

Resum

En aquest projecte es realitza el desenvolupament d'una eina de mesura de vibracions utilitzant un acceleròmetre capacitiu MEMS juntament amb una placa Arduino i amb una fulla de càlcul programada utilitzant el sistema de *macros* per facilitar la tasca del postprocés de les dades. També s'exposa un cas real a l'empresa HP Inc. en el que s'ha requerit l'ús de l'eina per solucionar un problema.

El projecte s'inicia amb un estudi dels diferents dispositius de mesura de vibracions mecàniques que existeixen al mercat, acceleròmetres, dispositius de mesura òptics i vibròmetres. D'aquesta manera es coneixen les opcions comercials que es poden adquirir de forma senzilla. Degut a la complexitat del ús d'aquests aparells i el llarg temps de processat, es decideix desenvolupar una nova eina per al departament d'I+D de l'empresa.

S'analitzen els requeriments del projecte per determinar quins són els elements de hardware que compleixen aquests requeriments. Un cop decidit els components, es desenvolupa el codi utilitzant la plataforma Arduino que permet accedir a les dades de l'acceleròmetre i obtenir un anàlisi temporal. Posteriorment, es desenvolupa la fulla de càlcul automatitzada per convertir les dades en gràfics i fer la conversió matemàtica del domini temporal al domini freqüencial.

Un cop el dispositiu està desenvolupat, es realitza un estudi estadístic i comparatiu per veure que els resultats obtinguts amb la nova eina són semblants als que es poden obtenir amb dispositius comercials professionals.

Finalment es presenta un problema de vibracions mecàniques que apareix en un dels prototips desenvolupats a l'empresa HP Inc. S'inclou des de l'anàlisi del problema fins a la selecció d'una solució per aquest problema. També es realitza la validació i test de la solució, utilitzant el dispositiu de mesura de vibracions desenvolupat en el projecte.

Sumari

| | |
|---|-----------|
| RESUM | 1 |
| SUMARI | 3 |
| 1. INTRODUCCIÓ | 5 |
| 1.1. Objectius del projecte..... | 5 |
| 1.2. Motivació | 6 |
| 1.3. Abast del projecte | 7 |
| 2. ESTAT DEL ART | 8 |
| 2.1. Eines estàndards per la mesura de vibracions..... | 8 |
| 2.2. Tipus de dispositius de mesura de vibracions | 8 |
| 2.2.1. Acceleròmetres mecànics..... | 9 |
| 2.2.1.1. Acceleròmetres piezoelèctrics | 10 |
| 2.2.1.2. Acceleròmetres capacitius | 10 |
| 2.2.1.3. Acceleròmetres piezo-resistius | 11 |
| 2.2.1.4. Acceleròmetres de efecte Hall | 12 |
| 2.2.1.5. Resum de propietats dels diferents acceleròmetres..... | 13 |
| 2.2.2. Dispositiu de mesura òptic, làser o amb ultrasons | 14 |
| 2.2.3. Dispositius de mesura d'efecte doppler | 14 |
| 3. DISSENY I VALIDACIÓ DEL PROJECTE | 16 |
| 3.1. Introducció..... | 16 |
| 3.2. Programa Arduino | 19 |
| 3.3. Captació de dades | 21 |
| 3.4. Programa VBA (Visual Basic for Applications) | 22 |
| 3.5. Diagrama de funcionament..... | 25 |
| 3.6. Validació i calibració del dispositiu..... | 26 |
| 4. APLICACIÓ EN UN CAS PRÀCTIC | 30 |
| 5. PRESSUPOST | 35 |
| 5.1. Pressupost de recursos humans | 35 |
| 5.2. Pressupost de recursos materials..... | 36 |
| 5.3. Pressupost total del projecte..... | 37 |
| 6. IMPACTE MEDIAMBIENTAL | 38 |

| | |
|------------------------|-----------|
| 7. PLANIFICACIÓ | 39 |
| CONCLUSIONS | 40 |
| AGRAÏMENTS | 41 |
| BIBLIOGRAFIA | 42 |

1. Introducció

1.1. Objectius del projecte

L'objectiu d'aquest projecte és desenvolupar una eina de mesura de vibracions mecàniques de baix pressupost i que permeti obtenir la informació gairebé al instant. Per a fer això es vol utilitzar eines de baix cost com són la placa de programació *Arduino* i un acceleròmetre digital de 3 eixos compatible amb la placa. A més, es vol realitzar un programa fàcil i intuïtiu que es pugi modificar segons la utilitat que es vulgui donar al dispositiu.

La idea d'aquest dispositiu surt de la necessitat d'estudiar les vibracions que apareixen a les màquines industrials de manera ràpida en el departament d'I+D de l'empresa HP Inc. Actualment s'utilitza un dispositiu professional format per varis acceleròmetres piezoelèctrics, juntament amb un equip d'adquisició de dades i un programa poc intuïtiu que requereix d'un treballador qualificat amb coneixements del programari encarregat de processar les dades. Per tant, en sistemes de vibracions simples en que només es necessiti fer l'estudi freqüencial o conèixer la forma temporal de la vibració es necessita una eina més intuïtiva, fàcil i ràpida de utilitzar.

1.2. Motivació

Tota idea parteix d'una experiència. En aquest cas, el projecte ha sorgit del programa de practiques de la universitat juntament amb la empresa de tecnologia HP Inc. que ha permès a l'autor obtenir experiència laboral. Gràcies a la participació en projectes dins del departament d'I+D de l'empresa multinacional va sorgir la idea de dissenyar un dispositiu per mesurar vibracions.

Una de les meves inclinacions sempre ha estat la programació i aquest projecte em permetia entrar completament a aquest món vist des d'un altre punt de vista al que havia obtingut de les assignatures d'informàtica a la universitat. Aquest nou concepte es basa en crear eines senzilles però molt útils pels treballadors que no s'hagin format en l'àmbit de la programació i que no coneixen llenguatges complicats. Al tractar-se de vibracions mecàniques, es treballa en l'especialitat que s'ha estudiat durant aquest Màster i es complementen les dues habilitats, la del coneixement mecànic amb la de programació bàsica de dispositius.

A més a més el projecte apareix per una necessitat real, cosa que ajuda en la motivació personal a l'hora de desenvolupar un projecte. Degut a que a l'empresa es volen mesurar vibracions de forma ràpida i fàcil i no es disposa de cap eina per suplir aquesta necessitat, faig front a aquest projecte amb més ganes que en el cas en que no hi hagués un objectiu concret.

A més a més, el lloc de treball que m'han ofert a l'empresa en el departament de mecànica em proveïa de totes les facilitats necessàries per desenvolupar el dispositiu. L'oportunitat de disposar del hardware necessari gairebé al moment, ha accelerat el desenvolupament i construcció del dispositiu. El suport de professionals especialitzats, amb molta experiència i coneixements han ajudat a agilitzar el projecte de construcció de l'eina. A més, la companyia també disposava del material electrònic necessari pel prototipatge.

Gràcies a tot el comentat anteriorment es va començar a tirar endavant aquest projecte.

1.3. Abast del projecte

L'abast del projecte engloba des de la selecció de components i desenvolupament d'un aparell de mesura de vibracions mecàniques, seguit pel post procés de les dades, la validació de l'aparell i l'ús de l'aparell en un cas real durant l'estància de pràctiques a l'empresa HP Inc.

A la primera fase es realitzarà una avaluació dels diferents dispositius per la mesura de vibracions mecàniques i es decidirà entre les diferents opcions quina és la que compleix els requeriments del projecte. Es decidiran els components de hardware, l'acceleròmetre, el captador de dades i l'element de post procés tenint en compte que es tracta d'un projecte enfocat al sector de la indústria i no al sector comercial.

A la segona fase, un cop decidit els elements a utilitzar, el següent pas serà desenvolupar el dispositiu de mesura, definint les prestacions, seleccionant els components i desenvolupant els sistema de control dels seus components. Aquest dispositiu haurà de ser capaç de capturar les dades d'una vibració mecànica i transformar-les per obtenir resultats analítics que defineixin la forma i el comportament de la vibració. En aquesta fase també es procurarà validar l'eina, de tal manera que l'usuari pugui utilitzar l'aparell tenint en compte que és un dispositiu robust. Per comprovar la validesa dels resultats es complementaran els tests amb un estudi estadístic d'aquests.

Finalment, per demostrar la utilitat de l'eina a l'hora de mesurar vibracions, es posarà en context d'un cas real viscut durant l'estada de pràctiques a l'empresa en el que s'ha utilitzat el dispositiu per tal de solucionar un problema d'inestabilitat d'una vibració mecànica en el prototip d'una impressora de gran format de 3,5 m de zona d'impressió.

2. Estat del art

2.1. Eines estàndards per la mesura de vibracions

Hi ha varies eines comercials que permeten la mesura de vibracions. N'hi ha que mesuren directament velocitats com els sensors de mesura òptics o làsers. Tot i això, les més utilitzades són els components que mesuren acceleracions, els acceleròmetres.

Un acceleròmetre és un dispositiu electromecànic que mesura l'acceleració de qualsevol moviment. Aquestes acceleracions poden ser estàtiques, com la gravetat, o dinàmiques com el moviment o la vibració. L'acceleròmetre apareix com una solució per trobar un mètode eficaç per mesurar vibracions en tot tipus d'estructures com ponts i vehicles en moviment com poden ser avions, vaixells o automòbils.

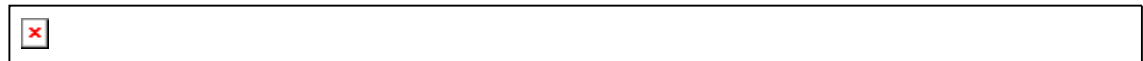
El primer acceleròmetre va néixer a partir d'una galga de tensió, on mesurant la deformació provocada a la galga i mitjançant una sèrie de transformacions es podia determinar l'acceleració d'un moviment. La idea la va presentar el seu autor, Hans J. Meier, des de les instal·lacions del MIT durant el 1938. Aquests acceleròmetres eren fràgils i només funcionaven de forma correcte amb vibracions de baixa freqüència, era capaç de mesurar ones de fins a 200 Hz. És per això que aquests dispositius no es podien aplicar ni a les estructures navals ni a les aeronaus, només s'utilitzaven per veure l'impacte dels terratrèmols en alguns elements estructurals. A causa d'això, es va haver de buscar una altra solució. A partir d'aquí, van sorgir els elements piezoelèctrics que permetien que els dispositius fossin de dimensions més reduïdes i amb un marge freqüencial molt més elevat. Aquests dispositius eren capaços de captar vibracions fins a 10 kHz de freqüència, molt útil per vibracions relatives a moviments ràpids i de poca duració.

2.2. Tipus de dispositius de mesura de vibracions

Actualment, el mercat és molt gran i ofereix moltes possibilitats relacionades amb les tecnologies referents als dispositius de mesura d'acceleracions. Aquests dispositius s'agrupen en funció de com estan construïts els acceleròmetres i defineixen quin tipus d'acceleròmetre és més adequat per cada tasca. Concretament, hi ha cinc paràmetres principals a l'hora d'escollir l'eina més adequada, els rangs de funcionament de la temperatura, amplitud, sensibilitat, precisió i freqüència. A part, hi ha altres paràmetres que poden ser importants com són la dimensió, la resistència als cops, el preu o el funcionament en entorns hostils.

2.2.1. Acceleròmetres mecànics

Aquest tipus d'acceleròmetres són els més antics i el seu funcionament es basa en el primer acceleròmetre que es va inventar [1]. S'utilitza una massa inert petita m , juntament amb un element elàstic de valor k , juntament amb un sistema d'esmoreïment c . Quan es provoca un cert moviment a la massa m degut a una excitació externa mesurant la distància entre la massa i el sistema de referència x , es pot determinar l'acceleració del sistema mitjançant l'equació del moviment d'una vibració mecànica:



Al tenir una massa petita i un esmoreïment petit es pot simplificar l'equació de manera que queda la següent equació, on l'acceleració del sistema, a , és proporcional al valor del desplaçament x .



Depenent de la forma en que es mesura el desplaçament de la massa mòbil del acceleròmetre es defineixen els diferents tipus d'acceleròmetres amb comportament mecànic.

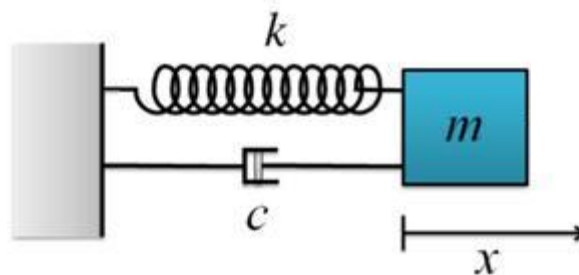


Figura 1: Esquema dels elements que conformen un acceleròmetre mecànic [2]

Com la major part dels acceleròmetres, aquests dispositius necessiten ser calibrats un cop fabricats ja que petits desplaçaments provoquen una gran variació de la resposta del dispositiu i és molt difícil que tots es comportin exactament igual degut al mètode de fabricació.

2.2.1.1. Acceleròmetres piezoelèctrics

El funcionament d'aquests acceleròmetres es basa en el comportament característic dels materials piezoelèctrics. Una deformació en aquest tipus de material genera un canvi a l'estructura cristal·lina canviant les seves propietats elèctriques. El dispositiu està compost per un material piezoelèctric (comunament un cristall de quars o zirconat de plom) juntament amb una petita massa, units amb un element elàstic (p.e. molla elàstica) que permet l'oscil·lació de la massa. La vibració que es vol mesurar es transmet a la massa interna del dispositiu. A continuació, aquesta massa genera una força sobre el material piezoelèctric, prèviament pretensat, i apareix un corrent elèctric amb un valor proporcional al valor de l'acceleració de la vibració. S'ha de tenir en compte que aquest tipus d'acceleròmetres és dels més versàtils i més utilitzats ja que es poden fer molt petits, de manera que l'efecte del transductor no afecta sobre la senyal de la vibració i tenen un rang de funcionament freqüencial de 0,3 Hz fins a 20 kHz, tot això a un preu mig.

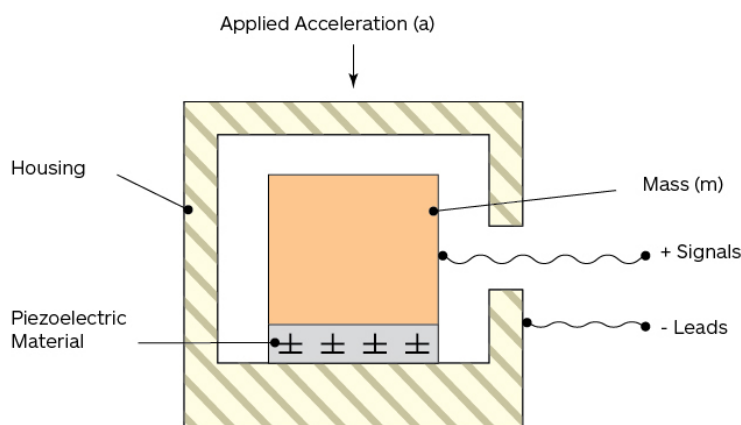


Figura 2: Esquema de funcionament d'un acceleròmetre piezoelèctric per compressió [3]

2.2.1.2. Acceleròmetres capacitius

Són dispositius mecànics amb un element electrònic, un condensador basculant. Un condensador és un component electrònic que permet emmagatzemar energia elèctrica entre dues plaques conductores separades per un element no conductor, el dielèctric. La distància entre les dues plaques defineix la diferència de potencial del condensador. Aprofitant aquesta propietat, els acceleròmetres capacitius es construeixen de manera que una de les dues plaques del condensador es mou en funció de la força externa que suporten [4]. D'aquesta manera, s'obté un senyal elèctric proporcional a la força i al tenir una massa constant es pot determinar l'acceleració de forma directe aplicant la segona llei de Newton, $\sum F = m \cdot a$.

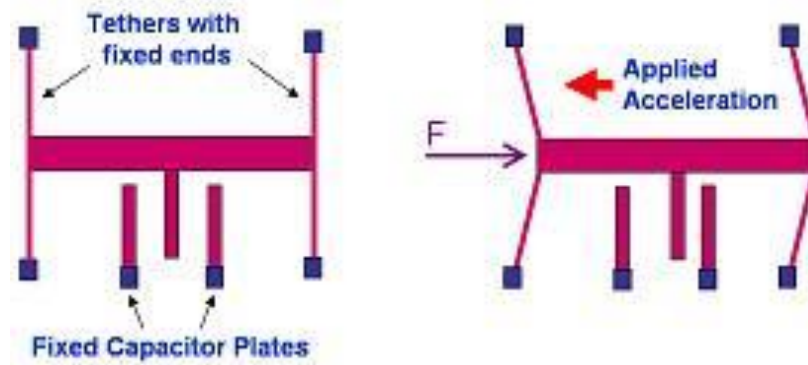


Figura 3: Esquema de funcionament d'un acceleròmetre capacitiu [5]

2.2.1.3. Acceleròmetres piezo-resistius

A diferència dels anteriors sensors (piezoelèctrics), els sensors piezo-resistius estan composts d'un diafragma sobre un substrat de silici compost per galgues que flecta en funció de la força aplicada [6]. Degut a aquesta flexió, es deforma la galga podent calcular el desplaçament de la massa. Un gran avantatge d'aquest tipus de sensors és que són molt sensibles i es poden mesurar fins a freqüències de 0 Hz, amb component contínua. Aquesta propietat permet que comunament s'utilitzin per determinar el nivell d'oli o gas en els automòbils o per mesurar la pressió arterial en equips mèdics. També s'incorporen en instruments de pressió baromètrica dels avions.

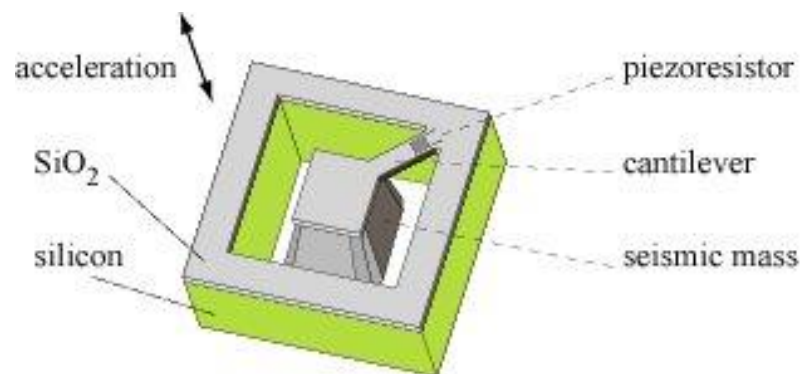


Figura 4: Diagrama d'un acceleròmetre piezo-resistiu de silici [7]

2.2.1.4. Acceleròmetres de efecte Hall

L'acceleròmetre d'efecte Hall segueix el principi de funcionament basat en l'efecte del camp magnètic en moviment sobre un element conductor. En aquest cas, la massa és un imant mòbil i el transductor està compost d'un material conductor. Al sotmetre l'acceleròmetre a un moviment o una vibració, l'imatge es mou relatiu al transductor de manera que el camp magnètic sobre l'element conductor varia generant una desviació del corrent del circuit primari cap al circuit secundari. Mesurant la diferència de potencial del circuit secundari, es pot extreure un valor proporcional a l'acceleració aplicada. En la següent imatge es pot observar el principi del efecte Hall.

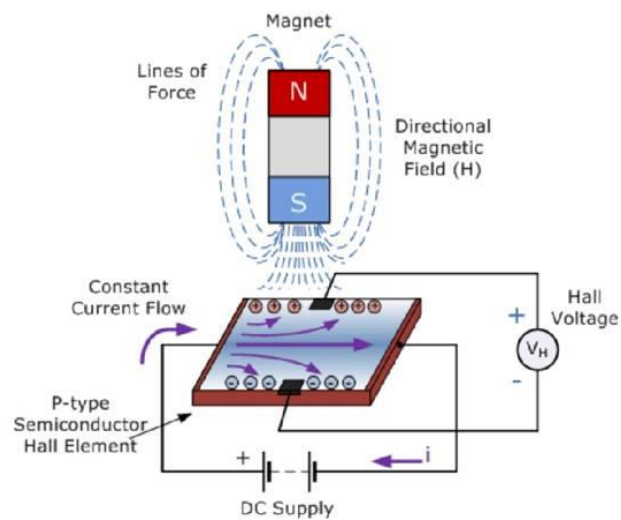


Figura 5: Funcionament del efecte Hall [8]

2.2.1.5. Resum de propietats dels diferents acceleròmetres

A continuació es mostra una taula resum on es comparen algunes de les propietats més rellevants dels diferents tipus d'acceleròmetres.

| Tipus | Rang d'amplitud | Rang freqüencial [Hz] | Característiques | Aplicacions |
|------------------------|-----------------|-----------------------|---|---|
| Piezoelèctrics | 0-2000g | 0,3-20k | Sensibilitat mitjana Ús complex Baixes temperatures | Vibracions Impacte Ús industrial |
| Piezo-resistius | 0-2000g | 0-10k | Temperatura mitja Baix cost Lleuger i petit Sensibilitat mitja | Vibració Impacte Automoció Sistemes de vol Túnels de vent |
| Capacitius | 0-1000g | 0-2k | Molt poc soroll Baixa potència Baix cost | Ús general Ús industrial Sistemes d'alarma Mesures sísmiques |
| Efecte Hall | 0-200g | 0,5-1k | Alta precisió Lent Cost elevat | Ús industrial Mesures sísmiques |

Taula 1: Taula resum dels diferents tipus d'acceleròmetres segons les seves propietats

2.2.2. Dispositiu de mesura òptic, làser o amb ultrasons

Aquest tipus de dispositiu està compost per un sensor, en funció del tipus de dispositiu, i una consola digital. El sensor utilitza un raig infraroig, làser o d'ultrasons per detectar la vibració d'una corretja. En funció de l'angle de rebot de l'ona o el raig i la variació d'aquest angle es pot determinar quina és la freqüència de vibració del sistema. La consola serveix únicament per transformar el valor del angle en Hertz i mostrar el valor a la pantalla [9]. En els tres casos el funcionament del dispositiu és molt semblant.



Figura 6: Eina de mesura de la freqüència d'oscil·lació mitjançant ultrasons

Aquest tipus d'eines de mesura s'utilitzen en casos molt específics en que no es necessita una gran precisió. A més, la informació que proporcionen sol ser únicament la freqüència natural i la tensió en la majoria del casos. El cost d'aquests dispositius és més elevat que el d'alguns acceleròmetres.

2.2.3. Dispositius de mesura d'efecte doppler

És un tipus de dispositiu popularment conegut com vibròmetre. S'utilitza per mesurar vibracions mecàniques en tres dimensions. Es solen utilitzar en metrologia d'elements mitjans o microscòpics per correlacionar els resultats experimentals. El principi de funcionament es basa en l'efecte d'un làser sobre la superfície del sistema a mesurar. Degut a l'efecte Doppler es mesura la freqüència de la llum del làser reflectit sobre la superfície. Analitzant la variació d'aquesta freqüència respecte l'original del làser, es pot determinar l'acceleració del sistema mecànic. Aquests dispositius són molt precisos però també són molt cars. És per això que només s'utilitzen en casos concrets on és necessita una alta precisió en sistemes dinàmics que treballen amb freqüències baixes.



Figura 7: Vibròmetre làser de PCE Instruments [10]

3. Disseny i validació del projecte

3.1. Introducció

Una part important del projecte és decidir quins elements s'utilitzaran per dissenyar el dispositiu. Aquests elements han de complir els requeriments del sistema. El requeriments principals són:

- Un cost baix, degut a que no és un projecte principal de l'empresa i per tant els recursos destinats són mínims.
- Dispositiu de petites dimensions. Al ser un acceleròmetre de massa petita permet col·locar-lo en qualsevol sistema sense alterar-lo per l'efecte d'aquesta. Ha de ser de petites dimensions per facilitar el muntatge i poder-lo col·locar gairebé en qualsevol lloc, ja que hi ha parts de les impressores que són poc accessibles.
- Robust a xocs i al soroll. A l'utilitzar-se per mesurar vibracions en màquines industrials, és important que l'acceleròmetre sigui robust en aquest ambient.
- Marge dinàmic adequat per a mesurar vibracions, 0 a 500 Hz (baixa freqüència), que és aproximadament el rang de freqüències que poden aparèixer a les màquines.

Tenint en compte això i els recursos dels que es disposen, s'ha decidit que s'utilitzarà un tipus d'acceleròmetre capacitiu. Dins de les possibilitats que existeixen, s'ha decidit finalment utilitzar un acceleròmetre MEMS capacitiu [11]. Un acceleròmetre MEMS (Mecano electromecànic) és un tipus d'acceleròmetre format per components electrònics que a la vegada tenen un comportament mecànic. Ajuntant els dos conceptes, el de la mecànica i el de l'electrònica s'aconsegueix un rendiment semblant als acceleròmetres mecànics però amb unes dimensions molt més reduïdes, des del micròmetre fins al mil·límetre, amb un cost de fabricació per unitat molt baix. Al tractar-se d'un acceleròmetre capacitiu, aquest està format per varis condensadors electrònics on la distància entre plaques és directament proporcional a l'acceleració mesurada. Aquest tipus de dispositiu sol estar format per tres acceleròmetres, un per cada eix.

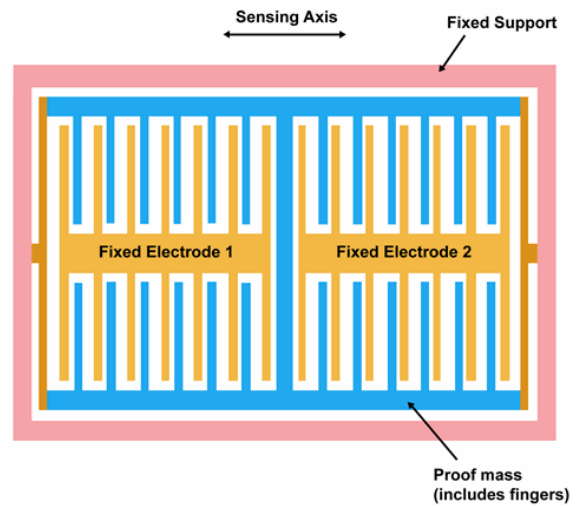


Figura 8: Diagrama de funcionament d'un acceleròmetre capacitiu MEMS [11]

De totes les opcions disponibles, el dispositiu seleccionat ha estat l'acceleròmetre ADXL345, capacitiu de 3 eixos, amb les següents propietats:

| Especificacions | Descripció |
|--------------------------------------|--|
| Baix Consum | 40 μ A en mode de mesura i 0,1 μ A en mode de repòs |
| Resolució programable | Resolució fixe a 10-bit i programables fins a 13-bit |
| Rang de ± 16 g | Rang de mesura d'acceleracions de 16g |
| Tecnologia FIFO | Conté una pila FIFO d'adquisició de dades |
| Alimentació entre 2,0 i 3,6 V | Rang d'alimentació per a un correcte funcionament |
| Interfície SPI o I2C | Protocol de comunicació |
| Rang de temperatura adequat | Rang de funcionament entre -40°C i $+85^{\circ}\text{C}$ |
| Petita dimensió | Petit i prim: 3mm x 5mm x 1mm |

Taula 2: Especificacions del acceleròmetre ADXL345 [12]

Un cop seleccionat l'acceleròmetre, mirant les seves propietats i tenint en compte la compatibilitat amb els altres dispositius, es decideix que s'utilitzarà una placa Arduino UNO

com a dispositiu de captació de dades i després un full de càlcul per el post procés. S'utilitzaran aquestes plataformes degut a que són recursos dels quals es disposen a l'empresa i que no suposen un cost afegit del dispositiu.

Ja que la necessitat d'aquest projecte apareix per complementar el dispositius de mesura amb acceleròmetres piezoelèctrics que es disposa en el departament, a la següent taula es pot observar una comparació dels dos acceleròmetres per veure que en alguns casos interessarà fer ús dels acceleròmetres piezoelèctrics i en altres serà millor utilitzar el nou dispositiu.

| Propietats | Eina a desenvolupar | Eina professional |
|--------------------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| Tipus de sensor | Acceleròmetre capacitiu | Acceleròmetre piezoelèctric |
| Nombre d'eixos | 3 eixos per acceleròmetre | 1 eix per acceleròmetre |
| Usuari | Genèric | Expert |
| Cost del dispositiu | < 25 € | > 2000 € |
| Temps de <i>setup</i> | < 10 min | < 1 hora |
| Temps de postprocès | < 10 min | > 2 hores |
| Error de mesura | < 2 % | < 0,6 % |
| Freqüència de mostreig | < 0,7 kHz | < 42 kHz |
| Rang d'amplitud (<i>peak</i>) | < 16 g | < 6000 g |

Taula 3: Comparació de les propietats de la eina a desenvolupar i la eina professional de mesura del departament de I+D de l'empresa

3.2. Programa Arduino

El primer programa que es va crear va ser el de desenvolupar un codi sobre la plataforma Arduino que permetés obtenir les dades del acceleròmetre i que totes les propietats fossin programables des de la consola, de manera que qualsevol enginyer d'I+D sigui capaç de configurar l'Arduino sense haver de canviar el codi de la placa. Com Arduino és una plataforma de codi obert, s'han utilitzat llibreries per facilitar la tasca. Concretament s'han utilitzat 3 llibreries. Una desenvolupada per controlar l'acceleròmetre (ADXL345.h), una llibreria per comunicar l'Arduino i l'acceleròmetre entre ells (I2Cdev.h) i finalment una llibreria per controlar el temps de mostreig de l'adquisició de dades (TimerOne.h).

```
// Arduino Wire library is required if I2Cdev I2CDEV_ARDUINO_WIRE implementation
// is used in I2Cdev.h

#include "Wire.h"
#include <avr/pgmspace.h>
#include <TimerOne.h>

// I2Cdev, ADXL345 and Knock must be installed as libraries, or else the .cpp/.h files
// for both classes must be in the include path of your project

#include "I2Cdev.h"
#include "ADXL345.h"
```

Figura 9: Declaració de les llibreries utilitzades en el programa

Com en qualsevol programa sobre plataforma Arduino, el codi es divideix en 2 parts, la primera és la configuració i està determinat per la funció *setup* de l'estructura del codi. La segona és el codi que es repeteix en un bucle infinit i que es troba sota la funció de bucle (*loop*).

En la funció *setup* es configuren totes les constants i variables que es voldran utilitzar posteriorment, decidint quin tipus de variable o constant és i, si escau, el valor inicial que han de prendre. El temps de mostreig és una variable que l'usuari pot introduir a la consola, aconseguint d'aquesta manera que no sigui necessari modificar el programa per canviar el temps de mostreig predefinit de 0,7 microsegons. A més, també es configuren totes les altres funcions programables de l'acceleròmetre seleccionat, el ADXL345.

Primer de tot, s'utilitza la llibreria de comunicació amb l'acceleròmetre que permet connectar els dos dispositius utilitzant el protocol de comunicació I2C. Aquest és un protocol molt utilitzat amb aquest tipus de plataformes. L'I2C és un protocol que permet connectar dos dispositius electrònics independentment del fabricant i els divers instal·lats. Aquest protocol té 4 connexions formades per una alimentació a 3,3 V, una connexió a

terra, una transmissió de dades (SDA) i un rellotge asíncron que decideix quan llegir les dades (SCL) [13]. Aquest tipus de norma permet connexions de velocitat de dades mitjana (400 MHz) i l'ús de un cable de fins a 500 mm de llarg. Això és important ja que la longitud del cable permetrà utilitzar l'acceleròmetre per mesurar vibracions, no només en estàtic sinó també en moviments dinàmics, i permetrà que col·locar-lo sigui molt més ergonòmic.

Un cop definit el protocol de comunicació entre l'acceleròmetre i la placa, el següent ha estat configurar el canal de comunicació entre la placa i el PC, que s'encarregarà de captar i emmagatzemar les dades. Per això, Arduino ofereix la comunicació per serial bus, que és fàcil de configurar, ràpida i efectiva. Per evitar que el coll d'ampolla relacionat amb velocitat de mostreig aparegui degut a aquesta connexió, s'ha configurat el port serial a una velocitat de 250000 bits per segon. D'aquesta manera, s'assegura no generar cap altre coll d'ampolla en el procés.

A continuació, es configura l'acceleròmetre per aconseguir llegir dades dels tres eixos de captació de dades independentment, així doncs, al llegir només un eix s'accelera el procés de captació de les dades. El valor llegit en cada eix es configura de tal manera que no tingui en compte l'acceleració de la gravetat. Per tant, el valor obtingut d'acceleració és el propi del sistema mecànic i és més senzill de llegir (Figura 10).

Finalment es configura l'acceleròmetre perquè funcioni en un rang de de 16g d'amplitud de vibració de pic a pic. A part, es configuren dos acceleròmetres per si es volguessin utilitzar dos alhora, tot i que en aquest cas només se n'utilitzarà un.

```
void setup() {
  Wire.begin();      // Join I2C bus (I2Cdev library doesn't do this automatically).
  Serial.begin(250000); // Initialize serial communication: 250000.

  // Serial.println("Initializing I2C devices...");

  Accel1.initialize(); // Initialize accelerometer 1.
  Accel2.initialize(); // Initialize accelerometer 2.
  Accel1.setRate(0xf);
  Accel1.setRange(0x3); //Set accelerometer range to +/-16g.
  Accel1.setFullResolution(0); //Set resolution to 10 bit.
  save = 0; //Set array data to 0
  delay(500);

  TWBR = 22; //Set I2C arduino speed to 400Mhz
}
```

Figura 10: Configuració inicial de l'acceleròmetre

En la segona part del codi, la funció *loop*, conté la tasca de processat de dades. Per a l'adquisició de dades de l'acceleròmetre, inicialment s'ha dissenyat un programa basat en interrupcions. Aquest programa determina en funció del temps de mostreig, definit per

l'usuari, el temps entre interrupcions. Casualment, aquest acceleròmetre tarda un temps determinat en enviar les dades a la placa Arduino i aquest temps és superior al temps que pot estar activa una interrupció. Per aquest motiu, el programa basat en interrupcions no era funcional i es va haver de modificar.

La solució per la que es va optar va ser crear un *timer* que controla el temps que passa entre mostra i mostra. En cada mostra, l'acceleròmetre envia una dada a l'Arduino i, a continuació, aquesta dada és enviada a través del Serial Bus cap al PC. Tot aquest procés triga un temps aproximat de 700 μ s. Aquest temps determina el temps de mostreig i, per tant, la freqüència màxima que és capaç d'interpretar el dispositiu, 1,4 kHz. Tenint en compte el teorema de Nyquist-Shanon [14], en el que per reconstruir un senyal digital a partir d'un senyal analògic amb un temps de mostreig T sense perdre informació, aquest ha de tenir un ample de banda del període més petit o igual a T/2. Per tant, la freqüència fonamental màxima real que pot interpretar el dispositiu és de **700 Hz**.

3.3. Captació de dades

Una part important del projecte és emmagatzemar les dades que s'obtenen amb l'acceleròmetre. Per realitzar aquesta tasca, s'utilitza el programa fet en una Arduino i un altre programa molt comú a l'empresa per la comunicació entre la plataforma Windows i altres dispositius electrònics, el **Putty**. El Putty és un client de Windows per la comunicació a través de SSH, Telnet o Serial bus (protocols de comunicació a través de la xarxa). Bàsicament, s'utilitza com a consola de comunicació entre l'ordinador personal i l'Arduino. Així, es poden emmagatzemar les dades en un arxiu de text de manera que sempre que es vulguin consultar aquelles dades es poden carregar a l'Excel i veure les dades de forma gràfica.

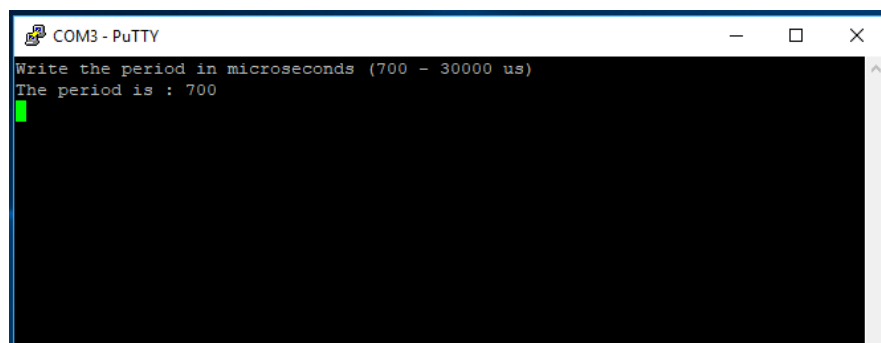


Figura 11: Funcionament del programa a la consola del Putty

3.4. Programa VBA (Visual Basic for Applications)

La plataforma Microsoft office Excel és un *software* de fulles de càlcul que ofereix el paquet de ofimàtica de Microsoft i que, per tant, en la majoria de computadores personals està disponible (88% de dispositius amb sistema operatiu Windows el 2016) [15]. És per això que s'utilitza aquesta plataforma, ja que així no cal que els enginyers que necessitin utilitzar el dispositiu hagin de descarregar-se cap aplicació nova. A part, es tracta d'una plataforma senzilla i intuïtiva i amb una gran capacitat de càlcul. Concretament, pel cas que es desenvolupa en aquest projecte, disposa d'una funció que, gràcies a les comandes adequades, permet transformar un conjunt de dades en un format concret de la seva funció temporal a una freqüencial. El fet de voler estudiar vibracions és una de les millors maneres d'analitzar els resultats juntament amb la vibració temporal (quan el que interessa és l'amplitud de la vibració).

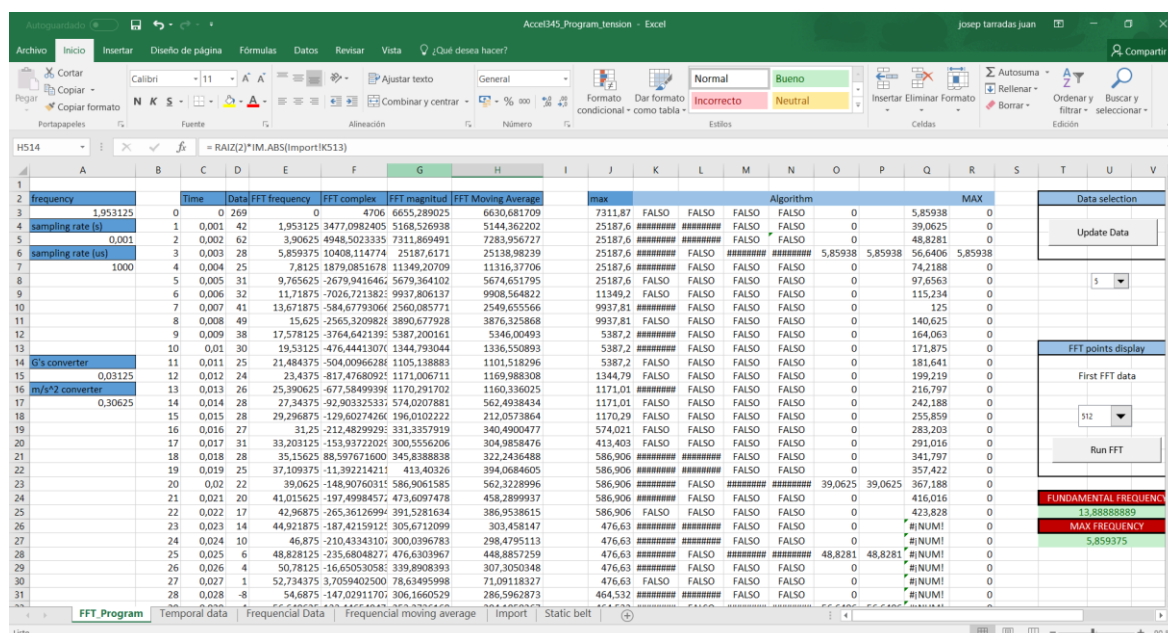


Figura 12: Full de càlcul programat per transformar les dades a la seva forma freqüencial

L'objectiu d'aquest programa és transformar l'arxiu de dades temporals, obtingut gràcies a l'Arduino, en gràfics on els resultats siguin fàcils d'interpretar. Una vibració mecànica té dues formes característiques a partir de la qual es poden obtenir conclusions, la primera és la forma temporal que la podem obtenir fàcilment amb el temps de mostreig i el valor de les dades obtingudes durant el mostreig. La segona és la forma freqüencial que ens mostra quines són les freqüències predominants en una vibració.



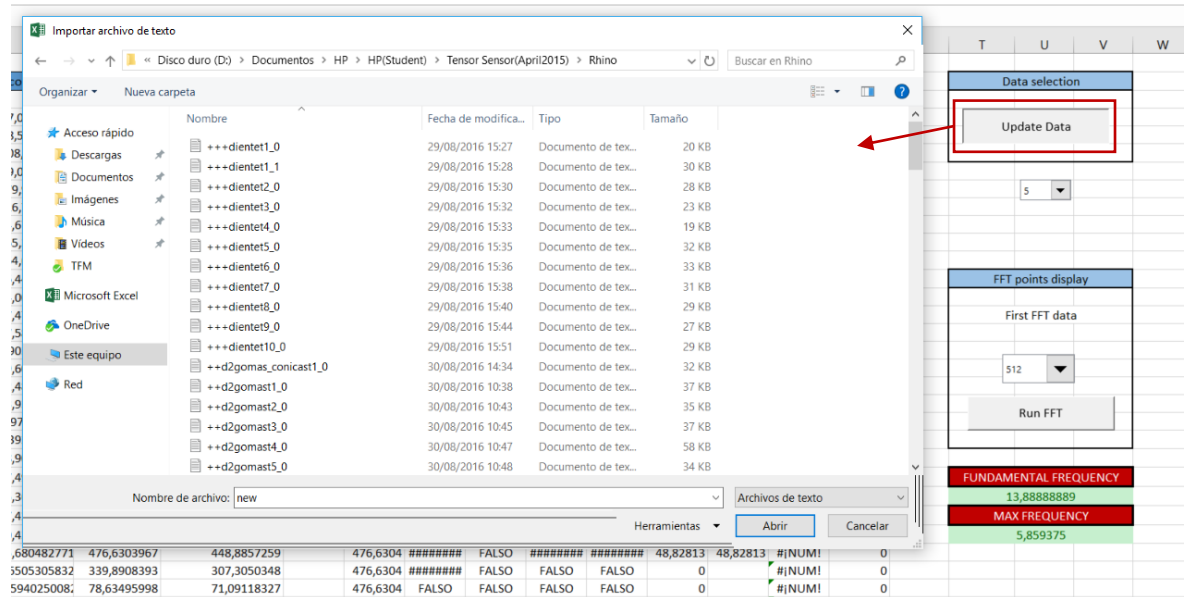


Figura 13: Imatge del full de càlcul en la pujada dels arxius de text

Per obtenir aquestes dues formes, el primer pas és carregar l'arxiu de dades .txt a l'arxiu Excel. El programa de Microsoft té una funció específica encarregada d'obtenir dades externes des d'un arxiu. Aquesta funció es troba a **Data -> External Data -> From text**. Per facilitar la tasca a l'usuari s'ha enllaçat aquesta funció al botó *Update Data*. D'aquesta manera, com s'observa a la figura anterior, només clicant sobre el botó ja apareix la finestra per carregar l'arxiu de text.

Un cop carregat l'arxiu de text, les dades es mostren a la columna *data* de la fulla de càlcul. A continuació, s'ha de seleccionar el nombre de mostres en un desplegable que es volen utilitzar per calcular la forma temporal FFT (*Fast Fourier Transform*) de les dades. La FFT és un algorisme de processament de senyals digitals per descomposar-les en el seu espectre freqüencial. És una eina relativament nova (1965) que apareix per la necessitat de la programació d'un algorisme de càlcul de sèries complexes. La FFT és una variació del algorisme DFT (*Direct Fourier Transform*), però el càlcul és molt més senzill i ràpid utilitzant la FFT [16]. La transformada directe de Fourier permet fer una transformació matemàtica basada en la sèrie de Fourier, on a partir d'unes dades temporals aconseguim transformar-les al seu espectre freqüencial. La fórmula d'aquesta transformació matemàtica és la següent:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi i}{N} kn} \quad k = 0, \dots, N - 1$$

Igual que en el cas anterior, el propi Excel disposa d'un paquet d'anàlisis de dades (*data analysis*) per calcular l'espectre freqüencial d'amplitud utilitzant l'algorisme de la FFT. Introduïnt les dades en forma temporal i el temps en que s'ha pres cada mostra, s'obté el valor complex de l'amplitud de la vibració al que aplicant el valor absolut ens dona el valor de l'amplitud en totes les bandes. El nombre de dades seleccionat, degut a l'algorisme que utilitza el programa, ha de ser una potència de 2. És per això que en desplegable només apareixen valors de 512, 1024, 2048, 4096; tots nombres derivats d'una potència de 2. En funció del nombre de dades que es seleccioni, el temps de càlcul serà major o menor. Amb poques dades el temps de càlcul és molt menor que amb moltes dades.

Un cop seleccionat el nombre de dades, en el desplegable s'ha afegit un botó amb el codi d'execució de la FFT per facilitar el procés al usuari. Al clicar el botó *Run FFT*, s'executa l'algorisme que s'encarrega tant de mostrar el valor de les dades FFT com d'actualitzar els gràfics de les fulles de càlcul que es troben en el mateix document amb les noves dades. Els gràfics estan a les fulles *Temporal data* i a la *Freqüencial data*.

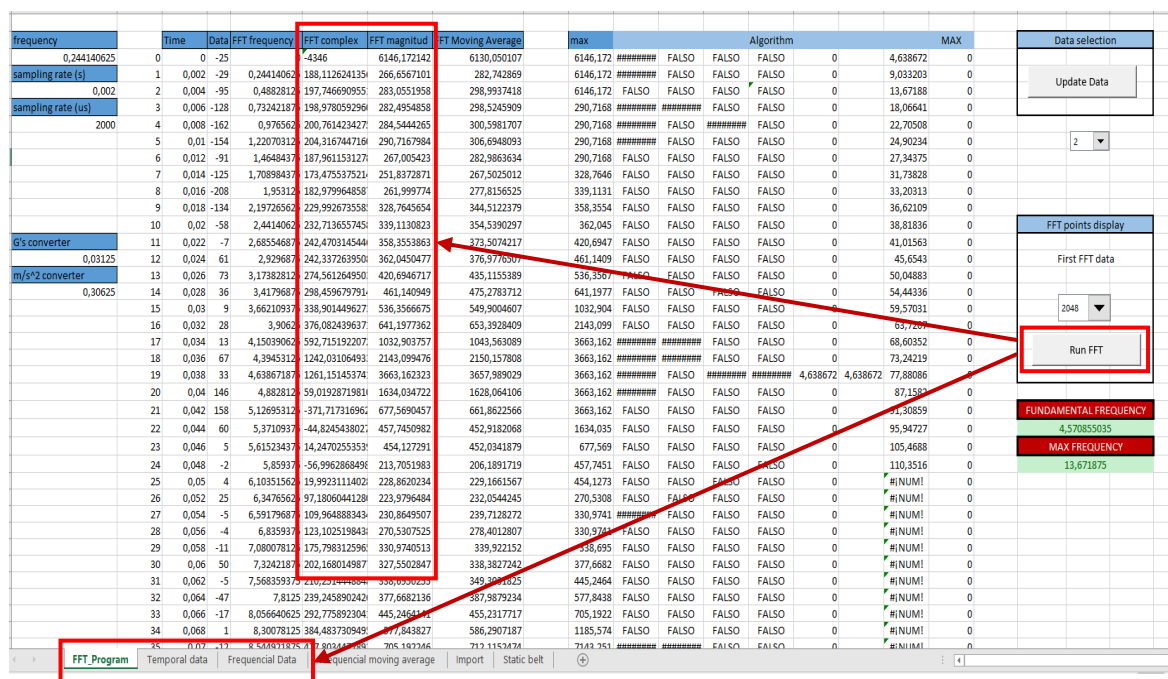


Figura 14: Imatge del full de càlcul per passar de mostres temporals a freqüencials

3.5. Diagrama de funcionament

A continuació, es pot veure un diagrama del funcionament de tots dos programes en conjunt, així com el funcionament del dispositiu.

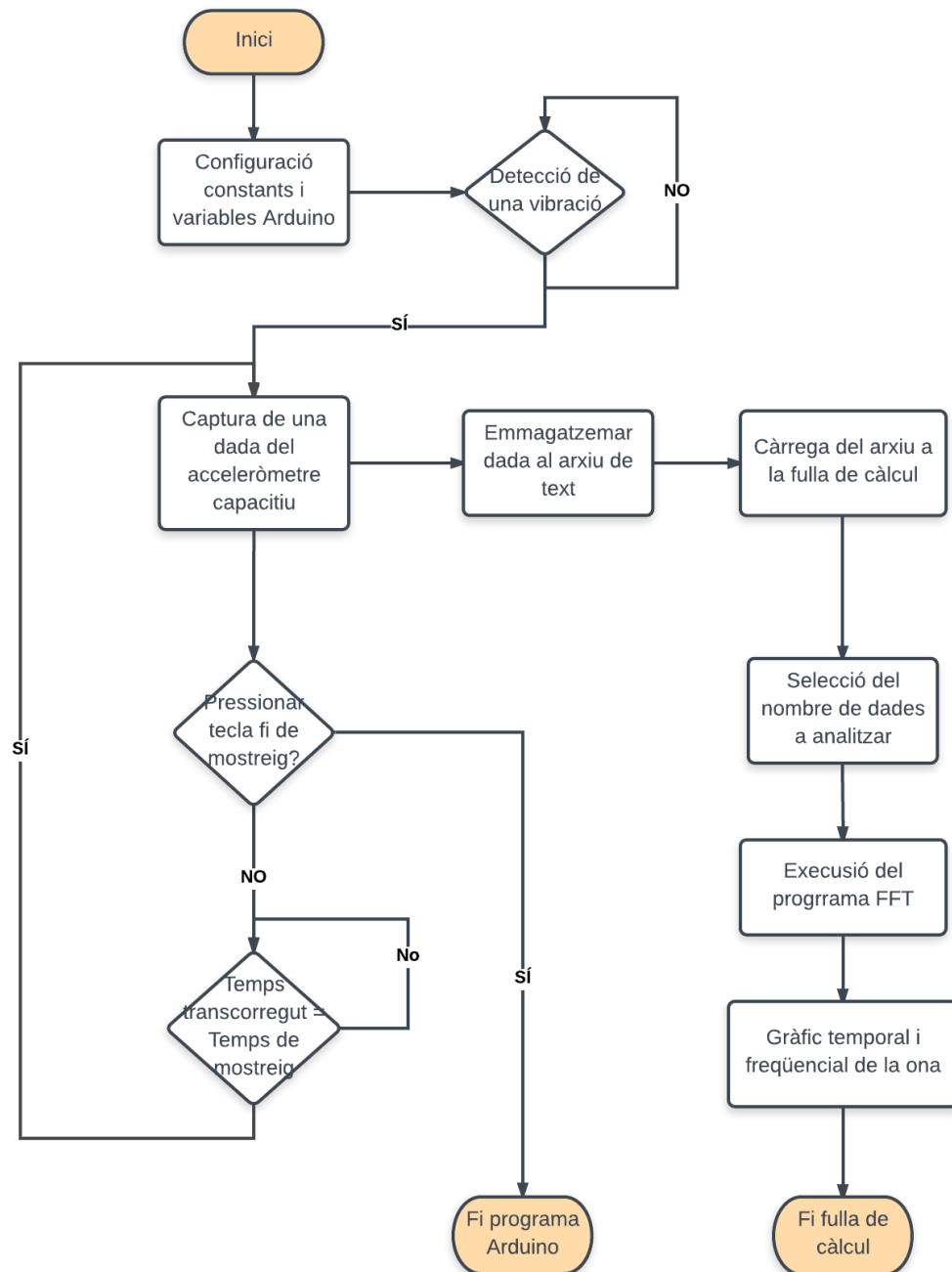


Figura 15: Diagrama de funcionament del codi del dispositiu de mesura de vibracions

3.6. Validació i calibració del dispositiu

Un cop definit el sistema i desenvolupat el dispositiu, és necessari comprovar el seu correcte funcionament. La principal preocupació era veure si el sistema de mesura era prou repetitiu tant en l'estudi temporal com en l'espectre freqüencial. S'ha utilitzat un regle de 15 mm de longitud lliure i fixat per l'extrem, del qual es coneixia el valor de la freqüència natural gracies al previ estudi del sistema amb una eina professional de mesura de vibracions òptic. El valor d'aquesta freqüència és 6,5 Hz. Mantenint sempre igual la variable de longitud, s'han modificat en diferents tests la posició de l'acceleròmetre sobre la superfície lliure del regle i la força que iniciava la vibració. En tots els tests s'han obtingut els mateixos resultats que es poden observar en el gràfics que es mostren a continuació.

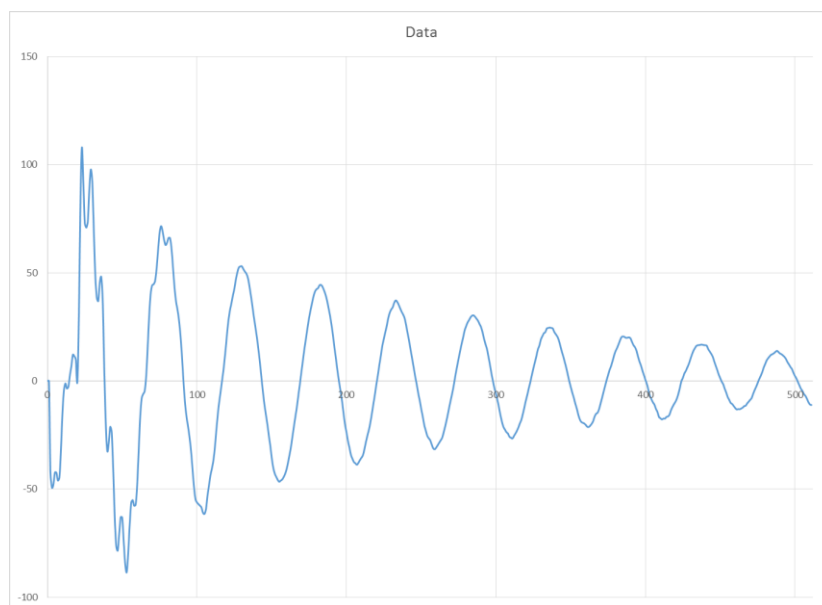


Figura 16: Gràfic temporal d'una vibració lliure d'un regle de 15 cm de longitud

A la figura 16, es pot veure una ona amb un comportament periòdic i esmorteït, ja que l'amplitud de la ona va disminuint progressivament. El més important en aquest gràfic és que no apareix soroll a l'ona, degut a que el moviment del regle és en un sol eix i no hi ha altres elements que intervinguin. Aquesta ona no mostra cap distorsió degut al soroll extern, això indica que l'acceleròmetre és molt robust al soroll extern i, per tant, el soroll que aparegui en posteriors anàlisis es deuran únicament al sistema mecànic analitzat.

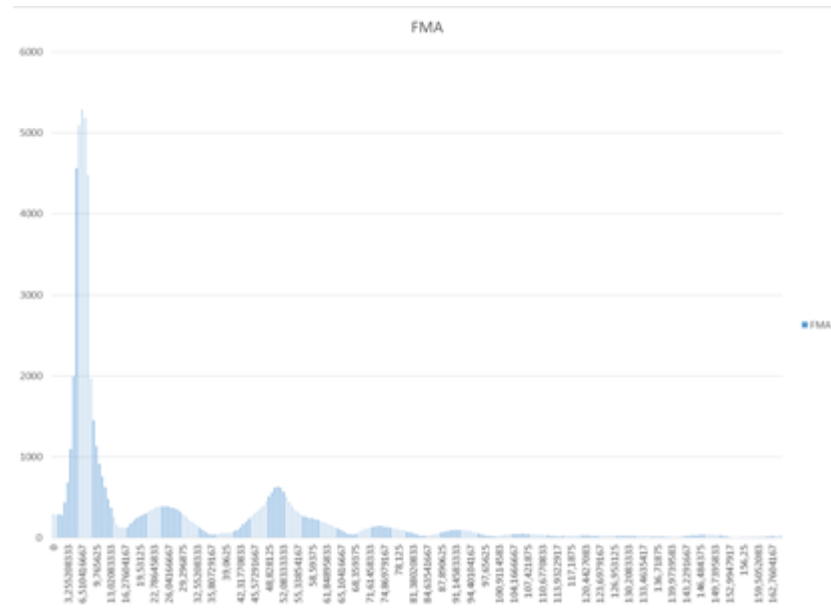


Figura 17: Gràfic freqüencial d'una vibració lliure d'un regle de 15 cm de longitud

La figura 17 mostra el valor de les freqüències fonamentals i dels seu harmònics. S'observa clarament que la freqüència fonamental del sistema regle és de 6,51 Hz. La repetibilitat mostrada en els tests demostra que aquest acceleròmetre és robust a la posició de l'acceleròmetre i a l'excitació inicial del sistema a analitzar. S'ha negligit l'efecte de la massa, com s'ha comentat durant la selecció de l'acceleròmetre, perquè és molt petita i era un requeriment bàsic. Per arribar a aquesta conclusió, s'ha realitzat un estudi estadístic de les dades (Taula 3) de freqüència obtingudes durant els tests. S'ha calculat la mitjana amb un nivell de confiança del 99% (Taula 4), tenint en compte una distribució de mostres T-Student. El resultat obtingut ha estat un interval de $6,51 \pm 0,0597$.

| Mostres | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Freqüència fonamental [Hz] | 6,57 | 6,48 | 6,41 | 6,56 | 6,48 | 6,55 | 6,49 | 6,41 | 6,60 | 6,58 |

Taula 4: Taula de mostreig freqüencial del regle

| Mitjana | Desviació estàndard | Interval de confiança | Alpha |
|---------|---------------------|-----------------------|-------|
| 6,51 | 0,0625 | 0,0597 | 0,01 |

Taula 5: Valors estadístics de la distribució de les mostres

Com podem veure, el rang és molt petit, concretament menys d'una dècima de variació en el pitjor cas, fet que no representa una variació significativa en l'estudi freqüencial d'un sistema mecànic. Estudiant els quartils de les dades obtingudes dels diferents test de vibració del regle, s'ha obtingut el següent gràfic on podem veure que la zona de més probabilitat és la de la caixa i amb un rang d'aproximadament una dècima i per l'altre costat, el rang total és, aproximadament, de dues dècimes. En resum, es disposa d'un sistema molt repetitiu en aquells sistemes que també ho són.

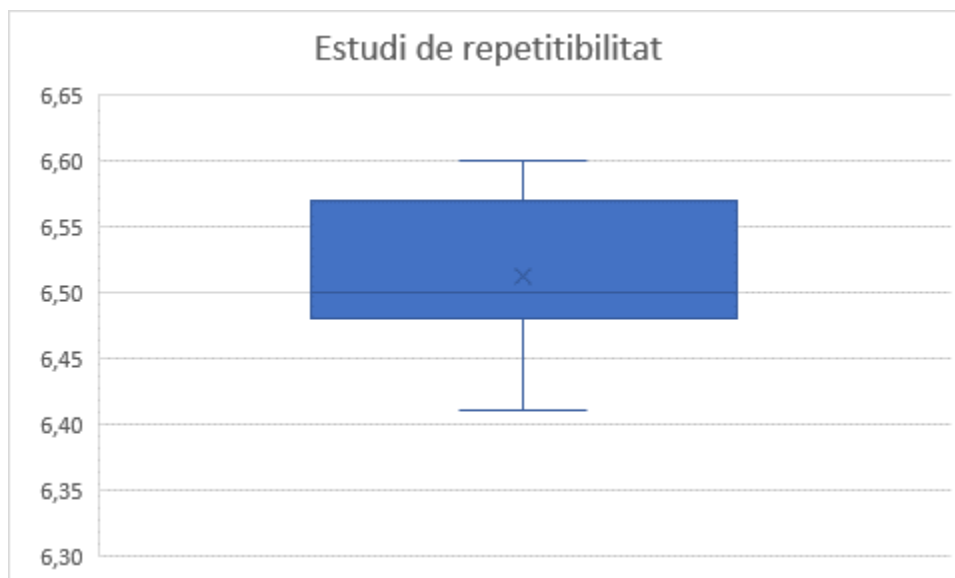


Figura 18: Diagrama de blocs amb els quartils de les mostres

Un cop vist que l'acceleròmetre i l'aplicació de postprocès de les dades és robust i no genera fluctuacions en la captura i anàlisi de dades, es procedeix a demostrar que el valor de la freqüència principal del sistema analitzat és el real i, per tant, coincideix amb el valor mostrat pels sistemes de mesura professionals. En aquest test s'utilitza un aparell electrònic per mesurar tensions de corretges de distribució, per tal de comparar el valor obtingut per l'acceleròmetre de la freqüència d'oscil·lació d'una corretja a una tensió aproximada de 400 N.

Utilitzant un dispositiu professional de mesura de freqüències fonamentals de vibració de corretges de motors d'automòbils, s'ha mesurat un tros de corretja constant de 3,5 m de branca tensat mitjançant un tensor elàstic, obtenint així un valor de freqüència natural de 4,6 Hz. Per altra banda, calculant el valor de freqüència d'oscil·lació mecànica de la corretja amb l'ajuda del dispositiu dissenyat amb l'acceleròmetre capacitiu, s'obté el mateix resultat, 4,64 Hz (Figura 19). Això permet veure que els valors de freqüència que s'obtenen amb aquest dispositiu són vàlids i reals, i amb millor resolució que el professional, tot i que les

prestacions de l'acceleròmetre són les que s'han esmentat a l'inici del projecte.

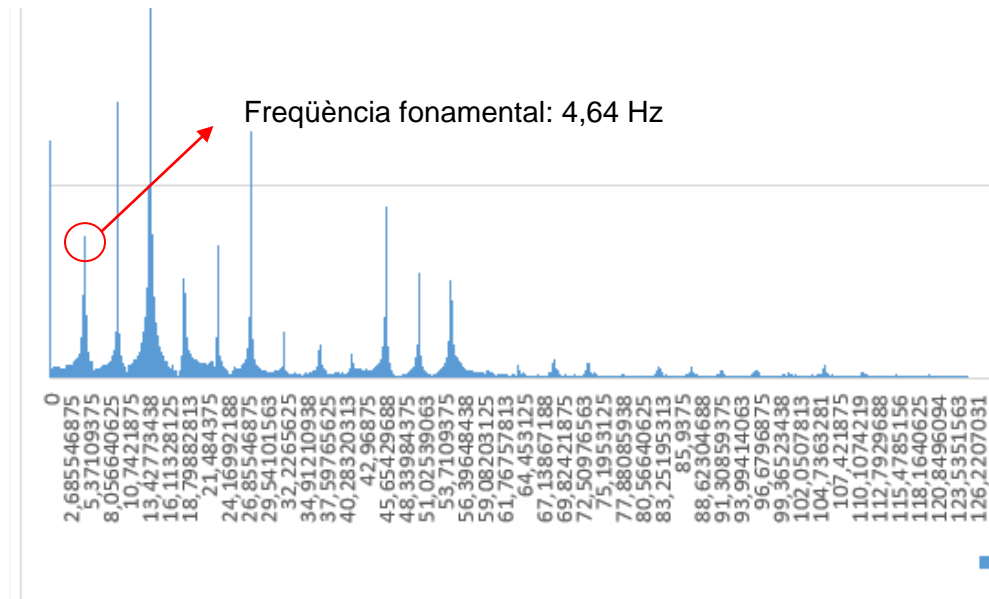


Figura 19: Diagrama freqüencial de la vibració d'una corretja dentada

El valor del primer pic és el valor de la freqüència fonamental del sistema, tot i que no és el pic amb major valor d'amplitud. Això es deu a la presència d'harmònics per la forma del senyal d'excitació (en aquest cas excitació manual). Els harmònics són múltiples del valor de freqüència fonamental i formen part de la vibració mecànica. Tot i això, per caracteritzar la tensió de la corretja només és rellevant la freqüència fonamental del sistema.

4. Aplicació en un cas pràctic

Aquest dispositiu s'ha utilitzat en un cas pràctic, del qual s'han obtingut bons resultats i s'ha solucionat un problema urgent. El problema apareix quan un prototip d'una impressora de gran format de 4 metres de longitud mostra símptomes de vibracions no desitjades en el moviment del carro. El sistema mecànic a estudiar esquematitzat es pot observar a la següent figura.

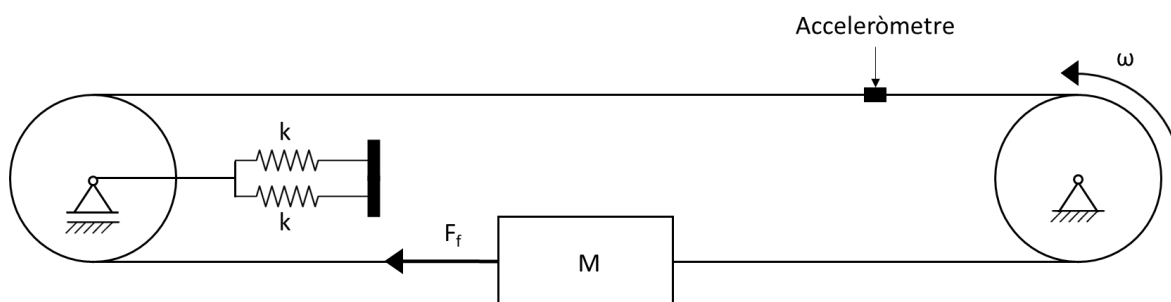


Figura 20: Esquema mecànic del funcionament del tensor d'una impressora HP Làtex 3500

Principalment el sistema està compost de la massa (el carro), que està impulsada a través d'una corretja dentada que es mou gràcies a un motor connectat a la politja dentada de la dreta del diagrama. Per altra banda, per no provocar un esforç tallant sobre l'eix del motor i disminuir el cicle de vida d'aquest, l'altre roda dentada està unida a la referència mitjançant dues molles elàstiques en paral·lel amb un valor de constant elàstica k .



Figura 21: Prototip del tensor amb problemes de vibracions mecàniques

Com es pot observar a la figura, no apareix cap element esmorteïdor, a part de l'elasticitat de la pròpia corretja dentada degut a la seva histèresi i la força de fricció F_f entre el carro i la guia per on es mou. L'esmorteïment provocat per aquests dos elements és un esmorteïment petit que no és suficient. En aquest esquema s'han negligit les resistències passives en els rodaments entre el motor i la roda dentada, que són els que ajuden en l'esmorteïment del sistema. Això provoca que quan el sistema entra en ressonància, el factor d'amplificació és tant gran que el sistema es torna inestable.

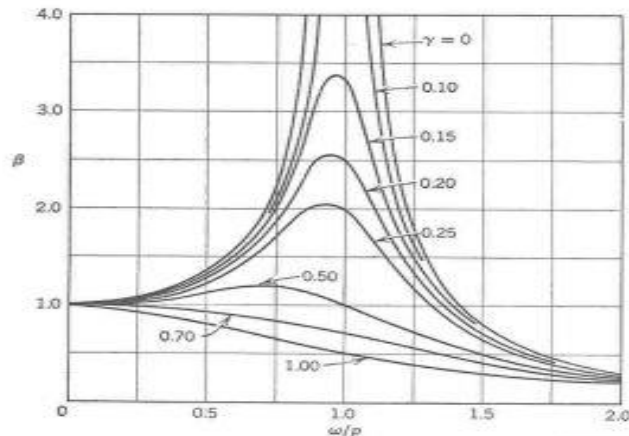


Figura 22: Diagrama del factor d'amplificació d'una vibració en funció de la freqüència principal de l'ona [18]

El problema és degut principalment al controlador PID del motor perquè té molt poc marge d'error. Per aquest motiu, el conjunt carro, corretja i motor es posa a vibrar en ressonància a la freqüència fonamental del moviment del carro, augmentant la vibració del sistema fins aturar la màquina. L'aturada de la màquina és un dels problemes més crítics en la impressió industrial ja que suposa una pèrdua directe de beneficis pels clients. En aquest cas, com es necessitava una resposta urgent, el primer que es va fer va ser establir una estratègia amb una etapa inicial i una altre a posteriori:

- Etapa 1: Buscar l'origen del problema, el que s'anomena *root cause*.
- Etapa 2: Donar una solució que eliminés el problema de les vibracions de forma urgent però fiable i robusta.

A partir d'aquí es va buscar una solució, una per solucionar el problema però sense canviar les condicions de funcionament (tensió, constant de la molla, tipus de motor, dimensions de la roda dentada, etc). Es van proposar tres solucions diferents. La primera, canviar les condicions de servo del motor, modificant les constants del

controlador. El problema és que per dur a terme aquesta solució era necessari ajustar les condicions de funcionament de la impressora com poden ser la velocitat, la posició del carro, les acceleracions d'inici i frenada, el desgast del sistema, etc. Al no disposar de temps, aquesta solució es va descartar a l'inici del projecte. Les altres dues solucions consistien en afegir un element esmorteïdor que permetés al sistema que, tot i entrar en ressonància, es reduís l'efecte del factor d'amplificació i, així, tenir un sistema més estable. Aquest element permetia passar d'un sistema mecànic essencialment MK a un sistema MKC (Figura 23).

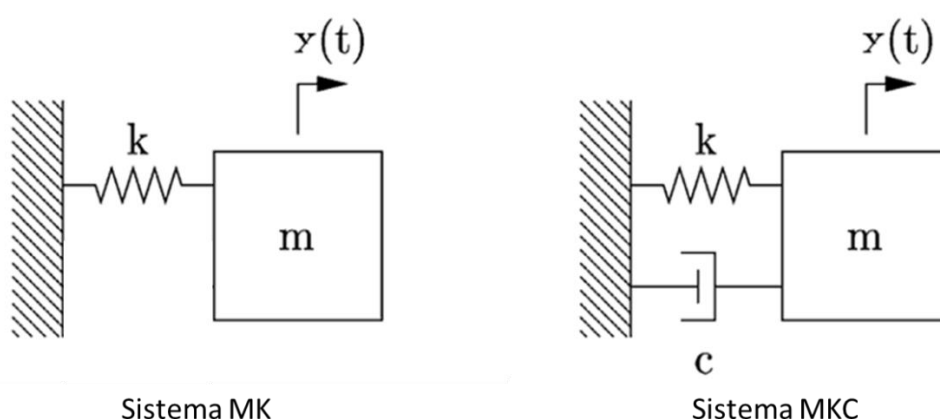


Figura 23: Comparació d'un sistema de vibració MK i un sistema de vibració MKC

Per incloure aquest element C en el sistema, es van proposar dues maneres. La primera es basava en instal·lar un element pur d'esmoreïment com un esmorteïdor pneumàtic (figura 24). El problema és que el cost és elevat d'aproximadament 30 € i és molt difícil d'instal·lar en el sistema ja que es tracta d'una peça predissenyada.



Figura 24: Cilindre pneumàtic que funciona com a esmorteïdor [17]

La manera més senzilla i escollida, degut a la urgència, era afegir una goma a la part de subjecció del sistema, en paral·lel a les molles. Aquesta solució era més barata que l'anterior aproximadament 4 €. Es van fer els càlculs pertinents de quin tipus de goma era la millor per solucionar el problema, el gruix i el punt d'aplicació. La solució proposada per l'equip va ser afegir un petit component molt fàcil de muntar que consistia en una goma, en forma de tub, cargolada al voltant d'una espiga muntada en el suport de les molles, utilitzat prèviament per tensar la corretja. L'element utilitzat està format per una goma molt tova per evitar modificar el comportament del sistema més enllà d'afegir una constant C (figura 25). D'aquesta manera, no cal refer els càlculs utilitzats pel dimensionat de tot el sistema carro - tensor - motor.

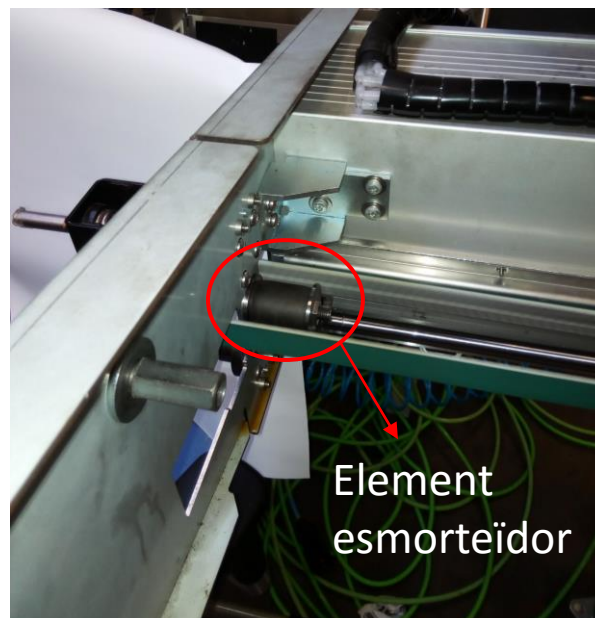


Figura 25: Solució proposada per els enginyers com a element esmorteïdor del sistema

A la part de validació del nou element (però no menys important) és on apareix la importància del dispositiu de mesura de vibracions ja que al col·locar la goma és important que la tensió de la corretja no canviï. El sistema està validat i dimensionat per una tensió de corretja concreta i per evitar haver de refer els càlculs i els test de vida de tot el conjunt, el més senzill era mantenir les mateixes condicions de funcionament inicials del prototip. A l'afegir l'element esmorteïdor, per aconseguir que actuï aportant la funcionalitat l'amplificació de la vibració degut a l'efecte de la ressonància, és necessari aplicar una petita precàrrega sobre la goma. Per assegurar que el valor de tensió de la corretja no variï,

s'ha hagut de reduir la longitud de la corretja de manera que aquesta variació de longitud genera un augment de la força realitzada per les molles, $F = k \cdot \Delta x$, compensant així l'efecte de la precàrrega de la goma. Per decidir quina és aquesta longitud s'ha utilitzat el dispositiu de mesura de vibracions per realitzar els tests. D'aquesta manera s'ha obtingut una configuració de longitud de la corretja i compressió de la goma que permetien al sistema superar totes les proves de funcionament utilitzant el mètode de prova i error. Els resultats obtinguts en els tests han estat els de la taula següent.

| Variació de la longitud de la corretja [mm] | Freqüència fonamental [Hz] sense esmorteïdor | Freqüència fonamental [Hz] amb esmorteïdor |
|---|--|--|
| + 20 | - | 5,12 |
| + 16 | - | 5,03 |
| + 12 | - | 4,95 |
| + 8 | 4,98 | 4,68 |
| + 4 | 4,89 | 4,49 |
| + 0 | 4.65 | 4,47 |
| - 4 | 4,48 | 4,43 |

Taula 6: Taula de resultats en mesurar la tensió de la corretja per diferents tensions/longituds

Amb aquests resultats obtinguts del dispositiu, es pot determinar finalment quina és la nova configuració on s'ha de col·locar el sistema goma, corretja, carro, motor. Al tractar-se d'una corretja dentada, el valor de la longitud que es pot modificar és múltiple a la distància entre dents de la corretja, 4 mm. Com s'aprecia a la taula anterior, la configuració on la freqüència fonamental associada a la tensió de la corretja coincideix amb la freqüència del sistema abans d'afegir l'efecte esmorteïdor (4,65 Hz) , és la longitud adequada per al correcte funcionament de la impressora amb el nou element. A més, afegint l'element esmorteïdor es pot veure com s'aconsegueix reduir l'amplificació de la vibració provocat per la ressonància.

5. Pressupost

5.1. Pressupost de recursos humans

S'ha definit una taula on es contemplen les despeses de recursos humans referents als costos generats per la participació de les persones en aquest projecte. Tenint en compte que la duració del projecte ha estat de aproximadament de 6 mesos.

| Cost de recursos humans | | | |
|---------------------------------------|------------|------------|-------------|
| Descripció | Temps [h] | Preu [€/h] | Cost [€] |
| 1 Enginyer en pràctiques | 300 | 7 | 2100 |
| Documentació i aprenentatge d'Arduino | 60 | | |
| Desenvolupament de la aplicació | 80 | | |
| Tests de robustesa | 60 | | |
| Disseny del prototip | 20 | | |
| Solució del cas pràctic | 80 | | |
| Cost de S.S. estudiant en pràctiques | | | |
| 1 Enginyer superior | 30 | 30 | 900 |
| Cost de S.S. enginyer superior(33%) | | | 297 |
| Total | | | 3297 |

Taula 7: Pressupost dels recursos humans del projecte.

5.2. Pressupost de recursos materials

En aquest apartat es desglossarà les despeses del recursos materials utilitzats durant el projecte, dividint-los en dues categories diferents, les llicències de software i els components físics utilitzats tant per crear la aplicació com per construir el prototip del projecte. Per avaluar les despeses dels elements que disposen d'una amortització més llarga que el temps del projecte, s'ha considerat només el cost dels 6 mesos que ha durat el projecte.

| Cost de recursos materials | | | | | |
|---------------------------------|------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------|------------------------|
| Descripció | Cost inicial [€] | Temps d'amortització [anys] | Amortització anual [€/any] | Duració [anys] | Amortització total [€] |
| Software | | | | | 10 |
| Llicència Arduino | 0 | 4 | 0 | 0,25 | 0 |
| Llicència Microsoft Office 2013 | 160 | 4 | 40 | 0,25 | 10 |
| Hardware | | | | | 113 |
| Acceleròmetre | 3 | | | | 3 |
| Ordinador portàtil | 1000 | 5 | 200 | 0,25 | 50 |
| Arduino | 15 | | | | 15 |
| Cablejat 2 m | 5 | | | | 5 |
| Peça de SLS | 40 | | | | 40 |
| Total | | | | | 123 |

Taula 8: Pressupost dels recursos materials del projecte.

5.3. Pressupost total del projecte

Finalment, un cop estudiats quines són les despeses particulars i detallades del projecte a la següent taula, es fa un balanç final del projecte, tenint en compte els impostos que el contractista ha d'abonar en la realització de qualsevol projecte. Aquests impostos depenen del lloc de facturació, en aquest cas España.

| Cost de recursos humans | |
|----------------------------|-------------|
| Descripció | Cost [€] |
| Cost de recursos humans | 3297 |
| Cost de recursos materials | 123 |
| PRESSUPOST TOTAL | 3420 |

Taula 9: Pressupost total del projecte

En resum, el pressupost total del projecte és d'un valor de **3420 €**.

6. Impacte mediambiental

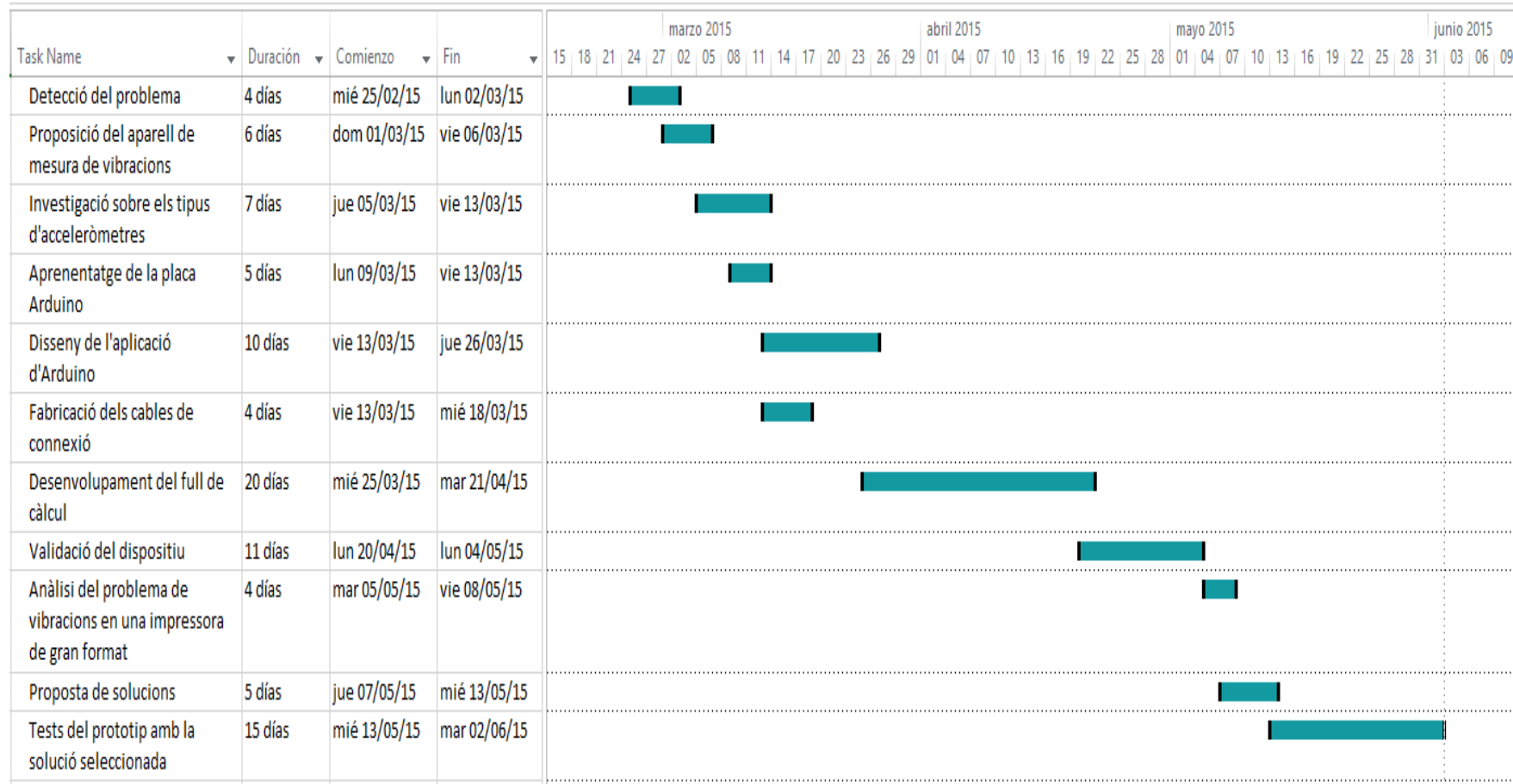
Al tractar-se d'un projecte centrat en una aplicació informàtica i posterior implementació, l'impacte mediambiental és escàs i es podria considerar gairebé nul. El consum energètic més característic és el *setup* utilitzat en els test de proves de vibració. A part d'això, no hi ha cap altre consum energètic afegit més enllà d'unes hores d'ordinador i l'Arduino encès per realitzar el test.

El *setup* de proves té un consum aproximat d'entre 200-250 W d'energia elèctrica. També hi ha altres dispositius com l'Arduino o l'ordinador que s'ha estat utilitzant durant la programació del dispositiu i per extreure les dades en el procés de test. Aquests dos dispositius tenen un consum energètic de 3 i 100 Watts, respectivament. Com es pot veure, el consum d'aquests dispositiu és menyspreable davant el consum del *setup*.

Suposant que utilitzar un Watt d'energia elèctrica suposa una emissió de 0,7 grams de CO₂ l'hora, resulta que l'impacte mediambiental en unitats de gas contaminant del projecte és del voltant de 245 g de CO₂ per hora. Considerant que un cotxe genera aproximadament 100 g/km i que la mitjana de velocitat és de 50 km/h, un cotxe arriba a consumir 5000 g de CO₂ per hora. En comparació, es pot apreciar que l'impacte mediambiental del projecte és relativament petit.

Per tant, es pot concloure que a nivell mediambiental aquest dispositiu no suposa cap avantatge, però tampoc implica un consum afegit. Només s'ha necessitat energia durant els tests del dispositiu per determinar la nova solució al problema de vibracions del carro de la impressora.

7. Planificació



Conclusions

En aquest projecte es realitza l'estudi i desenvolupament d'una eina per la mesura de vibracions mecàniques amb una utilitat concreta dins de l'equip d'enginyers mecànics a l'empresa HP Inc. L'objectiu del projecte és dissenyar, desenvolupar, construir i validar el funcionament del dispositiu per al moviment en un sol eix de vibració i amb un model de moviment harmònic simple o compost.

L'inici del projecte es veu la necessitat de desenvolupar el dispositiu degut a que en tota l'empresa només es disposa d'un dispositiu d'aquestes característiques i el temps que es tarda en obtenir resultats és d'aproximadament 1 o 2 setmanes. És per això que es decideix desenvolupar aquesta eina.

A partir d'aquí s'inicia l'estudi de les diferents opcions de hardware per desenvolupar el projecte tenint en compte sempre els recursos que ofereix l'empresa i el cost de les peces. Un cop decidit el hardware es dissenya tot el programari. Des del programa, encarregat de captar les dades amb codi Arduino, com l'encarregat del postprocés de les dades per obtenir el gràfic temporal i freqüencial de la vibració mecànica.

Finalment, es realitza una validació del dispositiu, mitjançant estudis de comparació amb altres dispositius de mesura i estudis estadístics de robustesa.

Per veure la utilitat del dispositiu dins de l'empresa, s'exposa un cas real en el que s'utilitza l'eina per resoldre una part del projecte. On l'acceleròmetre permet calibrar la tensió d'una corretja que té un moviment molt semblant al d'un moviment harmònic compost.

Durant el projecte s'ha pogut observar que moltes de les mesures que es realitzen en el món industrial no necessiten de eines professionals. Amb la millora tecnològica dels últims anys i l'aparició de plataformes *open source* molt intuïtives, es poden aconseguir dispositius de mesura molt barats i amb la suficient precisió per utilitzar en molts projectes. En el món industrial molts cops es prioritza la rapidesa davant de la precisió i per tant dispositius com el que s'ha desenvolupat en aquest projecte poden oferir molt valor afegit. Tot i això en casos en el que es necessiti molta precisió, no hi haurà altre opció que recórrer a dispositius professionals.

Agraïments

S'agraeix al tutor de l'empresa, Raimon Castells, pel suport ofert durant el procés d'aquest projecte. Sobretot destacar la seva disponibilitat i interès mostrat per a guiar-me, aconsellar-me i corregir-me sempre que ho he necessitat. També agrair al professor del departament de mecànica de l'escola, Jordi Martínez Miralles, la seva participació i implicació en el projecte tot i tractar-se de un projecte extern a l'escola.

Finalment agrair a la empresa HP Inc. per a la oportunitat de tenir l'experiència gràcies a la beca de pràctiques i a l'ajuda donada durant el projecte sobretot als inicis del projecte, per pensar la idea, i al final del projecte durant el prototipatge, per l'ajuda de coneixements i en els recursos materials.

Bibliografía

- [1] J. G. Webster, Wiley InterScience (Online service), y John Wiley & Sons., *Wiley encyclopedia of electrical and electronics engineering*. John Wiley, 1999.
- [2] «Cómo Realizar Mediciones de Sonido y Vibración - National Instruments». [En línea]. Disponible en: <http://www.ni.com/tutorial/7110/es/>. [Accedido: 06-sep-2017].
- [3] «Measuring Vibration with Accelerometers - National Instruments». [En línea]. Disponible en: <http://www.ni.com/white-paper/3807/en/>. [Accedido: 18-ago-2017].
- [4] «El fundamento físico del acelerómetro | Átomos y bits». [En línea]. Disponible en: <http://atomosybits.com/la-fisica-tras-el-acelerometro/>. [Accedido: 18-ago-2017].
- [5] «Accelerometers Information | Engineering360». [En línea]. Disponible en: http://www.globalspec.com/learnmore/sensors_transducers_detectors/acceleration_vibration_sensing/accelerometers. [Accedido: 06-sep-2017].
- [6] «Sensores de presión piezoresistivos». [En línea]. Disponible en: http://www.sapiensman.com/tecnoficio/electricidad/instrumentacion_industrial12.php. [Accedido: 18-ago-2017].
- [7] «:: IPCI »: [En línea]. Disponible en: http://81.161.252.57/ipci/courses/technology/inde_269.htm. [Accedido: 06-sep-2017].
- [8] «Product Roundup – Hall-Effect Sensors | Arrow.com». [En línea]. Disponible en: <https://www.arrow.com/en/research-and-events/articles/product-roundup-hall-effect-sensors>. [Accedido: 19-ago-2017].
- [9] «SKF Belt Frequency Meter user manual User manual box edition».
- [10] «Vibrometro | PCE Instruments». [En línea]. Disponible en: https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/vibrometro-kat_70584_1.htm. [Accedido: 11-sep-2017].
- [11] «Silicon Sensing | MEMS Accelerometers». [En línea]. Disponible en: <http://www.siliconsensing.com/technology/mems-accelerometers/>. [Accedido: 11-sep-2017].
- [12] A. Devices, «ADXL345 (Rev. 0)».
- [13] «El bus I2C | Tutoriales Arduino». [En línea]. Disponible en: <http://www.prometec.net/bus-i2c/>. [Accedido: 25-ago-2017].
- [14] S. Analógica, S. En, y T. Discreto, «Muestreo digital».
- [15] «• Sistemas operativos: cuota de mercado mundial 2017 | Estadística». [En línea]. Disponible en: <https://es.statista.com/estadisticas/576870/cuota-de-mercado-mundial-de-los-sistemas-operativos/>. [Accedido: 11-sep-2017].

- [16] P. University, «Fast Fourier Transform (FFT) Algorithm», *Compute*, pp. 74-84.
- [17] «Cilindro neumático / de vástago / de doble efecto / redondo - DSNU - Festo». [En línea]. Disponible en: <http://www.directindustry.es/prod/festo/product-4735-120580.html>. [Accedido: 03-sep-2017].
- [18] «INDISA On line». [En línea]. Disponible en: <http://www.indisa.com/indisaonline/anteriores/23.htm>. [Accedido: 30-ago-2017].