

Capítol 3

Desenvolupament del Hardware

En aquest capítol es descriurà tota la part de hardware emprada al projecte. Per tal de realitzar proves del correcte funcionament del PLL, era necessari un sistema ressonant, amb una freqüència de ressonància i amb un cert desfasament en aquesta. Es va emprar un sensor piezoelèctric ressonant, el qual s'havia d'excitar mecànicament mitjançant una vibració, per lo que es va emprar un transductor electromecànic el qual tenia un consum de corrent elevat i va ser necessari dissenyar una etapa de potència per tal de subministrar aquest corrent. La darrera part de Hardware que es va dissenyar és el convertidor I-V com a circuit d'acondicionament del senyal del piezoelèctric per dur a terme la lectura de la mesura, ja que la DAQ té entrades analògiques de tensió i no de corrent.

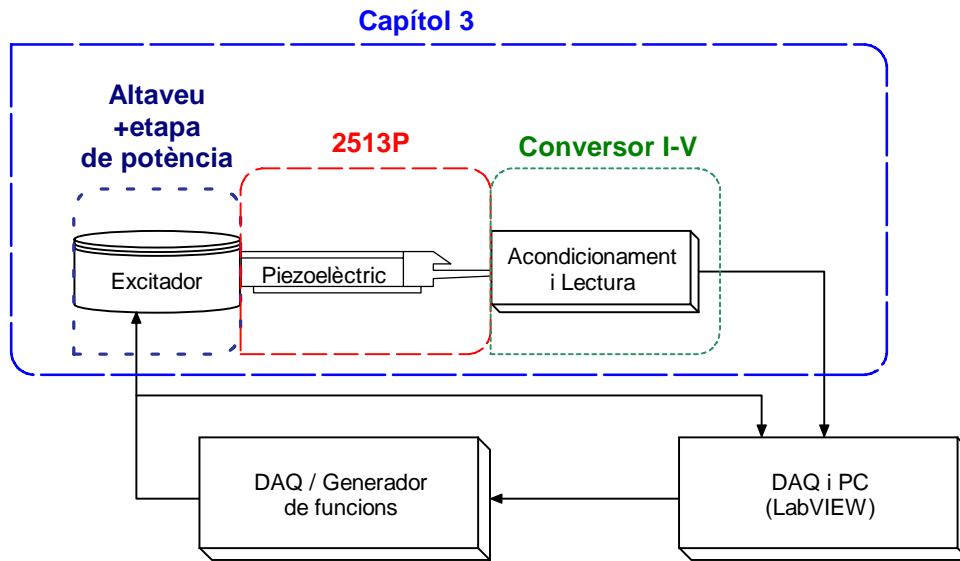


Figura 3.1. Esquema general indicant la part descrita al present capítol, juntament amb els apartats que el componen.

3.1. PIEZO FILM SENSOR.

3.1.1. Introducció.

Jaques i Pierre Curie van descobrir que quan aplicaven una pressió a un cristall de quars es produïen càrregues elèctriques en ell. Van denominar aquest fenomen com “efecte piezoelèctric”. Més tard verificaren que aplicant un camp elèctric al cristall, aquest es deformava físicament, amb lo qual, ho denominaren “efecte piezoelèctric invers”. Els materials que tenen aquesta propietat piezoelèctrica es poden emprar, per tant, per convertir energia elèctrica en mecànica i viceversa. [5].

El tipus de sensor emprat en aquest projecte és un piezoelèctric del tipus “film thin” (de l’anglès, transductor de pel·lícula fina), i també es tracta d’un sensor ressonant en forma de palanca com es pot observar a la següent imatge (Fig.3.2). És un piezoelèctric polímer que està experimentant el creixement més ràpid en les tecnologies de sensors a tot el món. Aquest tipus de sensor té una ampla gama de possibilitats en molts de camps diferents, i és el tipus de transductor que s’emprarà en aquest projecte, on tindrà un paper molt important, per tant, aprofundirem en la seva descripció i caracterització per tenir-ne un bon coneixement.

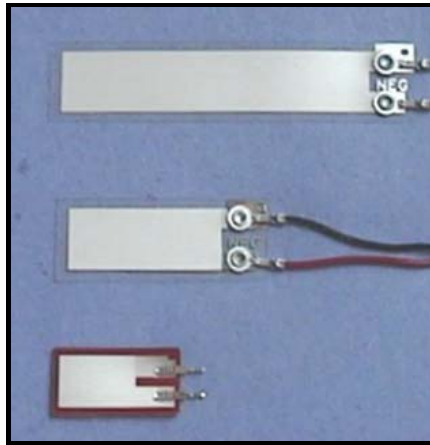


Figura 3.2. Piezo film sensor piezoelèctric de diferents mides [23].

3.1.2. Propietats.

Es tracta d'una pel·lícula fina de plàstic flexible de poc pes disponible en gran varietat de mides (com es pot veure a la figura superior). Per aquest projecte s'ha emprat el model de menors mides.

Les seves propietats com a transductor inclouen:

- Gran marge dinàmic, de μ Torr (mmHg) a Mbars.
- Alta elasticitat.
- Gran voltatge de sortida, fins a 10 pics major que un piezoelèctric ceràmic per la mateixa entrada.
- Baixa impedància acústica.
- Pot ser aferrat amb cola comercial [22].

Una de les principals avantatges del film piezoelèctric enfront als ceràmics és la baixa impedància acústica, la qual és propera a la de l'aigua, tan sols 2'6 vegades major, mentre que els ceràmics son fins a 11 vegades superiors. Té un alta sensibilitat i poca densitat.

Aquest piezoelèctric, per contra dels ceràmics, té la desavantatge de no poder-lo emprar com transductor electromecànic, sinó tan sols com a mecanicoelèctric, i a més, si els elèctrodes de la pel·lícula son exposats a camp magnètic, pot afectar al seu funcionament [23].

- **Conversió electromecànica.**

Aquest model de piezoelèctric no està dissenyat per actuar com a transductor electromecànic i per tant, no el podem emprar, per exemple, d'excitador d'un altre sensor. Per tal de poder

excitar mecànicament cal emprar un altre tipus d'aparell, com ara bé, un altaveu, que és la solució que s'ha adoptat en aquest projecte on la seva descripció serà presentada a l'apartat 3.3.

○ **Conversió mecanicoelèctrica.**

El piezoelèctric es podria comparar a una esponja amb aigua, si l'estrenys et caurà aigua, tanta fort com l'estrenyis. L'amplitud i la freqüència seran proporcionals a la deformació del material ja que aquesta deformació produeix un canvi a la densitat de la superfície de la pel·lícula i és crear una diferència de potencial als elèctrodes del piezo film. Si aquesta força es fa en sentit contrari, la polaritat de la tensió de sortida és oposada, el que pot generar una sortida alterna.

La sensibilitat del piezo film com un receptor d'entrada mecànica és excel·lent, no necessita alimentació externa. Aquesta sensibilitat és deguda al format del piezo film, ja que la seva estructura esta composta per un grossor molt baix per lo que petites forces a la pel·lícula provoquen, relativament, grans deformacions al material. La deformació és reversible, torna al seu estat original gràcies a les dues capes de plàstic que recobreixen la làmina interior [23].

La sortida V_o del piezo film serà:

$$V_o = g_n \cdot X_n \cdot t \quad (V) \quad n=1,2 \text{ o } 3 \quad (3.1)$$

Els eixos mecànics (n) venen donats com:

- 1 – direcció de llarg.
- 2 – direcció de l'ample.
- 3 – direcció de l'espessor.

On:

- V_o és la sortida del sensor piezoelèctric.
- g és el coeficient d'estrès segon la direcció on s'aplicarà.
- X la quantitat d'estrès aplicat al piezoelèctric.
- t és l'espessor [23].

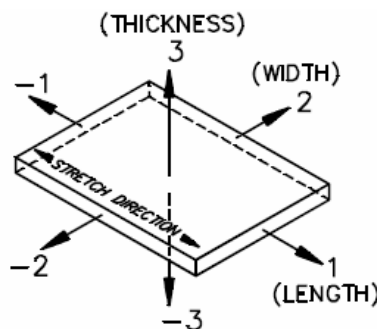


Figura 3.3. Representació dels eixos i nombre que reben les forces que es poden aplicar al piezoelèctric [23].

- **Característiques piroelèctriques.**

El piezo film sensor també es lleugerament sensible al canvi de temperatures, per lo que podem dir que te característiques semblants a la d'un sensor piroelèctric, el qual proporciona una diferència de tensió a la sortida quant sofreix un canvi de temperatura a la seva estructura. La fina pel·lícula del sensor absorbeix calor en forma de radiació i cobreix un rang de longituds d'ona de 7 a 20 μ m, per tant, si es vol fer feina a molt baixes freqüències ($<0,01\text{Hz}$ fins a 1Hz) s'ha de considerar la temperatura ambiental per tal de que no afecti a la sortida del sensor, encara que en el projecte es farà feina a freqüències superiors ($\approx 120\text{ Hz}$), i la temperatura tan sols ens afectarà a la sortida quant pugem molts de graus, com ara bé, atracar un encenedor al piezoelèctric [23].

- **Consideracions mecàniques.**

La tensió de sortida és proporcional a l'estrès que sofreix la pel·lícula, podent-ne elegir el seu grossor per tal d'optimitzar la sensibilitat segons les necessitats. Una pel·lícula més gruixada produeix voltatges més alts encara que es perd sensibilitat en quant a mínims canvis i es creen com a petites capacitats ja que tota l'àrea de la pel·lícula que no es deforma enfront a un estrès actuarà com un condensador sobre l'àrea que si la sofreix i s'hauria de reduir en lo possible [23].

- **Consideracions elèctriques i mecàniques juntament.**

La naturalesa capacitiva del piezo film implica que sigui sensible a interferències electromagnètiques, encara que es poden ignorar mentre es tingui una senyal de sortida alta o mentre a l'ambient no estigui exposat a elles. També quan un elèctrode del piezo film està conduint i l'altre està rebent la senyal vibratori s'ha de controlar que no es produeixin interferències, on una possible solució és emprar un cable coaxial, però per mesures no cal [23].

- **Model equivalent.**

Un sensor piezoelèctric ressonant pot venir modelat per un circuit elèctric RLC en sèrie com es pot veure a la figura següent.

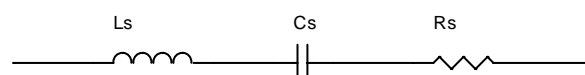


Figura 3.4. Circuit equivalent d'un sensor piezoelèctric.

On la L_s fa referència al component inercial degut a la massa total del sensor.

C_s fa referència a l'energia emmagatzemada durant l'oscil·lació, la qual depèn de l'elasticitat del piezo.

R_s simula l'energia dissipada durant l'oscil·lació per la fricció interna [3].

Amés d'aquests paràmetres hem de tenir en compte un factor paràsit molt important si el piezoelèctric és excitat elèctricament, ja que es crea una capacitat C_o molt major que C_s entre els seus elèctrodes i per tant, crea una corrent paral·lela molt major a la que passa pel circuit RLC impedint mesurar correctament la magnitud desitjada

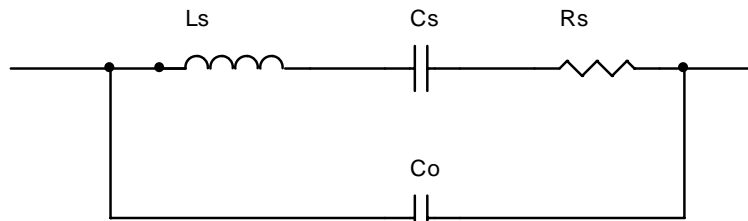


Figura 3.5. Model equivalent del piezoelèctric film sensor. Excitat elèctricament.

On el condensador C_o representa la capacitat que produeixen els elèctrodes, ja que són dos conductors amb un dielèctric entre ells.

En el nostre sensor s'evita tenir aquest problema d'una forma molt senzilla, excitant el piezoelèctric d'un mode no-elèctric, com és el mecànic.

- **Resposta freqüencial.**

Per conèixer la seva resposta freqüencial davant aquests elements paràsits descrits al apartat anterior s'ha realitzat el diagrama de BODE per distints valors de C_o . Per tant, hem ajustat els paràmetres RLC per tal de tenir una freqüència de ressonància propera a la del sensor real i amb un factor de qualitat semblant.

Els valors emprats pels paràmetres són:

$L_s = 750\text{KH}$,

$C_s = 3300\text{fF}$ i,

$R_s = 25\text{M}\Omega$, que com s'han comentat abans no es refereixen a valors reals elèctrics sinó tan sols per simular un model.

A les següents gràfiques podem veure la magnitud i fase en funció de la freqüència i de la capacitat C_o .

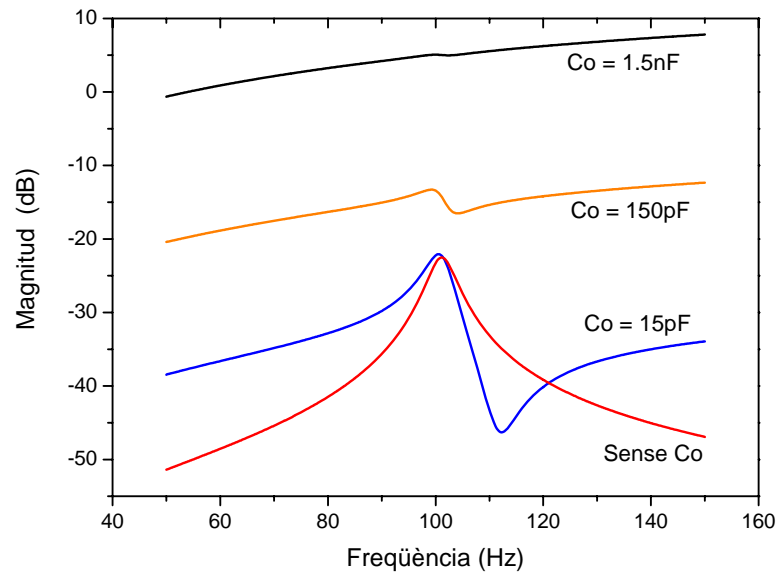


Figura 3.6. Simulacions de la magnitud respecte la freqüència en funció de la capacitat paràsita C_o .

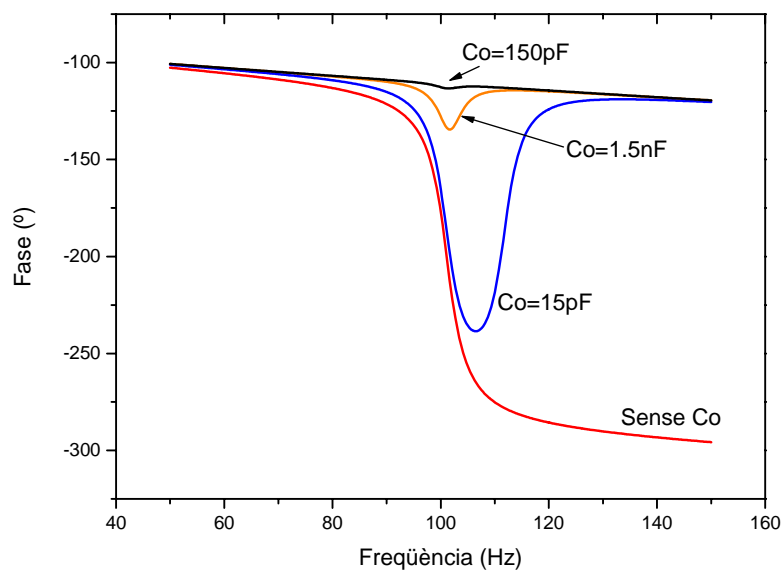


Figura 3.7. Simulacions de la fase respecte la freqüència en funció de la capacitat paràsita C_o .

En aquestes simulacions es pot comprovar que passaria si excitéssim el circuit elèctricament i, tenint en compte que la capacitat del piezoelèctric emprat és de $C_o=1.5\text{nF}$, i excitant mecànicament aconseguim la lectura adequada, com mostra la gràfica “Sense C_o ”.

- **Aplicacions.**

A continuació es nombraran alguns camps i exemples de on s'han emprat:

- Indústria: interruptors, robòtica, sensors tàctils, sensors de nivells, detecció de gasos, seguretat (detecció de trepitjades, de vidres romputs).
- Instrumentació: acceleròmetres, sensor de clima (intensitat de pluja, velocitat del vent).
- Medicina: diagnòstic (contador de pols, flux d'aire respirat), implantació (font de microcorrent, monitorització d'un marcapassos).
- Automoció: sensors de la posició dels sallents, del nivell del depòsit de combustible [23].

3.1.3. Piezoelèctric emprat en el projecte: 2513P de Farnell inOne®.

Pro-Wave ha dissenyat aquests sensors mecanicoelèctrics fets amb la tecnologia basada amb polímers. La fina pel·lícula del polímer té un efecte piezoelèctric molt superior a altres cristalls o materials ceràmics ja que té una constant piezoelèctrica (el paràmetre g) entre 10 i 20 vegades superior que el ceràmic i el converteix amb un material ideal per la conversió d'energia mecànica a elèctrica [25].



Figura 3.8. Imatge del sensor emprat, la figura de la dreta mostra un augment de l'espessor del piezoelèctric.

- **Característiques:**

- Alt coeficient piezoelèctric.
- Baixa impedància acústica i mecànica.
- Alta resistència per la humitat.
- Flexible, inoxidable, resistent i molt lleuger.
- Autogenera senyal de corrent [25].

- **Resposta Freqüencial de la sensibilitat.**

Aquest sensor treballa a baixes freqüències per lo qual el senyal és pot adquirir sense cap tipus de problema amb la DAQ. Té una freqüència de ressonància propera als 100Hz encara que aquesta pot sofrir lleugers desplaçaments degut a tot el que s'ha exposat abans. La màxima sensibilitat també depèn de la freqüència en la que es treballa així com la posició del sensor i l'eix de la seva excitació mecànica com es pot observar a la següent figura.

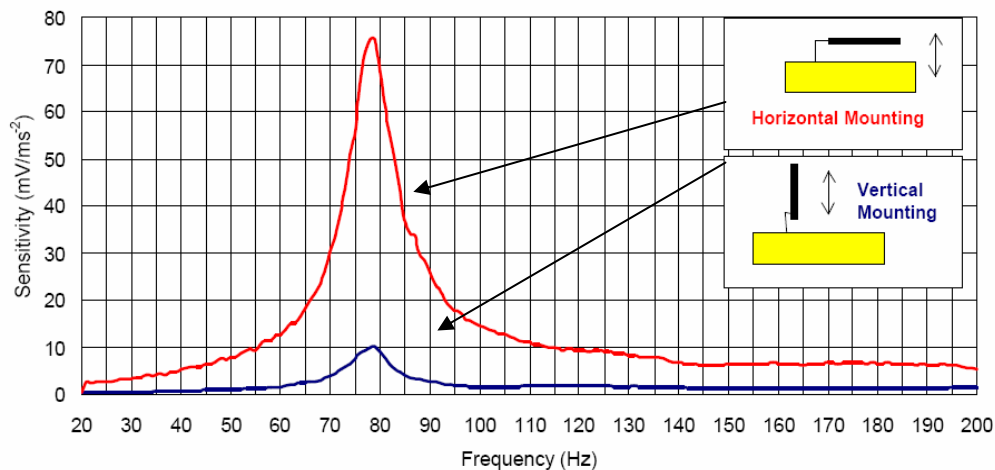


Figura 3.9. Sensibilitat enfront de la freqüència i segons el muntatge del sensor i del seu eix d'excitació mecànica [25]. El sensor emprat en el projecte s'ha emprat amb un muntatge horitzontal

- **Aplicació en aquest projecte.**

Son moltes les aplicacions que se lis pot donar en aquest sensor com s'ha vist anteriorment, però una aplicació que no s'ha mencionat abans és la que s'usarà en aquest projecte, el piezo film sensor s'emprarà com un sensor de massa estudiant la seva freqüència de ressonància, ja que com s'ha vist abans, aquesta també depèn, entre altres, del pes del piezoelèctric. El funcionament és molt simple, el sensor ressonarà a una certa freqüència quant estigui lliure de pes, i a una distinta quant es posi un pes damunt. Amb l'estudi i comparació de les dues freqüències es coneixerà el increment de pes que ha patit. Aquest piezoelèctric també es podria emprar com un acceleròmetre, sensor de pressió, detector d'impactes, etc. A continuació es mostra la part on pertany el piezoelèctric dins el desenvolupament del projecte.

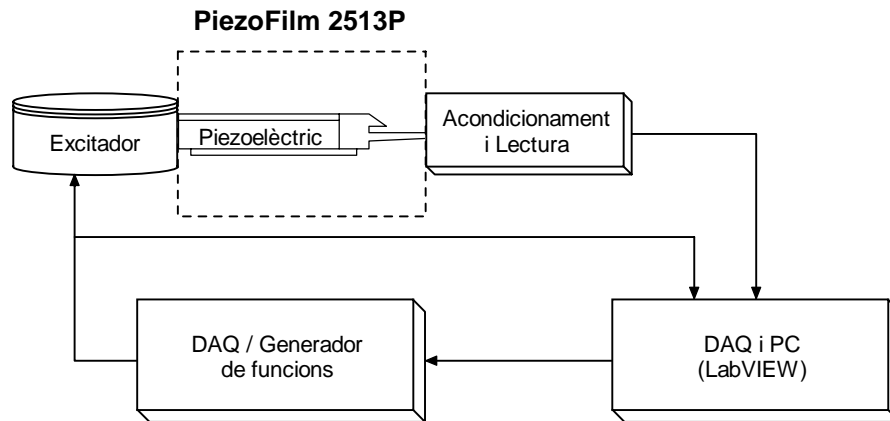


Figura 3.10. Esquema general. El quadrat despuntat indica on participarà el 2513P al muntatge.

3.2. CIRCUIT D'ACONDICIONAMENT PER A LA LECTURA DEL PIEZOELÈCTRIC.

Son molts els tipus de circuits que es poden posar a la sortida del senyal del piezo film, com per exemple, muntatges amb JFET (per tenir baix guany a altes freqüències o viceversa), muntatges per detectors de nivell de voltatges, circuits per detectar un simple impacte, circuits amb CMOS (per muntar un contador), etc [23]. Però per aquest projecte tan sols ha estat necessari posar un circuit d'acondicionament per tal de poder llegir la sortida amb voltatge, ja que la senyal de sortida del piezo film és en intensitat i l'entrada de la DAQ és per tensió, per tant s'ha muntat un convertidor I-V.

L'estudi teòric d'un convertidor ideal simplificat es realitzaria suposant l'entrada del circuit com una font de corrent independent i la sortida una font de tensió dependent de la corrent d'entrada com mostra la següent imatge (Fig.2.X.) on l'expressió de la tensió de sortida ve donada en funció de la corrent:

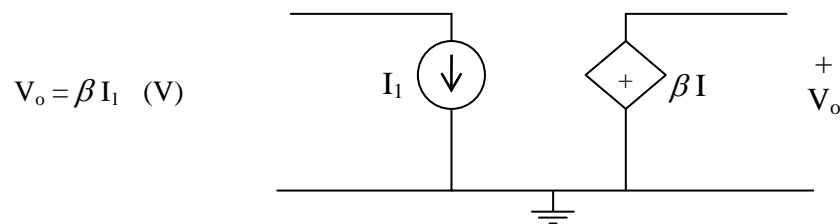


Figura 3.11. Convertidor I-V ideal.

Per convertir-lo en un circuit real, s'ha emprat un amplificador de transimpedància, el qual genera una tensió de sortida proporcional a la corrent d'entrada. El piezoelèctric film ens generarà la senyal de corrent i serà l'entrada del nostre convertidor. A la realimentació negativa de l'amplificador s'ha col·locat una resistència de gran valor ($R_1=820K\Omega$) i un condensador ($C_1=320nF$) per tal d'eliminar els efectes paràsits.

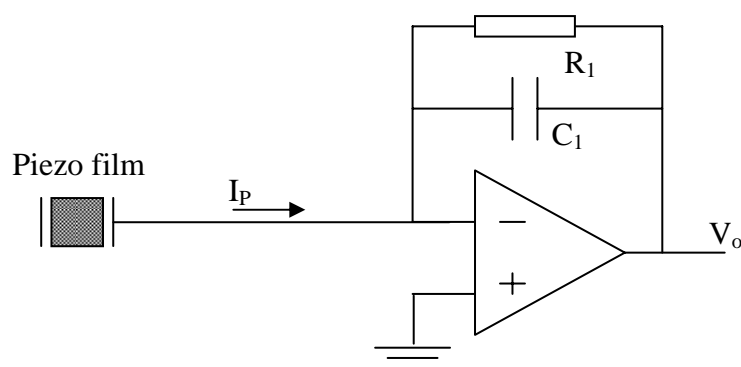


Figura 3.12. Convertidor I-V, amplificador de transimpedància connectat al sensor piezoelèctric.

Si resollem analíticament aquest circuit tenim que:

$$I_p = \frac{-V_o}{R_1} + j\omega C V_o \quad (\text{A}) \quad \Rightarrow \quad V_o = \frac{I_p}{j\omega C - \frac{1}{R_1}} \quad (\text{V}) \quad (3.2)$$

I s'observa que la tensió de sortida depèn directament de la corrent d'entrada i si es posa una resistència molt grossa, el terme diferencia tendeix a 0.

Aquest amplificador ens produeix un desfasament de l'ona d'entrada respecte de la sortida de 180°, però no ens afecta ja que depenent de a quin electrode del piezoelèctric es connecti la terra, la senyal del piezo també s'inverteix 180°, i per tant, la senyal d'entrada al piezoelèctric (la d'excitació) amb la de sortida del convertidor I-V no sofreix desfasament a tenir en compte. A continuació es mostra l'esquema general del projecte i la posició que ocupa el sistema d'acondicionament.

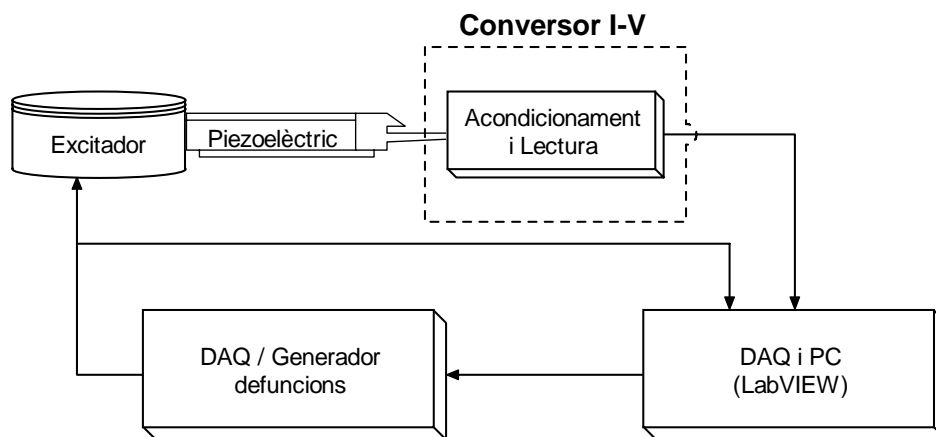


Figura 1.13. Esquema general del muntatge. La part puntejada indica la posició esquemàtica dins el muntatge.

3.3. TRANSDUCCIÓ ELECTROMECAÀNICA.

3.3.1. Introducció.

Com ja s'ha explicat, el sensor piezoelèctric ressonant d'aquest projecte és un transductor mecanicoelèctric, i calia una excitació mecànica prèvia abans de poder emprar-lo i realitzar mesures. Es va pensar en una vibració ja que crearia una sortida sinusoidal degut al distints sentits de la força, que és precisament el que interessa, ja que es vol treballar amb desfasaments d'ona i per tant, aquesta sortida, també ho havia de ser. La solució adoptada, encara que hi havia més possibilitats al mercat, va ser l'utilització un altaveu, ja que en disposàvem al laboratori d'electrònica de la UIB i amés, son de baix cost.

3.3.2. Muntatge d'un l'altaveu.

L'altaveu és alimentat amb la DAQ o un generador de funcions, amb un senyal sinusoidal, i la vibració que es produeix a la membrana aferrada solidàriament als elèctrodes del piezoelèctric, és a la mateixa freqüència que l'ona del generador, i per tant, la mateixa freqüència de la senyal de sortida del piezo film.

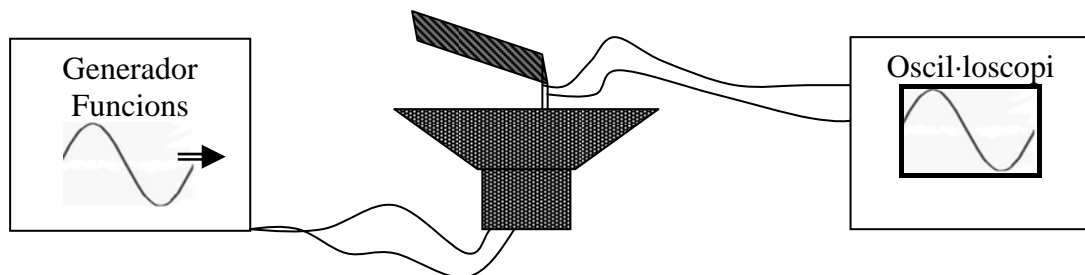


Figura 3.14. Representació esquemàtica de la transducció electromecànica i mecanicoelèctrica.

▪ Teoria de l'altaveu.

Un altaveu es compon de dues parts, el convertidor d'energia elèctrica a mecànica (transductor electromecànic) i convertidor d'energia mecànica a acústica (transductor mecanicoacústic) [26]. La força de la vibració depèn de la potència i de la freqüència, que teòricament pot funcionar a tot el rang de freqüències audibles, encara que mai sol ser així. Hi ha dos tipus d'altaveus segons el transductor electromecànic que s'empra. Els tipus son:

- Dinàmics: empren un transductor electromagnètic, molt emprat per sistemes de alta fidelitat.

- Electrostàtics: empenen un transductor electrostàtic, no obtenen bons resultats a baixes freqüències [26].

En el projecte s'emprarà un altaveu dinàmic, ja que treballarem a baixes freqüències i a més, són els que tenim al laboratori de docència.

- o Característiques dels altaveus.
 - *Mida del diafragma*: depèn del rang de freqüències a les que volem fer feina, per freqüències baixes, el diafragma és major que per altes.
 - *Resposta freqüencial*: la freqüència més baixa que pot emetre un altaveu és propera a la freqüència de ressonància del diafragma. Per que la resposta sigui bona, un altaveu per sons greus (freqüències baixes), ha de tenir un diafragma gros i molt flexible, i per aguts (freqüències altes) ha de ser lleuger i rígid.
 - *Eficiència*: tan sols una petita part de l'energia elèctrica que rep l'altaveu es transforma en so, en els altaveus domèstics, es sol perdre fins un 90% de la energia elèctrica en forma de calor. Aquesta eficiència ve determinada per molts de factors, com ara be, l'estructura de l'altaveu, la massa, el con, l'àrea, etc. La equació que caracteritza l'eficiència de l'altaveu ve donada per [26]:

$$\rho_{\text{altaveu}} = \frac{\text{Energia}_{\text{transformada en so}}}{\text{Energia}_{\text{elèctrica}}} \cdot 100 \quad (3.3)$$

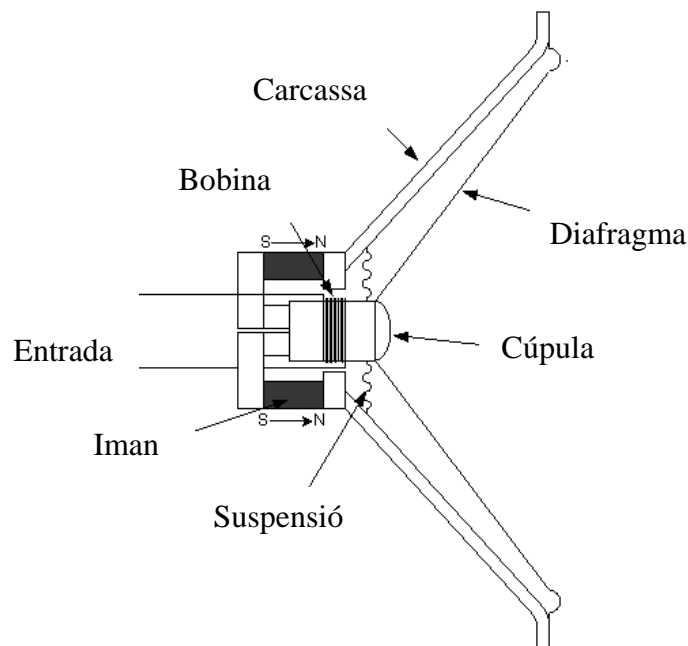


Figura 3.15. Components d'un altaveu [23].

○ **Funcionament intern de l'altaveu.**

Com es pot observar a les següents imatges, quan l'ona sinusoidal entra a l'altaveu, la membrana o diafragma actua depenent del valor immediat d'aquesta senyal, és a dir, quan entra la part positiva de l'ona (Fig. 3.13(a)) la membrana s'allunya proporcionalment a l'amplitud d'aquesta i per negatives s'apropa al iman (Fig. 3.3 (b)).

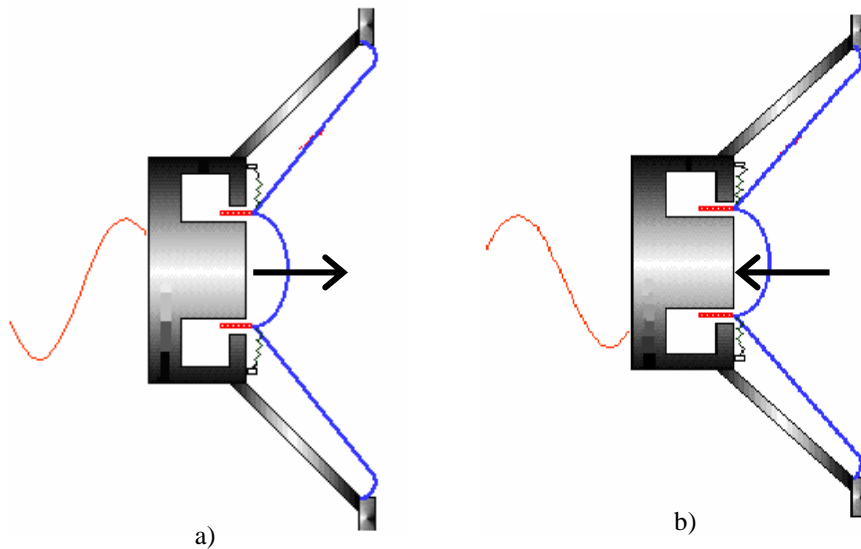


Figura 3.16. Simulació de l'entrada d'ona a l'altaveu i desplaçament de la membrana segons el cas. a) La membrana s'allunya enfront a l'entrada positiva. b) La membrana s'atraca en cas d'entrada negativa [23].

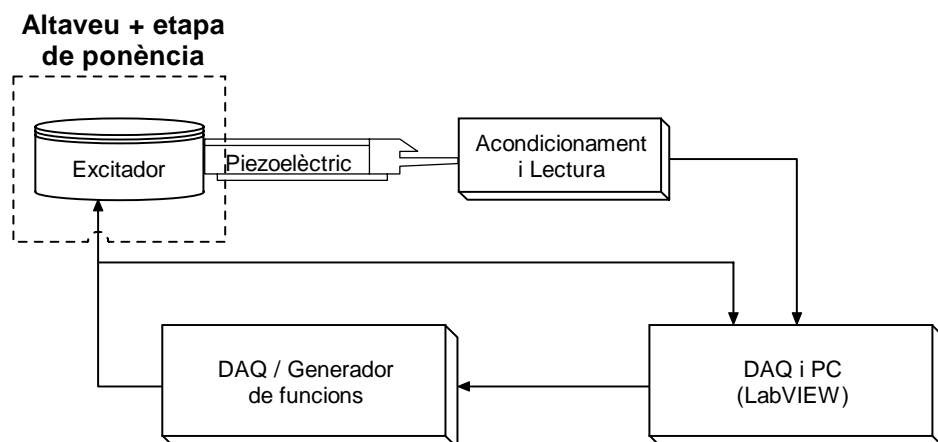


Figura 1.17. La part puntada indica la posició esquemàtica del muntatge de l'altaveu i etapa de potència (següent apartat).

3.4. ETAPA DE POTÈNCIA.

3.4.1. Introducció.

L'altaveu té una potència de $P_A=0.25W$ i amb una resistència de $R_A=8\Omega$ per lo que la corrent que travessarà l'altaveu serà de:

$$P=V \cdot I = I^2 \cdot R \quad (W) \rightarrow I = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{0.25}{8}} = 176.776mA \quad (3.4)$$

Es una quantia de corrent important i sobretot per un sistema on la funció de generació de senyal ve donada per una tarja d'adquisició de dades (DAQ) limitada. Com hem vist a las especificacions tècniques del la DAQ 6024E, la màxima corrent de sortida que pot generà és de 5mA i resultava insuficient per alimentar a l'altaveu, en el qual la pèrdua de corrent es veia compensada per amplitud i ens quedava una senyal amb amplada pròxima a zero i el que ens feia impossible detectar la senyal.

Com a solució es va implementar una etapa de potencia la qual es capaç de generar un rangs de tensió i corrent més amples de forma que pugui transferir a la càrrega la potencia que necessita. Te un guany proper a 1 però amb la capacitat de subministrar les corrents necessàries. (Fig 1.4.).

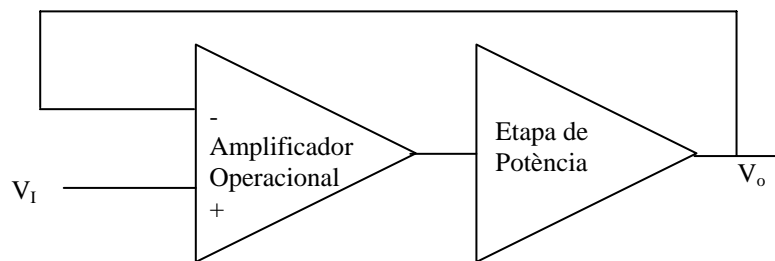


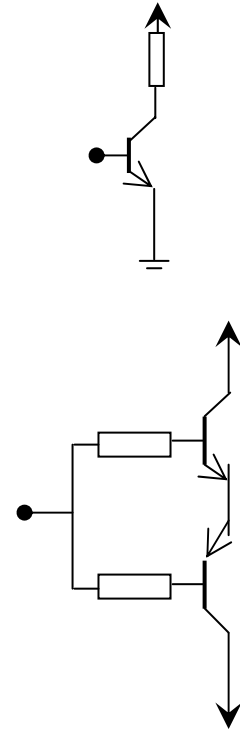
Figura 3.18. Esquema de l'etapa de potència emprada.

L'amplificador operacional proporciona l'alt guany que se necessita en el bucle de realimentació per reduir la no linealitat i distorsió que introdueix l'etapa de potencia.

Les etapes de potència es classifiquen en funció del punt de treball en que es polaritzen els dispositius de potencia i segons el cicle de senyal durant el que condueixen.

3.4.2. Tipus de etapes.

- Etapa classe A: el dispositiu es polaritza en una zona de resposta lineal, amb capacitat de resposta a senyals de qualsevol polaritat. La seva principal avantatge és que segueix un model d'amplificador lineal convencional. La desavantatge és que amb una senyal d'entrada nul·la, dissipa una quantitat considerable de potència i a més, no en servia pel projecte ja que retalla la part negativa d'un senyal sinusoidal [27].
- Etapa classe B: el dispositiu es polaritza en el extrem de la zona de resposta lineal, per tant, només respon a senyals amb una determinada polarització, en aquest cas no es produeix dissipació de potència quan no hi ha senyal d'entrada, però requereix la utilització d'etapes complementaries per poder generar una resposta freqüencial [27].



En aquest projecte s'ha emprat una etapa de potència de classe B, realimentat negativament amb un amplificador operacional com es mostra a la Figura 3.16. On les resistències $R_1=R_2=2.2K\Omega$ i $V_{cc}=5V$ i R_L representa l'altaveu, $R_L=8\Omega$

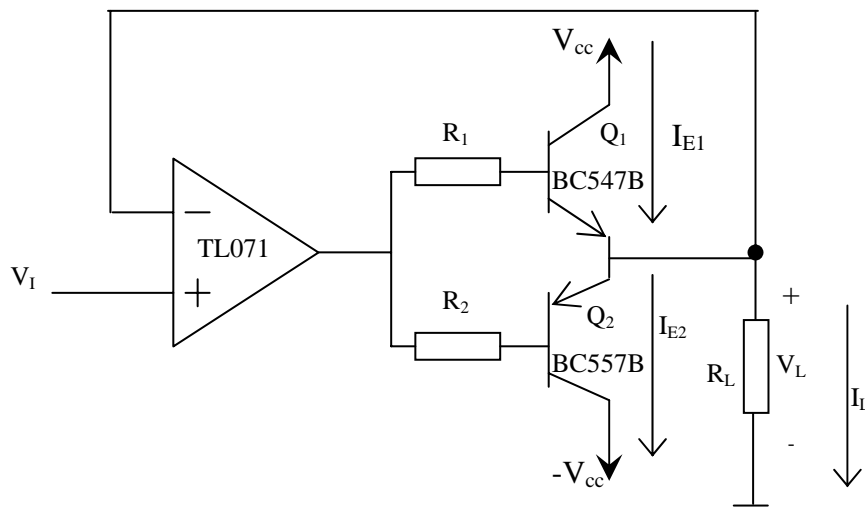


Figura 3.19. Amplificador operacional realimentat juntament amb una etapa de sortida classe B.

3.4.3. Descripció del funcionament de l'etapa classe B.

L'amplificador de potència amb etapa de sortida tipus B ha està composta per dues etapes complementaries, on cada una d'elles es troba sense conduir quan no hi ha senyal i quan la senyal varia respecta zero fa que condueixi una de les etapes d'acord amb la polaritat de la variació.

A continuació es representen les corrents dels transistors (I_{E1} i I_{E2}) i es pot observar com aquests BJT's estan configurats de forma complementaria i amb fonts d'alimentació simètriques. Quan V_I és positiva, el transistor Q_1 comença a conduir i el Q_2 es talla, llavors, quan es fa negativa Q_2 condueix i Q_1 es talla.

En ambdós casos la corrent del transistor que està conduint transmet la corrent a la resistència de carrega ja que l'altre transistor no condueix [27].

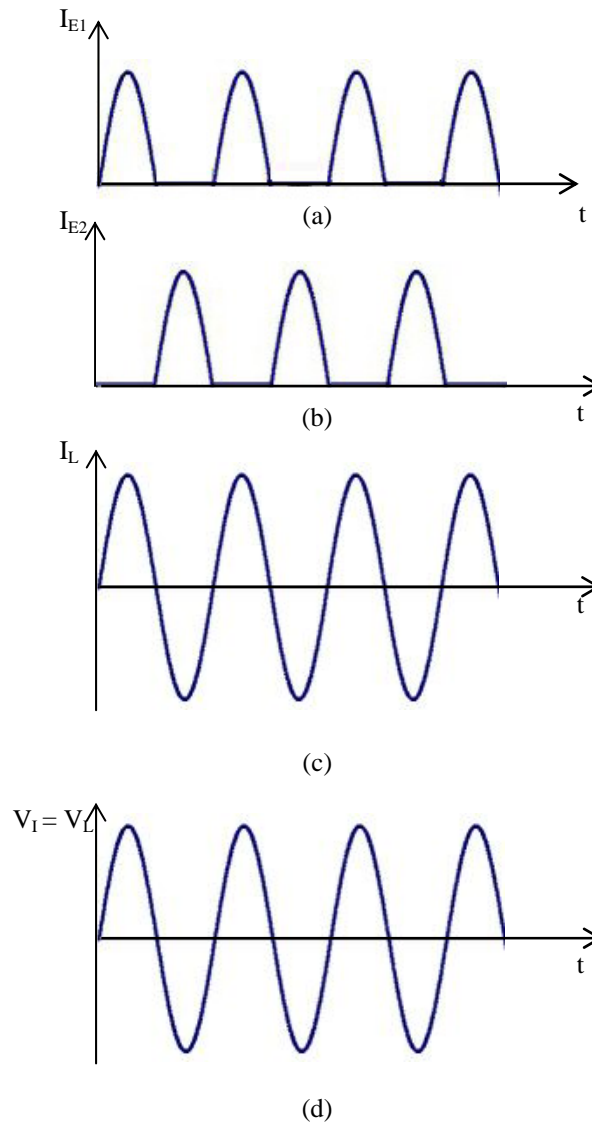


Figura 3.20. Representació de les corrents dels transistors, a la resistència de càrrega i les tensions d'entrada i sortida. a) Transistor Q_1 , b) Transistor Q_2 , c) Corrent a la sortida i d) Senyals de la tensió d'entrada i sortida [27].

3.4.4. Anàlisi del circuit per una entrada sinusoidal.

Si l'etapa s'excita amb una etapa sinusoidal amb amplitud màxima V_m , doncs [27]:

$$V_I(t) = V_L(t) = V_m \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (\text{V}) \quad (3.5)$$

$$I_L(t) = \frac{V_L(t)}{R_L} = \frac{V_m}{R_L} \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (\text{A}) \quad (3.6)$$

La potencia que dissipen juntament les dues fonts de tensió es:

$$P_S = \frac{2}{\pi} \frac{V_{CC} \cdot V_m}{R_L} \quad (\text{W}) \quad (3.7)$$

La potencia que s'entrega a la càrrega R_L serà igual a :

$$P_L = \frac{V_m^2}{2R_L} \quad (\text{W}) \quad (3.8)$$

I la potencia dissipada per cada un dels dos transistors BJT serà:

$$P_T = \frac{P_S - P_L}{2} = \frac{1}{\pi} \frac{V_{CC} \cdot V_m}{R_L} - \frac{V_m^2}{4R_L} \quad (\text{W}) \quad (3.9)$$

L'amplitud de la corrent màxima produeix la màxima dissipació de potencia en el transistor. Aquesta potencia màxima es pot calcular igualant a zero la derivada de la potencia respecta l'amplitud màxima de l'entrada:

$$\frac{\partial P_T}{\partial V_m} = 0 \quad (3.10)$$

i juntament amb la igualtat:

$$V_m = \frac{2}{\pi} V_{CC} \quad (\text{V}) \quad (3.11)$$

tenim:

$$P_{T,\max} = \frac{V_{CC}^2}{\pi^2 R_L} = 0.1 \cdot \frac{V_{CC}^2}{R_L} \quad (\text{W}) \quad (3.12)$$

La màxima potència que es pot entregar a l'entrada és quan $V_m = V_{CC}$, i en aquest cas:

$$I_m = \frac{V_{CC}}{R_L} \quad (\text{A}) \quad (3.13)$$

per tant, també modificant les equacions anteriors resulta:

$$P_{L,\max} = \frac{V_{CC}^2}{2R_L} \quad (\text{W}) \quad (3.14)$$

$$P_{T,\max} = \frac{V_{CC}^2}{\pi R_L} - \frac{V_{CC}^2}{4R_L} = 0.068 \frac{V_{CC}^2}{R_L} \quad (\text{W}) \quad (3.15)$$

$$P_{S,\max} = \frac{V_{CC}^2}{\pi R_L} \quad (\text{W}) \quad (3.16)$$

El rendiment màxim de la etapa ve donada per l'equació:

$$\eta = \frac{P_{L,\max}}{P_{S,\max}} = \frac{\pi}{4} = 0.0785 = 7.85\% \quad (3.17)$$

Les caigudes de tensió entre base i emissor fan que la eficiència d'aquesta etapa sigui inferior al 7.85%.

3.5. IMATGES DEL HARDWARE COMPLET.

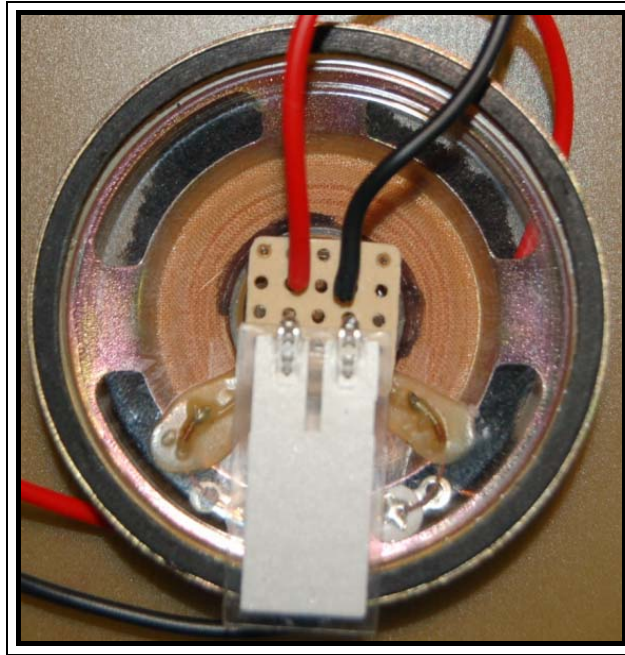


Figura 3.21. Muntatge del piezoelèctric amb l'altaveu.

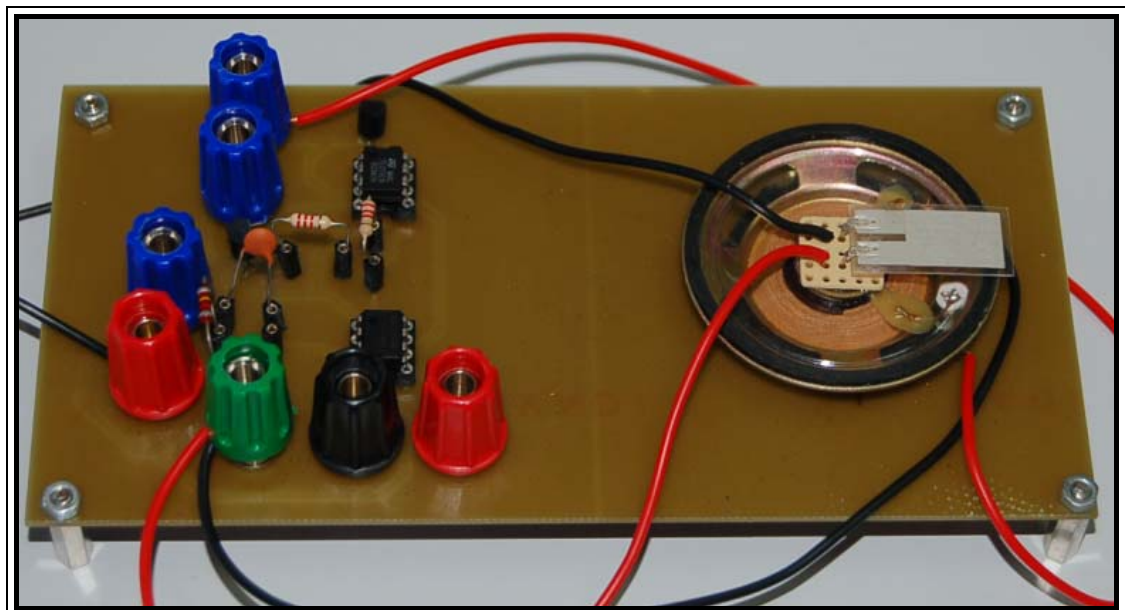


Figura 3.22. Sistema Hardware complet. Circuit d'acondicionament (Convertor I-V), etapa de potència, altaveu i piezoelèctric tot a una PCB (Printed Circuit Board).

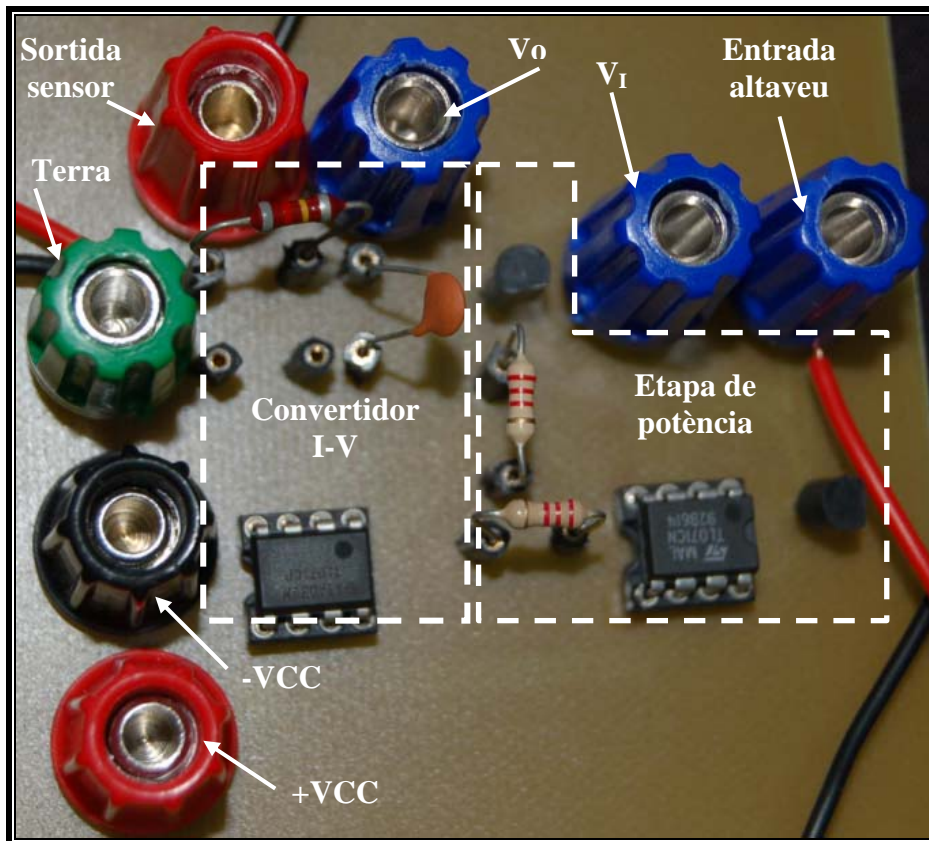


Figura 3.23. Circuit dissenyat amb LayoutPlus de OrCAD. Connectors bananes de les entrades i sortides de l'etapa de potència i convertor I-V respectivament.

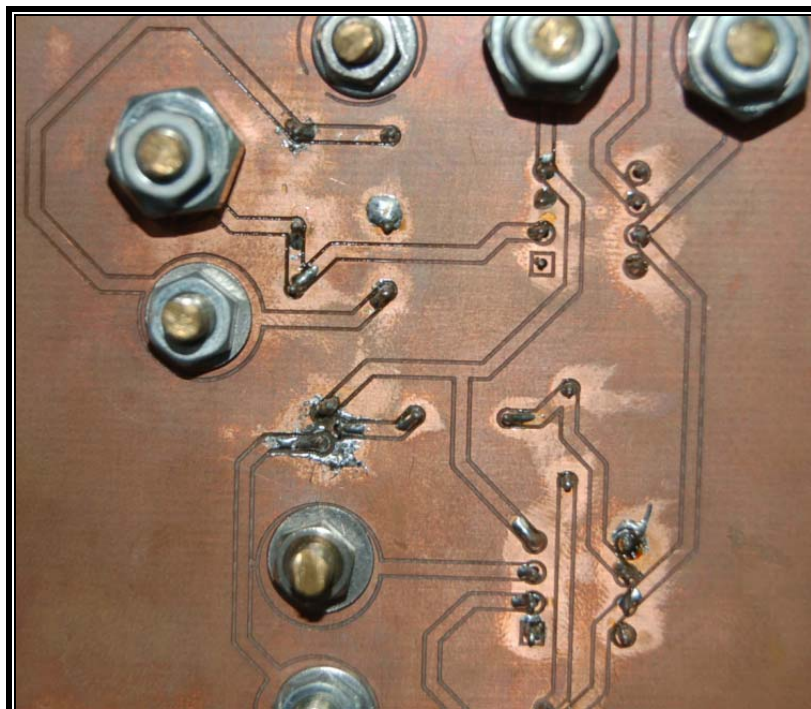


Figura 3.24. Connexions de la PCB.

3.6. COST DEL HARDWARE.

En aquest apartat farem un repàs del cost econòmic que ha tingut dissenyar aquest Prototip amb el que hem aconseguit un sensor de precisió de massa. Els components emprats amb el seu preu al mercat es detallen a continuació.

3 Resistències	0.09€
Condensador.....	0.05€
Transistor BJT BC547B	0.07€
Transistor BJT BC557B	0.07€
2 Amplificadors Operacionals TL071	0.52€
Placa PCB	6.07€
Altaveu P=0.25W	2€
7 connectors banana	4.27€
Cablejat	2€
Sensor piezoelèctric	3.04€
Total.....	18.054€