra, els inconvenients són que a partir d’una certa mida és impossible soldar-los a mà (al contrari que els *through hole*) i que costa més refredar-los perquè tenen menys superfície per dissipar la temperatura. Com ja hem comentat abans, no sempre són adquiribles a les botigues de venda al detall ni en embalatges de poques unitats.

5.3 Comentaris sobre els components utilitzats

En aquest punt llistem els components fets servir, i comentem alguns problemes trobats fruit de la incompatibilitat entre els programes TINA-TU i EAGLE (no existeixen els mateixos components, se n’han posat d’alternatius) i les característiques dels components reals escollits. Per veure les característiques tècniques, consultar a l’Annex 2 els enllaços web que hi ha als *datasheets* dels diferents fabricants. A la Figura 17 mostrem el menú que ens hem trobat a l’hora d’escollir components:

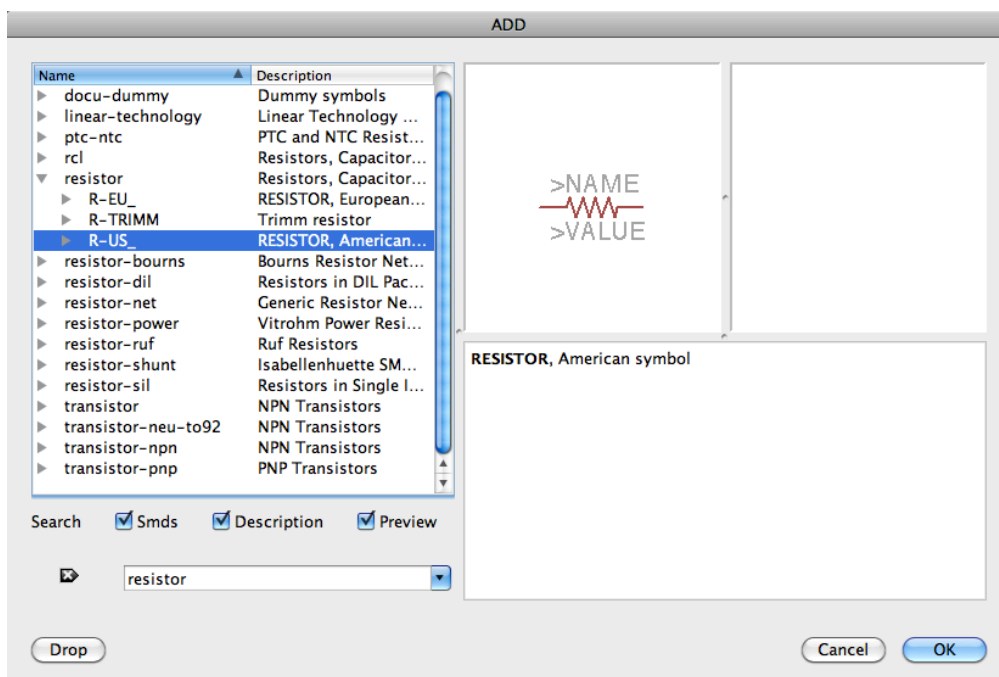


Fig.17: Exemple de grup de components

A la Figura 17 mostrem l'exemple del model de resistor que hem fet servir: pertany al grup R-US_. Per cada component del llistat següent, especifiquem el grup de components dins el qual l'hem trobat a les llibreries del programa EAGLE.

◆ **Resistor:** hem escollit el model **R-US_M1206**, de mida 1,2x0,6mm (dins el grup R-US_).

◆ **Galga extensomètrica:** posem dos PADS i el circuit ja farà la resta. Els components no estan físicament al circuit, sino enganxats a la biga per tant només hem de contemplar la seva connexió mitjançant el cable que ja porta incorporat el propi component. Els PAD's que hem fet servir són (buscant per *PAD*), **WIREPAD 2,15/1,0**: aquest component té un diàmetre de 2,15mm i un forat d'1mm, suficient per soldar-hi el cable de la galga.

◆ **Amplificador operacional:** hem escollit l'integrat **LM358D** (buscant per *LM*). És smd, alimentació de fins a $\pm 16V$. Atès que es tracta de components de dues portes, el propi programa ens ha permès reduir la quantitat d'unitats utilitzades (inicialment onze a l'esquemàtic, finalment sis a la placa). A més, amb la funció *invoke* [17] hem pogut simplificar l'esquemàtic perquè el que permet aquesta prestació és assignar l'alimentació a tots els dispositius que són iguals dins l'esquemàtic, sense mostrar la connexió, fet que redueix la informació visual i permet treballar més còmodament. L'excepció són els operacionals 7, 8, 9 i 10 (de la Figura 14), que van alimentats amb $\pm 5V$ i que ho hem connectat manualment.

◆ **Diode:** hem escollit el model **SOD123** perquè les seves propietats compleixen els nostres requisits. Es troba dins el grup de components CGRM i és el CGRM4001-G.

◆ **LED:** escollim un model estàndard de 5mm, buscant per LED: *led/LED/LED5MM*.

◆ **Condensador:** hem escollit el model **C-EUC1206** (buscant per *capacitor*) per mantenir la mateixa mida que els resistors.

◆ **Porta lògica OR:** l'integrat **74ACT32D** (buscant per *OR*, dins el grup *74xx-eu*), que són quatre portes OR de les quals n'aprofitem dues.

◆ **Pads de sortida per les alarmes:** el mateix que per les galgues, **WIREPAD 2,15/1,0**.

◆ **Fonts d'alimentació:** l'Eagle té un component que fa referència a una font i que permet fer ús de la funció *invoke*, comentada anteriorment. D'aquesta manera, amb un sol component es fan les connexions a tots els dispositius que en necessitin. Per connectar la font real a la placa, hem afegit un PAD com el de les galgues: **WIREPAD 2,15/1,0**.

◆ **Massa:** el mateix que amb les fonts, Eagle té un símbol per fer referència a la massa i quan es vulgui connectar un component a massa, només cal relacionar-lo (es pot fer amb una etiqueta) amb el símbol GND. Pel que fa a la connexió, també fem servir el **WIREPAD 2,15/1,0**.

A l'hora de fer el disseny del *layout* no hem fet servir cables però quan sigui el moment de muntar la placa necessitarem cable per connectar les fonts, les galgues i potser les alarmes (si el cable que porten queda curt) a la placa. Per aquest motiu,

proposem el mateix tipus de cable unipolar amb dos colors: negre per la massa i vermell per les tensions diferents de zero. D'aquesta manera podrem distingir visualment on va connectat cada terminal. L'escollim d'1,4mm de diàmetre i de 10m de largada i amb temperatures de treball aptes entre -5°C i 80°C. Tenint en compte que la galga tindria comportaments anòmals amb temperatures superiors als 83°C, no té sentit escollir un cable que aguantí un rang de treball diferent.

5.4 Problemes observats

El primer problema que ens hem trobat han estat *warnings* (avisos) amb els pins dels integrats LM358D i 74ACT32D que no fem servir però no és important perquè tampoc llegim la possible sortida que produís un resultat a partir de les entrades. La solució ha estat ignorar-los.

També hem trobat impediments amb la mida de la placa perquè la versió utilitzada (5.11.0 del programa EAGLE) té un límit de 4x3,2 pulzades, fet que ha impedit alguna disposició física dels components, però ha estat fàcil resoldre-ho amb més dedicació i enginy. Hem tornat a començar el disseny del *layout* i hem redistribuït els components diferent, de manera que hem aconseguit més espai entre pistes i menys encreuaments entre elles.

Un tercer entrebanc ha estat els errors per OVERLAP: al posar vies, no queden anomenades com la connexió, és qüestió d'agafar l'eina "Name" i posar el mateix nom que el PAD on va connectada.

Quan la placa ha estat completament rutejada, han aparegut errors relacionats amb les *Rules* (regles), que són les restriccions pel que fa a l'amplada de les pistes, la separació mínima entre components, pistes o vies, entre d'altres normes. Hem hagut de modificar la distància permesa (*clearance*) entre les vies i els PADs, entre PADs i entre vies per tal d'aconseguir un equilibri entre la complexitat de la placa i la disposició dels components proposada.

Finalment, a l'hora de generar els *gerbers* ens hem trobat problemes amb l'arxiu de les perforacions (vies i forats de la placa). Quan hem intentat crear l'arxiu amb la informació de perforacions (en format .drd) l'EAGLE no ens el generava correctament perquè no detectava bé un fitxer auxiliar (en format .drl), que és on hi ha els diversos diàmetres necessaris per foradar la placa. Finalment, redactant el fitxer manualment, hem aconseguit generar el fitxer *TFC.drd*.

5.5 Layout definitiu

Després de proposar una possible distribució espacial dels components i del connexionat entre ells i de resoldre els errors que han anat apareixent, donem per definitiu el *layout* mostrat a la Figura 18. Hem agrupat les galgues d'una manera molt semblant a la disposició que tenen en el Pont de Wheatstone (veure Figura 7) per facilitar-ne la localització a l'hora de soldar-ne els terminals. Pel que fa a la resta de components, hem intentat agrupar-los per facilitar-ne el rutejat (connexionat amb pistes de coure) i

minimitzar les vies utilitzades. Les vies són les circumferències verdes que es veuen a la Figura 18 que permeten passar una pista que es troba a la cara superior (de color vermell) a la cara inferior (de color blau), evitant l'encreuament de dues pistes a la mateixa capa i, per tant, facilitant el connexionat entre terminals que es troben relativament allunyats i que no poden ser units amb coure per un camí situat en una sola cara. Tenen forma de cilindre (en el cas que siguin de base circular, també poden ser de base quadrada o hexagonal) i connecten la zona de coure d'una cara amb el camí de coure a l'altra cara.

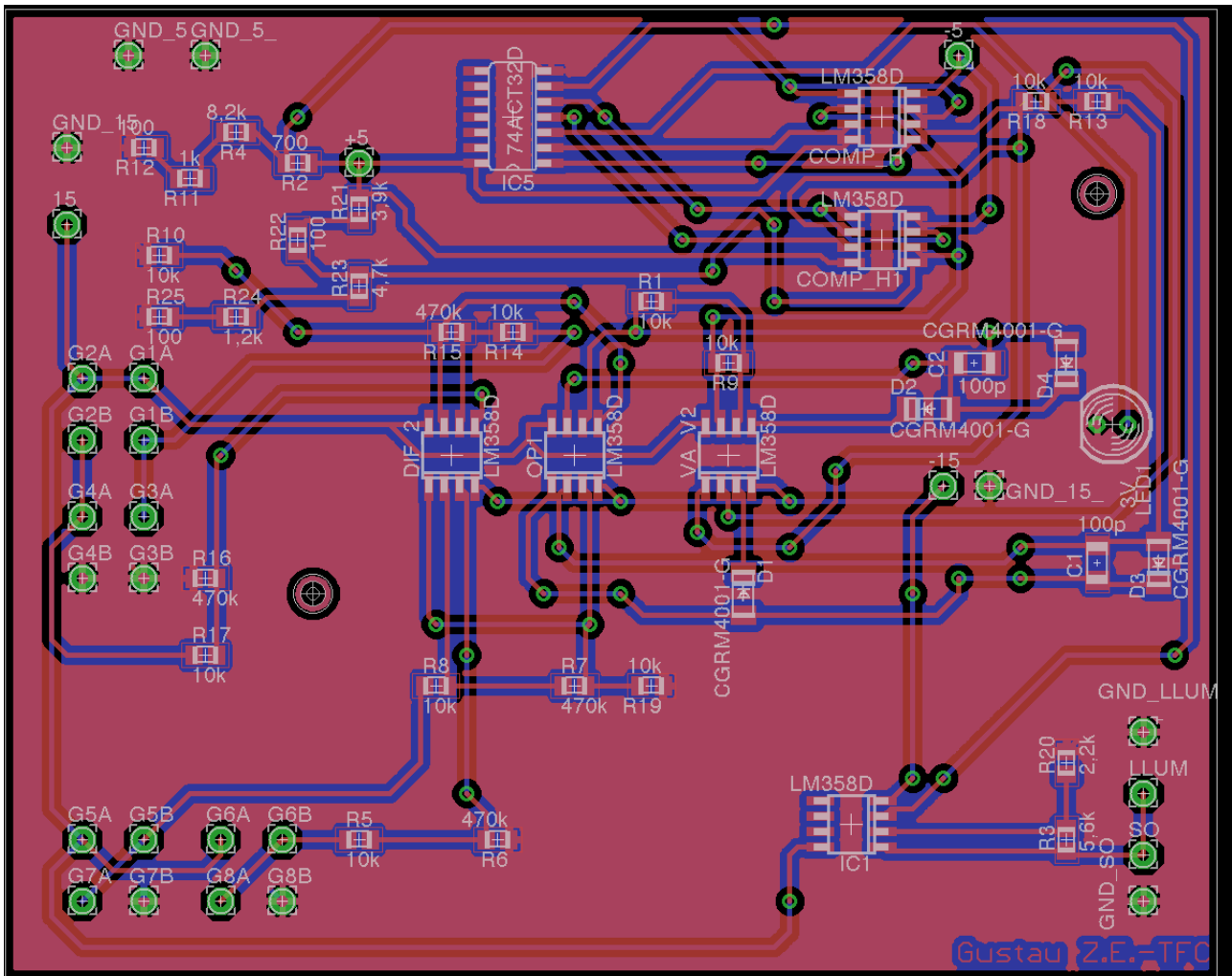


Fig.18: Layout definitiu

Per diferenciar millor la cara superior de la inferior, i veure el connexionat i l'ús de les vies, mostrem a continuació a les Figures 19 i 20 el rutejat de la cara superior (*Top*) i de la inferior (*Bottom*).

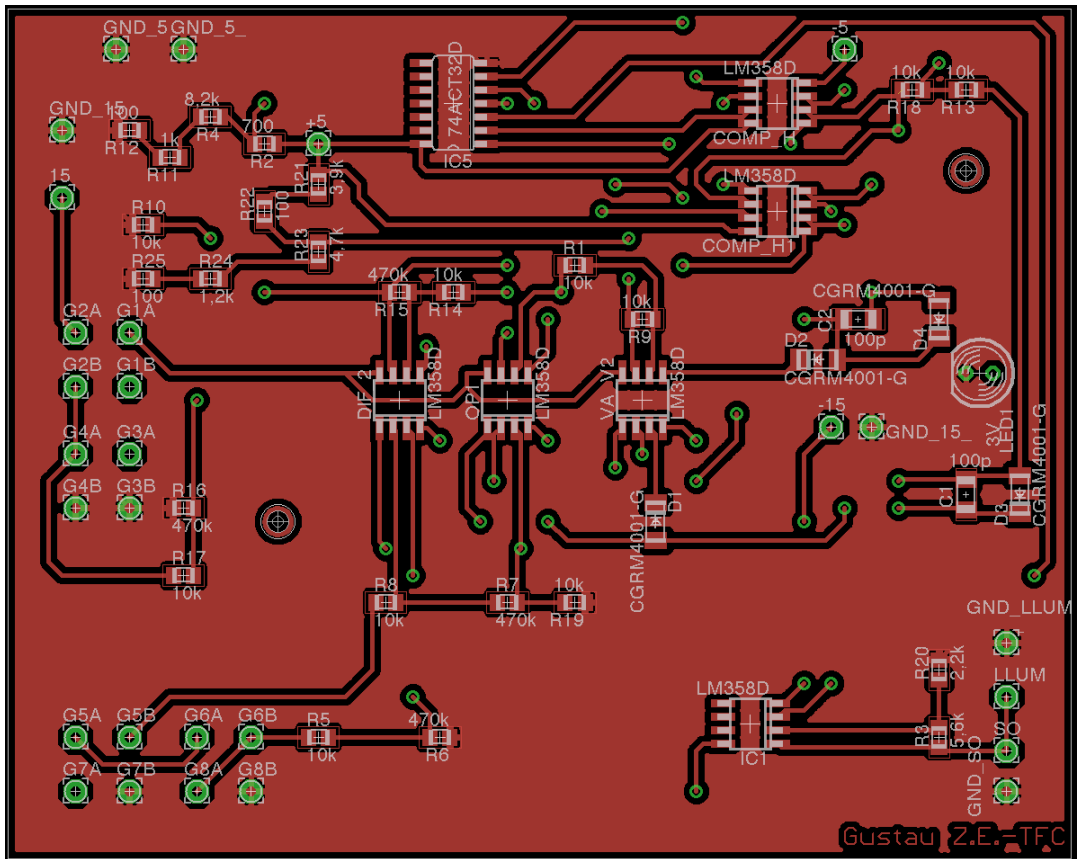


Fig.19: Cara top del layout

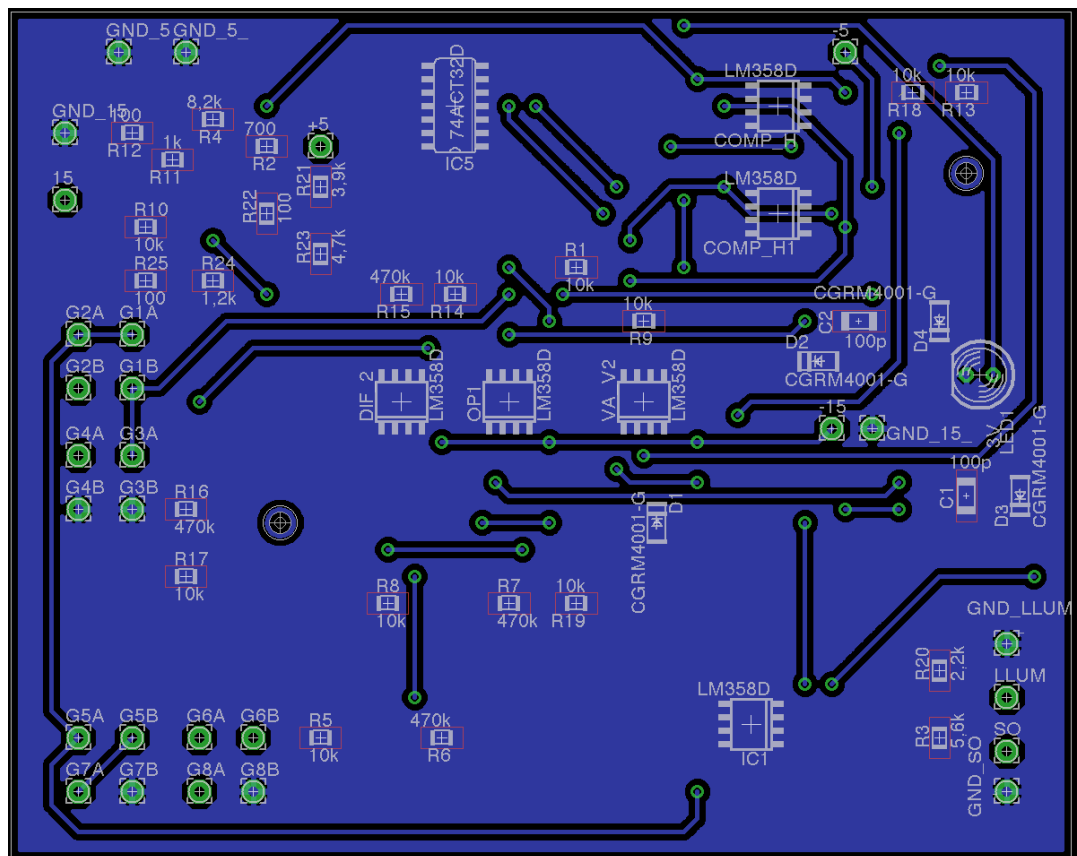


Fig.20: Cara bottom del layout

A les dues figures anteriors, es pot observar que els terminals (vermells) dels components que són de tipus *smd* no apareixen a la cara *bottom* (apareix la seva presència, però no els terminals de connexió), mentre que sí que ho fan a la cara superior. Per contra, els dispositius *through hole*, o de perforació, com són els pads de connexió de les galgues o les fonts d'alimentació, sí que apareixen també a la cara inferior.

Com a últim comentari del *layout*, i tal i com es pot observar a les Figures 19 i 20, hem creat un pla de massa a la placa. Aquesta tècnica serveix per assegurar que les zones sense pad a la placa tinguin una tensió de 0V i d'aquesta manera s'aconsegueixi reduir la petita, però existent, resistència que pugui tenir la placa. Consisteix en cobrir de coure les zones no utilitzades i connectar aquest recobriment amb el senyal de massa per tal de forçar que la major part de la superfície de la placa tingui una tensió de 0V, el que implica que no podrà tenir una tensió diferent de 0V. Així es dona robustesa al circuit perquè s'eliminen sorolls i es reforça la referència del circuit.

5.6 Generació *gerbers*

Per tal d'aconseguir el document de síntesi que reuneixi tot l'estudi fet en aquest treball i que doni peu a la fabricació de la placa amb el circuit dissenyat, ens cal generar els *gerbers*, que són els documents que enviarem a l'empresa que fabrica les plaques de circuits impresos i que contenen tota la informació necessària per construir la placa tal i com l'hem dissenyat nosaltres.

Per a obtenir aquest entregables amb el programa EAGLE, ens fixem amb els requeriments de l'empresa a la qual volem portar a fabricar la nostra placa, ja que és la mateixa que ofereix un servei en línia de pressupost a distància, tal com explicarem al punt 6 "Valoració econòmica d'un prototip". Aquesta empresa és **2CI Circuitos Impresos** i dins la secció "Info Tècnica" de la seva pàgina web trobem la informació necessària per saber què necessiten i com podem generar-ho.

La documentació necessària que demana la web corporativa s'ha de reunir en un fitxer comprimit i ha de constar de:

- ◆ **RS-274X (preferiblement) o RS-274D**: la pàgina web explica que és preferible el primer cas perquè aquest format conté informació de diàmetres i formes i es redueixen els errors de conversió, mentre que en el segon cas es necessita una taula amb obertures en un arxiu independent.
- ◆ Generar un arxiu *gerber* per cada capa. Ho detallem als punt 5.6.1 fins al 5.6.7.
- ◆ Resolució mínima de 5 xifres, i preferentment 2:5 i 3:5.
- ◆ Arxius de control numèric (serveixen de guia per foradar la placa)
 - si és possible, en format Excellon (variant del format RS-274D)
 - sense extensió de caràcters ASCII (seleccionable al programari amb la opció *ASCII none*)
 - si és possible, sense supressió de zeros

-si és possible, normalitzar les unitats respecte els arxius *gerbers*

Un cop tenim els requeriments, anem a fer-ho amb el programa EAGLE i basant-nos en tres documents: el manual de l'empresa 2CI Circuitos Impresos (que es troba a la mateixa web, dins la secció "Info tècnica", i que adjuntem amb el Treball amb el nom "Eagle.pdf", dins la carpeta Bibliografia), un tutorial en línia de la web Piclist [18] i finalment un tutorial en format ".pdf" que explica detalladament com generar els diversos fitxers, i que també adjuntem amb el Treball sota el nom "GUIA_GENERAR_GERBER.pdf", [19]. Els passos que hem seguit han estat obrir File / CAM Processor i crear una *Section (pestanya)* per cada capa que vulguem exportar. Per a poder-ho aprofitar en altres dissenys, guardem aquesta configuració en un arxiu (TFC.cam, que també adjuntem al treball) i d'aquesta manera ja tindrem la configuració a punt en properes ocasions.

Expliquem com a exemple la secció amb la informació de pistes de la capa superior de components ja que la resta segueix el mateix procés. Cada cop que acabem una secció, apremem *Add* i se'ns aniran afegint tantes pestanyes com capes vulguem exportar. Tot aquest conjunt de seccions es guarden en una plantilla en format ".cam", a partir de la qual es podran generar gerbers de més projectes (en el nostre cas TFC.cam). Per generar els fitxers entregables, un cop creades totes les pestanyes, cal apretar *Process Job* i si no hi ha cap error, dins el directori del projecte hi haurà tants fitxers com seccions haguem definit. En el cas que hi hagués algun error, ho indicaria, i un cop resolt ja quedarien creats i llestos per enviar a fabricar els diversos fitxers que llistem a continuació.

5.6.1 Fitxer de pistes de la capa superior (*TFC.top*)

Per la capa de pistes dels components necessitem el que veiem a la Figura 21: seleccionar les capes *Top*, *Pads*, *Vias* i *Dimension* i el format RS-274X comentat anteriorment.

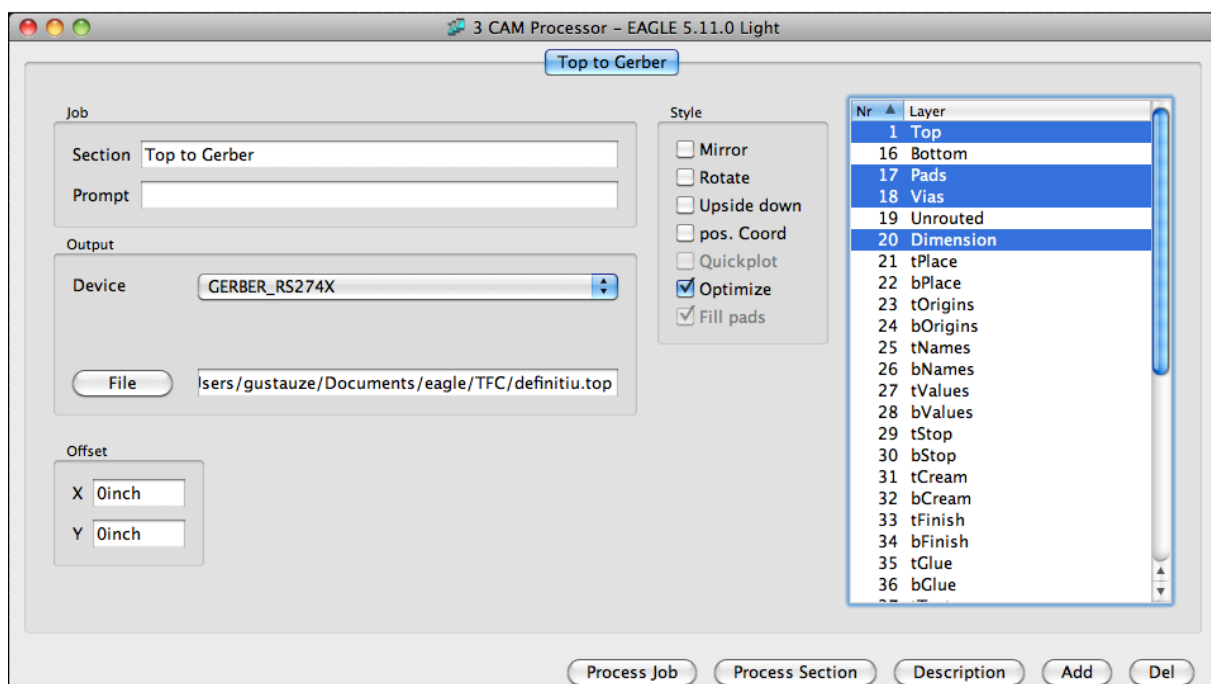


Fig.21: Configuració del fitxer *definitiu.top*

A la Figura 21 hi mostrem la finestra de configuració dels fitxers *gerbers* a generar. Un cop fet això, apremem *Add* i continuem amb la resta de capes.

5.6.2 Fitxer de pistes de la capa inferior (*TFC.bot*)

Igual que l'anterior, canviant *Top* per *Bottom*.

5.6.3 Fitxer de components al costat dels components (*TFC.slc*)

Seleccionem les capes a exportar: *tPlace*, *tNames* i *Dimension*, que ens permet imprimir a la placa els *footprints* dels components. El *footprint* és el dibuix del component sobre la placa, el que en anglès s'anomena "empremta" per localitzar i ubicar més fàcilment els components a la placa. Aquesta capa també s'anomena serigrafia.

5.6.4 Fitxer de components al costat de soldadura (*TFC.sls*)

Igual que l'anterior però seleccionant *bPlace*, *bNames* i *Dimension*. La "t" en el cas anterior o la "b" en aquest cas que veiem al nom de la capa fa referència a la capa superior (*Top*) o inferior (*Bottom*).

5.6.5 Fitxer de màscara de soldadura al costat dels components (*TFC.smc*)

En aquest fitxer només hi seleccionem la capa *tstop*, que és la que defineix la màscara de soldadura: la zona per on no hi haurà coure al voltant dels components, també s'anomena antisoldant.

5.6.6 Fitxer de màscara de soldadura al costat de soldadura (*TFC.sms*)

Com en l'anterior, només hi seleccionem la capa *bstop*.

5.6.7 Fitxers de perforacions (*TFC.drd*, *TFC.dri* i *TFC.drl*)

Aquí és on hi haurà la informació dels forats i vies de la placa. Hem de seleccionar un dispositiu (*Device*) diferent, l'EXCELLON (tal i com ens indica el manual de l'empresa 2CI). Ho fem i ens apareix una nova casella RACK on hem de posar la ruta cap a un fitxer *.drl* on hi ha informació sobre les broques per taladrar la placa. Com que el fitxer no està creat en l'EAGLE, el creem amb la instrucció (dins l'editor de *layout*) "**run drillcfg.ulp**". Ens demana seleccionar "mm" o "inch", i escollim aquesta segona opció. Ens apareixen diverses pantalles i finalment ens demana on guardar-lo, el deixem dins la mateixa carpeta on tenim guardat el projecte amb el nom *TFC.drl*.

Tornem a la finestra del processador CAM i especifiquem la ruta perquè trobi el fitxer que acabem de crear. Un cop fet això, guardem totes les seccions en un fitxer anomenat "TFC.cam" i procedim a comprovar que no tenim cap error i que podem donar per enllestit el gerber i, per tant, la part pràctica del Treball Final de Carrera. Per fer això, executem el *Job* (procés de creació dels fitxers i comprovació que no hi ha cap error) i ens ho fa correctament. En total, ens queden tretze fitxers: el projecte (*eagle.epf*), l'esquemàtic (*TFC.sch*), la placa (*TFC.brd*), el rutejat per les cares superior i inferior (*TFC.top* i *TFC.bot*), serigrafia per les dues cares (*TFC.slc* i *TFC.sls*), màscara de soldadura per les

dues cares (*TFC.smc* i *TFC.sms*) i els fitxers amb la informació de perforacions (*TFC.dri*, *TFC.drl* i *TFC.drd*). Per últim l'arxiu *TFC.gpi* (*gerber photoplotter information*) conté informació no rellevant però es genera automàticament.

6. Valoració econòmica d'un prototip

Un cop dissenyat el layout, podem fer una previsió de quin cost econòmic tindria fer-ne un prototip real, tenint en compte el preu dels components, el preu de fabricació de la placa i una estimació d'hores tant de disseny com de comprovació de funcionament del circuit per validar-lo definitivament (amb el seu preu/hora associat).

Pel que fa a la fabricació de la placa, optem per una empresa catalana: **2CI Circuitos Impresos** (<http://www.2cisa.com/>), perquè en anteriors ocasions ja hi hem treballat i ens dóna confiança. La web corporativa ofereix la possibilitat de fer un pressupost en línia (que adjuntem a l'Annex 3) i amb molta rapidesa ens han contestat la petició: per una comanda mínima obligada de tres plaques en un mateix plafó, i amb les característiques que es poden veure tant al pressupost com a la pròpia petició que adjuntem en aquest Treball (dins la carpeta `gustauze_treballpractic`), ens costaria 191,21€ perquè no ens importa rebre-ho en vuit dies o més.

Pel que fa als components, prenem com a vàlids els preus de diverses webs de referència i consultats a dia 9 de maig de 2011. A les taules següents mostrem el component (i sobre el seu nom, l'enllaç a la pàgina amb les característiques tècniques), la referència del distribuïdor i el preu. Per començar, a la Taula 6 llistem els preus dels components consultats a la web del distribuïdor Farnell.

Component	Codi Farnell	Preu
Resistor (1K Ω)	1107508	1,60€
Condensador	3558952	0,146€
Porta lògica OR	9592393	0,88€
Amplificador Operacional	7527007	0,33€
Diode	1467565	0,103€

Taula 6: Relació de preus dels components (Farnell)

La sirena acústica, l'aconseguiem a través de Cetronic:

Component	Referència Cetronic	Preu
Sirena acústica	35.065	8,12€

Taula 7: Relació de preus dels components (Cetronic)

Per l'alarma lluminosa, els cables i el LED, mirem els models i preus de la botiga i distribuïdor Onda Radio i els mostrem a la Taula 8.

Component	Referència Onda Radio	Preu
Sirena lluminosa	HPE106D	7,48€
Cable negre	CC1142N	1,58€
Cable vermell	CC1142R	1,65€
LED taronja	L53ND	0,0594€

Taula 8: Relació de preus dels components (Onda Radio)

Les fonts d'alimentació (de +15V, -15V i +5V per un costat, i de -5V per l'altre) les podem trobar a Mouser Electronics. Els enllaços proporcionats mostren un llistat de components perquè l'enllaç web directe a la pàgina del producte no funciona. En els dos casos, i en l'ordinador utilitzat, l'enllaç és el primer producte de la llista.

Component	Referència Mouser	Preu
Font d'alimentació ($\pm 15, +5$)	826-LPT63	54,41€
Font d'alimentació (-5)	826-LPT64	54,41€

Taula 9: Relació de preus dels components (Mouser Electronics)

Per últim, el preu de les galgues extensomètriques utilitzades l'hem trobat en un arxiu, actualitzat del 2006, d'una empresa distribuïdora de Nova Zelanda: Reid Technology (<http://www.reidtechnology.co.nz/>), que les ven en paquets de cinc unitats. Com que per la nostra placa en necessitem vuit, hauriem de comprar-ne dos paquets. A dia 9 de maig de 2011, l'equivalència entre Dòlars Americans i Euros és de $1\$ = 0,697\text{€}$. En aquest cas no hem aconseguit posar un enllaç web perquè l'arxiu és descarregable però no es pot consultar en línia; per aquest motiu, l'afegim amb tota la documentació complementària al Treball amb el nom "*Preus galgues VISHAY.pdf*".

Component	Referència Reid Technology	Preu
Galga extensomètrica	LEA-06-W125E-350/3R	$2 \times (5 \times 64,45\$) = 644,5\$ = 449,176\text{€}$

Taula 10: Relació de preus dels components (Reid Technology)

Arribats a aquest punt, fem una taula resum amb el preu de cada component, la quantitat i la suma total del que costaria comprar tots els components, inclosa la placa. A la Taula 11 veiem la contribució dels components desglossats per tipus i per valor. Hem comptat només 1 galga perquè en aquest preu ja hi van incloses les vuit unitats que necessitem, tal com hem comentat en el paràgraf anterior a la Taula 10. Veiem que el subtotal és de 811,32€.

Tipus	Valor	Quantitat	Preu unitari	Contribució
Resistor	100Ω	2	€ 1,60	€ 3,20
	700Ω	1	€ 1,60	€ 1,60
	1KΩ	2	€ 1,60	€ 3,20
	1,2KΩ	1	€ 1,60	€ 1,60
	2,2KΩ	1	€ 1,60	€ 1,60
	3,9KΩ	1	€ 1,60	€ 1,60
	4,7KΩ	1	€ 1,60	€ 1,60
	5,6KΩ	1	€ 1,60	€ 1,60
	8,2KΩ	1	€ 1,60	€ 1,60
	10KΩ	10	€ 1,60	€ 16,0
	470KΩ	4	€ 1,60	€ 6,40
Condensador	100pF	2	€ 0,146	€ 0,292
Diode	-	4	€ 0,10	€ 0,40
LED	3V	1	€ 0,0594	€ 0,0594
Porta lògica	OR	1	€ 0,88	€ 0,88
Galga	350Ω	1	€ 449,176	€ 449,176
Cable	Negre	1	€ 1,58	€ 1,58
	Vermell	1	€ 1,65	€ 1,65
Font	±15V, 5V	1	€ 54,41	€ 54,41
	-5V	1	€ 54,41	€ 54,41
Operacional	-	5	€ 0,33	€ 1,65
Sirena	Lluminosa	1	€ 7,48	€ 7,48
	Acústica	1	€ 8,12	€ 8,12
Placa	PCB	1	€ 191,21	€ 191,21
SUBTOTAL				€ 811,32

Taula 11: Preu dels components i de la placa

Un cop tenim els costos físics d'un prototip, hem de contemplar també els de disseny de la pròpia placa i els d'elaboració del Treball, és a dir, la mà d'obra. Agafem un valor habitual de 25€ per hora i el total d'hores que surt de sumar totes les hores de dedicació previstes al Pla de treball. Aquestes són 67 hores de la PAC1, 37 hores de la PAC2, 42 hores de la PAC3 i finalment 64 hores pel document final i l'enregistrament vídeo. Inicialment, la PAC3 suposava 27 hores però hem afegit 15 hores més de disseny del *layout*. Per últim, cal contemplar les 8 hores de soldadura i una hora de comprovació, és a dir, un total de 219 hores.

No tenim en compte el soldador, l'estany necessari ni tampoc les eines que seran necessàries per a soldar els components a la placa un cop fabricada perquè considerem que no cal comprar materials dels quals ja disposem. El que sí que hem de tenir en compte són les hores de feina de disseny, de redactat de la memòria, de soldadura (muntatge de la placa) i de comprovació del correcte funcionament.

A partir de la previsió feta al Pla de Treball, hem separat les hores dedicades al disseny (estudi del programari i hores de disseny) de les hores de redactat de memòria, correcció amb el Tutor, etc. Per últim, malgrat no estaven contemplades al Pla de Treball, hem afegit les hores de muntatge i de comprovació.

Factor	Quantitat	Preu unitari	Contribució
PCB	1	€ 811,32	€ 811,32
Disseny	66	€ 25,00	€ 1.650,00
Redactat memòria	144	€ 25,00	€ 3.600,00
Soldadura	8	€ 25,00	€ 200,00
Comprovació	1	€ 25,00	€ 25,00
TOTAL			€ 6.286,32

Taula 12: Preu total del Projecte

A la Taula 12 veiem el preu total del Projecte comptant totes les fases de disseny, la redacció de les tres PACs i de la memòria final, la fabricació de la placa, el muntatge i la comprovació. Al Pla de Treball havíem previst quinze hores pel disseny del layout, quan en realitat n'hem invertit el doble. Aquestes hores extres estan contemplades en aquest càlcul total. El preu total del Projecte és de **6.286,32€**.

7. Conclusions

En aquest últim capítol resumirem els objectius assolits i les lliçons apreses durant el desenvolupament del Projecte.

Per començar, podem dir que hem assolit tots els objectius proposats inicialment: anàlisi de les deformacions de la biga, disseny de l'etapa amplificadora, disseny del circuit discriminador, disseny del mòdul d'alarmes i, finalment, generació dels *gerbers*.

Pel que fa a l'anàlisi de les deformacions de la biga, cal dir que ha estat un dels objectius que ha costat més desenvolupar perquè desconeixiem per complet les galgues extensomètriques i ens va costar trobar informació que fos útil pel nostre Treball. Malgrat això, hem descobert els transductors i les múltiples aplicacions que tenen, sobretot com a sensors de magnituds físiques.

A l'hora de dimensionar l'etapa amplificadora no hem tingut problemes que hagin alentit el procés. Hem cercat bibliografia per prendre una referència robusta i les simulacions amb el programa TINA-TU han confirmat el correcte disseny.

Quan va ser el moment de dissenyar el circuit discriminador vam pensar una primera proposta i finalment hem optat per una altra que creiem que és més encertada. El primer model feia una suma aritmètica de les deformacions mesurades amb les galgues i els ponts però el defecte que tenia era que es tractava per igual una deformació que només tingués, per exemple, contribució horitzontal que una deformació amb components vertical i horitzontal. Això feia que l'etapa amplificadora quedés dimensionada amb un rang molt ampli de valors i no donava a la sortida valors fàcils de tractar. La opció escollida ha estat fer la suma lògica de les deformacions vertical i horitzontal: només que una de les dues suposi un perill, l'alarma serà activada. Aquest comportament es pot implementar mitjançant una porta lògica OR, on la sortida (l'alarma) és activa quan qualsevol de les dues entrades (les dues deformacions mesurades) pren el nivell lògic alt. La lliçó apresada és que cal contemplar més d'una opció abans de confirmar un model per no perdre temps amb el simulador.

El mòdul d'alarmes ha tingut dues fases: inicialment vam optar per indicar el perill de deformació crítica però vam acabar amb suficient marge de temps abans de l'entrega de la PAC3 i el Tutor ens va proposar afegir una alarma per deformacions lleus. Llavors, el disseny final conté aquestes dues opcions. L'inconvenient que ens hem trobat ha estat que la porta lògica prèvia a les alarmes treballa amb valors TTL, mentre que les alarmes ho fan amb valors de 12V. Per aquest motiu ha calgut afegir un amplificador per adaptar els valors de treball.

On ens hem trobat més problemes ha estat amb el *layout* i la generació dels *gerbers*. Un cop hem tingut l'esquemàtic definitiu i hem volgut importar-lo del TINA a l'EAGLE per a fer el *layout*, ens hem adonat que els formats són incompatibles, fet que ha suposat dibuixar l'esquemàtic de nou amb l'EAGLE. A mesura que hem anat desenvolupant el *layout*, ens hem trobat amb errors de les regles de disseny (*Design Rules*) com ara distàncies de separació entre pads i components massa petites. La

solució ha passat per canviar el rutejat de la placa i disminuir les restriccions canviant també les regles. La lliçó apresada és que, de cara a propers projectes, en aquesta fase del disseny hauríem de proposar més dedicació d'hores a la planificació temporal.

Pel que fa als *gerbers*, hem estat capaços de generar tots els fitxers a la primera, excepte els relatius a les perforacions. Amb el manual que seguïem com a referència el fitxer que se'ns generava no contenia els diàmetres dels forats correctes i ens donava un error. Finalment, la solució ha estat editar el fitxer manualment amb els diàmetres i decimals necessaris i coherents amb el layout.

8. Bibliografia

[1] **VVAA.**(2011, 14 de febrer).”Puente de Wheatstone”. *Wikipedia* [enciclopèdia en línea].
[Data de consulta: 2 de març de 2011]
<http://es.wikipedia.org/wiki/Puente_de_Wheatstone>

[2] **Callister,D. , William,Jr.** (1996).”Otras características eléctricas de los materiales”.
Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales.[‘Introducció a la Ciència i Enginyeria dels Materials’] (1a edició). Barcelona: REVERTÉ.

[3] **VVAA.**(2011, 2 de febrer).”Galga extensiométrica”. *Wikipedia* [enciclopèdia en línea].
[Data de consulta: 2 de març de 2011]
<http://es.wikipedia.org/wiki/Galga_extensiom%C3%A9trica>

[4] **VVAA.**(2011, 2 de febrer).”Módulo elástico”. *Wikipedia* [enciclopèdia en línea].[Data de consulta: 3 de març de 2011]
<http://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%B3dulo_el%C3%A1stico>

[5] **Arancibia,F.**(2009, 28 de març).”Tracción en Metales”. *Ingeniería y Construcción.*
[article en línea].[Data de consulta: 14 de març del 2011]
<http://facingyconst.blogspot.com/2009_03_28_archive.html>

[6] **H. Gulvanessian, H.Milan** (1996).”Appendix1: Limiting deflection for serviceability limit states”.*Designer’s handbook to Eurocode1: Basis of design.*[‘Manual pel dissenyador de l’Eurocode1: Bases del disseny’] (1a edició). Londres: Thomas Telford.

[7] **VVAA** (2005).”7.1 Deformaciones generadas por tensiones normales”. *Introducción a las estructuras de edificación* [‘Introducció a les estructures d’edificació’] (1a.edició). València: Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia (Tomo I).

[8] **Sensorland.** “The strain gauge”. How they work [tutorial en línea].[Data de consulta: 3 de març de 2011]
<<http://www.sensorland.com/HowPage002.html>>

[9] **Schilling,D.L. , Belove,C.** (1993). *Circuitos Electrónicos. Discretos e integrados.*
[‘Circuits electrònics. Discrets i integrats’] (3a edició). Aravaca: McGraw-Hill.

[10] **López Ferreras, F.**(1994). Teoremas fundamentales de circuitos. A: F. López Ferreras. *Análisis de CIRCUITOS LINEALES (Volumen I)*. [Anàlisi de CIRCUITS LINEALS (Volum I)] (1a edició). Madrid: Editorial Ciencia 3 Distribución.

[11] **Texas Instruments.**(2008). "Precision absolute value circuits". *Application Bulletin* [butlletí en línia]. [Data de consulta: 29 de març de 2011]
<<http://focus.ti.com/general/docs/lit/getliterature.tsp?baseLiteratureNumber=sboa068&track=no>>

[12] **Mouser Electronics:** font d'alimentació de +15V, -15V i +5V de contínua de la marca Emerson / Astec power
<<http://es.mouser.com/ProductDetail/Emerson-Astec-Power/LPT63/?qs=sGAEpiMZZMtZ8P%2feuiupSU2z101i0Ya9qswd3cwxR%2fM%3d>>

[13] **Mouser Electronics:** font d'alimentació de -5V de contínua de la marca Emerson / Astec power
<<http://es.mouser.com/ProductDetail/Emerson-Network-Power/LPT64/?qs=RCLU9o6%252bptxGu%252bS5TzdW2Q%3d%3d>>

[14] **F.J.M.**(2004). "Electrónica fácil". *Comparador de tensión*. [tutorial en línia]. [Data de consulta: 15 de març del 2011]
<<http://www.electronicafacil.net/tutoriales/COMPARADOR-TENSION.php>>

[15] **Cetronic.** Distribuidor de material elèctric i electrònic on disposen de la sirena acústica com la que proposem.
<<http://www.cetronic.es/sqlcommerce/disenos/plantilla1/seccion/producto/DetalleProducto.jsp?idIdioma=&idTienda=93&codProducto=999019453&cPath=1051>>

[16] **Onda Radio.** Distribuidor de material elèctric i electrònic on disposen de la sirena lluminosa com la que proposem.
<<http://www.ondaradio.es/esp/detalle.aspx?id=61586>>

[17] **Bolding, K.** "Cadsoft Eagle 4.0 Editor Tutorial". [tutorial en línia]. [Data de consulta: 18 d'abril del 2011]
<<http://myhome.spu.edu/bolding/EE4211/EagleTutorial4.htm>>

[18] **Piclist.com.** "Gerber file making by EAGLE". *Eagle*. [tutorial en línia]. [Data de consulta: 08 de maig del 2011]
<http://www.piclist.com/images/www/hobby_elec/e_eagle44.htm>

[19] **Uniandes.edu**. "Guia generar gerber". [tutorial per descarregar]. [Data de consulta: 08 de maig del 2011]

<labelec.uniandes.edu.co/lfc/GUIA_GENERAR_GERBER.pdf>

Annexos

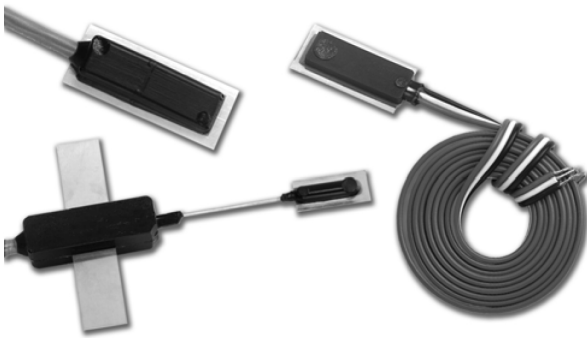
Annex 1. Full de característiques de la galga extensomètrica

Sealed Weldable Patterns

MEME Micro-Measurements



Special Use Strain Gages - Weldable Strain Gages



Micro-Measurements Sealed Weldable Strain Gages are specially designed for spot welding to structures and components. They are ideally used for applications where test or environmental conditions preclude clamping and curing an adhesively bonded gage installation. These gages

are equally advantageous when strain measurements must be made at elevated temperatures, but the nature of the test object does not permit the use of an elevated-temperature-curing adhesive. Additionally, all Micro-Measurements Sealed Weldable Strain Gages come with a preinstalled protective coating providing both protection in moist environments and savings in the time and effort required for making the complete gage installation.

All sensors are fabricated with EA-Series strain gages, laboratory-prebonded with a high-performance adhesive to a thin [0.005 in (0.127 mm)] stainless steel carrier, and fully encapsulated for protection against moisture. They have a ± 5000 microinch/in strain range, and a normal operating temperature range of -40°F (-40°C) to $+180^{\circ}\text{F}$ ($+83^{\circ}\text{C}$). These gages can be used on surfaces with a radius of curvature of 3.0 in (76 mm) or greater.

The three leadwire-series of Micro-Measurements Sealed Weldable Strain Gages have physical constructions designed for various environmental exposures and installation constraints.

R-LEADWIRE-SERIES

These gages are designed for long-term out-of-doors use. Primarily used in applications such as railroad and civil structures, they can be exposed to oil and water splash and short-term submersion in water of shallow [24 in (60 cm)] depth. The metal carrier is processed to give good first cycle data, excellent fatigue resistance and a high strain range.

Exposure of the vinyl-insulated cable to strong solvents - especially MEK - should be avoided to prevent damage. Long-term exposure to sub-freezing temperatures requires careful handling to avoid cracking of the vinyl insulation.

DESIGNATION	NOMINAL RESISTANCE (Ohms)	NOMINAL GAGE FACTOR	GRID GEOMETRY	GAGE LENGTH (in)	LEADWIRE	SHIM LENGTH (in)	SHIM WIDTH (in)
LEA-06-W125E-350/3R	350	2.0	Axial	0.125	Vinyl	0.8	0.4
		<p>Bridge Circuit</p>		<p>Configuration</p>			

Annex 2. Enllaços dels fulls de característiques dels components

- ◆ **Resistor:** <http://www.vishay.com/docs/30102/wscwsn.pdf>, i el nostre model és el **WSC4527** (de la primera taula de la segona pàgina)
- ◆ **Galga extensomètrica:** <http://www.vishaypg.com/doc?11533>
- ◆ **Amplificador operacional:** <http://www.farnell.com/datasheets/314110.pdf>
- ◆ **Diodes:** <http://www.fairchildsemi.com/ds/MM/MMSD4148.pdf>
- ◆ **LED:** <http://www.ariston.es/web/imgProductos/doc/153nd.pdf>
- ◆ **Condensador:** http://www.johansondielectrics.com/images/stories/surface-mount/high-voltage/jdi_high-voltage_2009-07.pdf
- ◆ **Porta lògica OR:** <http://www.farnell.com/datasheets/74428.pdf>
- ◆ **Fonts d'alimentació:** com ja hem comentat anteriorment al punt 3 d'aquest Treball, les fonts de +5V, +15V i -15V són la mateixa: http://www.powerconversion.com/assets/lpt60series_ds_1184686568_ds.pdf, model **LPT63**. Pel que fa a la font de -5V, el model escollit és el **LPT64** de la mateixa marca i podem veure les seves especificacions al mateix datasheet anterior.
- ◆ **Sirena lluminosa:** <http://www.ariston.es/web/imgProductos/doc/hpe106.pdf>
- ◆ **Sirena acústica:** http://www.cetronic.es/sqlcommerce/ficheros/dk_93/productos/999019453-2.jpg
- ◆ **Cable pel connexionat de les fonts a la placa:** subministrat per Onda Radio
 - Negre: <http://www.ondaradio.es/esp/detalle.aspx?id=1457>
 - Vermell: <http://www.ondaradio.es/esp/detalle.aspx?id=1459>

Annex 3. Pressupost en línia de l'empresa 2CI



Pl. La Ferreria - c/ la Tècnica, 4
08110 Montcada i Reixac
Tel: 93 485 00 95 - Fax: 93 300 92 60
2cisa@2cisa.com - www.2cisa.com
CIF A-58.045.055



A/A: GUSTAU

UOC

08301
BARCELONA

TEL.: 647587931
FAX.:

PRESUPUESTO N° 62432

09/05/11 17:52:38

PREVISIÓN DE ENTREGA ACTUAL: Estándar 2CI (9-11 días hábiles)	Estándar Exterior (19-21 días hábiles)
--	--

OBSERVACIONES

FABRICACIÓN MÍNIMA 3 U. SOLO REALIZAMOS LA FABRICACIÓN DE LOS CIRCUITOS, NO INSERTAMOS COMPONENTES, EN NUESTRA PÁGINA WEB PUEDE ENCONTRAR MONTADORES.

DATOS CIRCUITO

Mod.	NUEVO	Medidas	101x80	Material	FR4	Másc. verde	2
S/Ref	TFC.MESURA	Capas	2	Base	1	Másc. Pelable	No
N/Ref		SMD	SÍ	Cobre final	35	Sit.C.blanco	1
Desc.		Clase	5	Acabado	Flash-Gold	Test	SÍ
Entrega panel	101,6 x 80,01(1u x 1u)0,81dm ² /u.			Dificultad:		Conjunto de:	

		Plazo de entrega	Mts ²	Unidades	Precio u.	Gastos	Fotoplot	Total
1	-Proto-	3 días	0,02	3	67,78	50,00	0,00	253,34 €
2	-Proto-	5 días	0,02	3	52,71	50,00	0,00	208,13 €
3	-Proto-	8 días	0,02	3	47,07	50,00	0,00	191,21 €

La validación de los archivos del diseño se realizará una vez recepcionado su pedido. Para próximas solicitudes de precio rellene el formulario que encontrará en nuestra web www.2cisa.com.

PORTES PAGADOS: siempre portes pagados. Pedidos en 1/2, 1 y 2 días PORTES PAGADOS URGENTES (antes 10:00h).

PLAZOS ACTUALES: 1/2 día, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 días y plazo estándar. Si el pedido llega antes de las 9h., ese día ya cuenta.

SERIE: es la mejor opción si se ha de fabricar ese modelo más de una vez. La documentación generada es definitiva y sólo se paga la primera vez.

PROTOTIPO: es la mejor opción si se ha de fabricar ese modelo una sola vez. La documentación generada es de sólo un uso y más económica que la serie.

MÁSCARA bl=blanco; vd=verde; az=azul; am=amarillo; rj=rojo; ng=negro; grm=gris mate

INDIQUE EN SU PEDIDO EL NÚMERO DE PRESUPUESTO. LLÁMENOS ANTE CUALQUIER DUDA.

