

Capítol 1

Introducció

En aquest capítol es farà una breu descripció dels sensors basats en palanques que és el marc en que s'ha desenvolupat aquest projecte. S'exposaran els mètodes i topologies de mesura utilitzats per aquests sensors per finalment introduir l'esquema que s'ha utilitzat en aquest treball. També s'exposen les motivacions així com els objectius que s'han fixat per aquest projecte.

1.1. MOTIVACIÓ DEL PROJECTE.

Una de les línies d'investigació que realitza en Jaume Verd del grup de Tecnologia Electrònica de la UIB en col·laboració amb el Departament d' Enginyeria Electrònica de la UAB consisteix en el desenvolupament de sensors de massa amb resolucions de fins els attograms ($1 \text{ ag} = 10^{-18} \text{ g}$) basats en palanques (*cantilevers*) ressonants de dimensions sub-micromètriques i integrades monolíticament amb circuiteria CMOS [3]. La idea d'aquest projecte va sorgir del desig de tenir un sistema sensor basat en el mateix principi però a escala mil·limètrica que es pogués utilitzar com a eina docent en estudis de postgrau, per exemple en l'assignatura de Micro i Nanosistemes que s'imparteix a la UAB dins el Màster d'Enginyeria micro i nanoelectrònica.

Amb aquest prototipus de sensor a una escala més “tangible” que la micromètrica, permetria desenvolupar les següents tasques per part de l'alumnat de postgrau:

- Observar/entendre els principis de funcionament de sensors basats en palanques ressonants.
- Observar i analitzar l'estabilitat i resolució del sensor.
- Realitzar mesures de massa i adquirir dades per poder-les post-processar.

Així doncs, es va pensar en el desenvolupament d'un prototipus de sensor que fos econòmic i que es pogués utilitzar fàcilment. Per a la implementació del sistema de control des del principi el director d'aquest projecte em va proposar la utilització del software LabVIEW ja que és una eina molt comú de programació pel control d'instrumentació, amb una molt bona interfície amb l'usuari i que es troba disponible en la majoria de laboratoris docents. L'ús del programa LabVIEW va ser clau alhora de decidir-me en realitzar aquest projecte, ja que després de conèixer-lo degut a les pràctiques d'Instrumentació Electrònica II que he realitzat en els meus estudis, em va semblar una de les eines de programació més interessants i extenses que havia emprat a la carrera. La seva facilitat d'ús i de programació amés d'una ample gamma de possibilitats i compatibilitat hem feren enfocar d'un altre punt de vista el projecte proposat. A més, la utilització de sensors piezoelèctrics emprats com a sensors de massa era una novetat per a mi. Per una altra part, la necessitat d'haver de dissenyar també alguna placa de circuit imprès (PCB) per integrar el sensor i la circuiteria de condicionament necessària em va motivar encara més ja que em donava l'oportunitat d'aprendre una habilitat nova que jo no havia realitzat durant els meus estudis.

1.2. SENSORS BASATS EN PALANQUES.

Els sensors basats en palanques o *Cantilevers* resulten ser uns transductors molt simples que permeten la detecció de propietats físiques i/o químiques, com la pressió, acceleració, massa, etc. El funcionament bàsic consisteix amb la transducció de l'estrès aplicat en la palanca a energia que es podrà mesurar, com per exemple, elèctrica. Les palanques poden funcionar amb dos modes totalment distints, el mode estàtic o DC, que consisteix en la mesura de la deflexió de la palanca degut a un canvi en el mesurant (p.e. increment massa). El mode dinàmic, ressonant o AC, que consisteix en detectar canvis en la resposta freqüencial del sensor (p.e. la freqüència de ressonància) provocats pel mesurant. [1].

1.2.1. Propietats.

Per entendre el comportament i característiques que pot tenir una palanca basta fixar-se en les propietats d'un rectangle amb un dels seus extrems fixats. Les forces que actuen sobre la palanca són el seu propi pes i la magnitud a detectar, i en cas dels ressonants, també actua una força d'excitació externa [1].

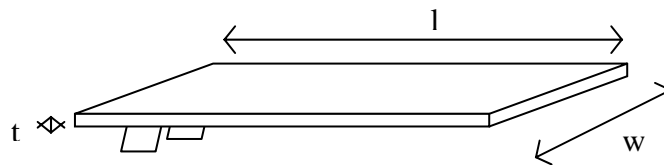


Figura 1.1. Sensor de palanca amb les referències de les seves mides, on l és la longitud, w és l'amplada i t és l'espessor.

La deformació que sofreix la palanca sotmesa a una força ve donada per la seva constant elàstica, expressada en la següent expressió [3]:

$$k = 3 \frac{EI}{l^3} \quad (\text{N/m}) \quad (1.1.)$$

On E és el mòdul de Young del material,

l la longitud i,

I és el moment d'inèrcia, la qual ve donada com per un àrea rectangular com:

$$I = \frac{wt^3}{12} \quad (\text{m}^4) \quad (1.2)$$

On t és l'espessor del rectangle i,

w l'amplada.

D'acord amb les dues equacions anteriors, la constant elàstica d'una cantilever rectangular es podrà definir:

$$k = \frac{Et^3}{4l^3} \cdot w \quad (\text{N/m}) \quad (1.3)$$

Si el sensor treballa en mode ressonant, un dels paràmetres importants a conèixer és la seva freqüència de ressonància per poder determinar el seu comportament dinàmic. Considerarem que la palanca té el seu pes uniformement distribuït segons la densitat del material, Així doncs, coneixent les característiques físiques de la palanca, la seva freqüència de ressonància ve expressada en funció d'aquests paràmetres de la següent manera [3]:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \frac{t}{l^2} \quad (\text{Hz}) \quad (1.4)$$

On ρ és la densitat del material.

1.2.2. Sensors estàtics (DC) i dinàmics (AC).

En aquest apartat es descriuran breument les característiques d'aquests dos modes de funcionament d'un sensor.

- **Sensors estàtics (DC).**

Quan es treballa amb sensors estàtics o DC, el mesurant provoca una deformació que és la que es mesurarà amb els diferents mètodes de detecció que es descriuran en apartats posteriors.. Hi ha molts de tipus de sensors que operen en aquest mode, per exemple, sensors tèrmics, biosensors, etc.

Per tenir alta sensibilitat convé tenir palanques amb una constant elàstica lo més baixa possible, com per exemple, amb $k=0.02 \text{ N/m}$ es poden arribar a detectar deflexions de la palanca de $\delta x = 0.1 \text{ nm}$. Com s'ha vist a l'equació 1.3, la constant elàstica k depèn del mòdul de Young i de les mides de la palanca, per tant, serà millor com més llarga i estreta sigui. Així doncs, la sensibilitat vendrà determinada únicament per les característiques físiques de la palanca però la resolució final, estarà determinada pel sistema de detecció emprat..

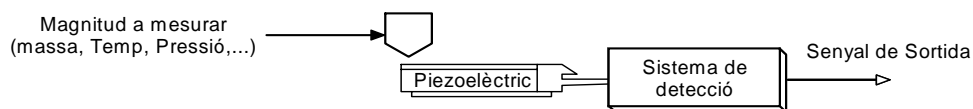


Figura 1.2. Diagrama de blocs d'un sensor DC basat en palanca.

- **Sensors dinàmics (AC).**

En els sensors dinàmics, ressonants o AC el que es mesura és un canvi en la seva resposta freqüencial.. Uns dels principis de funcionament més habituals és la de mesurar la variació de la freqüència de ressonància. Amb aquests sensors es poden obtenir resolucions millors que amb els sensors en mode DC. La desavantatge d'aquest sistema es la necessitat d'un sistema d'excitació de mode que provoqui l'oscil·lació de la palanca.

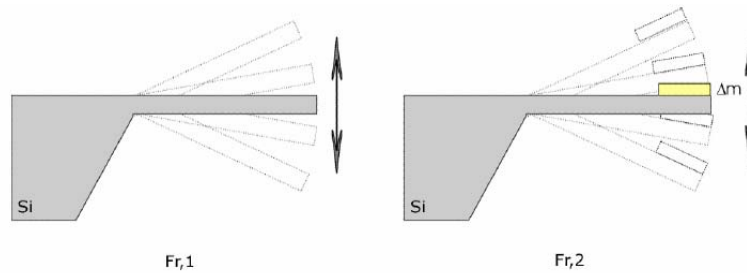


Figura 1.3. Representació d'un sensor ressonant a $Fr,1$ i amb massa a $Fr,2$, on es complirà que $Fr,1 > Fr,2$. Fr és la freqüència de ressonància.

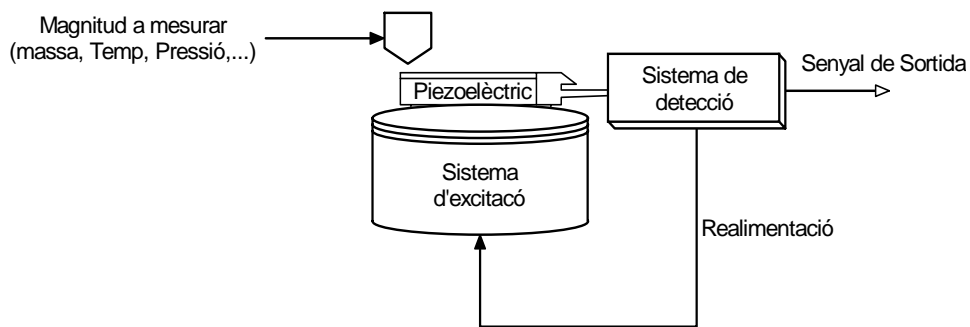


Figura 1.4. Diagrama de blocs d'un sensor DC basat en palanca.

En mode ressonant la sensibilitat de la palanca es pot expressar en funció de la massa efectiva i de la freqüència de ressonància, segons la següent equació [4,28]:

$$\frac{\Delta m}{\Delta f} = -\frac{2m_{eff}}{f_o} \quad (\text{Kg/Hz}) \quad (1.5)$$

On m_{eff} és la massa efectiva de la palanca.

Per una palanca fixada per un extrem, com és el nostre cas, la seva massa efectiva ve donada per la següent equació:

$$M_{eff} = 0.24 \rho w l t \quad (\text{Kg}) \quad (1.6)$$

D'aquesta manera la freqüència de ressonància també es podrà expressar de la següent manera, assumint un sistema massa-molla [3]:

$$f_o = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m_{eff}}} \quad (\text{Hz}) \quad (1.7)$$

La freqüència de ressonància és la freqüència on es té el màxim guany entre l'entrada i la sortida. El factor de qualitat (Q) ens determinarà la bona resposta freqüencial del filtre, que serà inversament proporcional a l'ample de banda (BW). L'equació que defineix aquests dos paràmetres que caracteritzen la resposta freqüencial d'un filtre passa-banda, tal com la resposta del sensor és [1]:

$$Q = \frac{f_o}{BW} \quad (1.8)$$

On f_o és la freqüència de ressonància del sistema i,
 BW és l'ample de banda, donat per l'equació [1]:

$$BW = \Delta f_{-3dB} \quad (\text{Hz}) \quad (1.9)$$

On el increment Δf_{-3dB} representa la diferència entre les freqüències on l'atenuació del senyal decau 3dB's respecta a la freqüència de ressonància.

1.2.3. Mètodes per a la detecció i excitació de sensors.

Tant per sensors estàtics com per ressonants es poden emprar varies topologies amb el sensor per tal de detectar correctament la magnitud [1]:

- Capacitiu: consisteix en mesurar la variació de la capacitat formada per la palanca i un elèctrode separats per algun material, degut a la variació de la distància entre aquests provocat per la diferència de posició de la palanca.
- Piezoresistiu: es basa en la variació de la resistència que es produeix a un material piezoresistiu solidari amb la palanca quan aquesta és sotmès a l'estrès.
- Piezoelèctric: consisteix en posar un material piezoelèctric solidari a la capa de la palanca i quan s'apliqui una força en aquesta, el material piezoelèctric produirà una diferència de potencial entre els seus elèctrodes.
- Òptics: el sistema consisteix en aplicar un feix de llum làser sobre la palanca i amb un fotodetector llegir la llum reflectida. Quan la palanca sofreixi una deformació, l'angle del llum variarà proporcionalment [1].

Per l'estudi d'un sensor en mode ressonant s'han de tenir en comptes dos camps independents, el primer és el de la detecció explicat abans, i el segon, l'excitació d'aquest, que es pot dur a terme de varis modes, entre ells:

- Electromagnètic: es fa oscil·lar la palanca aplicant un camp magnètic al seu voltant. Això implica que s'ha de posar una peça metàl·lica de pes conegut a sobre per tal que sigui atreta per la imantació.
- Electrotèrmica: s'adjunta a la palanca un material molt resistiu i s'aplica una diferencia de potencial entre aquest material i la palanca per tal de encaletir el material, el qual canviarà la forma i serà detectat per la palanca.
- Piezoelèctrica: s'aplica una corrent alterna a un transductor electromecànic que provoqui la compressió i expansió del material amb un moviment periòdic [1].

1.3. TOPOLOGIES PER A LA MESURA DINÀMICA DE f_o

Abans de tot s'ha d'indicar que en aquest projecte s'ha emprat un sensor ressonant piezoelèctric excitat mecànicament per la detecció precisa de massa. Per tant, i com s'ha explicat a l'apartat anterior, detectarem aquest increment de massa estudiant les propietats ressonants del sensor, com la seva freqüència de ressonància. Existeixen distints mètodes i topologies per detectar variacions freqüencials en un sistema, com un oscil·lador o un PLL (Phase Locked Loop).

1.3.1. Oscil·lador.

Un oscil·lador és un circuit que produeix una oscil·lació pròpia a una certa freqüència i amplitud. Un sistema realimentat pot resultar ser oscil·lant a causa d'una inestabilitat inicial que després es controla [9,10].

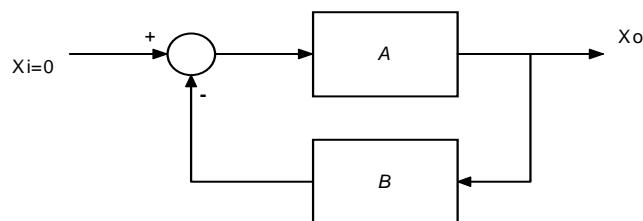


Figura 1.5. Estructura bàsica de realimentació per aconseguir un oscil·lador.

Si es considera una forma del senyal sinusoidal, un sistema oscil·larà si es compleixen les següents expressions [10]:

$$|A(j\omega_o) \cdot B(j\omega_o)| = 1 \quad (1.10)$$

$$\varphi[A(j\omega_o) \cdot B(j\omega_o)] = 180^\circ \quad (1.11)$$

Així doncs, emprant un oscil·lador juntament amb un sensor ressonant en llaç tancat descrit per el següent esquema, on es similar al emprat per un oscil·lador de cristall de quars, tan sols canviant el cristall pel dispositiu piezoelèctric.

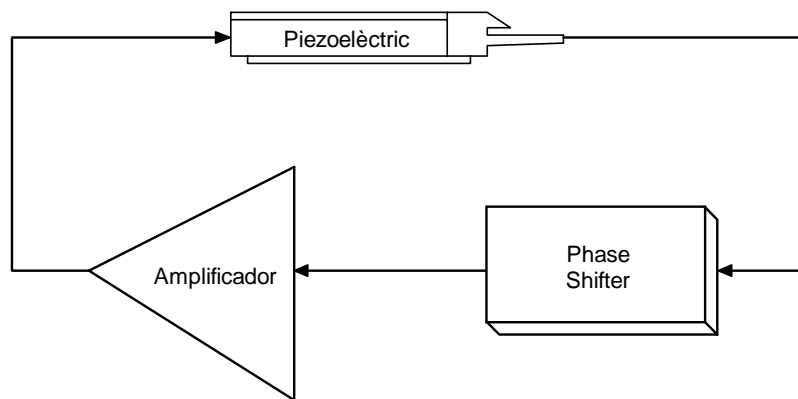


Figura 1.6. Esquema general d'un sistema basat amb un oscil·lador per controlar el desplaçament de la freqüència de ressonància. El *Phase Shifter* proporciona poder treballar a un cert desfasament [9].

No es va considerar com una bona opció realitzar la detecció de variació freqüencial mitjançant un oscil·lador, degut a que té bona resposta quant el sistema té un factor de qualitat alt, però dolent quant és baix.

Per factor de qualitat baixos, resultava millor controlar la resposta freqüencial amb un PLL, amés, que es podrà controlar molts de paràmetres més que si ho dissenyessim amb un oscil·lador, i d'aquesta forma també, aconseguirem més resolució.

1.3.2. PLL – Phase Locked Loop.

Com que el PLL ha estat la solució adoptada, s'explicarà amb més detall per tal de conèixer les seves característiques i el seu funcionament.

El laç d'enclavament de fase (PLL) és un sistema retroalimentat en el qual la magnitud comparada per obtenir el senyal d'error és la diferència de fases existent entre el senyal d'entrada i el senyal de l'Oscil·lador Controlat per Tensió (V.C.O.) del propi PLL que actua variant la freqüència d'oscil·lació del senyal generat.

L'esquema que s'utilitza per a mesura amb sensor ressonants seguint l'esquema d'un PLL analògic és el que es mostra a la Figura 1.7. Per tant, aquest dispositiu consta bàsicament de quatre blocs: detector de fase, controlador, amplificador d'error i l'oscil·lador controlat per tensió.

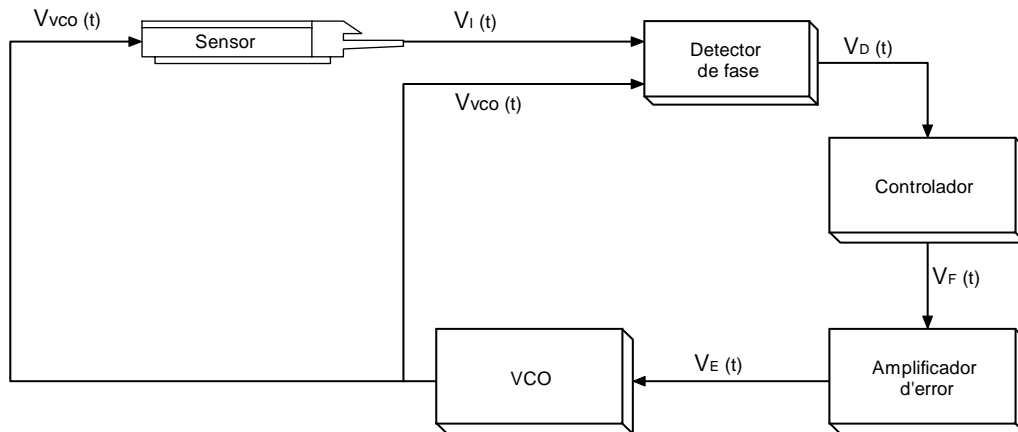


Figura 1.7. Diagrama de blocs d'un PLL analògic per mesures amb sensors ressonants.

A continuació s'explicarà el funcionament de cada bloc per separat:

- **Detectors de fase.**

El detector de fase és un bloc que genera una senyal de error ($V_D(t)$) que va en funció de la diferència de fases entre la senyal d'entrada del PLL ($V_I(t)$) i la senyal procedent del VCO ($V_{VCO}(t)$). La seva implementació es pot dur a terme de varies maneres.

- Comparadors de fase basats amb un multiplicador analògic de quatre quadrants, normalment en PLL's analògics.
- Comparadors de fase basats amb una porta OR-exclusiva, generalment en PLL's digitals.
- Comparadors de fase basats amb bombes de càrrega, emprats per circuits integrats amb tecnologia CMOS.
- Comparadors de fase basats amb detectors de fase i freqüència, formats per un circuit lògic seqüencial.
- Comparadors de fase basats en circuits de mostreig i manteniment (Sample & Hold), emprats en sintetitzadors de freqüència [11].

- **Controlador.**

El bloc controlador, a diferència d'un PLL clàssic on normalment és un simple filtre passa-baixes, es tracta d'un controlador tipus PI (proporcional-integral) que s'encarrega de mantenir constant la diferència de fase entre els senyals V_I i V_{VCO} encara que la resposta freqüencial del sensor variï. [9].

- **Amplificador d'error.**

L'amplificador d'error és una etapa amplificadora típica DC basada en un o més transistors o amplificadors operacionals. La seva tasca és proporcionar un guany (K_A) i una tensió d'entrada suficientment gran per excitar l'VCO i inclús una càrrega connectada a la sortida del PLL si n'hi hagués [11].

- **Oscil·lador controlat per tensió (VCO).**

Un VCO és un circuit amb una entrada i una sortida, la qual genera un senyal de sortida (habitualment sinusoidal) amb una certa freqüència (f_{VCO}), en funció de la tensió present a l'entrada. Si a l'entrada no hi ha tensió, $V_E=0$ V, el circuit oscil·la a una freqüència determinada "freqüència de lliure oscil·lació", que sol ser fixada per l'usuari del PLL mitjançant resistències i condensadors o un cristall de quars, que determinaran les constants de temps de l'VCO. Generalment, la relació que té la freqüència de sortida amb la tensió d'entrada és la que se mostra a continuació, encara que poden ser altres:

$$\omega_{VCO} = \omega_0 + K_0 V_E(t) \quad (\text{rad/s}) \quad (1.12)$$

On K_0 és una constant de proporcionalitat (amb unitats de (rad/s)/V o Hz/V) que depenen del propi VCO, també anomenat sensibilitat del VCO.

El guany K_0 juntament amb la de l'amplificador d'error K_A és el guany total del llaç. Aquest paràmetre ens fixarà coses tant importants com la rapidesa de resposta del nostre PLL enfront a variacions de freqüència a l'entrada, inclús de l'estabilitat o no del bucle [11].

1.4. PLL VIRTUAL.

Per aquest projecte es pretén implementar i dissenyar tot el sistema PLL descrit anteriorment de forma virtual mitjançant la l'eina de programació LabVIEW, amb lo que s'aconsegueix totes les avantatges que pot tenir un PLL en quant als temes de detecció d'un desfasament o per analitzar les variacions de freqüència de ressonància del sensor ressonant si no que amés, podem controlar molts més paràmetres i visualitzar d'una forma clara i ordenada tots el resultats i dades obtingudes, així com moltes més opcions que seran descrites al següents capítols. Tots els processos explicats a l'apartat anterior queden simplificats i tan sols es treballa i s'elabora més amb detall les passes necessàries per aconseguir la sortida esperada respecta a una certa entrada, per tant, el diagrama general del PLL es compondrà dels següents blocs:

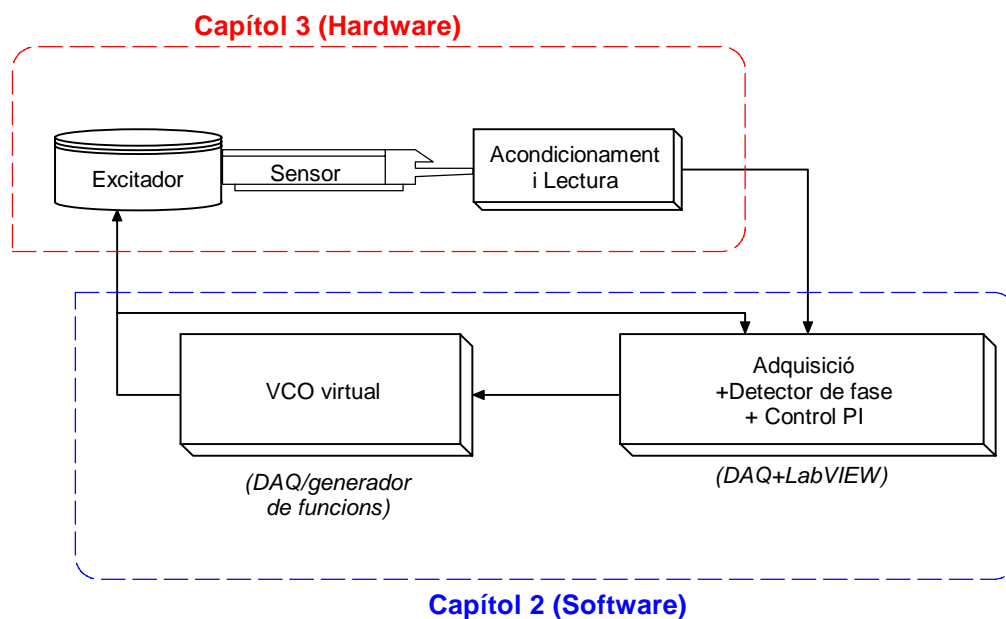


Figura 1.8. Esquema general de la implementació del PLL virtual indicant entre parèntesis les eines emprades pel seu desenvolupament, així com l'esquematització per capítols de tot el contingut.

1.4.1. Funcionament del PLL virtual.

El model del PLL virtual és lleugerament distint al descrit anteriorment encara que la funció és la mateixa. A continuació s'explica el comportament genèric de cada bloc per separat. Al capítol 2 s'explicarà cada un amb detall.

- **Adquisició dels senyals d'entrada i sortida del transductor:**

En aquest cas es tracta de senyals discrets ja que per adquirir la senyal analògica amb una targeta d'adquisició de dades haurem de realitzar un mostreig, el qual també és configurat i dut a terme amb LabVIEW, aconseguint d'aquesta manera un array de punts indicant en cada

mostra el valor de l'amplitud de l'ona que s'ha registrat en aquell instant. La correcta adquisició de les dades dependrà de la configuració de la targeta, com per exemple, la freqüència de mostreig.

- ***Detector de fase:***

S'implementarà un algoritme amb LabVIEW per tal de detectar el desfasament entre dues senyals adquirides i tenint les dades emmagatzemades en memòria.

- ***Controlador:***

El controlador s'encarregarà, un cop coneixent el desfasament d'una senyal respecte l'altre, de generar les senyals de control pertinents per variar correctament la freqüència que li hauria d'entrar al sistema per aconseguir reduir aquest desfasament i així enganxar les ones al desfasament desitjat.

- ***Generació del senyal:***

Basant-se amb els senyals de control generats pel controlador, el programa crearà un senyal sinusoidal amb la nova freqüència per ser posteriorment generada per la sortida analògica de la targeta, que serà l'entrada al sensor. A més de la generació per la targeta, també es podrà emprar un generador de funcions.

1.4.2. Entorn de programació: LabVIEW.

L'entorn de programació LabVIEW és un eina dissenyada especialment per monitoritzar, controlar, automatitzar i fer càlculs complexos de senyals analògiques i digitals capturades mitjançant una tarja d'adquisició de dades, ports sèrie i bussos GPIB (Bussos d'intercanvi de Propòsit General). Aquest entorn de programació té la característica de ser totalment gràfic, lo qual simplifica molt la utilització del propi llenguatge així com la comprensió del programa per un usuari que estigui pot familiaritzat amb l'entorn.

El LabVIEW és un programa molt estès i resulta molt senzill aconseguir subprogrames o drivers des de la seva pàgina web i de forma gratuïta, per controlar els instruments amb els quals es pot treballar via GPIB o DAQ. També té llibreries per l'adquisició, anàlisi, presentació i emmagatzematge de dades. Està basat en la programació modular, el que permet crear feines molt complicades a partir de mòduls o/i submòduls molt més senzills, amés de que el mateix mòdul pot ser emprat a un altre part del programa, lo que el converteix amb una programació ràpida i profitosa. A l'hora, aquests mòduls es poden descompondre amb un nivell més baix, compost per altres submòduls, i que a més, qualsevol d'aquests mòduls o submòduls pot ser emprat dins altres mòduls. Es podria dir que el llenguatge segueix una programació estructurada i jeràrquica [12].

La programació amb aquest software es compon de dos conceptes bàsics, el *Front Panel* (Panell frontal) i el *Block Diagram* (Diagrama de blocs).

El Front Panell és la interfície que l'usuari veurà i on pot controlar tot el procediment, molt semblant a qualsevol instrument. En ell es podrà monitoritzar tot el que està ocorrent amés de controlar el sistema. Aquest conté controls i indicadors dels quals n'hi ha molts de tipus.

En el Block diagram es pot observar totes les connexions de tots els controls i variables, tot implementat per mòduls i línies on viatgen les dades i controls del programa, que representaria en certa mesura l'esquema elèctric del instrument. Aquesta vendria a ser la cara oculta del panell frontal, on a priori, l'usuari no pot veure.

1.5. DESCRIPCIÓ I OBJECTIUS DEL PROJECTE.

Exposada la motivació i centrada la temàtica en la que s'emmarca aquest treball, a continuació exposem els principals objectius del projecte que pretén desenvolupar un prototipus de baix cost d'un sistema sensor basat en una palanca ressonant amb un sistema de control tipus PLL implementat en LabVIEW sobre un PC.

Així doncs, els objectius principals del projecte es poden sintetitzar en els següents punts:

- Recerca d'un sensor adequat per aquest projecte
- Desenvolupament i implementació del sistema de control sobre LabVIEW basat en el control i seguiment de fase (PLL virtual).
- Disseny i implementació del sistema d'excitació i lectura del transductor.
- Test del prototipus.



Figura 1.9. Lloc, instruments de treball i prototip dissenyat. Laboratori d'Electrònica de l'edifici Anselm Turmeda de la Universitat de les Illes Balears.