



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

Escola Superior d'Enginyeries Industrial,  
Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa

# Projecte de desenvolupament, verificació i aplicació d'un sistema de mesura de vibracions multicanal de baix cost

Document:

Memòria

Autor/Autora:

Albert Miras Rodríguez

Director/Directora - Codirector/Codirectora:

Oriol Casamor Martinell / Pierre Antoine Nessim  
Huguenet

Titulació:

Grau en Enginyeria en Tecnologies Aeroespacials

Convocatòria:

Primavera, 2022 – Tardor, 2022

TREBALL DE FI D'ESTUDIS

## **Resum**

En l'actualitat la capacitat de mesurar, controlar i analitzar les vibracions és quelcom essencial per a moltes empreses i indústries en el sector de la recerca i desenvolupament en l'àmbit estructural, ja sigui per a possibles aplicacions en grans estructures o per ser utilitzat en àmbits més transversals com en el disseny de peces per a l'aplicació en avions, satèl·lits, etc. Els mètodes comercials ja existents adequats per a crear un sistema de mesura de vibracions precís acostumen a suposar una gran despesa per les empreses i no sempre es troben a l'abast de tothom degut al cost elevat que comporta l'adquisició dels elements que el conformen.

El present treball pretén identificar la viabilitat de realitzar un mètode alternatiu per a la mesura de vibracions i continuar un projecte de desenvolupament d'un sistema de mesura de vibracions multicanal de baix cost que permeti la caracterització modal.

## **Resumen**

En la actualidad, la capacidad de medir, controlar y analizar las vibraciones es algo esencial para muchas empresas e industrias en el sector de la investigación y desarrollo en el ámbito estructural, ya sea para posibles aplicaciones en grandes estructuras o para ser utilizado en ámbitos más transversales como en el diseño de piezas para su aplicación en aviones, satélites, etc. Los métodos comerciales ya existentes adecuados para crear un sistema de medida de vibraciones preciso suelen suponer un gran gasto para las empresas y no siempre se encuentran al alcance de todos debido al coste elevado que comporta la adquisición de los elementos que lo conforman.

El presente trabajo pretende identificar la viabilidad de realizar un método alternativo para la medida de vibraciones y continuar un proyecto de desarrollo de un sistema de medida de vibraciones multicanal de bajo coste que permita la caracterización modal.

### **Abstract**

In this day and age, the ability to measure, control and analyze vibrations is essential for many companies and industries which do research and development in the structural field, either for possible applications in large structures or to be used in more transversal areas such as the design of parts for application in airplanes, satellites, etc. Existing commercial methods suitable for creating an accurate vibration measurement system are often a great expense for companies and are not always available to everyone due to the high cost involved in acquiring the elements that make it up.

The present work aims to identify the feasibility of performing an alternative method for vibration measurement and to continue a project, already started, of developing a low-cost multichannel vibration measurement system that allows modal characterization.



# Índex

<b>Índex de taules</b>	<b>3</b>
<b>Índex de figures</b>	<b>4</b>
<b>1 Introducció</b>	<b>6</b>
1.1 Objecte	6
1.2 Abast	7
1.3 Requisits	8
1.4 Justificació	9
<b>2 Antecedents i estat de l'art</b>	<b>10</b>
2.1 Vibracions i sistemes de mesura	10
2.1.1 Acceleròmetres com a sistemes de mesura de vibracions	14
2.2 Projecte inicial	16
<b>3 Desenvolupament d'un sistema multicanal</b>	<b>18</b>
3.1 Revisió de l'estat inicial del sistema i ampliació de software per a nombre arbitrari d'acceleròmetres	18
3.2 Sincronització dels acceleròmetres	24
3.2.1 Correlació de senyals	25
3.2.2 Aplicació de la correlació creuada	26
3.3 Algoritme de sincronització	28
3.3.1 Algoritme de sincronització: Procediment 1	28
3.3.2 Algoritme de sincronització: Procediment 1 – Resultats	33
3.3.3 Algoritme de sincronització: Procediment 2	36
3.3.4 Algoritme de sincronització: Procediment 2 – Resultats	38
3.3.5 Elecció de l'algoritme i verificació del funcionament	41
3.4 Post processat de les dades per a caracterització modal	45
3.4.1 “ <i>Modal Assurance Criterion</i> ” (MAC): Concepte i aplicació	45
3.4.2 Desenvolupament del codi de post-processat per a caracterització modal	46
3.4.3 Verificació del sistema per mitjà de “ <i>Modal Assurance Criterion</i> ” (MAC)	52

3.4.4	Anàlisi dels resultats de la caracterització modal en un cas pràctic . . . . .	53
3.5	Interfície d'usuari . . . . .	54
3.5.1	Terminal de control de l'usuari . . . . .	54
3.5.2	Diàlegs i sistemes de control per a la sincronització i el post-processat . . .	55
<b>4</b>	<b>Campanya de verificació</b>	<b>57</b>
4.1	Sistema de mesura comercial de referència . . . . .	57
4.2	Estructura a estudi i set-up per a la verificació . . . . .	59
4.3	Tractament de les dades, validació i comparació de resultats . . . . .	62
<b>5</b>	<b>Caracterització modal d'un sistema mecànic</b>	<b>68</b>
5.1	Adaptació del codi de post-procés per al sistema mecànic sota estudi . . . . .	68
5.2	Resultats de la caracterització modal . . . . .	70
<b>6</b>	<b>Anàlisi i valoració de les implicacions ambientals i socials</b>	<b>72</b>
<b>7</b>	<b>Conclusions</b>	<b>73</b>
<b>8</b>	<b>Treball futur</b>	<b>75</b>
<b>9</b>	<b>Pressupost</b>	<b>76</b>
	<b>Referències</b>	<b>77</b>

## Índex de taules

1	Retards obtinguts segons el tipus de connexió dels acceleròmetres a la terminal . . .	23
2	Taula comparativa de freqüències de ressonància . . . . .	44
3	Taula comparativa de les 3 primeres freqüències obtingudes en diversos tests . . .	66
4	Pressupost segons principals blocs de treball i costos associats . . . . .	76

## Índex de figures

1	Comparativa de freqüències de vibració per a tres casos exemple. [1] . . . . .	11
2	Sensors de mesura de vibracions . . . . .	12
3	Esquema de l'estructura del sistema de mesura de vibracions . . . . .	17
4	Eliminació del senyal virtual en la interfície d'usuari . . . . .	19
5	Identificació d'acceleròmetres . . . . .	20
6	Gràfics de les mesures de tots els eixos de 2 acceleròmetres connectats simultà- niament . . . . .	21
7	Espai de la interfície d'usuari que permet la selecció d'eixos dels acceleròmetres .	21
8	Gràfics de les mesures dels eixos $Z$ de 2 acceleròmetres connectats simultàniament	22
9	Valors possibles de <i>Sample Size</i> en <i>FFT Settings</i> . . . . .	24
10	Equacions correlació [2] . . . . .	25
11	Vectors utilitzats per a l'explicació de <i>np.correlate</i> . . . . .	26
12	Procés de correlació creuada. Cas amb factor de correlació màxim . . . . .	26
13	Valors de correlació obtinguts pel cas exemple . . . . .	27
14	Senyals inicials rebuts dels acceleròmetres (dades fictícies) . . . . .	29
15	Gràfics després de la correcció en freqüència . . . . .	30
16	Gràfics després de la correcció en freqüència . . . . .	30
17	Missatge amb les dades de sincronització . . . . .	31
18	Comparativa aplicació sincronització en un cas real . . . . .	32
19	"Set-up" utilitzat pel cas pràctic amb una biga en forma de L . . . . .	33
20	Cisell utilitzat per generar vibracions en la biga . . . . .	34
21	Comparativa gràfics transformades de <i>Fourier</i> cas fictici i real . . . . .	36
22	Senyals inicials rebuts dels acceleròmetres (dades fictícies) . . . . .	37
23	Senyals corregits en temps i freqüència . . . . .	37
24	Valors d'error obtinguts . . . . .	38
25	Gràfics en la terminal abans d'aplicar la sincronització en les dades de la biga . .	39
26	Gràfics en la terminal després d'aplicar la sincronització en les dades de la biga .	39
27	Comparativa valors errors obtinguts en un cas fictici i real . . . . .	40
28	Biga de secció quadrada utilitzada pel procés de verificació . . . . .	41

29	Gràfics obtinguts en la terminal de control per a una mesura de vibracions amb la biga de secció quadrada . . . . .	42
30	Equació per a l'obtenció de la MAC donats 2 vectors $\{\varphi_A\}$ i $\{\varphi_X\}$ [3] . . . . .	45
31	Exemple esquemàtic de matriu MAC de 2 dimensions [3] . . . . .	46
32	Representació dels modes a partir dels valors teòrics . . . . .	47
33	Representació de la Transformada de <i>Fourier</i> per a la identificació de freqüències en el post-procés . . . . .	48
34	Representació temporal de l'acceleròmetre de referència amb el primer acceleròmetre a comparar . . . . .	48
35	Representació temporal de l'acceleròmetre de referència amb el segon acceleròmetre a comparar . . . . .	49
36	Forma del 1r mode i valors obtinguts experimentalment . . . . .	50
37	Forma del 2n mode i valors obtinguts experimentalment . . . . .	50
38	Forma del 3r mode i valors obtinguts experimentalment . . . . .	51
39	Forma del 4t mode i valors obtinguts experimentalment . . . . .	51
40	AUTOMAC obtinguda a partir dels valors teòrics . . . . .	52
41	Resultat de l'aplicació de la "Modal Assurance Criterion" . . . . .	52
42	Terminal del sistema multicanal . . . . .	55
43	Sistema de mesura de vibracions comercial . . . . .	58
44	Estructura utilitzada per a la campanya de verificació . . . . .	59
45	Set-up dels acceleròmetres sobre l'estructura sota estudi . . . . .	60
46	Tub utilitzat per a colpejar l'estructura en la campanya de verificació . . . . .	61
47	Gràfics dels temporals dels dos sistemes sobreposats . . . . .	63
48	Gràfics dels <i>Fouriers</i> dels dos sistemes . . . . .	64
49	Representació dels modes a partir de les dades dels acceleròmetres en 3D . . . . .	70
50	AUTOMAC obtinguda a partir dels valors dels sensors . . . . .	71
51	MAC comparativa entre els valors del sistema desenvolupat i el sistema comercial . . . . .	71

# 1 Introducció

## 1.1 Objecte

L'objecte d'estudi o finalitat de la realització del present treball final de grau pretén ser la continuació del projecte de desenvolupament d'un sistema de mesura de vibracions multicanal de baix cost. Es tracta de continuar amb el desenvolupament del projecte completant-lo amb la modificació i millora del codi original, junt amb la realització d'una campanya de verificació i l'execució d'una caracterització modal d'un sistema mecànic.

Aquest sistema multicanal pretén aportar una solució assequible en termes econòmics a la mesura de vibracions, donat que els aparells i sistemes existents són d'un alt cost i poden considerar-se no assequibles per a tots els públics.

A més del propi desenvolupament del sistema multicanal, es presenta una campanya de verificació per tal de demostrar l'eficàcia i assegurar així l'òptima utilitat del sistema.

En la línia de la verificació, l'objectiu final és aplicar el sistema complet de mesura per realitzar la caracterització modal d'un sistema mecànic existent.

## 1.2 Abast

L'abast del present treball es desglossa en els següents apartats:

- **Desenvolupament del sistema multicanal:**

El desenvolupament inclou tot el procés de treball relacionat amb el disseny i desenvolupament del sistema multicanal per al seu òptim funcionament i futura aplicació.

En el desenvolupament del sistema multicanal no s'inclou el disseny ni fabricació dels acceleròmetres, ni els seus contenidors, ni les plaques identificatives.

- Revisió de l'estat inicial del sistema: Donat que el treball parteix d'un sistema en previ desenvolupament es presenta una revisió de l'estat inicial.
- Software: El software desenvolupat ha de permetre l'ús d'un número arbitrari d'acceleròmetres i la sincronització de les dades rebudes dels acceleròmetres. Paral·lelament s'ha de desenvolupar un codi, inclòs en el principal o a part, que permeti el post procés de les dades per a la caracterització modal.
- Interfície d'usuari: La interfície d'usuari ha de permetre l'ús adequat del sistema, la correcta interpretació i salvat de les dades per a un posterior tractament.

- **Campanya de verificació:**

La campanya de verificació correspon a la correcta verificació del hardware, del firmware dels acceleròmetres utilitzats, de l'equip de mesura i del software d'adquisició mitjançant la comparativa amb un sistema comercial existent.

- **Caracterització modal:**

Com a tancament del treball realitzar la caracterització modal d'un sistema mecànic existent com a aplicació del sistema complet.

### 1.3 Requisites

El sistema multicanal un cop acabat ha de complir els següents requeriments per tal de satisfer l'objectiu del treball:

- S'ha de permetre l'ús simultani d'un nombre arbitrari d'acceleròmetres, o detectar el número màxim que pot arribar a connectar-se pel correcte funcionament del sistema.
- La interfície amb què es controla el programa ha de permetre mostrar les dades desitjades dels eixos dels acceleròmetres seleccionats i ocultar les dades que no interessin a l'usuari.
- Les dades rebudes per mitjà dels acceleròmetres han de poder obtenir-se sincronitzades.
- S'ha de poder obtenir els gràfics pertinents a la sincronització, per tal de poder conèixer el procés realitzat.
- Els resultats que s'obtinguin han de poder complir amb un cert nivell de fiabilitat respecte els obtinguts pel sistema comercial. En cas de no obtenir els resultats desitjats s'hauran d'analitzar les causes i motius per al no assoliment.

Les especificacions que marquen el desenvolupament del projecte i altres aspectes a contemplar són:

- Ús de Python, i Matlab de forma complementària, per a la programació del software, la implementació de l'algoritme de sincronització i tot el global de processos informàtics desenvolupats.



## 1.4 Justificació

La raó de ser d'aquest treball ve motivada pel fet que els sistemes de mesures de vibracions i caracteritzacions modals que es troben en el mercat acostumen a requerir d'una gran inversió de diners. És complicat que una empresa disposi de tot el sistema necessari pertinent per realitzar un estudi d'alta precisió per vibracions, ja que disposar de tots els aparells implica una gran inversió, la qual molts cops pot acabar sent desaprofitada al voler-se realitzar només un estudi en un projecte molt puntual. És per això que sempre acostumen a ser les mateixes empreses les que disposen de les eines necessàries que s'encarreguen de realitzar aquest tipus d'estudis.

Originalment aquest projecte es va iniciar quan el tutor del treball en el seu àmbit laboral va voler comprovar un estudi realitzat per una empresa externa en un projecte que estava realitzant. Va considerar que comprar tots els dispositius per realitzar aquest estudi era quelcom desproporcionat per la utilitat que podria arribar a tenir en un futur i que podria ser viable dissenyar un sistema de mesura de vibracions de baix cost.

Com que la motivació s'havia originat en el seu àmbit de treball, però no implicava una relació directe amb l'empresa el projecte es desenvolupa paral·lelament a aquesta, ja que aquesta tampoc requereix de la finalització del treball per a la seva utilització, però l'empresa es mostra oberta a col·laborar per tal de facilitar els estudis de verificació a realitzar.

## 2 Antecedents i estat de l'art

Per tal d'iniciar el desenvolupament del treball s'han de contemplar diversos aspectes. El present treball parteix d'un projecte ja iniciat, el qual es trobava en una fase inicial com ja s'ha comentat anteriorment, és per això que a continuació s'exposa l'origen d'aquest projecte per poder posar en antecedents tot el treball realitzat.

Per tal de poder complementar la informació provinent del projecte inicial es presenta una recerca en l'àmbit dels sistemes de mesura de vibracions multicanals, per poder tenir coneixements en certs aspectes que podran ser de rellevància al llarg del treball.

### 2.1 Vibracions i sistemes de mesura

Primerament, per poder assentar unes bases pel treball, cal entendre que són les vibracions.

Una vibració és l'oscil·lació o el moviment de forma repetida d'un objecte al voltant de la seva posició d'equilibri durant un període de temps. La posició d'equilibri és, per tant, la posició que adquireix l'objecte analitzat quan la força que actua sobre ell és nul·la.[4]

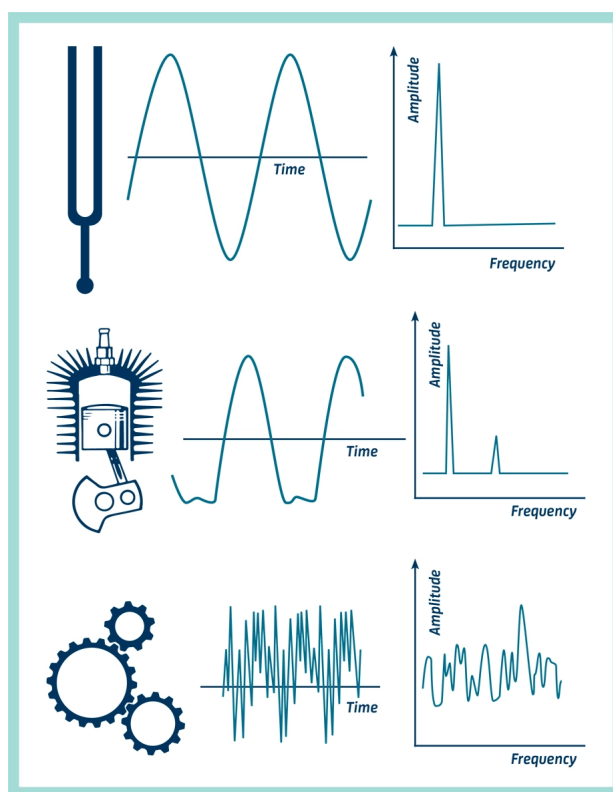
La vibració pot ser expressada en unitats mètriques ( $m/s^2$ ) o en funció de la constant gravitacional  $g = 9,81m/s^2$ . [5]

Les forces o sol·licitacions que actuen sobre un sistema estructural es poden classificar en tres grans tipologies:

- Sol·licitacions estàtiques: Són les forces a les que es troba sotmesa una estructura en equilibri estàtic.[6]
- Sol·licitacions quasi-estàtiques: Són les forces a les que es troba sotmesa una estructura en equilibri quasi-estàtic. On l'equilibri quasi-estàtic correspon a un equilibri dinàmic de l'estructura, és a dir, que es mou i/o es deforma, on les forces d'inèrcia són menyspreables respecte la resta de forces degudes a la dinàmica del sistema.[6]
- Forces dinàmiques: Són les forces que generen un comportament dinàmic de l'estructura en el que apareixen forces d'inèrcia significatives. La gran majoria de forces d'evolució temporal són considerades forces dinàmiques.[6]

Com ja s'ha comentat, un cos en estat de vibració descriu un moviment oscil·latori sobre una posició de referència. El nombre de vegades que es produeix un cicle de moviment durant un període d'un segon és el que es defineix com a freqüència, la qual es mesura en hertzs (Hz).[4]

El moviment pot consistir en un sol component que es produeix a una única freqüència, o en diversos components que es produeixen a diferents freqüències simultàniament. Els senyals de vibració a la pràctica solen consistir en varies freqüències que es produeixen de forma simultània, de manera que no és possible determinar quants components hi han i a quines freqüències es produeixen.[5]



**Figura 1** Comparativa de freqüències de vibració per a tres casos exemple. [1]

La freqüència o les freqüències amb les quals un objecte tendeix a vibrar quan es colpeja, es toca o s'altera d'alguna manera es coneix com a freqüència natural de l'objecte. Si les amplituds de les vibracions són prou grans i la freqüència natural de l'objecte a estudi es troba dins del rang de freqüències humana, aleshores la vibració genera ones sonores que poden ser audibles.[7]

Les freqüències naturals són les que es produeixen de manera natural quan pertorbem un objecte d'una manera física, mentre que els objectes que vibren d'acord amb l'aplicació d'una vibració determinada s'anomenen freqüències forçades.[8]

Quan s'aplica una freqüència no natural, també denominada com a forçada, a un objecte, la qual coincideix amb la freqüència natural de l'objecte es genera un efecte denominat ressonància, és a dir, oscil·lacions a la freqüència natural de l'objecte. Si això passa en determinades estructures, les oscil·lacions poden continuar augmentant en magnitud, donant lloc a una fallada estructural.[7]

Quan les oscil·lacions d'un sistema són equivalents a la seva freqüència natural es formen patrons de moviment els quals es designen com a modes normals de l'objecte, que generen una forma específica que pren l'estructura al vibrar a aquella freqüència natural. [8]

Un cop exposat el concepte de vibració cal entendre com aquesta es mesura i quantifica. Principalment hi ha dos tipus de sensors que s'utilitzen de forma convencional: els acceleròmetres i les sondes de proximitat.



(a) Acceleròmetre de 3 eixos comercial [9]

(b) Sonda de proximitat [10]

**Figura 2** Sensors de mesura de vibracions

Un acceleròmetre és un sensor que mesura l'acceleració dinàmica de l'objecte sobre el que es troba adherit. Donada la seva gran versatilitat permeten tant la mesura de xocs com ara explosions i proves de fallades com mesures més lentes de vibracions de baixa freqüència [11].

L'altre tipus de sensor que s'utilitza per a la mesura de vibracions és la sonda de proximitat. A diferència dels acceleròmetres, els quals, com ja s'ha esmentat, mesuren l'acceleració per determinar la vibració, les sondes de proximitat són transductors sense contacte que mesuren la distància a un objectiu. Les seves aplicacions són molt més limitades i s'utilitzen gairebé de forma exclusiva en maquinària rotativa per mesurar la vibració d'un eix [11].

Donat que en el present treball s'aplica únicament l'ús d'acceleròmetres, en la secció que es troba a continuació es presenta una explicació més centrada en aquest tipus de sensors per tal de comprendre el seu funcionament i conèixer totes les seves possibles característiques.

### 2.1.1 Acceleròmetres com a sistemes de mesura de vibracions

Els acceleròmetres són aparells que produeixen senyals elèctrics en proporció a l'acceleració que experimenten. Existeixen diverses tècniques per realitzar la conversió d'acceleració a senyal elèctric, encara que la majoria dels acceleròmetres o bé basen el seu funcionament en la llei de Hooke i en la primera i segona llei de Newton o es basen en l'ús de l'efecte piezoelèctric. El funcionament d'aquest últim és més simple del que pot arribar a semblar, ja que l'acceleració de l'estructura sota estudi es transmet a una massa sísmica dins l'acceleròmetre, la qual genera una força proporcional sobre el cristall piezoelèctric. La tensió externa sobre el cristall genera una càrrega elèctrica proporcional a la força aplicada i, per tant, també a l'acceleració. [11]

Gràcies a la seva gran versatilitat, les seves aplicacions tenen un gran abast. S'utilitzen àmpliament per controlar la vibració en aplicacions aeroespacials, d'automoció i de fabricació, entre d'altres. Solen ser utilitzats per diagnosticar problemes amb equips giratoris o per avaluar l'estabilitat d'estructures sotmeses a tensions periòdiques [12].

Segons la finalitat d'aplicació i les característiques d'estudi que es pretén realitzar s'han de tenir en compte diversos factors per aconseguir que l'anàlisi que es realitzi sigui eficient i adequada. Primer cal contemplar la varietat de tipologies d'acceleròmetres per tal de seleccionar el que aportï un millor resultat per l'objectiu desitjat. Algunes de les principals varietats comercials d'acceleròmetres són:

- **Piezoelèctrics:** Funcionen per la capacitat dels materials piezoelèctrics de canviar el seu potencial elèctric quan es troben sota estrès. Tenen un ampli rang dinàmic, una excel·lent linealitat, un ampli rang de freqüències (des d'uns pocs Hz fins a 30 kHz) [13].
- **Piezo-resistius:** Funciona de manera similar als materials piezoelèctrics, amb la diferència que canvia la resistència elèctrica del material i no el potencial elèctric [13].
- **Capacitiu:** De forma genèrica, un feix metàl·lic produeix una capacitat, que es canvia quan el sensor s'accelera. S'utilitzen més habitualment en MEMS (Sistema Micro-Electro-Mecànic) [13].
- **Potenciomètrics:** Estan formats principalment per un braç/palanca unit a la massa d'una molla, de tal forma que quan la molla es mou es poden obtenir les dades per la transmissió del moviment [13].

- **D'efecte Hall:** Es disposa d'un imant unit a una molla. Al rebre una força la molla es mou i conseqüentment també l'imant provocant un canvi en el camp elèctric de l'element Hall [13].
- **Magneto-resistius:** Funciona de manera similar al sensor d'efecte Hall, però l'element Hall és substituït per un element de resistència magnètica [13].
- **De Bragg:** Tenen una fibra òptica, la qual al veure's modificada canvia la longitud d'ona de Braggs, a partir de la qual es pot obtenir l'acceleració [13].

Les capacitats que té l'acceleròmetre d'aportar dades segons el nombre d'eixos amb els quals ha estat dissenyat és un altre aspecte a tenir en compte. Existeixen dos tipus d'acceleròmetres axials. L'acceleròmetre més comú mesura l'acceleració al llarg d'un sol eix, mentre que el segon tipus correspon a un acceleròmetre triaxial, útil per a quan és necessària la determinació de totes les vibracions que experimenta l'estructura o objecte sota estudi, és a dir, lateral, transversal o rotacional [11].

Un altre aspecte a tenir en compte a l'hora de seleccionar els acceleròmetres a utilitzar és el pes d'aquests. En general, el pes de l'acceleròmetre no hauria de superar el 10% del pes de l'estructura, ja que l'addició de massa a l'estructura pot alterar les seves característiques vibratòries i, potencialment, conduir a dades inexactes.

Finalment l'últim aspecte a remarcar en l'elecció dels acceleròmetres és el tipus de muntatge que es realitzarà amb aquests, és a dir, com seran adherits a l'estructura. De forma general existeixen quatre tipus de muntatges, els més simples i eficients per a estudis bàsics són el magnètic o l'adhesiu, que consisteixen en adherir l'acceleròmetre a l'estructura per mitjà d'un imant o un adhesiu el qual el manté subjecte a aquesta, però a la vegada permet la seva extracció i recol·locació en qualsevol moment. El mètode menys eficient, però més simple és el de subjecció a mà, és a dir, l'acceleròmetre no té cap tipus de sistema de subjecció integrat en ell i simplement es situa en una posició on pugui obtenir mesures sense que aquest pugui arribar a veure's malmès. Finalment, la tècnica considerada com a millor muntatge en quant a la qualitat de dades obtingudes és la de muntatge de perns, però requereix de perforar l'objecte sota estudi per instal·lar de forma permanent els sensors [11].

## 2.2 Projecte inicial

El present treball parteix d'un projecte previ, iniciat pel tutor del treball, el qual assenta unes bases en el desenvolupament d'aquest.

De forma introductòria es presenten els diferents elements que s'utilitzen al llarg del treball, dels quals ja constava el projecte inicial:

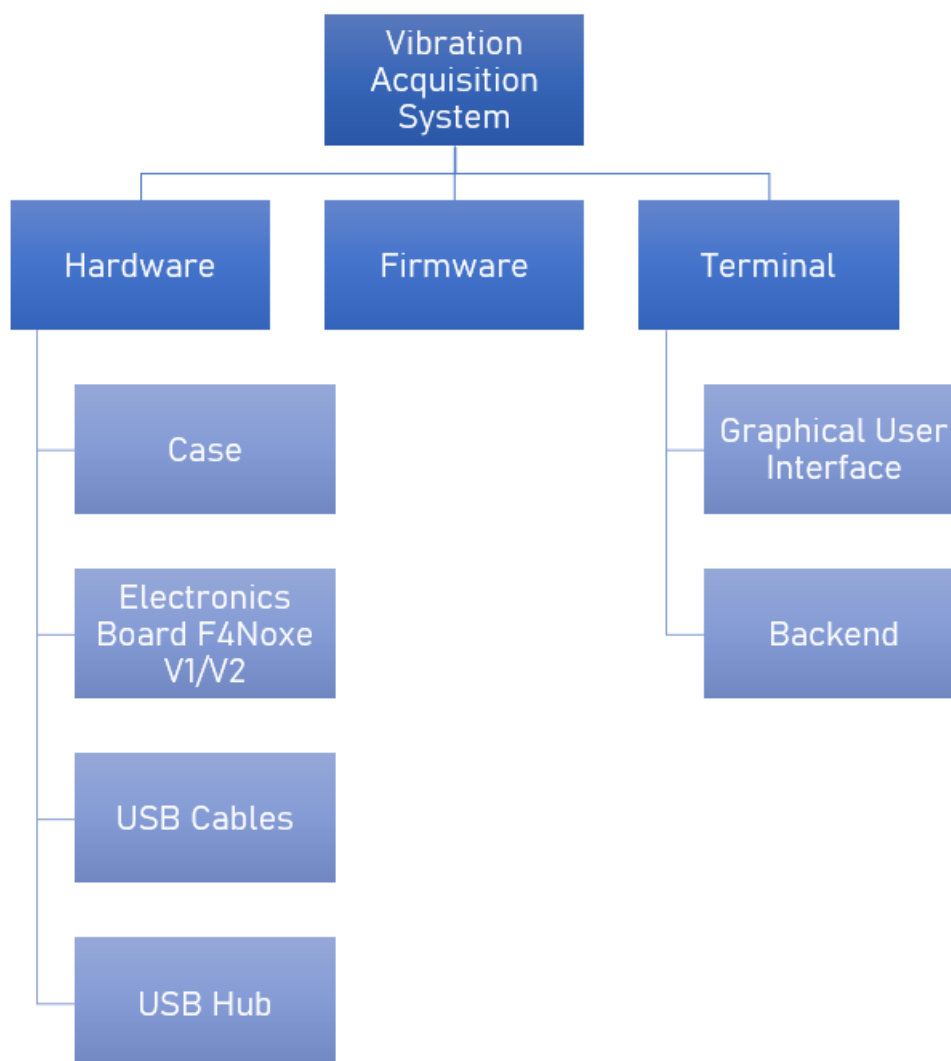
El sistema d'adquisició i mesura de vibracions consisteix en un set d'acceleròmetres triaxials que es connecten a l'ordinador de l'usuari mitjançant un cable USB, cadascun d'ells de forma independent. La seva connexió pot ser tant directa, per mitjà dels ports USB del propi ordinador com a través d'un hub USB, el qual permetria la connexió de múltiples acceleròmetres a l'ordinador utilitzant només un port USB d'aquest.

Cadascun dels acceleròmetres consisteix essencialment en una electrònica comercial que conté un microcontrolador STM32 i un acceleròmetre MPU6000. Aquestes plaques es comercialitzen com a controladores de vol per *drons radiocontrol* i tenen un preu aproximat de 30 euros cadascuna. La carcassa del acceleròmetre consisteix en unes peces de PLA mitjançant FDM i un imant de neodimi que permet adherir-se a estructures metàl·liques ferromagnètiques. El *Firmware* de les plaques sobrescriu el *Firmware* original de la controladora de vol per tal d'adquirir les dades de l'acceleròmetre i enviar-les a través del port USB mitjançant un port serial virtual.

Finalment, les dades de tots els acceleròmetres connectats són rebudes per la terminal de control, desenvolupada íntegrament en Python. Per mitjà de la terminal l'usuari permet que les dades s'emmagatzemin i es processin.



L'esquema que es mostra en la Figura 3 presenta l'estructura del sistema de mesura de vibracions:



**Figura 3** Esquema de l'estructura del sistema de mesura de vibracions

En quant a les diferents seccions mostrades en l'esquema de la Figura 3 el present treball s'encarrega de realitzar una revisió de totes elles, per tal de verificar el seu correcte funcionament i adequació als objectius del treball. Ara bé, l'objectiu del treball només contempla el desenvolupament del sistema de mesura de vibracions, és a dir, dels aspectes relacionats amb la **Terminal** ja que és aquesta la que s'encarrega de tractar les dades dels diferents acceleròmetres i processar-les. Els aspectes relacionats amb *Hardware* i *Firmware* han sigut proporcionats per part del tutor utilitzant els desenvolupats pel projecte inicial.

### 3 Desenvolupament d'un sistema multicanal

En el següent apartat s'exposa el treball realitzat a nivell de programació del sistema multicanal. Dins d'aquest apartat s'inclouen també aspectes relacionats amb la gestió, utilització i connexió dels acceleròmetres que permeten obtenir les dades.

#### 3.1 Revisió de l'estat inicial del sistema i ampliació de software per a nombre arbitrari d'acceleròmetres

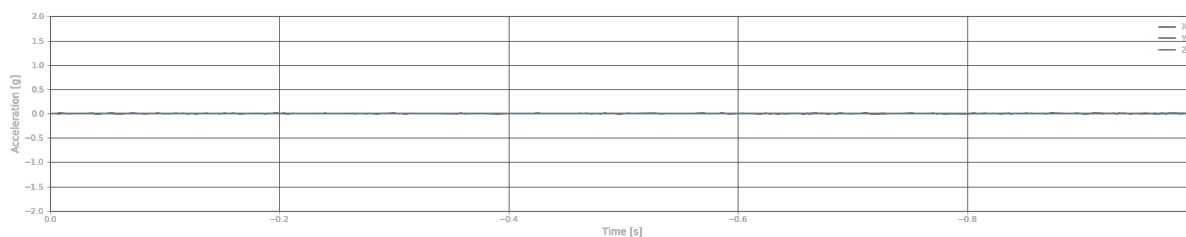
Com s'ha explicat anteriorment en la secció 2.2, el treball de desenvolupament parteix d'un projecte ja iniciat, el qual ja tenia el seu propi codi desenvolupat íntegrament en el llenguatge de programació *Python*.

Per tal d'iniciar el treball es realitza una revisió de l'estat inicial en què es troba el codi. Els aspectes a destacar inicialment, els quals marquen els primers passos a realitzar en el treball són els següents:

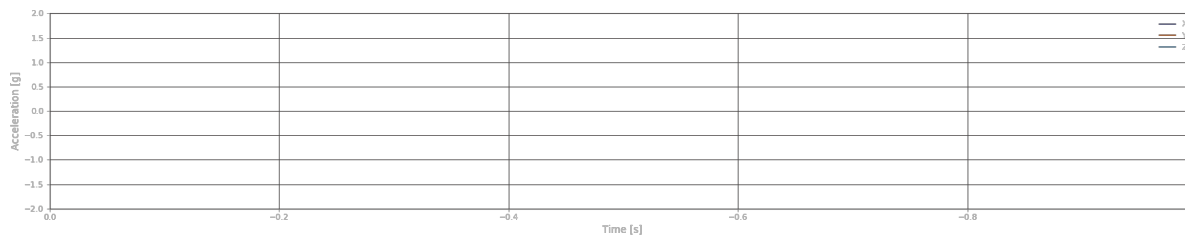
- El codi permet només l'adquisició de dades d'un acceleròmetre, el qual ha de tenir el seu número de sèrie afegit en una llista feta a mà en el codi.
- Les dades que s'obtenen de l'acceleròmetre no poden ser seleccionades, és a dir, totes les dades que s'obtenen dels tres eixos de l'acceleròmetre són tractades i es mostren els corresponents gràfics d'acceleració vs. temps i *PSD* vs. freqüència per pantalla.
- Un cop s'acciona el botó de connexió sempre apareix una font de dades fictícia/virtual la qual s'ha utilitzat per fer proves i les corresponents cal·libracions fins arribar a l'estat del codi inicial.

Un cop identificats aquests punts s'inicia el treball per poder canviar els aspectes que no s'adeqüen a l'objectiu que es pretén aconseguir.

Primerament es procedeix a eliminar tots els aspectes relacionats amb el senyal virtual, ja que aquest ja no és necessari i pot comportar interpretacions incorrectes per a un usuari que utilitzi el programa. Ja ha complert amb les seves funcions, per tant, ja no és necessari seguir obtenint aquestes dades ni el seu posterior tractament que genera els seus respectius gràfics per pantalla.



(a) Interfície d'usuari amb el senyal virtual



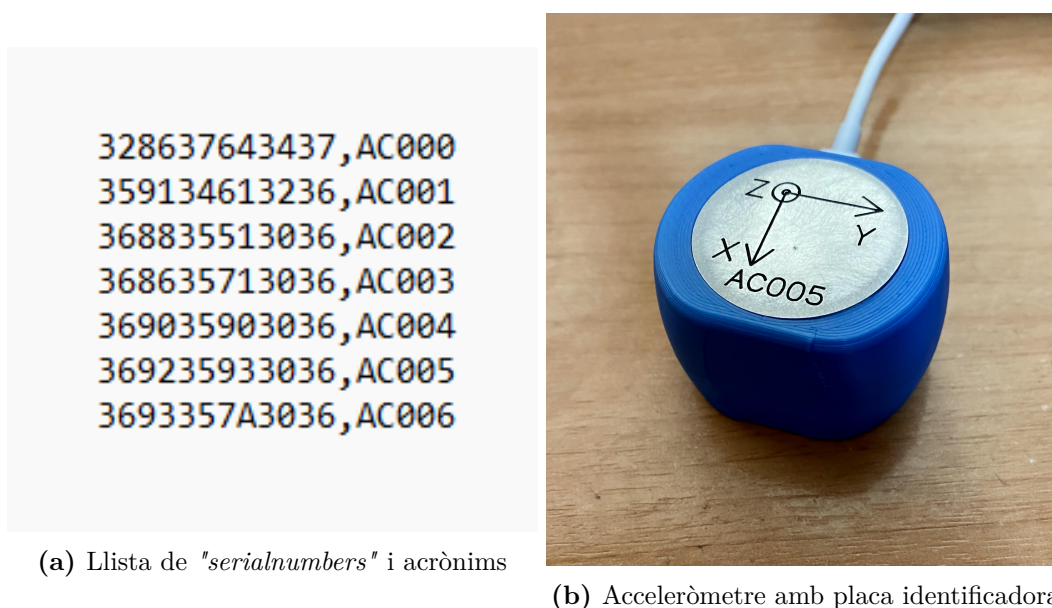
(b) Interfície d'usuari sense el senyal virtual

**Figura 4** Eliminació del senyal virtual en la interfície d'usuari

Un cop s'ha eliminat el senyal virtual es procedeix a l'optimització del codi per a permetre l'ús de més d'un acceleròmetre simultàniament i la selecció de dades pel seu posterior tractament.

Donat que el sistema multicanal té l'objectiu d'adquirir dades simultàniament de varis acceleròmetres el primer pas és classificar els acceleròmetres d'una forma accessible per a qualsevol usuari. En el directori de l'espai de treball en què es troba el codi es crea un document en format *txt* on s'introdueix una llista amb el número de sèrie de cadascun dels acceleròmetres i l'acrònim d'identificació que se l'assigna a cada acceleròmetre per a una millor identificació, tal i com es pot observar en la figura 5a. Aquest acrònim també es troba gravat en una placa en l'acceleròmetre físic, tal i com es mostra en la figura 5b, de tal forma que l'usuari quan utilitza el programa al connectar un acceleròmetre al seu terminal de treball pot identificar-lo per l'acrònim i no ha de conèixer el número de sèrie que el fabricant ha assignat.

Tenint classificats els acceleròmetres en un arxiu fora del codi s'elimina la llista manual que existia en el propi codi de tal forma que aquest no hagi de ser modificat en cas de voler afegir-ne un de nou, sinó només l'arxiu extern. El codi ara permet l'ús de qualsevol nou acceleròmetre que s'afegeixi a la llista de l'arxiu.



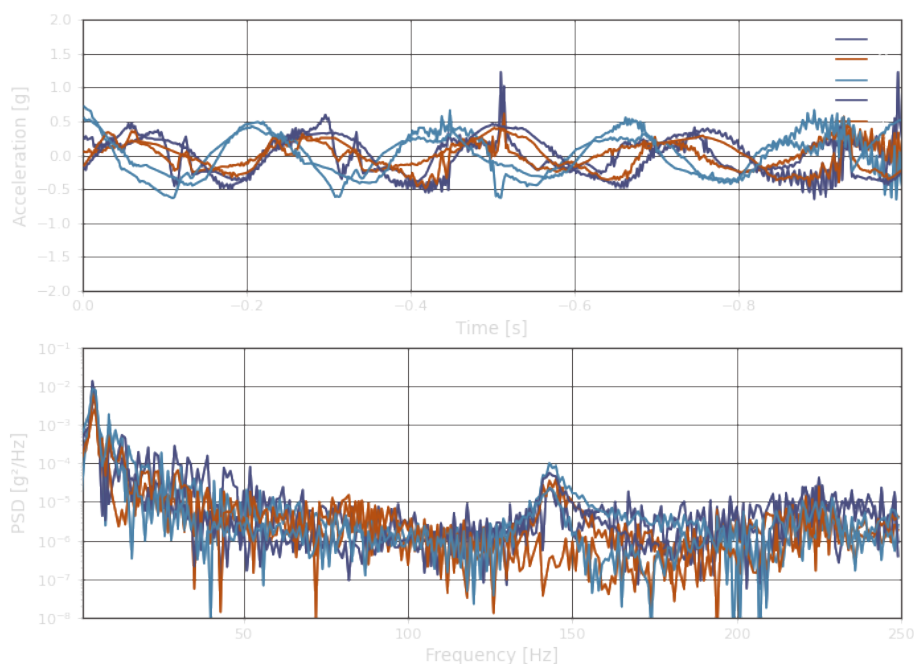
**Figura 5** Identificació d'acceleròmetres

Havent enllaçat la llista i el codi es procedeix a modificar el codi per a que permeti l'ús i tractament de dades de més d'un acceleròmetre simultàniament. Donat que el codi només contempla la utilització d'un acceleròmetre aquest s'optimitza mitjançant una estructura de lectura iterativa de dades pels diferents acceleròmetres que es troben connectats, prèviament inclosos en la llista.

Permetent ara l'adquisició de dades de més d'un acceleròmetre apareixen dos casuístiques que donen problemes al programa:

- La interpretació de les dades es torna difícil ja que es realitzen els gràfics de tots els eixos i la superposició entre ells no aporta cap facilitat visual a l'hora de llegir els resultats.
- Al connectar més d'un acceleròmetre s'alenteix de forma significativa la recepció de dades i la realització dels gràfics. A més la terminal amb la qual es realitzen les proves, un ordinador portàtil, comença a sobreescalfar-se.

Per encarar el primer problema es planteja una nova idea, l'aplicació d'un sistema per a seleccionar les dades dels acceleròmetres. Cada acceleròmetre obté dades simultàniament dels tres eixos (X, Y, Z) i s'envien al terminal. Aquestes dades són tractades pel codi i es realitzen els pertinents gràfics amb totes elles. Com s'observa en la Figura 6, al connectar més d'un acceleròmetre la interpretació de les dades es dificulta.



**Figura 6** Gràfics de les mesures de tots els eixos de 2 acceleròmetres connectats simultàniament

La decisió que es pren és la de dissenyar un sistema de *CheckBoxs* les quals permetin primerament seleccionar els acceleròmetres i a continuació els eixos dels quals es volen obtenir, tractar i mostrar les dades, tal i com es pot observar en la Figura 7. Per a realitzar això es reutilitza la llista creada anteriorment amb tots els acceleròmetres, introduint-la en una taula interactiva la qual relaciona l'acceleròmetre connectat a la terminal amb els eixos que té. Segons si l'usuari activa o no la *CheckBox* de l'eix corresponent s'habilita el tractament i la realització dels gràfics amb les dades rebudes. En la següent Figura 7b es mostra un exemple de l'activació de les *CheckBoxs*:

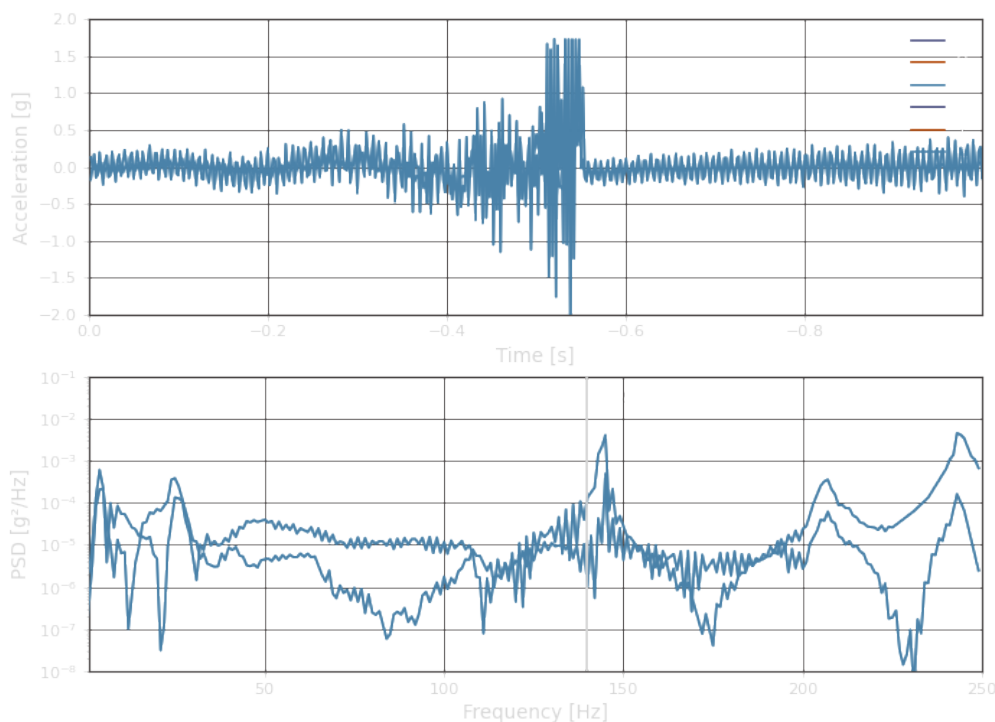
	ACC	X	Y	Z
1	<input type="checkbox"/> AC000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	<input type="checkbox"/> AC002	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	<input type="checkbox"/> AC003	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	<input type="checkbox"/> AC005	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	<input type="checkbox"/> AC006	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

(a) No *CheckBoxs* activades

	ACC	X	Y	Z
1	<input checked="" type="checkbox"/> AC000	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	<input type="checkbox"/> AC002	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	<input checked="" type="checkbox"/> AC003	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	<input checked="" type="checkbox"/> AC005	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	<input type="checkbox"/> AC006	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

(b) *CheckBoxs* activades

**Figura 7** Espai de la interfície d'usuari que permet la selecció d'eixos dels acceleròmetres



**Figura 8** Gràfics de les mesures dels eixos  $Z$  de 2 acceleròmetres connectats simultàniament

Permetent ara la selecció de diferents acceleròmetres es procedeix a solucionar el segon problema esmentat anteriorment, l'alentiment en l'adquisició de dades i la realització dels gràfics.

Al connectar simultàniament més d'un acceleròmetre i seleccionant l'obtenció de dades de més d'un d'ells es detecta a la terminal de treball un alentiment en els gràfics que es realitzen, és a dir, des de que els acceleròmetres reben una vibració fins que els gràfics arriben a actualitzar-se per pantalla pot haver-hi des d'un mínim de 5 segons de retard amb la rebuda del primer senyal fins a 15 o 20 segons amb els senyals posteriors. Concretament amb 2 acceleròmetres simultàniament ja succeeix un retard significatiu el qual no es pot considerar òptim sota cap circumstància. A major número d'acceleròmetres connectats es detecta que s'alenteix cada cop més i, amb la intenció de solucionar el problema, es realitza una inspecció del codi per tal de detectar en quin punt es pot estar generant aquest retard.

Després de la revisió es conclou que si s'elimina el gràfic de la transformada de *Fourier* s'aconsegueix que no s'alenteixi la connexió amb més d'un acceleròmetre i s'evita el sobreescalfament de la terminal de treball. La realització dels càlculs per a obtenir aquest gràfic està definida per a que succeeixi constantment, és a dir, que encara que no s'estigui mostrant per pantalla ni s'hagi seleccionat l'eix de dades del corresponent acceleròmetre el codi està realitzant tots

els càlculs necessaris per a obtenir-lo. A més, el gràfic per pantalla només mostra la part real de la *FFT*, però els càlculs es realitzen obtenint la *FFT* completa, tenint les dades part real i imaginària. La mesura que es pren és canviar la crida d'aquest càlcul per a que només es realitzi pels acceleròmetres connectats en el moment en què s'activi el botó de connexió i, per tant, en el moment en que sigui necessari realitzar els gràfics. També es realitza la comprovació de si canviar el càlcul de la *FFT* total o només de la seva part real influeix en el retard. Un cop s'ha realitzat el canvi es veu que fer només el càlcul de la part real no contribueix de cap forma a una millora en la velocitat, per tant, s'opta per deixar-ho amb el càlcul complet per si en un futur pogués ser necessari obtenir totes les dades per algun estudi concret.

Encara havent realitzat la modificació pertinent es detecta que segons el número d'acceleròmetres connectats i el tipus de connexió a la terminal es genera un retard a partir de cert nombre d'acceleròmetres. La següent taula exemplifica els diferents casos:

Nº connexions	1 - 3 accs.			4 accs.		+ 4 accs	
Combinacions	3 - directes	directe + hub	3 - hub	2 - directes 2 - hub	1 - directe 3 - hub	2 - directes + hub	1 - directe + hub
Retard (s)	0	0	0	4	5	+10	+10
<b>Especificacions terminal</b>							
Processador: Intel(R) Core(TM) i7-10750H CPU @ 2.60GHz 2.59 GHz							
RAM: 32 GB							

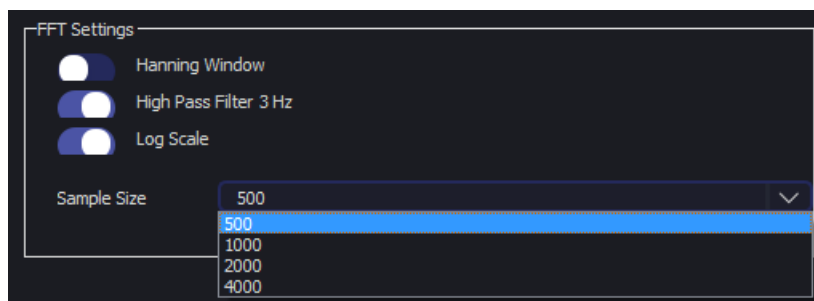
**Taula 1** Retards obtinguts segons el tipus de connexió dels acceleròmetres a la terminal

Cal remarcar que la taula anterior ha sigut conformada basant-se en els retards obtinguts per un ordinador portàtil amb les especificacions indicades, però segons el tipus de terminal que s'estigui utilitzant el retard podria augmentar o disminuir segons les capacitats de cada ordinador. També, cal tenir en compte que segons el "hub" de connexió que s'utilitzi i les seves característiques el retard pot veure's condicionat en major o menor mesura.

Finalment es conclou que el sistema multicanal té certes limitacions en relació al número d'acceleròmetres connectats, el qual és un aspecte important a contemplar ja que entre els objectius del treball es vol aconseguir conèixer si és possible realitzar un sistema que permeti la connexió d'un número arbitrari d'acceleròmetres o si existeixen certes limitacions en quant a obtenir dades de més d'un nombre determinat d'acceleròmetres simultàniament.

En relació al retard, també s'observa que si al quadre d'opcions de la *FFT*, en la opció del *Sample Size* de la Figura 9, a major valor d'aquest més s'alenteix l'aparició de les dades en els gràfics, però aquest aspecte es considera lògic ja que s'està requerint al programa que process

un major número de dades per a realitzar els gràfics amb major precisió.



**Figura 9** Valors possibles de *Sample Size* en *FFT Settings*

### 3.2 Sincronització dels acceleròmetres

Un dels objectius és aconseguir poder tractar totes les dades dels acceleròmetres de tal forma que després puguin ser utilitzades per a realitzar una caracterització modal. Un dels aspectes importants per a la correcta interpretació de les dades és que aquestes s'obtinguin i es puguin veure de forma sincronitzada, és a dir, que les diferències percebudes entre els diferents acceleròmetres pel simple fet d'on estan posicionats en l'objecte que s'està analitzant respecte el punt on s'aplica la font de la vibració o el propi desfase en temps dels acceleròmetres no generin discrepàncies i aportin una informació clara i adequada.

Per a aconseguir això es necessita implementar un algoritme de sincronització en el codi del programa que s'encarregui de corregir els possibles errors amb què les dades arriben a la terminal per tal de poder obtenir uns valors que després siguin tractables en un post-procés. Els errors que s'han de corregir són dos: l'error en freqüència i l'error en "*delay*"/retard de temps.

Per realitzar ambdues correccions cal aplicar la correlació creuada de senyals en l'algoritme. El concepte de correlació creuada i les seves aplicacions s'exposen en les següents seccions [3.2.1](#) i [3.2.2](#).



### 3.2.1 Correlació de senyals

La correlació de senyals, funcions o ones és una operació que consisteix en avaluar i mesurar la relació de semblança existent entre les fonts sota estudi. La correlació pot classificar-se en dos tipus d'operacions segons el nombre de senyals amb els quals es pretén treballar. [14]

Si la correlació es realitza amb un únic senyal l'operació s'anomena autocorrelació, que es defineix com la mesura de semblança o coherència entre un senyal i una versió d'ell mateix amb un retard en temps. Per tant, l'autocorrelació correspon a la correlació d'un senyal amb si mateix i aporta com el nivell d'energia (potència) es troba distribuït al llarg del senyal. Típicament té aplicacions en radars, sonars, satèl·lits i comunicacions inalàmbriques entre d'altres. [14]

L'altre opció de la correlació és que es realitzi entre dos senyals diferents, la qual es denomina correlació creuada, que es defineix com la mesura de semblança o coherència entre un senyal de referència i un altre senyal, el qual acostuma a correspondre a un similar al primer, però sent aquest últim la versió retardada en el temps d'un altre senyal. [14]

L'aplicació més típica de la correlació creuada és per a la detecció/estimació de la similitud entre dos mesures d'un mateix senyal, el qual ha estat corromput per un senyal no desitjat, el qual es denomina com a soroll, que ha generat diferències entre les dades obtingudes pels diferents sistemes de mesura i han perjudicat l'obtenció de les dades d'una forma clara i precisa.[2]

A nivell matemàtic, donats dos senyals, les funcions de autocorrelació i correlació creuada es defineixen respectivament per:

$$R_{xx}[k] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x[m]x[m-k], \quad R_{yy}[k] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} y[m]y[m-k]$$

$$R_{xy}[k] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x[m]y[m-k], \quad R_{yx}[k] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} y[m]x[m-k]$$

where the parameter  $k$  is any integer,  $-\infty \leq k \leq \infty$

**Figura 10** Equacions correlació [2]

### 3.2.2 Aplicació de la correlació creuada

Com s'ha exposat en l'anterior apartat la correlació creuada és un mètode que ens permet calcular la similitud entre dos senyals. A nivell computacional, per a poder realitzar tal comparació el que es fa és comparar dos vectors de dades, els quals seran referenciats com a Vector\_1 i Vector\_2 per a la present explicació.

Aquests vectors compleixen amb una característica en concret, i és que han de tenir la mateixa llargada per tal de poder ser comparats, és a dir, si el Vector\_1 conté 8 dades, el Vector\_2 també haurà de comptar amb 8 dades.

$$\text{Vector}_1 = [0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0]$$

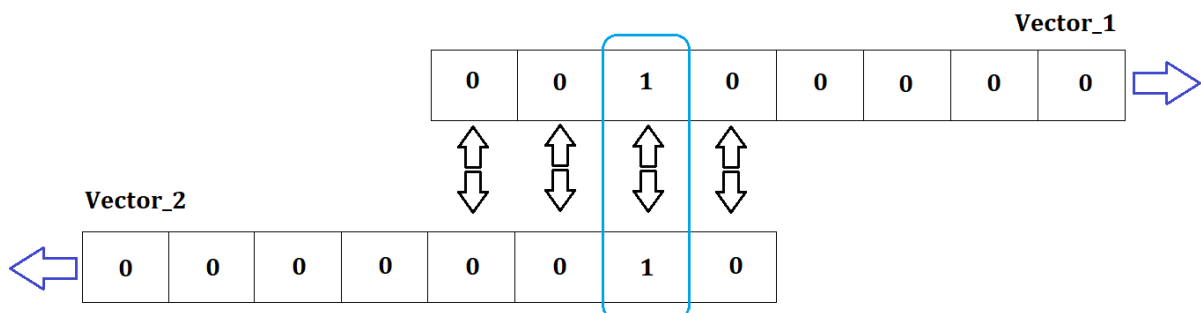
$$\text{Vector}_2 = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0]$$

**Figura 11** Vectors utilitzats per a l'explicació de *np.correlate*

Per tal d'implementar la correlació creuada en el codi de programació en llenguatge *Python* s'utilitza la funció “*correlate*” de la llibreria “*numpy*” de *Python* [15].

Aquesta funció va lliscant el Vector\_2 sobre el Vector\_1 passant per cada posició recurrent així tot els valors, tal i com es pot observar en la Figura 12. Per a cada posició es calcula un factor de correlació en base a la similitud entre els dos senyals, de tal forma que a major similitud entre els valors que s'estan comparant major és el factor de correlació obtingut.

En el cas mostrat es detecta a simple vista que el Vector\_2 es troba 4 posicions (“samples”) desplaçat respecte el Vector\_1. Per tant, el valor màxim de correlació s'obindrà quan coincideixin els valors d'1 en ambdós vectors, tal i com es mostra en la Figura 12.



**Figura 12** Procés de correlació creuada. Cas amb factor de correlació màxim

La funció “*correlate*” permet treballar en diferents formats segons el resultat que es pretén obtenir. De forma general la correlació creuada entre els dos vectors genera un nou vector el qual té una llargada igual a la suma de la llargada dels dos vectors -1, tal i com es mostra en el Figura 13 [15].

En el nou vector resultant mostra el valor obtingut després d'aplicar els càlculs matemàtics mostrats anteriorment, és a dir, després de realitzar els pertinents productes entre els valors en cada posició del vector. Aquella posició on s'obté el valor màxim de correlació indica el retard del vector que s'analitza respecte el vector de referència. Segons la posició que ocupa es pot determinar si el retard és en negatiu o positiu ja que, segons la correspondència que té el factor de correlació més gran amb la posició en la qual es troba dins del vector es determina el tipus de retard, tal i com es pot veure en la Figura 13.

**Factors\_corr = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0]**  
**x\_corr = [-7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]**

**Figura 13** Valors de correlació obtinguts pel cas exemple

El resultat que es mostra s'obté per la modalitat predeterminada de la funció que correspon a *mode = 'full'*. Si en canvi, només es vol obtenir el valor per a la major correlació i descartar els altres és necessari utilitzar la modalitat *mode = 'valid'* [15]. Aquest segon mètode és útil per a quan es vol repetir el procés de correlació per a diferents casos de forma iterativa, de tal forma que un cop s'han comparat tots, només és necessari detectar en quin cas s'ha obtingut la correlació més alta.

### 3.3 Algoritme de sincronització

Per tal d'obtenir la sincronització dels senyals rebuts pels acceleròmetres es pretén desenvolupar un algoritme el qual permeti obtenir la correcta sincronització de les dades solucionant els aspectes relacionats amb l'error en freqüència i en temps. Donada aquesta casuística es plantejen dos procediments diferents pel desenvolupament de l'algoritme amb l'objectiu d'obtenir la millor sincronització possible entre els diferents senyals.

El primer procediment es basa en la implementació de la sincronització a partir de realitzar primerament la correcció de l'error en freqüència per mitjà de la correlació creuada dels *Fouriers* i un cop realitzada aquesta correcció en el temporal es continua amb la correcció de l'error en temps procedint ara amb l'aplicació de la correlació creuada dels temporals amb les correccions en freqüència ja aplicades.

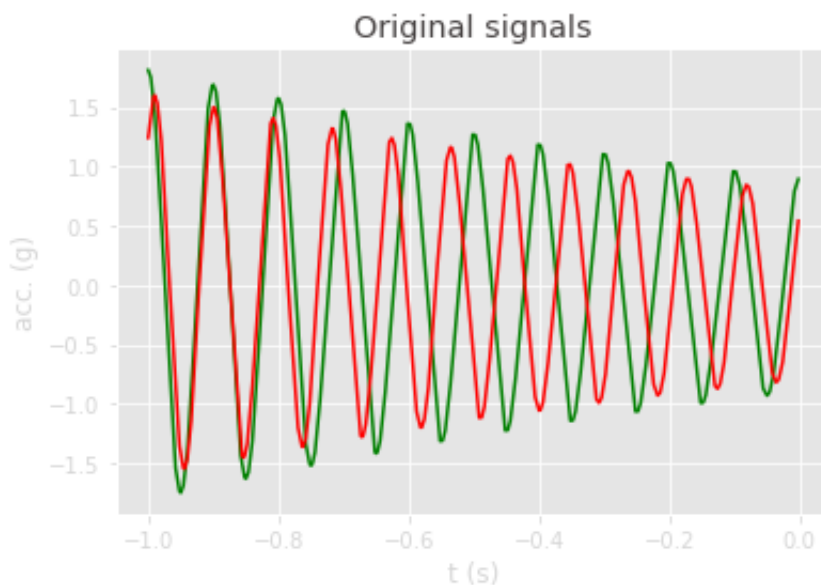
El segon procediment consisteix en una aplicació més directe de la correcció, és a dir, amb les dades dels dos temporals s'utilitza una funció d'optimització que a partir d'uns valors inicials d'error en temps i freqüència modifica el senyal corresponent per tal d'aconseguir la major similitud amb el senyal de l'acceleròmetre de referència. Aquest segon procediment pretén ser més directe al no haver de passar per la sincronització en freqüència mitjançant la comparació dels *Fouriers*.

*Nota: En els diferents apartats que es mostren a continuació dins d'aquesta secció es fa referència a unes dades fictícies. Aquestes dades són dos senyals ficticis de la funció cosinus, tal i com es pot observar en algunes de les figures que s'aniran presentant, on les dades del segon senyal són idèntiques a les del primer senyal, però aquestes últimes ha estat modificades amb un error en freqüència d'1 Hz i un retard en temps ("delay") de 0.01 segons respecte el primer senyal, per tal de poder mostrar i realitzar el procés de sincronització de senyals.*

#### 3.3.1 Algoritme de sincronització: Procediment 1

Per tal d'obtenir la sincronització dels senyals rebuts pels acceleròmetres es desenvolupa un algoritme el qual permeti obtenir la correcta sincronització de les dades solucionant els aspectes relacionats amb l'error en freqüència i en temps.

Primerament els senyals són rebuts pel terminal, tal i com mostra la Figura 14, i un cop s'activa el botó de pausa en el panell d'usuari s'inicia el procés de sincronització.

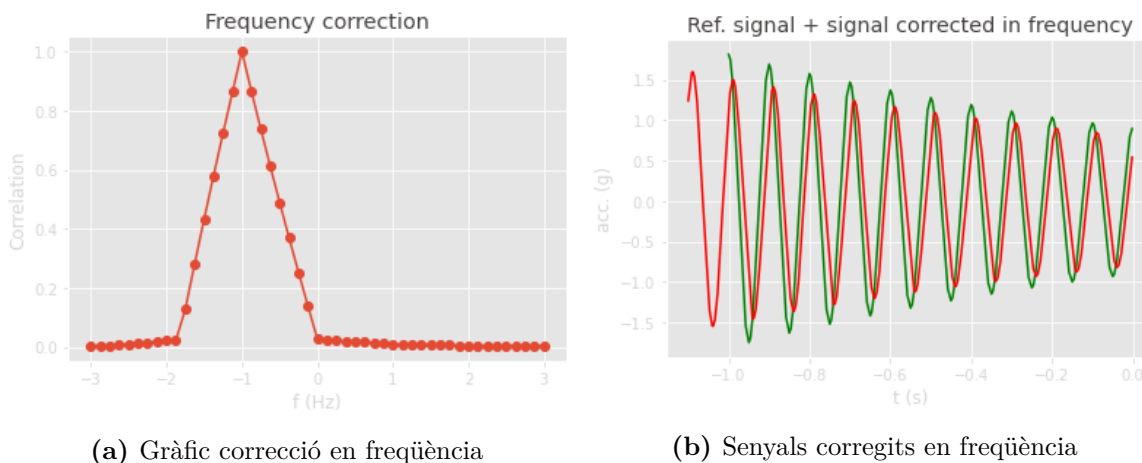


**Figura 14** Senyals inicials rebuts dels acceleròmetres (dades fictícies)

L'estructura de l'algorisme es basa en una funció general que s'encarrega de sincronitzar totes les dades dels diferents acceleròmetres respecte un acceleròmetre en concret que correspon al primer acceleròmetre de la llista, el qual passarà a ser considerat l'acceleròmetre de referència. La funció està estructurada en diferents crides a altres funcions més petites que s'encarreguen de realitzar les corresponents sincronitzacions en freqüència i en temps.

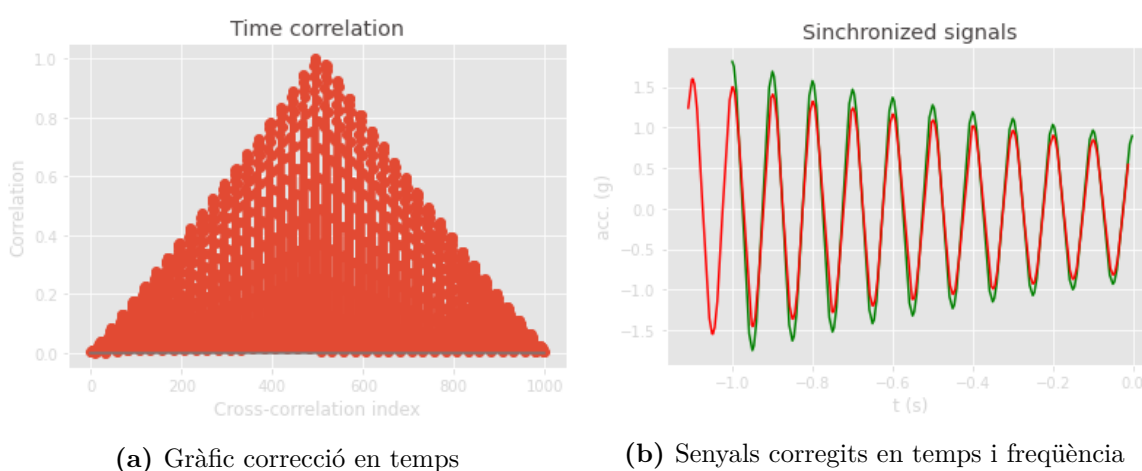
La primera crida que realitza la funció general de sincronització és a la funció de sincronització en freqüència. Aquesta funció s'encarrega de generar els possibles valors amb els que es comprovarà l'error en freqüència i crida a una altra funció, la qual mitjançant la correlació creuada i la interpolació de valors permet obtenir aquella nova freqüència amb la que s'ha detectat major similitud amb la de referència. La funció comprimeix i expandeix el gràfic obtingut per l'acceleròmetre que s'està sincronitzant i un cop realitzada aquesta modificació procedeix amb la correlació creuada dels senyals. Així doncs, de forma iterativa comprova amb quina modificació s'assimila més el segon *Fourier* al primer generant una llista de "valors de similitud" entre els gràfics. Un cop fet tot el procés iteratiu amb els valors possibles es selecciona aquell que ha obtingut un "valor de similitud" major indicant-nos així quin és el canvi més adequat per obtenir la correcció en freqüència. Simultàniament es genera un gràfic que mostra per a quin valor de freqüència s'ha de modificar el segon senyal per obtenir correctament la sincronització.

Havent obtingut l'error en freqüència la funció principal realitza la correcció en les dades de l'acceleròmetre que s'està sincronitzant multiplicant pel factor corresponent el segon senyal i es procedeix a cridar la funció que s'encarrega de trobar el retard en temps entre els dos senyals, ara ja amb el segon corregit en freqüència.



**Figura 15** Gràfics després de la correcció en freqüència

Aquesta funció, mitjançant la correlació creuada de senyals i la interpolació necessària per poder comparar les dades, obté el retard en temps entre el senyal sincronitzat i el senyal de referència. Els valors obtinguts d'aquesta correlació també són representats en un gràfic de tal forma que l'usuari pot veure per a quin valor s'ha aconseguit major correlació. Obtenint l'error en temps es corregeix el posicionament de les dades del segon senyal i s'actualitza el gràfic que es mostrava per pantalla de tal forma que les dades poden ser tractades i interpretades correctament.



**Figura 16** Gràfics després de la correcció en freqüència

Finalment, de forma esquemàtica, el procés de sincronització dels acceleròmetres es defineix amb les següents etapes:

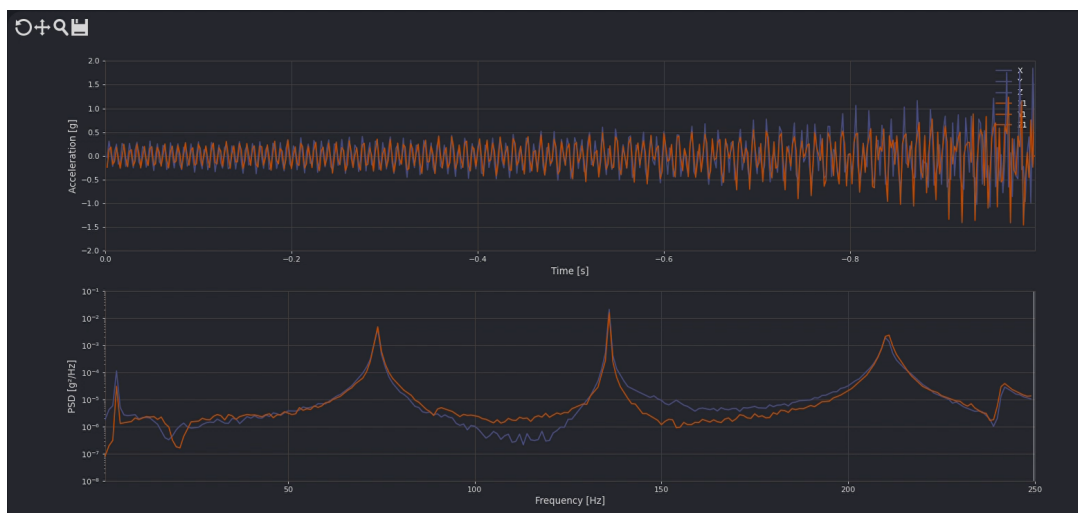
- Activació del botó de pausa en la terminal per part de l'usuari.
- Rebuda de dades i aplicació de l'algoritme iteratiu per a obtenir la sincronització en freqüència respecte l'acceleròmetre de referència, aplicant la correlació creuada, i els gràfics de correlació per poder mostrar a l'usuari amb quins valors s'ha establert la sincronització.
- Correcció de les dades obtingudes en el terminal multiplicant pel factor de correcció determinat amb l'error en freqüència.
- Aplicació de l'algoritme per a obtenir la sincronització en "delay" de les noves dades ja corregides, aplicant la correlació creuada.
- Correcció de les dades aplicant l'error en "delay" respecte l'acceleròmetre de referència.
- Càlcul de la nova Transformada de *Fourier* amb les dades finals corregides.
- Actualització dels gràfics dels acceleròmetres sincronitzats amb les dades finals corregides.

La consola del programa amb la que s'executa el codi presenta el següent missatge amb la informació pertinent per conèixer quines modificacions s'han hagut de realitzar per obtenir la sincronització:

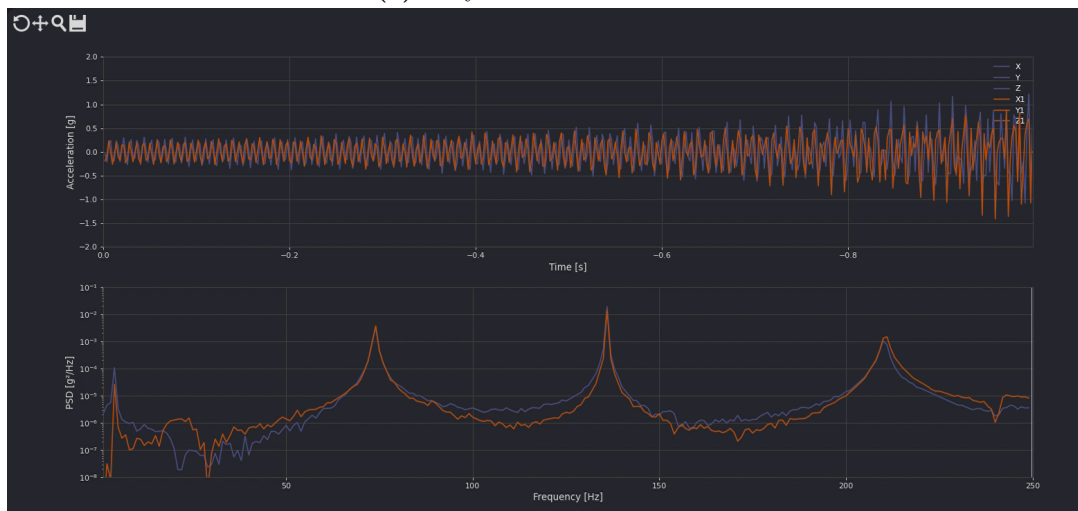
```
Maximum correlation has been found if second signal is corrected with: -1.0Hz  
Frequency error with respect to reference ACC: 1.0 Hz  
Time lag with respect to reference ACC: -1.00e-02 s
```

**Figura 17** Missatge amb les dades de sincronització

Per poder veure l'aplicació en un cas real es presenta la comparativa entre els resultats obtinguts previs a l'aplicació de l'algoritme, és a dir, tal i com arriben dels acceleròmetres i els gràfics obtinguts després de l'aplicació d'aquest. La Figura 18a mostra el cas previ, mentre que la Figura 18b mostra els gràfics havent realitzat la sincronització. La biga utilitzada pel cas pràctic i els estris pertinents es poden trobar exposats en la següent secció.



(a) Senyals sense sincronitzar



(b) Senyals sincronitzats

**Figura 18** Comparativa aplicació sincronització en un cas real



### 3.3.2 Algorisme de sincronització: Procediment 1 – Resultats

Havent realitzat totes les modificacions esmentades s'executen les validacions per a diferents casos de l'exemple de dos senyals fictícies de la funció cosinus i es procedeix a realitzar proves amb un model real d'una biga, obtenint els resultats que es poden observar en la Figura 18.

La biga analitzada pel cas pràctic es correspon a l'exposada en la Figura 19. Per tal d'aconseguir la casuística de dos extrems lliures es penja la biga per mitjà d'una cinta de pintor i es deixa suspesa en l'aire sense contacte amb cap objecte. Sobre la biga es situen dos dels acceleròmetres, un a cada extrem d'aquesta, els quals proporcionen les dades necessàries per executar les verificacions pertinents en la sincronització. L'eina utilitzada per colpejar la biga i generar les vibracions és la que es mostra en la Figura 20, un cisell d'acer que permet obtenir una bona resposta en els acceleròmetres al realitzar el cop sobre la biga.



**Figura 19** "Set-up utilitzat pel cas pràctic amb una biga en forma de L



**Figura 20** Cisell utilitzat per generar vibracions en la biga

Per al cas dels senyals ficticis s'observa que la precisió de la sincronització de forma general aporta un resultat bo el qual permet obtenir una correcta sincronització dels senyals. Encara així, es detecta que existeixen mancances segons les freqüències utilitzades i el retard en temps d'un senyal respecte l'altre. Aquest error deriva principalment de dos factors: el fet de treballar amb senyals ficticis els quals no representen un cas real com a tal, sinó només un teòric que permet assentar unes bases de treball i les interpolacions que s'han de realitzar en el codi, les quals depenen directament del número de valors que es tenen.

Donat que l'error entre acceleròmetres no es considera que sigui possible que arribi a valors molt grans es treballa sota la hipòtesi de que com a molt pot arribar a existir un error en freqüència proper als  $\pm 3$  Hz i un error en temps no major a 20 ms entre els senyals. És per això que si es superessin aquests marges considerats pels errors el codi no arribaria a poder realitzar tal comprovació i generaria com a valor d'error el màxim que permeten les limitacions.

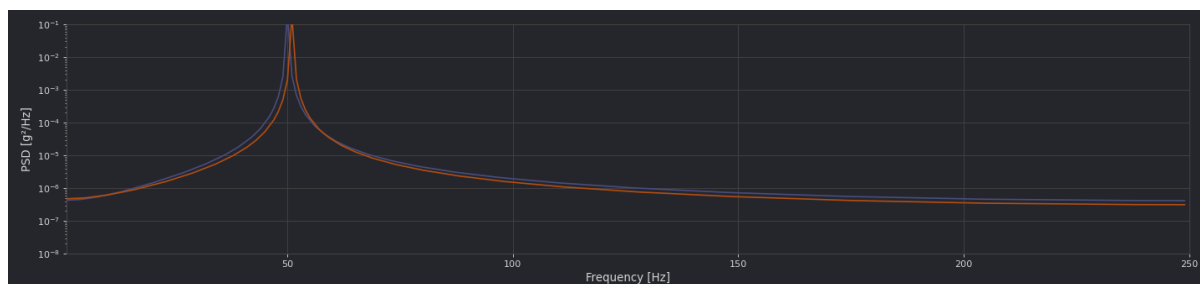
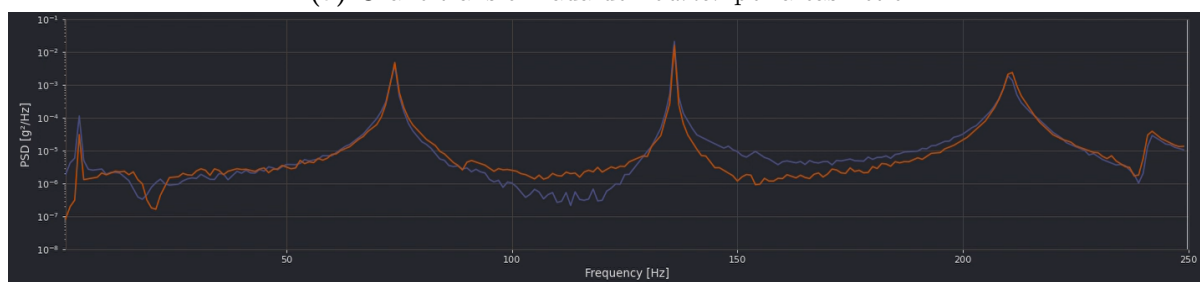
Respecte l'error per interpolació, el *sample rate*/número de mostres típicament utilitzat pel programa és de 500 *samples*, això aporta suficients valors per a tenir una bona representació gràfica per pantalla a l'hora que s'eviten ralentitzacions del programa ja que a major número de *samples* major nombre de dades rebrà el programa i la realització dels gràfics serà més lenta, fins el punt d'existir un retard molt important entre la captació de les dades per part dels acceleròmetres en l'objecte sota anàlisi i la rebuda de dades per part del terminal de treball. Amb un total de 500 *samples* es detecta que quan les freqüències que no són números enters o bé no tenen uns decimals de 0.5 l'error obtingut difereix en major o menor mesura de l'estipulat, ja que la

interpolació linear aproxima valors agafant de referència l'anterior i el posterior, fet que pot comportar errors en la generació de nous punts del mateix gràfic i desembocar en valors menys precisos de la correlació creuada. En relació a aquest aspecte, donat que l'error en temps es realitza a partir de les dades corregides en freqüència, si la correcció en freqüència s'ha desviat del valor estipulat provoca que la correlació creuada per obtenir el retard en temps també tingui un error implícit en les seves dades.

De forma general la desviació en l'error calculat en freqüència es pot veure disminuït per la correcció en temps ja que aquesta intentarà sincronitzar en temps els dos senyals, encara que la correcció en freqüència hagi generat una modificació del tot no precisa. És per això que els resultats segons per a quins casos, molt cops s'acostumen a veure força ben corregits, encara generant uns valors amb petites discrepàncies.

Si ara bé el cas dels senyals ficticis mostra certs errors segons les aproximacions realitzades per la interpolació de valors en els diferents processos de la sincronització, la sincronització en un cas real dels senyals obtinguts després de generar vibracions en una biga per mitjà d'un cop amb un objecte sembla mostrar millors resultats i errors que poden ser considerables pel cas a estudi. Els gràfics de la transformada de *Fourier* que s'obtenen de dades reals difereixen molt respecte els que s'obtenen a partir de senyals ficticis, tal i com es pot veure en la Figura 21 ja que aquests últims només mostren un pic a la freqüència introduïda en la funció i després una corba que atenua el pic fins el zero, mentre que els *Fouriers* dels senyals reals són completament irregulars, amb pics en les seves freqüències de ressonància i amb soroll afegit.

Una primera idea observant aquest cas pot constatar que les interpolacions que es realitzen consten amb el mateix número de valors, però completament diferents al cas anterior, i això pot contribuir a que els possibles errors que es generen pels senyals ficticis acabin sent mitigats o lleugerament atenuats a l'hora de realitzar les correlacions creuades entres les dades dels senyals.

(a) Gràfic transformada de *Fourier* per a cas fictici(b) Gràfic transformada de *Fourier* per a cas real**Figura 21** Comparativa gràfics transformades de *Fourier* cas fictici i real

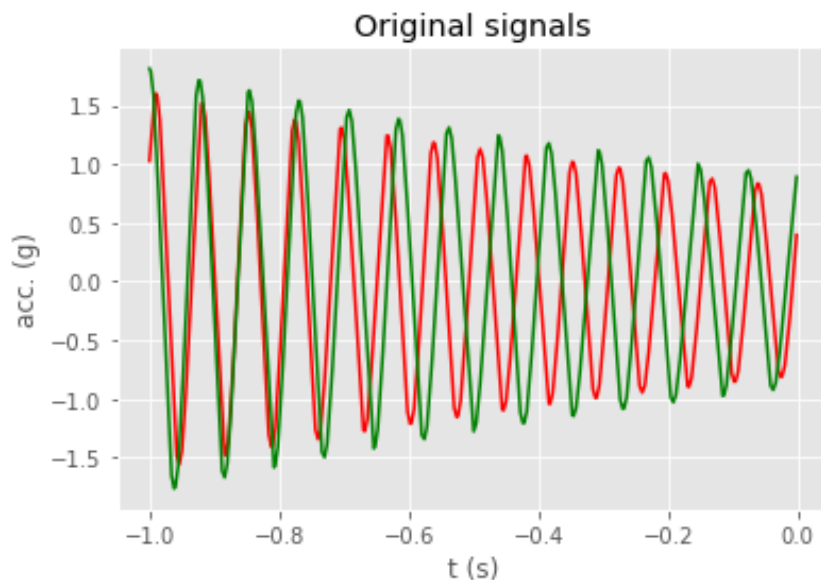
### 3.3.3 Algorisme de sincronització: Procediment 2

El segon procediment pel desenvolupament de l'algorisme pretén ser una versió similar a la del procediment 1, però aquest pretén ometre els problemes que poden derivar dels errors obtinguts per mitjà de l'aplicació de la correlació creuada de senyals varies vegades.

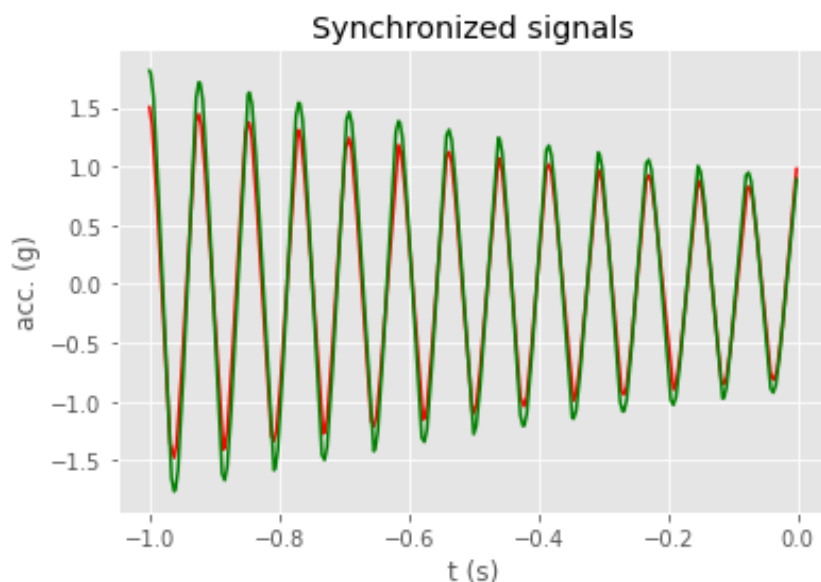
Donat que pretén ser similar en quant a forma a l'algorisme del primer procediment, l'estructura de funcionament és bastant semblant. Primerament, hi ha una funció principal la qual s'encarrega de tractar les dades dels senyals, cridar la funció que s'encarrega de la sincronització i un cop obtinguda la sincronització modifica les dades originals dels acceleròmetres per les dades corregides amb els factors corresponents.

La funció encarregada de la sincronització primerament estableix uns valors inicials d'error en freqüència i error en temps, amb els quals, per mitjà de l'optimització, busca el valor màxim de correlació entre els senyals comparats. De forma iterativa va modificant els valors dels errors per aconseguir obtenir aquells que permeten una sincronització més precisa entre les dades i, per tant, corresponen amb l'error més probable entre els senyals. Un cop es determina el valor màxim de correlació s'extreuen els valors dels errors i s'envien a la funció principal, ja que aquesta és l'encarregada de modificar els senyals per aconseguir el resultat final. A continuació es mostren en la Figures 22, 23 i 23 els gràfics i valors dels errors que s'obtenen a l'implementar

aquest mètode sobre dos senyals ficticis amb un error en freqüència d'1 Hz i un error en temps de 0.01 segons.



**Figura 22** Senyals inicials rebuts dels acceleròmetres (dades fictícies)



**Figura 23** Senyals corregits en temps i freqüència

Com s'observa en els gràfics la sincronització dels senyals és molt bona i el resultat és satisfactori. Visualment no s'observen gaires discrepàncies en les formes que presenten els dos senyals.

```
ORIGINAL ERRORS
Freq. error: 1.0 Hz
Delay: 0.01 s

VALUES OBTAINED BY ITERATION
Freq. error: 0.9988865733157901 Hz
Delay: 0.009669155311584472 s
```

**Figura 24** Valors d'error obtinguts

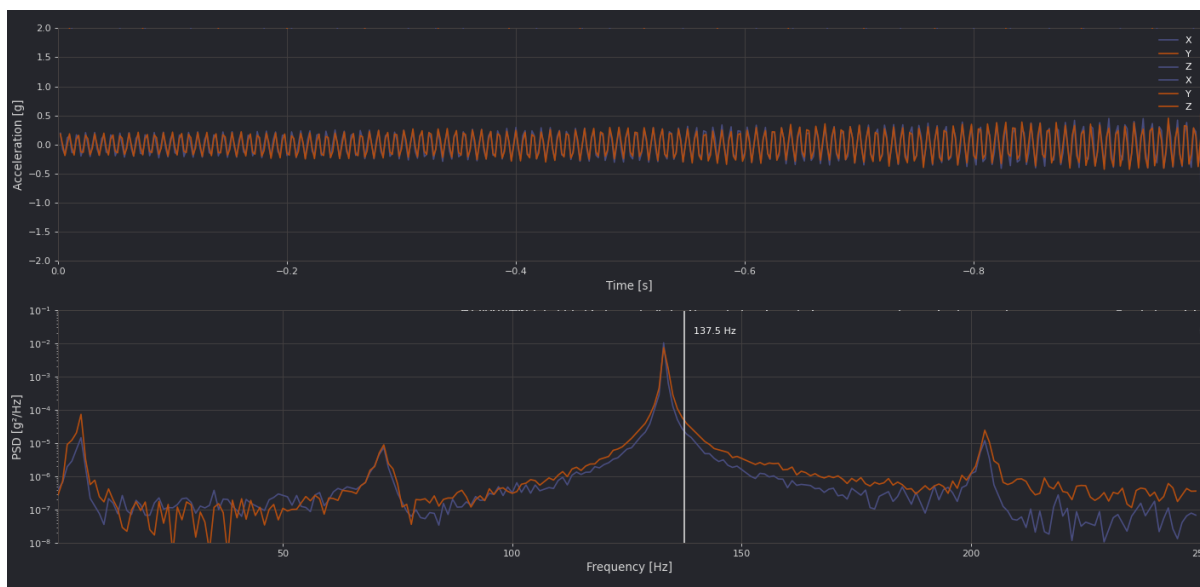
Si es quantifica ara la precisió de la sincronització per mitjà dels errors obtinguts respecte els errors introduïts, es pot apreciar que la precisió és molt alta. És cert que no s'aconsegueix la precisió absoluta en l'error, però les desviacions són molt inferiors a un 1% i aquestes es poden deure a que els mètodes d'optimització per a obtenir el valor màxim de similitud no aconseguen obtenir un valor més precís que el que es mostra, ja sigui per limitacions computacionals de la funció o per altres aspectes propis del tractament de les dades que fa la funció d'optimització.

### 3.3.4 Algoritme de sincronització: Procediment 2 – Resultats

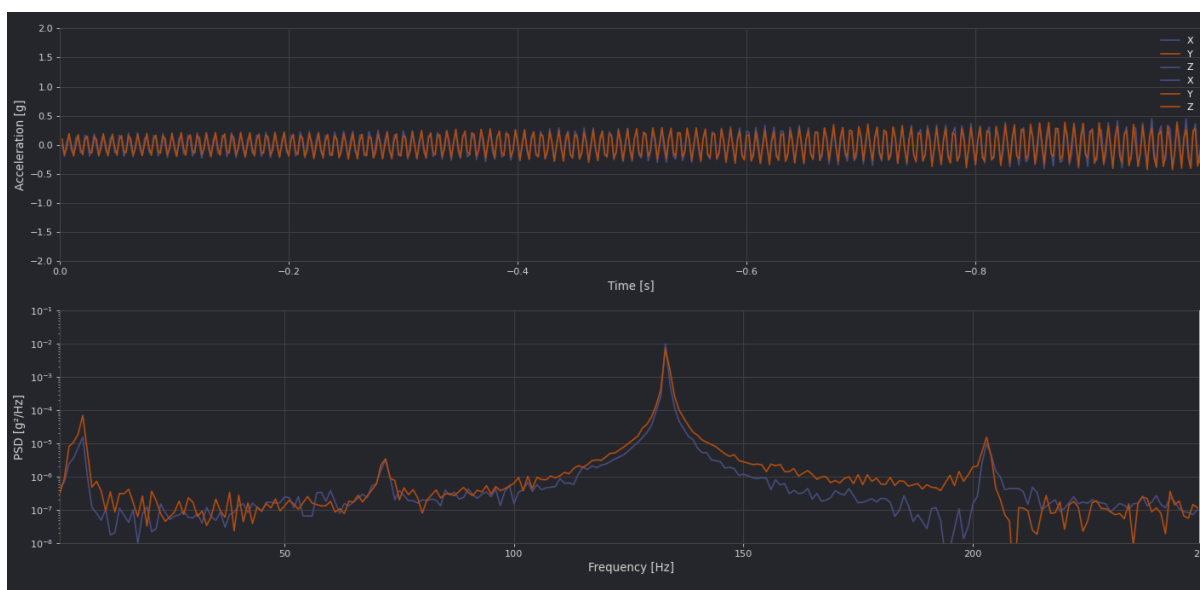
Pel present algoritme també es realitzen les corresponents validacions per a diferents casos mitjançant senyals fictícies de la funció cosinus i es realitzen diverses proves en un cas pràctic real amb una biga, mostrada anteriorment en la Figura 19, obtenint els resultats que es poden observar en les Figures 25 i 26.

En l'aplicació de l'algoritme de sincronització amb els senyals ficticis s'aconsegueix una exactitud molt alta en la sincronització. En la gran majoria de casos s'obté exactament el mateix valor d'error que s'ha introduït manualment tant en freqüència com en temps, i en el casos en que el resultat obtingut divergeix de l'introduït l'error d'aquest és inferior a l'1%. Aquests resultats ja permeten verificar que l'algoritme funciona correctament i que la precisió dels resultats és suficientment alta com per poder realitzar proves en un cas pràctic com és la biga.

En l'aplicació del l'algoritme de sincronització amb els senyals de les dades enviades pels acceleròmetres al fer vibrar una biga penjada, considerant l'estat de dos extrems lliures, els resultats obtinguts són també molt precisos. Donada la poca complexitat en la forma de la biga i les dimensions d'aquesta (1.5 metres), és lògic considerar que l'error en freqüència que els acceleròmetres poden arribar a tenir entre ells no és major a 1 Hz i l'error en temps deu estar proper a 1 ms. És per això, que a l'observar que els valors de sincronització obtinguts es situen en aquests barems es pot constatar que s'obté una bona sincronització entre els diferents senyals.



**Figura 25** Gràfics en la terminal abans d'aplicar la sincronització en les dades de la biga



**Figura 26** Gràfics en la terminal després d'aplicar la sincronització en les dades de la biga

En la Figura 27 es mostra una comparativa entre els valors dels errors obtinguts a l'aplicar l'algoritme en el cas fictici, que ja s'havia tractat anteriorment, i en el cas pràctic.

```
ORIGINAL ERRORS
Freq. error: 1.0 Hz
Delay: 0.01 s

VALUES OBTAINED BY ITERATION
Freq. error: 0.9988865733157901 Hz
Delay: 0.009669155311584472 s
```

(a) Valors d'error obtinguts per un cas fictici

```
Frequency error with respect to reference ACC: -0.792 Hz
Time lag with respect to reference ACC: 9.18e-04 s
```

(b) Valors d'error obtinguts en un cas real

**Figura 27** Comparativa valors errors obtinguts en un cas fictici i real

Els errors obtinguts pel cas fictici ja permeten assegurar una bona implementació del procés d'optimització en l'algoritme per a la sincronització, però si s'inclouen també els resultats obtinguts en un cas d'aplicació real, es pot constatar que aquest procediment aconsegueix obtenir una bona sincronització ja que els errors es troben dintre dels barems esmentats i concorden amb les hipòtesis que s'han contemplat a l'hora de realitzar l'estudi.



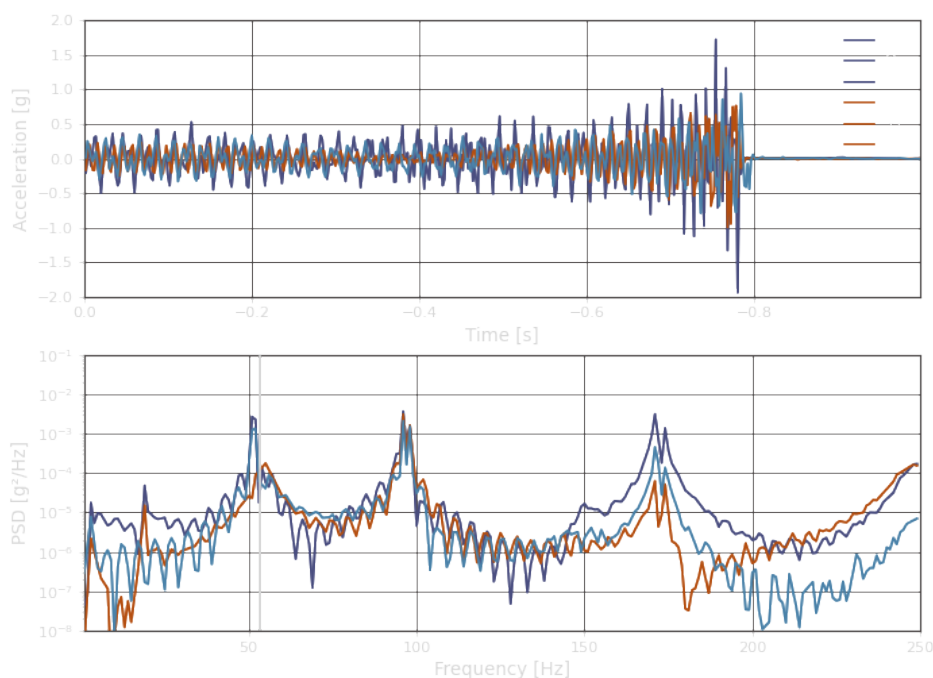
### 3.3.5 Elecció de l'algoritme i verificació del funcionament

Un cop analitzats tots els resultats d'ambdues casuístiques per a les diferents proves executades es pot concloure que els resultats obtinguts en l'aplicació del segon algoritme són d'una major precisió que els resultats obtinguts a l'aplicar l'algoritme dissenyat segons el procediment 1. Havent constatat aquest fet, es selecciona el segon algoritme com aquell que s'implementarà de forma definitiva en el codi.

Després de realitzar la selecció de l'algoritme, per tal de verificar la seva total funcionalitat i aplicació en diferent casos reals es realitzen una nova sèrie de proves amb una nova biga, aquesta ara de 2 metres de llargada i secció quadrada, buida per dintre, que es pot observar en la Figura 28. Els gràfics obtinguts un cop aplicada la sincronització en la terminal de control amb aquesta nova biga es presenten a continuació en la Figura 29.



**Figura 28** Biga de secció quadrada utilitzada pel procés de verificació



**Figura 29** Gràfics obtinguts en la terminal de control per a una mesura de vibracions amb la biga de secció quadrada

A partir d'observar el gràfic inferior en la Figura 29 es poden determinar els valors de freqüència als quals els acceleròmetres han detectat un pic, per tant, les freqüències de ressonància de la biga. De forma més precisa, utilitzant un post-procés públic de MatLab ([16]) per obtenir amb exactitud els valors de freqüència, s'obté que els 4 valors típics que acostumen a obtenir-se després de realitzar varies proves són aproximadament:

$$f_1 = 19 \text{ Hz} ; f_2 = 53 \text{ Hz} ; f_3 = 101 \text{ Hz} ; f_4 = 175 \text{ Hz}$$

La biga utilitzada en aquestes proves, al tenir unes característiques de forma simple, permet obtenir teòricament les seves freqüències que defineixen els modes de vibració, entre d'altres aspectes. Un cop determinats els valors teòrics a partir d'aplicar les corresponents equacions y realitzar els pertinents càlculs que es presenten a continuació, es pot analitzar de forma més precisa el correcte funcionament dels acceleròmetres.

La següent fórmula, per a una biga situada en l'estat de dos extrems lliures, ha estat extreta de [17]:

$$f = \frac{\lambda^2}{2 \cdot \pi \cdot L^2} \cdot \left( \frac{E \cdot I}{\bar{m}} \right)^{1/2}$$

On les diferents lletres corresponen a:

- $f$ : freqüència
- $\lambda$ : valors estipulats pel cas de biga amb dos extrems lliures
- $L$ : longitud total de la biga
- $E$ : Mòdul d'elasticitat
- $I$ : Moment d'inèrcia
- $\bar{m}$ : Massa per unitat de longitud

Considerant els següents valors propis de la biga sota estudi i els càlculs pertinents per a obtenir tots els valors necessaris per a l'equació:

$$\lambda = [4.73004074, 7.85320462, 10.9956078, 14.1371655] m$$

$$E = 210,000 * 10^6 Pa \quad ; \quad d_{acer} = 7,850 kg/m^3 \quad ; \quad L = 2 m$$

$$c_{ext} = 1.2 * 10^{-2} m \quad ; \quad grui{x} = 0.1 * 10^{-2} m \quad ; \quad c_{int} = c_{ext} - 2 \cdot grui{x}$$

$$V_{ext} = c_{ext}^2 \cdot L \quad ; \quad V_{int} = c_{int}^2 \cdot L$$

$$V = V_{ext} - V_{int}$$

$$I = c_{ext}^4/12 - c_{int}^4/12$$

$$\bar{m} = m/L = d_{acer} \cdot V/L$$

S'obté que els valors de les freqüències de ressonància per a la biga en qüestió a partir de càlculs teòrics haurien de ser:

$$f_{1-teòrica} = 20.762 Hz \quad ; \quad f_{2-teòrica} = 57.231 Hz$$

$$f_{3-teòrica} = 112.196 Hz \quad ; \quad f_{4-teòrica} = 185.466 Hz$$

	<b>Freqüències (Hz)</b>			
	<b>f_1</b>	<b>f_2</b>	<b>f_3</b>	<b>f_4</b>
<b>Valors teòrics</b>	20.8	57.2	112.2	185.5
<b>Valors reals</b>	19	53	101	175

**Taula 2** Taula comparativa de freqüències de ressonància

Si es realitza una comparació de les freqüències obtingudes dels acceleròmetres amb els valors que s'obtenen de forma teòrica, es pot determinar que la desviació no és excessiva. Si s'observa la Taula 2, a freqüències baixes la precisió és bastant alta i els valors reals respecte els teòrics difereixen en menys d'un 10% respecte el valor original. A valors més alts l'error augmenta, però mantenint un grau de fiabilitat bastant bo, donat que el cas teòrics no contemplar tots els aspectes externs que influeixen a l'hora de realitzar un test pràctic. A més, cal destacar que per realitzar certs càlculs en el cas teòric s'han pres valor estàndard de densitat i mòdul d'elasticitat els qual podrien variar respecte la realitat, contribuint així a un increment en l'error.

Tenint en compte tots aquests aspectes, i assumint que les desviacions en les freqüències obtingudes no són de la magnitud suficient com per considerar un error en el sistema de mesura, es pot constatar que fins el present punt els resultats obtinguts y el mètode seleccionat per a la sincronització és l'adequat.

### 3.4 Post processat de les dades per a caracterització modal

Un cop verificat tot el procés de sincronització de senyals es procedeix amb el següent pas per a la culminació del desenvolupament del sistema multicanal. Les dades sincronitzades obtingudes pels acceleròmetres han de poder ser tractades per tal de poder obtenir una caracterització modal, o almenys, una aproximació a una caracterització modal de l'objecte o estructura el qual s'ha sotmès a una vibració. Per aconseguir això es desenvolupa un codi a part en **MatLab** que s'encarrega de tractar i post-processar les dades que s'han guardat des de la terminal per l'usuari.

Aquest codi no té una aplicació genèrica ja que requereix de definir amb anterioritat la forma de l'estructura que s'analitza.

#### 3.4.1 “Modal Assurance Criterion” (MAC): Concepte i aplicació

Una eina útil, i actualment de les més populars, per a la comparació quantitativa de vectors modals és el Modal Assurance Criterion (MAC). La MAC és un indicador estadístic que per mitjà d'una anàlisi de regressió lineal basada en quadrats produeix un indicador, el qual és més sensible a les grans diferències entre els valors comparatius i els resultats. [3]

La MAC només pot indicar consistència o coherència, però no validesa, per la qual cosa s'utilitza principalment en fases prèvies de test, ja que és incapaç de distingir entre errors sistemàtics i discrepàncies locals.

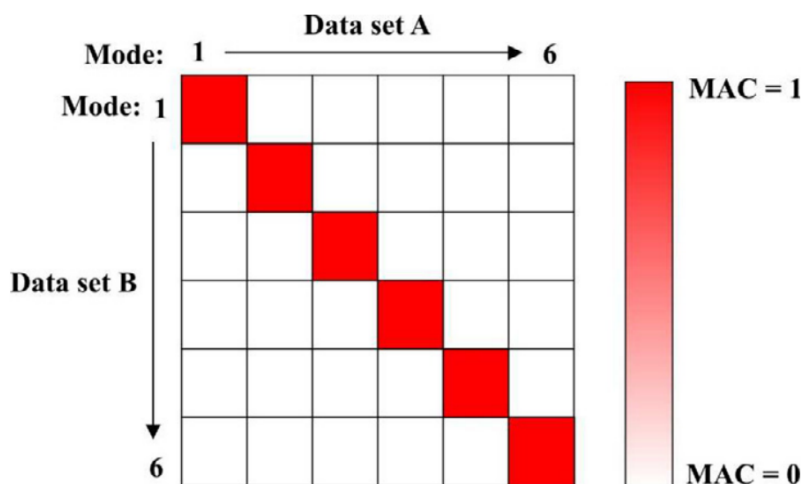
La MAC es calcula com el producte escalar normalitzat dels dos conjunts de vectors. Utilitzant la següent equació s'obtenen els escalars resultants que es disposen a la matriu MAC. [3]

$$MAC(r, q) = \frac{\left| \{\varphi_A\}_r^T \{\varphi_X\}_q \right|^2}{\left( \{\varphi_A\}_r^T \{\varphi_A\}_r \right) \left( \{\varphi_X\}_q^T \{\varphi_X\}_q \right)}$$

**Figura 30** Equació per a l'obtenció de la MAC donats 2 vectors  $\{\varphi_A\}$  i  $\{\varphi_X\}$  [3]

Els valors de la matriu MAC prenen un valor entre 0 (que representa cap correspondència coherent) i 1 (que representa una correspondència totalment coherent). Per això, els valors superiors a 0.9 indiquen una correspondència consistent, mentre que els valors petits indiquen una poca semblança de les dues formes. [3]

A continuació, en la Figura 31 es mostra de forma clara com la MAC d'un sistema en condicions adequades hauria de resultar:



**Figura 31** Exemple esquemàtic de matriu MAC de 2 dimensions [3]

### 3.4.2 Desenvolupament del codi de post-processat per a caracterització modal

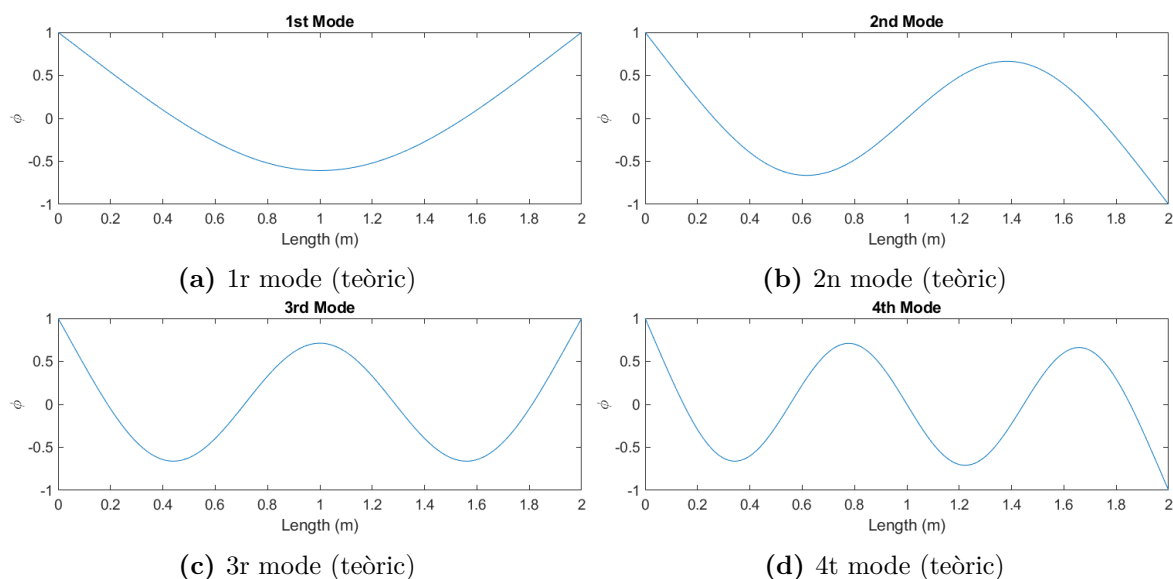
Per tal de poder post-processar les dades obtingudes en els tests realitzats amb la biga de secció quadrada i llargada 2 metres es desenvolupa un codi en MatLab el qual permeti obtenir la caracterització modal a partir de les dades que s'extreuen dels gràfics, després de la sincronització, del sistema multicanal de mesura de vibracions.

Primerament el codi desenvolupat realitza tots els càlculs teòrics mostrats en apartats anteriors i realitza nous càlculs envers la identificació dels modes de vibració. Seguint les indicacions per l'obtenció de les formes dels modes extrems de [17], per a cada mode, partint dels valors corresponents en cada cas, es calcula i representa la forma teòrica que tindria en tota la barra.

Si a les dades presentades en la secció 3.3.5 si afegeixen els valors de  $\tau$  obtinguts també per a les mateixes condicions seguint les indicacions de [17] es poden obtenir les formes teòriques dels modes al llarg de la biga que es mostren en la Figura 32.

$$\tau = [0.982502215, 1.000777312, 0.999966450, 1.000001450]$$

$$\bar{y} = \cosh \frac{\lambda \cdot x}{L} + \cos \frac{\lambda \cdot x}{L} - \tau \cdot \left( \sinh \frac{\lambda \cdot x}{L} + \sin \frac{\lambda \cdot x}{L} \right)$$



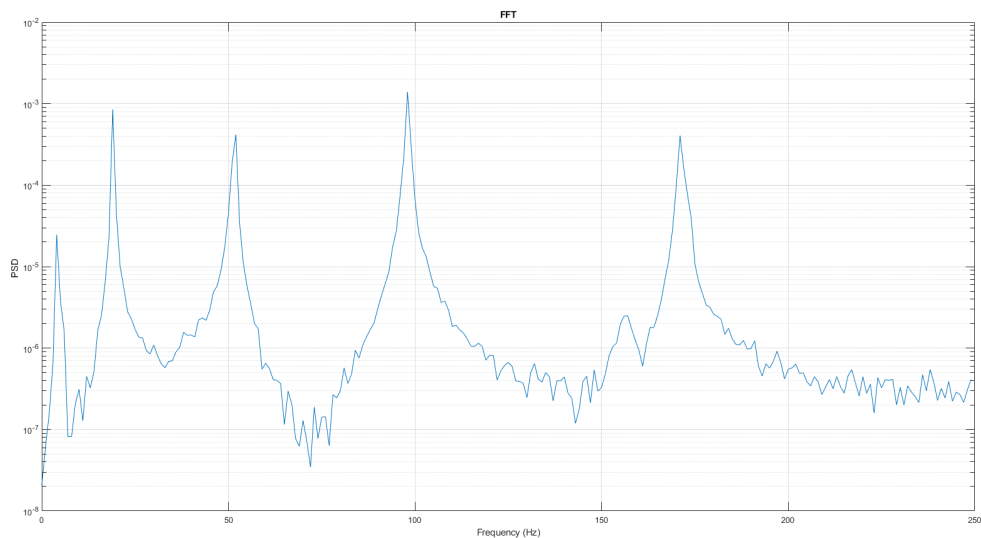
**Figura 32** Representació dels modes a partir dels valors teòrics

Un cop realitzades totes les operacions pertinents per a obtenir la versió teòrica es realitza l'adquisició de les dades reals sincronitzades i es procedeix a tractar-les per a la seva aplicació.

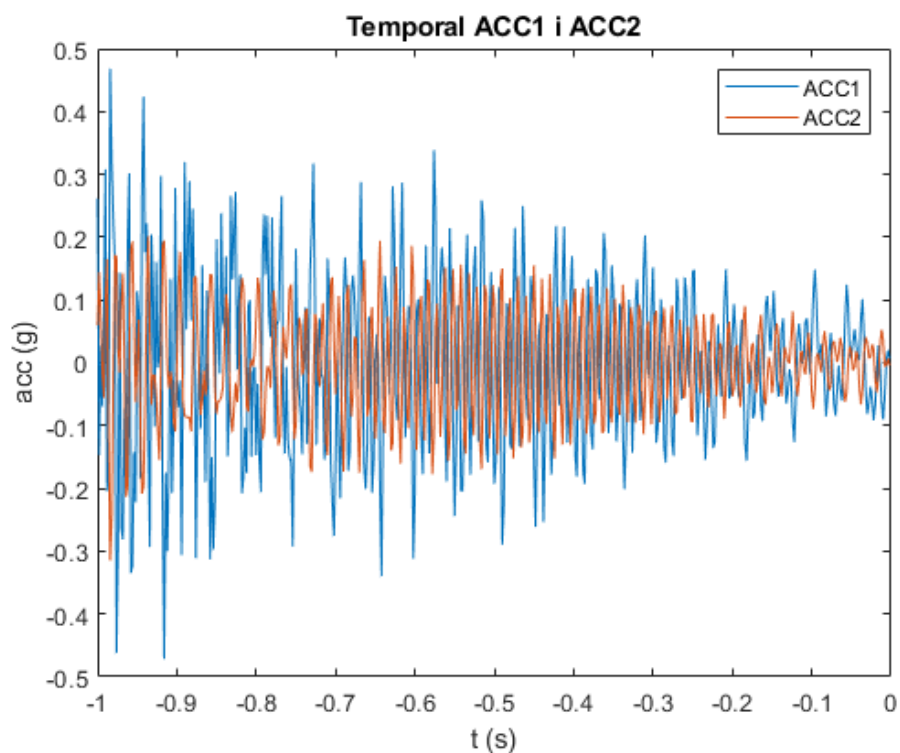
Havent rebut tota la informació dels senyals s'extreuen les dades corresponents als valors d'acceleració i *PSD*. Es realitza de nou el gràfic de la Transformada de *Fourier*, com es mostra en la Figura 33, per tal de poder identificar els valors pic de freqüència ja que seran requerits. Un cop introduïts els valors pel terminal es requereix definir la posició d'on s'han extret les dades, és a dir, on estaven situats els acceleròmetres. Com ja s'ha esmentat anteriorment el post-processat és únic per a cada cas i requereix de definir l'estructura sota estudi amb anterioritat i modificar els aspectes relacionats amb ella si es vol mantenir automatitzat el post-tractament.

Definida la posició dels acceleròmetres en l'estructura es realitzen els mateixos càlculs que s'havien portat a terme anteriorment amb els valors teòrics, però ara utilitzant les dades empíriques i obtenint els valors de la forma del mode en les posicions concretes on s'ha situat els acceleròmetres. Ja que els valors dels modes obtinguts a partir de les dades empíriques es troben en valor absolut es requereix assignar el signe de forma manual. És per això que també es representen els temporals de cada acceleròmetre respecte el de referència per poder observar si aquests es troben en fase o en contrafase, segons la freqüència que s'està analitzant, com s'observa en les Figures 34 i 35.

MatLab permet ampliar els gràfics de tal forma que la precisió per decidir el signe és molt més alta que la que es pot determinar a l'observar les Figures a continuació.

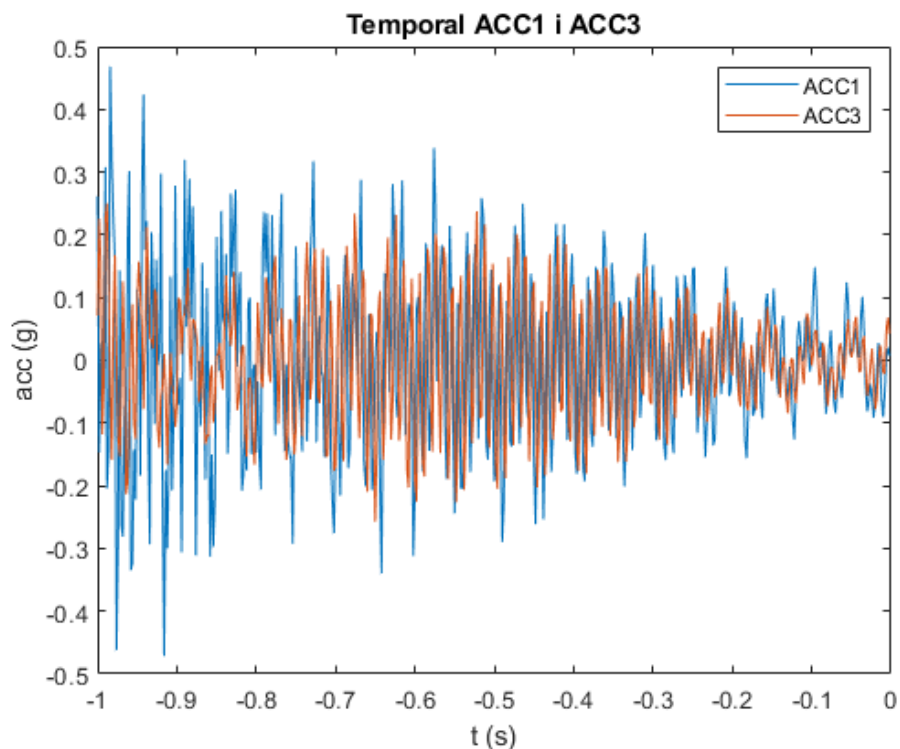


**Figura 33** Representació de la Transformada de *Fourier* per a la identificació de freqüències en el post-procés



**Figura 34** Representació temporal de l'acceleròmetre de referència amb el primer acceleròmetre a comparar

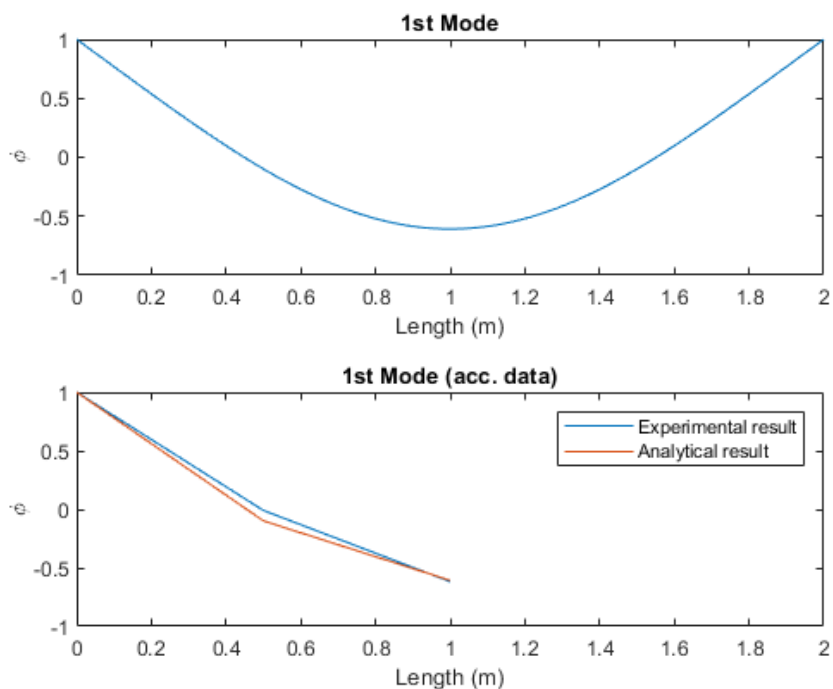




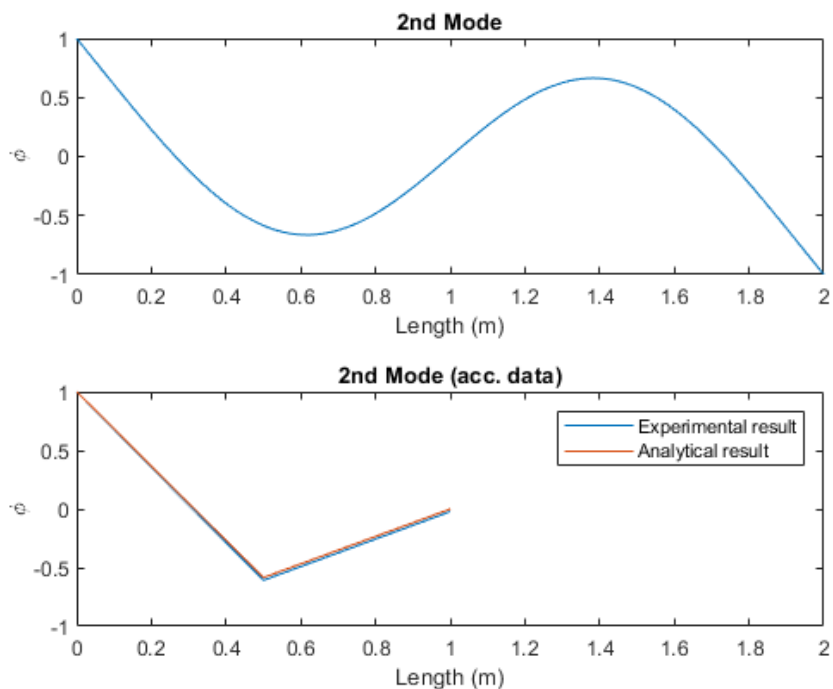
**Figura 35** Representació temporal de l'acceleròmetre de referència amb el segon acceleròmetre a comparar

Quan ja s'han assignat els signes corresponents per a cada acceleròmetre segons les freqüències analitzades es poden obtenir els valors dels modes els quals es normalitzen i es representen. Per tal de poder apreciar la precisió que s'obté simultàniament, en el mateix gràfic, es representa per sota amb una tonalitat diferent els valors normalitzats del mode teòric en aquelles mateixes posicions. D'aquesta forma, a simple vista es pot apreciar si la similitud entre el cas real i el teòric és la correcta.

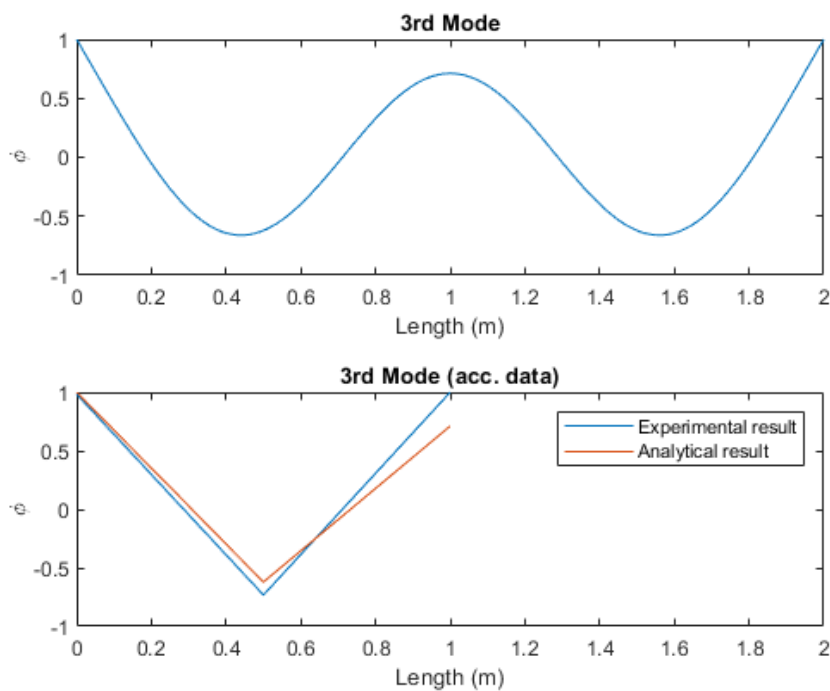
A continuació es presenten els gràfics resultants d'analitzar les vibracions en la biga situant tres acceleròmetres, un a l'extrem de la biga, l'altre situat a mig metre de l'extrem en el que es troba el primer acceleròmetre i finalment el tercer acceleròmetre situat a la meitat de la longitud total, és a dir, a 1 metre respecte l'extrem on es troba el primer acceleròmetre. Per tant, les Figures 36, 37, 38 i 39 mostren els resultats del post-processat complet de les dades per a la caracterització modal.



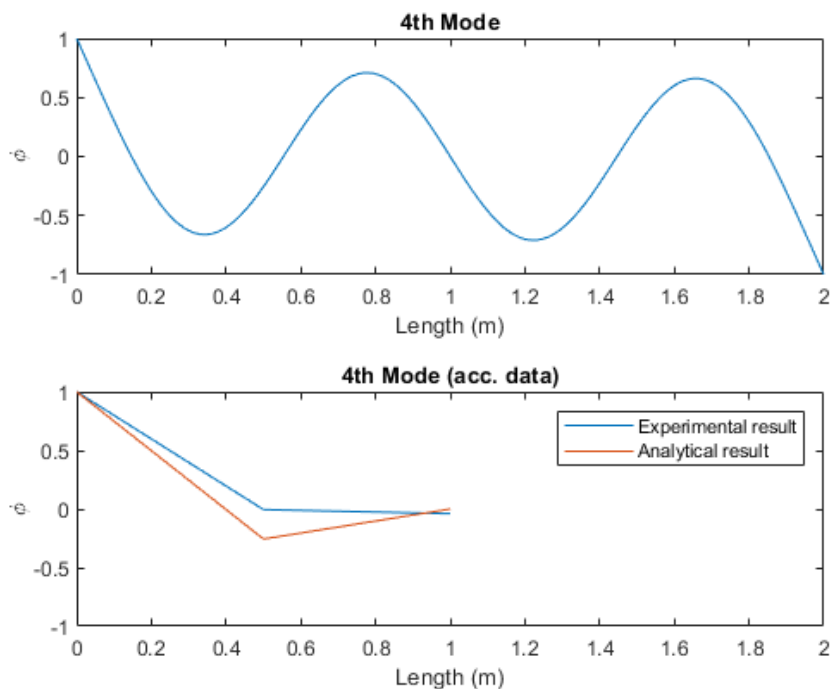
**Figura 36** Forma del 1r mode i valors obtinguts experimentalment



**Figura 37** Forma del 2n mode i valors obtinguts experimentalment



**Figura 38** Forma del 3r mode i valors obtinguts experimentalment



**Figura 39** Forma del 4t mode i valors obtinguts experimentalment

### 3.4.3 Verificació del sistema per mitjà de “*Modal Assurance Criterion*” (MAC)

Paral·lelament a l'obtenció de les formes dels modes i els valors experimentals d'aquest en la posició dels acceleròmetres es pot aplicar la MAC per tal de realitzar la verificació prèvia que s'havia esmentat en la secció 3.4.1.

Per tal d'aconseguir una vista global de la precisió en els resultats es realitzen 3 MACs al llarg del post-procés. Primerament una AUTOMAC dels valors teòrics amb si mateixos. Com és evident la matriu resultant consta d'una diagonal d'1s, com s'observa en la Figura 40, i serveix per tenir una matriu de referència amb la que comparar els valors que s'obtindran posteriorment en les altres MACS.

**AUTOMAC:**

1.0000	0.6048	0.8554	0.7154
0.6048	1.0000	0.7321	0.9244
0.8554	0.7321	1.0000	0.6665
0.7154	0.9244	0.6665	1.0000

**Figura 40** AUTOMAC obtinguda a partir dels valors teòrics

La segona MAC que es realitza és la MAC del vector de dades teòriques amb el vector de dades experimentals, però aquestes en valor absolut, és a dir, sense haver assignat encara el signe.

La MAC final que correspon a la matriu resultant de comparar el vector de dades teòriques amb el vector de dades experimentals amb el signe ja assignat per part de l'usuari per mitjà d'observar els gràfics. Ambdues MACs es mostren en la Figura 41 i com s'observa en la diagonal, que són els valors més rellevants de la matriu, els valors no varien i es situen per sobre del 0.9.

**MAC COMPUTED WITH ABSOLUTE VALUES OF EXPERIMENTAL DATA:**

0.9942	0.5453	0.7995	0.6824
0.6101	0.9994	0.7490	0.9148
0.8015	0.5930	0.9756	0.5137
0.7597	0.7483	0.5611	0.9394

**MAC COMPUTED WITH THE EXPERIMENTAL DATA WITH ASSIGNED SIGN:**

0.9942	0.5453	0.1227	0.6824
0.6101	0.9994	0.7157	0.9148
0.0581	0.5930	0.9756	0.5137
0.7597	0.7483	0.5018	0.9394

**Figura 41** Resultat de l'aplicació de la “*Modal Assurance Criterion*”

#### 3.4.4 Anàlisi dels resultats de la caracterització modal en un cas pràctic

Si s'analitzen els gràfics de la caracterització modal s'observa una gran precisió entre els valors teòrics i els valors experimentals. Per tal de poder realitzar una bona comparació es normalitzen els valors en cada cas, d'aquesta forma indiferentment dels valors reals que s'han obtingut en cada mode al normalitzar es pot observar amb major facilitat les similituds o discrepàncies amb els valors obtinguts per a cada posició.

Centrant l'anàlisi en els valors obtinguts per les MACs, els valors situats en la diagonal de la matriu resultant final són superiors al 0.9, aspecte que remarcaria la coherència dels resultats. A més, pel cas del dos primers modes els valors es troben per sobre del 0.99, és a dir, només es troben un 1% per sota de la màxima precisió. Pel cas del tercer mode el valor disminueix, però segueix estant molt per sobre del 0.9, marge que ens segueix assegurant que la caracterització realitzada és coherent. Respecte al valor corresponent a l'últim mode és l'únic valor que es troba més lluny de l'1, però segueix estant per sobre del 0.9 i es considera un resultat satisfactori.

Finalment, veient els resultats de les matrius MAC obtingudes i considerant que per l'exemple mostrat, encara que també succeeix el mateix per a altres tests realitzats, els resultats són precisos i la forma del mode acostuma a coincidir significativament amb la forma teòrica que hauria de tenir, es pot concloure que el procés de caracterització modal a partir de les dades sincronitzades obtingudes pel sistema multicanal s'aconsegueix correctament i compleix amb els objectius plantejats inicialment.

### 3.5 Interfície d'usuari

La interfície d'usuari del present treball no només comprèn els aspectes relacionats amb la terminal de control del sistema multicanal, sinó també els diàlegs i sistemes que s'han dissenyat per poder controlar amb totalitat el sistema de sincronització entre els diferents acceleròmetres i per poder aconseguir el post-processat desitjat de les dades un cop ja han estat tractades.

A continuació es desglossa en diferents seccions l'experiència de control per part de l'usuari, per tal de poder aprofundir de manera més precisa en els aspectes rellevants.

#### 3.5.1 Terminal de control de l'usuari

Com s'ha pogut observar en els anteriors apartats la interfície d'usuari ha anat sent modificada al llarg de l'optimització del codi. Algunes modificacions que no han estat comentades en anteriors seccions són relacionades amb aspectes com el nom que reben els botons d'accionament, però són aspectes que només influeixen en l'experiència de l'usuari en el seu ús i no en l'obtenció de dades ni repercuteixen en l'estudi que es realitzi amb el programa.

L'objectiu del treball es centra en adquirir una interfície d'usuari que permeti la realització de les accions pertinents per l'objecte a estudi, és a dir, l'obtenció de dades dels eixos seleccionats dels acceleròmetres sota les condicions especificades per l'usuari, la realització dels gràfics d'acceleració vs. temps i *PSD* vs. freqüència per pantalla segons les opcions escollides com la mida del *sampleig*, l'ús de la finestra de Hanning, l'aplicació d'un filtre per a freqüències altes o l'aplicació de l'escala logarítmica en l'eix de la *PSD* en el *Fourier*.

Cal remarcar que la interfície original ja havia estat creada en el projecte inicial que s'ha presentat en la secció 2.2 i que aquesta només s'ha anat veient modificada en el qual s'ha pogut mostrar en les anteriors seccions.

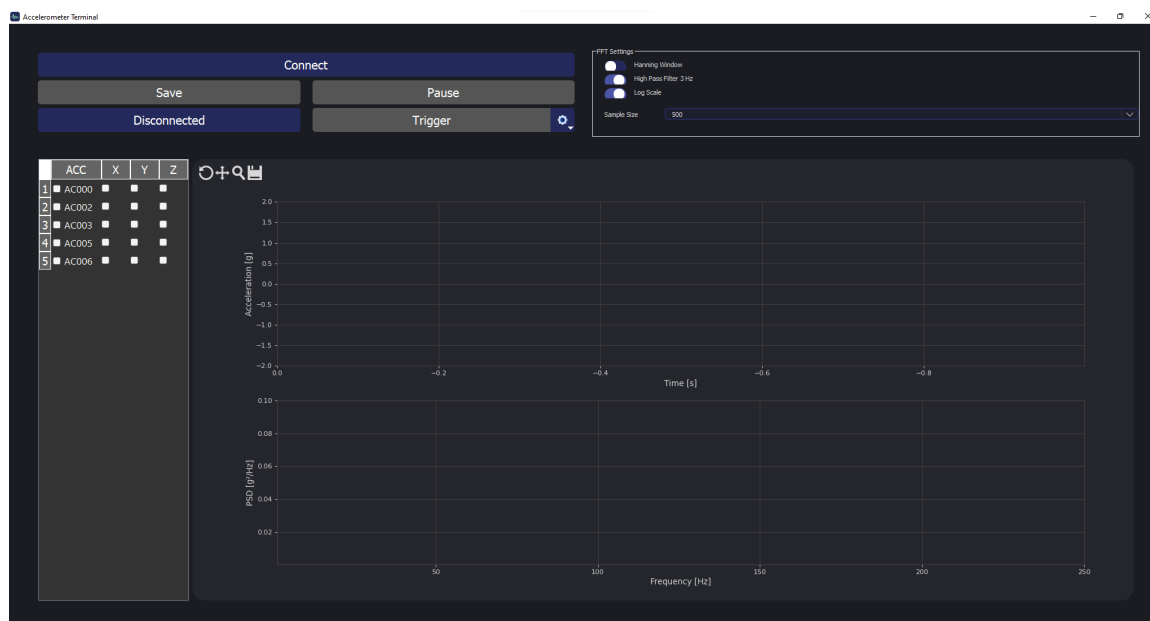


Figura 42 Terminal del sistema multicanal

### 3.5.2 Diàlegs i sistemes de control per a la sincronització i el post-processat

En relació als diàlegs i sistemes de control que s'han anat integrant tant en el codi principal com en el codi del post-processat han tingut la finalitat de fer més precisa la selecció de les dades, evitant possibles errors que pogués cometre l'usuari en la seva utilització.

Pel que respecte a la sincronització de les dades, a part de la terminal principal que ja s'ha mostrat en la secció anterior, en el moment d'activar la pausa i, en conseqüència, desencadenar el procés de sincronització, pel panell de control apareixen una serie de missatges per tal d'especificar correctament la sincronització que es vol realitzar.

Donat que els eixos dels diferents acceleròmetres no sempre es trobaran orientats en la mateixa direcció abans d'iniciar el procés es requereix a l'usuari que indiqui quin eix vol utilitzar de l'acceleròmetre de referència i quin eix vol sincronitzar amb el prèviament seleccionat en cada acceleròmetre. D'aquesta forma no es sincronitzen automàticament els eixos de cada acceleròmetre amb els respectius dels altres, sinó que per mitjà d'aquesta selecció l'usuari indiferentment d'haver situat en posicions i direccions diferents els eixos dels acceleròmetres podrà seguir fent ús del programa desenvolupat.

A part, també s'afegeix l'opció de detenir el procés de sincronització en qualsevol moment si l'usuari considera que les dades que ha captat al realitzar la pausa no s'ajusten a l'objectiu

desitjat. Així l'usuari pot tornar a realitzar un nou test sense la necessitat de realitzar tot el procés de sincronització amb unes dades que acabarien sent descartades per la seva no validesa.

En referència als aspectes relacionats amb el post-processat, totes aquelles dades que requereixen ser definides per poder realitzar la caracterització modal d'una biga són requerides per mitjà de missatges que apareixen en la terminal de control de MatLab. Per tant, quan s'han d'introduir les freqüències on es situen els pics el propi programa les requereix per mitjà d'un missatge on introduint els valors que l'usuari obté del gràfic es processen directament per realitzar els càlculs pertinents. A més, donada la casuística a estudi de la biga, per indicar la posició dels acceleròmetres es proposen 5 casos típics on es poden situar els acceleròmetres per tal de facilitar la identificació d'aquests.

Finalment, per l'assignació de signe als valors absoluts en la caracterització modal el programa del post-processat requereix a l'usuari que indiqui si cal assignar un signe positiu o negatiu als valors que mostre per pantalla. Donat que encara tenint els gràfics per identificar amb facilitat si els temporals es troben en fase o contrafase a les freqüències estipulades el programa també mostra els signes dels valors teòrics, per tal d'ajudar a l'usuari en el cas que pogués tenir alguna dificultat en identificar amb precisió la relació dels temporals entre ells.



## 4 Campanya de verificació

En aquesta secció es presenta la campanya de verificació del sistema de mesura de vibracions multicanal desenvolupat, realitzada utilitzant un sistema comercial d'alta precisió com a referència per a la mesura de vibracions.

La campanya de verificació pretén identificar la viabilitat de l'aplicació del sistema desenvolupat en un cas pràctic. En cas de demostrar la seva viabilitat podria ser d'utilitat tant per a un usuari particular com per a una companyia amb interès en realitzar estudis estructurals de forma simple. El fet de ser un sistema molt més simple fa evident que els resultats molt probablement tinguin una precisió inferior als obtinguts amb un sistema comercial, però en termes econòmics, el fet de ser un sistema de baix cost podria ser d'interès al considerar el factor econòmic.

### 4.1 Sistema de mesura comercial de referència

Donat que l'objectiu de la campanya de verificació és quantificar i qualificar la qualitat de mesura de vibracions i caracterització modal que es pot obtenir amb el sistema desenvolupat es decideix que la millor forma d'analitzar aquests aspectes és utilitzar un sistema comercial d'alta precisió per a mesura de vibracions, de tal forma que un cop realitzats els tests pertinents es puguin comparar els resultats proporcionats pels diferents sistemes.

El sistema comercial utilitzat ha estat un *LMS SCADA MOBILE* de 8 canals, proporcionat pel codirector del treball. Aquest sistema consta d'un aparell de mesura (Figura 43a) que es connecta directament a un terminal que pot ser un ordinador, el qual mitjançant un programa propi del sistema tracta les dades que es reben per l'aparell de forma simultània i permet enregistrar grans quantitats de dades. Segons el model l'aparell consta de certs canvis, per això es mostren dos versions en la Figura 43a.

A l'aparell que es connecta a l'ordinador s'hi connecten els sensors que s'utilitzen per a mesurar les vibracions. Aquests sensors són d'alta precisió i contenen uns imants de gran potència que permeten una bona subjecció a una estructura metàl·lica indiferentment de la posició en la que es trobin. Un dels sensors utilitzats es pot observar en la Figura 43b.

Cada sensor consta d'una fitxa tècnica que l'identifica amb el model al que pertany i un número de sèrie propi. A més la fitxa tècnica indica la sensibilitat del sensor, el *BIAS level*, la data de fabricació i la persona encarregada de la seva fabricació. Tota aquesta informació és rellevant ja que el seu cost és bastant elevat i en cas d'un usuari tenir problemes relacionats amb el seu funcionament cal disposar de tota la informació necessària per solucionar-los.



(a) Aparell de mesura de vibracions comercial [18]



(b) Sensor d'alta precisió del sistema comercial

**Figura 43** Sistema de mesura de vibracions comercial

## 4.2 Estructura a estudi i set-up per a la verificació

Per tal de portar a terme la campanya de verificació s'escull una estructura metàl·lica robusta de grans dimensions, com es pot veure en la Figura 44b, proporcionada per l'empresa *SENER Aeroespacial* en el seu taller. L'estructura en qüestió amb més precisió pot ser observada en la Figura 44a.



(a) Vista precisa de l'estructura sota estudi      (b) Vista general de l'estructura sota estudi

**Figura 44** Estructura utilitzada per a la campanya de verificació

Encara tenint una forma complexa l'estudi que es realitza és de les vibracions en sentit transversal a la part rectangular que es troba en la part superior de l'estructura i que segueix perpendicular al terra.

Per tal de realitzar les proves es disposen 3 acceleròmetres del sistema comercial i 3 acceleròmetres del sistema multicanal desenvolupat, més o menys en posicions molt similars per tal que tots dos sistemes mesurin les vibracions sota unes circumstàncies el més idèntiques possibles. La disposició dels acceleròmetres en les diferents posicions de l'estructura es pot veure en la Figura 45.



**Figura 45** Set-up dels acceleròmetres sobre l'estructura sota estudi

Per la mesura de les vibracions és necessari utilitzar un objecte per realitzar el cop que desencadeni aquestes. Primerament es decideix provar l'estri utilitzat per generar les vibracions en la biga de 2 metres utilitzada pels diferents processos de verificació i disseny del codi del sistema multicanal, però el resultat és que les seves dimensions i el seu pes són molt inferiors a les de l'estructura i, les vibracions que s'obtenen al realitzar un cop amb ell són fortament atenuades per l'estructura, fins el punt que el sistema comercial detecta baixes vibracions, però el sistema desenvolupat no és capç de detectar cap vibració.

Havent realitzat un primer intent es decideix canviar l'objecte per colpejar l'estructura, i finalment s'escull un tub d'acer de dimensions i pes més considerables. Per poder apreciar les dimensions d'aquest observis la Figura 46 que mostra una comparativa de les dimensions del tub amb unes tisores i un portàtil.





(a) Tub comparat amb unes tisores comercials



(b) Tub comparat amb un ordinador portàtil

**Figura 46** Tub utilitzat per a colpejar l'estructura en la campanya de verificació

Amb aquest tub es realitzen un parell de proves prèvies per comprovar si un cop realitzat amb ell genera les vibracions suficients com per ser captades per tots dos sistemes i s'aconsegueix que tant el sistema comercial com el sistema desenvolupat detectin vibracions. Havent verificat la seva utilitat, es decideix utilitzar el tub com objecte per colpejar l'estructura i es procedeix a realitzar diferents tests.

Per poder realitzar un estudi complet, assegurant que les proves que s'han realitzat condueixen a uns resultats òptims pel seu posterior anàlisi es realitzen 3 tests. En els dos primers tests es colpeja l'estructura en sentit transversal a ella, és a dir, des de la cara oposada a on es troben els acceleròmetres situats es colpeja un total de sis cops l'estructura, tres a un extrem d'aquesta i els altres tres cops a l'altre extrem, i amb els dos sistemes s'enregistren les vibracions en mostres diferents. Pel tercer test es canvien de posició els acceleròmetres i es situen en les parets exteriors de l'estructura i des de l'espai interior es colpeja també un total de 3 cops l'estructura, generant les respectives vibracions que són enregistrades pels dos sistemes.

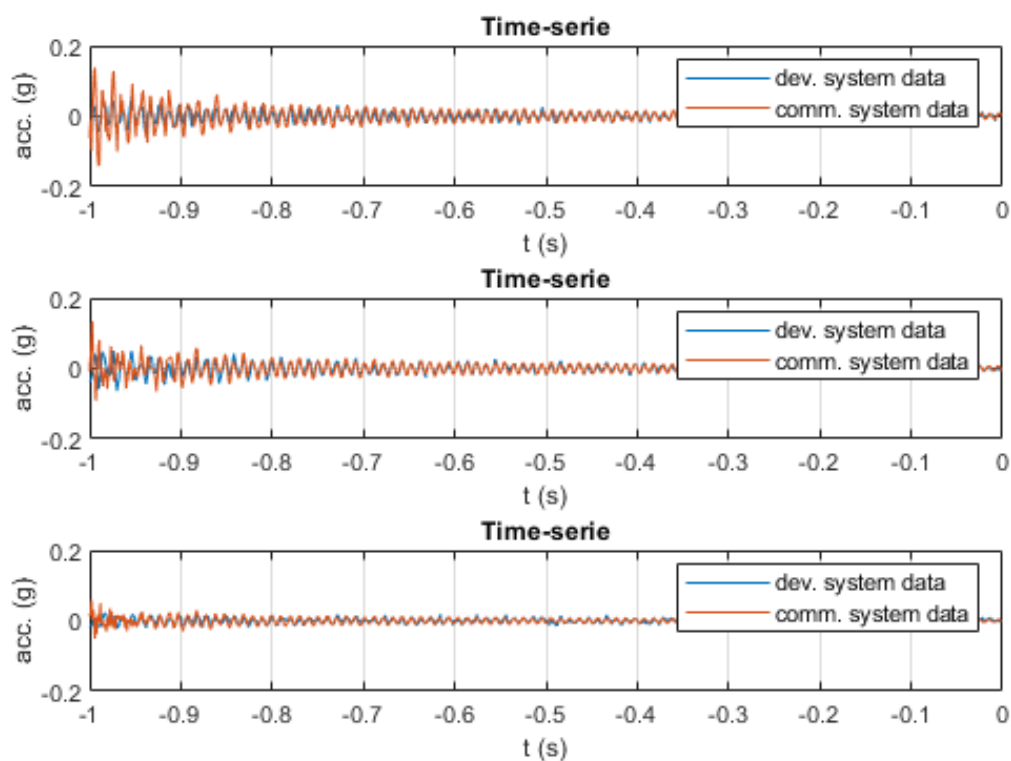
### **4.3 Tractament de les dades, validació i comparació de resultats**

Un cop enregistrades les diferents proves dels tests cal realitzar un post-tractament d'aquestes per poder comparar la precisió que s'obté amb el sistema desenvolupat respecte els resultats enregistrats amb el sistema comercial.

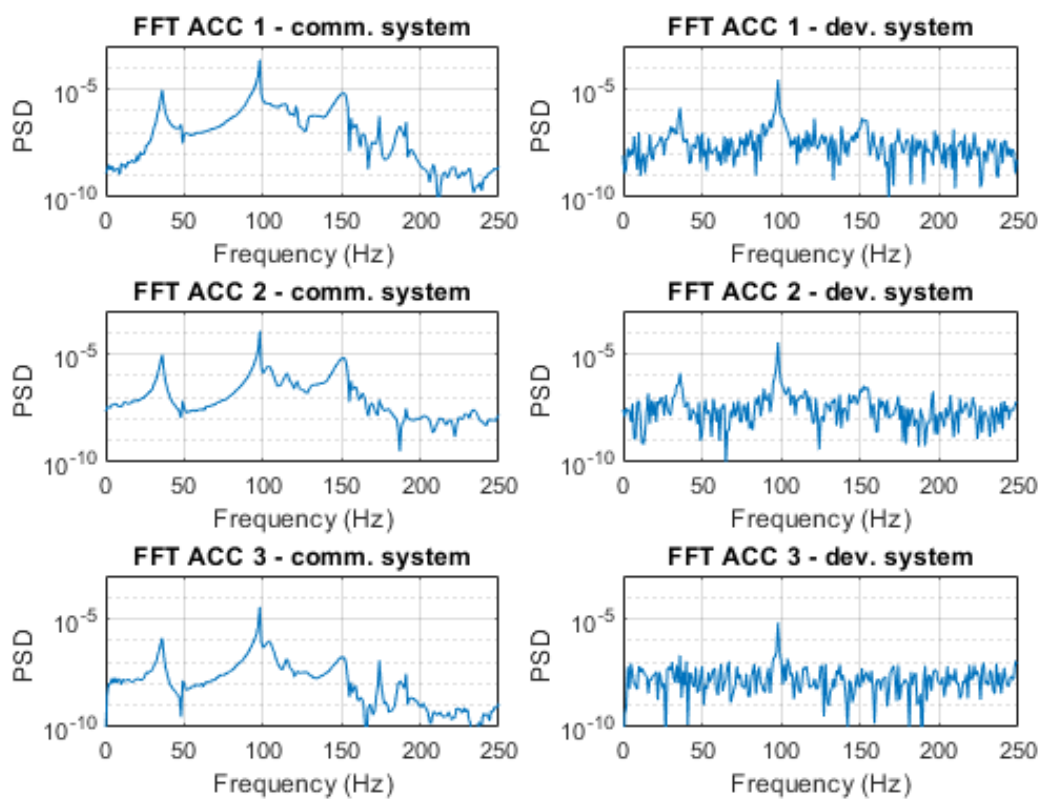
Cal remarcar que el procés d'enregistrament de les dades és completament diferent entre els dos sistemes, ja que el sistema comercial capta totes les dades de vibracions des del moment en que s'activa el botó de "play" en la terminal, fins que es decideix detenir l'enregistrament. En canvi, el sistema desenvolupat és molt més simple, ja que només capta les dades que apareixen en pantalla en el moment d'activar la pausa, és a dir, només queden enregistrades aquelles dades que l'usuari considera necessàries utilitzar i segons les circumstàncies pot ser un aspecte beneficiós per ometre dades innecessàries directament en el moment de la realització dels tests o perjudicial si s'ha reaccionat de manera tardana per activar la pausa i capturar les dades.

Per tal de poder comparar-les cal retallar les dades enregistrades pel sistema comercial i extreure-hi aquelles que es corresponen amb les capturades pel sistema desenvolupat. Coneixent el "sampleig" amb el que s'han enregistrat les dades del sistema comercial, i sabent que el sistema desenvolupat ha captat un total de dades de durada un segon cal seleccionar manualment les dades que coincideixen per tal de poder comparar-les. Un cop realitzat aquest tractament les dades ja poden ser comparades en la seva totalitat i es desenvolupa un codi que sintetitzi el sistema de comparació per tal de verificar la validesa dels resultats obtinguts pel sistema desenvolupat.

Primerament, a partir de les dades obtingudes tant del sistema comercial com del sistema desenvolupat es generen dos grups de gràfics que permeten veure les similituds i diferències que existeixen entre ambdues dades. El primer gràfic, que es pot observar en la Figura 47, mostra els temporals que s'han enregistrat per tots dos sistemes, en cada acceleròmetre, i superposats entre ells. El segon conjunt de gràfics correspon a la representació dels *Fouriers* que es generen amb cada grup de dades dels acceleròmetres. En aquest cas no es superposen els gràfics dels diferents sistemes pel fet de que com es pot observar en la Figura 48 el resultat obtingut pels acceleròmetres del sistema desenvolupat conté bastant "soroll" que embrutaria les dades precises obtingudes pel sistema comercial i, encara sent quelcom que es tractarà més endavant, es prefereix optar per presentar els gràfics per separat, ja que tots dos segueixen permetent la identificació dels pics en les freqüències de ressonància i les dades són més fàcils de tractar i comparar per separat.



**Figura 47** Gràfics dels temporals dels dos sistemes sobreposats



**Figura 48** Gràfics dels *Fouriers* dels dos sistemes

Com es pot apreciar en la Figura 47, la comparació dels senyals es pot fer difícil a simple vista, és per això que a l'utilitzar el codi es recomana utilitzar l'opció d'ampliar la vista o augmentar la finestra de visualització aconseguint així poder veure amb major precisió la forma dels senyals i les similituds i diferències existents.

Les magnituds d'acceleració captades pel sistema comercial són superiors a les captades pel sistema desenvolupat. Això és un indicador clar de la falta de sensibilitat que tenen els acceleròmetres del sistema del treball amb comparació als del sistema comercial. Encara així, existint una diferència apreciable en quant a les magnituds entre ambdues versions, els senyals van bastant sincronitzats entre ells.

Si es realitza un estudi comparatiu de la diferència entre les amplituds dels senyals obtingudes pel sistema comercial i pel sistema desenvolupat es detecta que l'amplitud del senyal mesurat pel sistema desenvolupat sempre és inferior i en alguns cassos només és lleugerament inferior fins al punt d'arribar a tenir una amplitud molt similar a la del sistema comercial.



Quantificant aquesta similitud, els senyals del sistema comercial dels sensors 1 i 2, associats amb els acceleròmetres 1 i 2 del sistema desenvolupat respectivament, acostumen a prendre valors màxims propers als 0.2g i fins i tot en alguns cassos els sobrepassen lleugerament. Per altra banda, les amplituds màximes a les que arriben els senyals detectats pel sistema desenvolupat són de 0.1g i en alguns cassos aconseguen assolir valors lleugerament superiors als 0.15g. En el cas del tercer sensor i del tercer acceleròmetre, com tots dos es troben situats lluny de la font originària de les vibracions els senyals que capten no assoleixen grans amplituds, però d'igual forma que succeïa amb els anteriors, els sensors pel fet de tenir una major sensibilitat sempre són capaços de captar vibracions i això comporta que tinguin majors amplituds. Per tant, l'error entre les amplituds màximes es pot aproximar al 20%, fet que demostra que el sistema desenvolupat manca d'una altra sensibilitat com la del sistema comercial.

El sistema comercial capta un total de 1024 valors en un període d'1 segon com es mostra en els gràfics. Els 1024 valors, que es tradueixen en 1024 dades, permeten representar el seu gràfic temporal, mentre que el sistema desenvolupat només captura un total de 500 valors i, per tant, realitza el gràfic amb una quantitat inferior de dades. És comprensible considerar que les diferències existents poden veure's condicionades pel fet que el sistema desenvolupat estigui enregistrant una menor quantitat de dades, però si s'observa en precisió tots dos senyals es troben força ben sincronitzats i capten les mateixes vibracions, encara que un dels dos les capti amb menor sensibilitat.

Si ara es comparen els gràfics mostrats en la Figura 48, s'aprecia que la nitidesa dels gràfics que s'han obtingut a partir de les dades del sistema comercial és molt superior a la dels gràfics generats a partir de les dades del sistema desenvolupat. Aquests aspectes venen completament condicionats pel número de mostres que ha utilitzat cada sistema en l'enregistrament de les dades dels temporals ja que a major nombre de dades, major precisió i nitidesa s'obté al realitzar la *Transformada de Fourier*.

Cal remarcar que el sistema desenvolupat ha enregistrat les dades amb un "sampleig" de 500 per les limitacions d'aquest, ja que a major quantitat de mesures, major és el retard entre la captació de les dades pels acceleròmetres i la seva representació pel terminal del programa. Aquestes limitacions han condicionat que al final es prenguéssim com a decisió més favorable seleccionar un menor número de "samples" davant d'un major nombre de dades, ja que l'objectiu és assegurar que el sistema permet captar les vibracions generades de forma correcta i un cop realitzats els *Fouriers* permet la correcta identificació de les freqüències de ressonància.

Respecte la identificació de les freqüències en les que la estructura analitzada vibra amb major intensitat, observant els gràfics obtinguts pel sistema comercial s'identifica molt més fàcilment les freqüències de forma precisa, ja que els pics estan molt més definits i gairebé no existeix soroll que embruti el gràfic. Per altra banda, amb els *Fouriers* generats a partir de les dades del sistema desenvolupat també es poden identificar aquelles freqüències on les vibracions són més elevades, però la dificultat per diferenciar-les és major i el soroll existent no facilita una correcta visualització.

En quant a valors obtinguts, tots dos sistemes acaben coincidint amb els valor de les freqüències de ressonància de forma bastant precisa. En la Figura 48 les dues primeres freqüències són identificades amb facilitat (36 i 98 Hz), a partir de la tercera freqüència ja es torna difícil identificar-la amb el sistema desenvolupat, però agafant de referència l'obtinguda amb el sistema comercial (151 Hz) es pot apreciar que en els gràfics del sistema desenvolupat també existeix un pic, menor als anteriors i atenuat amb el soroll, entre els 150 i 160 Hz.

A continuació es presenta una taula comparativa on s'exposen les freqüències obtingudes pels dos sistemes en diferents tests, per tal de poder apreciar la gran similitud de valors que ofereix el sistema desenvolupat respecte el sistema comercial.

		Sistema comercial			Sistema desenvolupat		
		Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Acc. 1	Acc. 2	Acc.3
<b>Test 1</b> - <b>Cop transeversal</b>	1era freqüència (Hz)	36	36	36	36	36	36
	2na freqüència (Hz)	98	98	98	98	98	98
	3ra freqüència (Hz)	152	152	152	152	152	153
<b>Test 2</b> - <b>Cop transversal</b>	1era freqüència (Hz)	36	36	36	36	36	36
	2na freqüència (Hz)	98	98	98	98	98	98
	3ra freqüència (Hz)	152	152	152	152	152	158
<b>Test 3</b> - <b>Cop transversal</b>	1era freqüència (Hz)	36	36	36	37	36	35
	2na freqüència (Hz)	98	98	98	98	98	98
	3ra freqüència (Hz)	152	152	152	153	152	156
<b>Test 1</b> - <b>Cop lateral interior</b>	1era freqüència (Hz)	48	48	48	48	48	48
	2na freqüència (Hz)	98	98	98	98	98	98
	3ra freqüència (Hz)	162	162	162	167	166	164
<b>Test 2</b> - <b>Cop lateral interior</b>	1era freqüència (Hz)	48	48	48	48	48	48
	2na freqüència (Hz)	98	98	98	98	98	98
	3ra freqüència (Hz)	162	162	162	162	165	164
<b>Test 3</b> - <b>Cop lateral interior</b>	1era freqüència (Hz)	48	48	48	48	48	48
	2na freqüència (Hz)	98	98	98	98	98	98
	3ra freqüència (Hz)	162	162	162	162	162	163

**Taula 3** Taula comparativa de les 3 primeres freqüències obtingudes en diversos tests

Com es pot apreciar en la Taula 3, les freqüències obtingudes en la gran majoria dels cassos coincideixen amb total precisió amb les obtingudes pel sistema comercial. Encara així s'observa que la tendència general és a errar en la identificació de la freqüència a major és aquesta, és a dir, per a freqüències baixes el sistema desenvolupat en la gran majoria dels cassos aconsegueix tenir una precisió del 100% en la identificació de les freqüències de ressonància de l'estructura, però a majors valors de freqüències es comencen a percebre errors en la seva mesura que comporten problemes a l'hora d'identificar-les correctament.

Si s'avalua l'error en freqüència entre el sistema comercial i el desenvolupat trobem que en els errors enregistrats sempre es situen per sota del 5%, és a dir, que de forma general l'error màxim que s'aconsegueix detectar entre els altres tests realitzats i els mostrats en la Taula 3 no es desvia en més de 5 Hz respecte la mesura del sistema comercial

Finalment, cal recordar que com s'ha explicat anteriorment, i s'ha mostrat en la Figura 45, el tercer acceleròmetre del sistema desenvolupat i el tercer sensor del sistema comercial s'han situat a una alçada inferior en la columna que continua la barra situada en la zona superior. En aquesta zona els sensors es troben molt més lluny del focus on s'ha realitzat el cop que ha generat les vibracions, i encara que el sistema comercial és capaç de captar les vibracions amb gran precisió s'observa una pèrdua en les magnituds captades. Per altra banda, el sistema desenvolupat ja té les seves pròpies limitacions de precisió i el fet de situar el tercer acceleròmetre lluny de la zona on es colpeja l'estructura ha afavorit a què les vibracions captades hagin estat menors i, en conseqüència, a l'hora de representar la *Transformada de Fourier* d'aquestes dades s'hagi aconseguit un resultat de menor qualitat, el qual només permet identificar amb facilitat una de les freqüències de ressonància de l'estructura.

Considerant que les Figures 47 i 48 es corresponen a un cas concret dels tests realitzats, exposades per tal de poder brindar una representació general dels resultats que s'obtenen després del processament de les dades, en tots els diferents tests el tercer acceleròmetre sempre ha detectat un menor nivell en la magnitud de les vibracions ja que les condicions de precisió i posició han contribuït a que sigui més difícil obtenir uns valors precisos. Encara així, aquest tercer acceleròmetre ha permès verificar que malgrat la sensibilitat dels acceleròmetres utilitzats pel sistema desenvolupat no és tan alta com la dels sensors d'alta precisió del sistema comercial, s'aconsegueix poder detectar algunes de les freqüències de ressonància que serien perilloses per l'estabilitat de l'estructura i, a més, contribueix a verificar que les dades obtingudes pels altres acceleròmetres són correctes.

## 5 Caracterització modal d'un sistema mecànic

Utilitzant el treball realitzat en la campanya de verificació es procedeix a continuar amb el post-processat de les dades brindades pels acceleròmetres per tal poder obtenir una caracterització modal de l'estructura que s'ha estat estudiant.

Com s'ha exposat al llarg de l'apartat 4 del treball, l'estudi realitzat de l'estructura en qüestió s'ha fet utilitzant un total de 3 acceleròmetres, és per això, que la caracterització modal que es pot obtenir no és la més precisa possible de l'estructura. A més, utilitzant els 3 tipus de tests com a referència, en el moment de realitzar la representació modal en 3D de l'estructura només es podran observar diferències en el sentit de les vibracions entre els tests on el cop s'ha realitzat transversalment a l'estructura i els tests on el cap s'ha realitzat des del lateral interior de l'estructura.

### 5.1 Adaptació del codi de post-procés per al sistema mecànic sota estudi

En la secció 3.4.2 s'havia exposat el complet desenvolupament del codi de post-processat de les dades, i s'havia remarcat el fet de què cada post-processat requereix d'haver definit amb antelació l'estructura sota estudi per tal de poder obtenir la correcta representació i caracterització modal. És per això que per tal d'implementar el codi de post-processat desenvolupat anteriorment cal modificar certs aspectes en relació a la nova estructura.

Un dels primers aspectes a contemplar és la forma de l'estructura. A diferència de la biga aquesta estructura no pot ser representada com un cos bidimensional sobre el qual es poden realitzar els gràfics corresponents a les formes dels modes donat que els cops que s'han realitzat sobre l'estructura acaben constituint una imatge en tres dimensions.

Amb la finalitat de poder representar les formes dels modes a partir de les dades obtingudes dels acceleròmetres cal redefinir l'estructura en el codi, de forma simple assignant una estructura composta per dos bigues unides en forma de L invertida. Aquesta estructura simple permet visualitzar els resultats obtinguts pels acceleròmetres, ja que tots ells es troben sobre aquesta part de l'estructura i permet evitar la complexitat del disseny del cos central.

Un cop definida l'estructura amb la nova forma es tornen a realitzar els mateixos passos que en el primer post-procés, primer de tot es sol·licita a l'usuari que identifiqui des d'on s'ha realitzat el cop a l'estructura ja que és un aspecte clau a l'hora de representar les formes dels modes. Com ja s'ha explicat anteriorment, en la totalitat dels diversos tests han hagut dos posicions

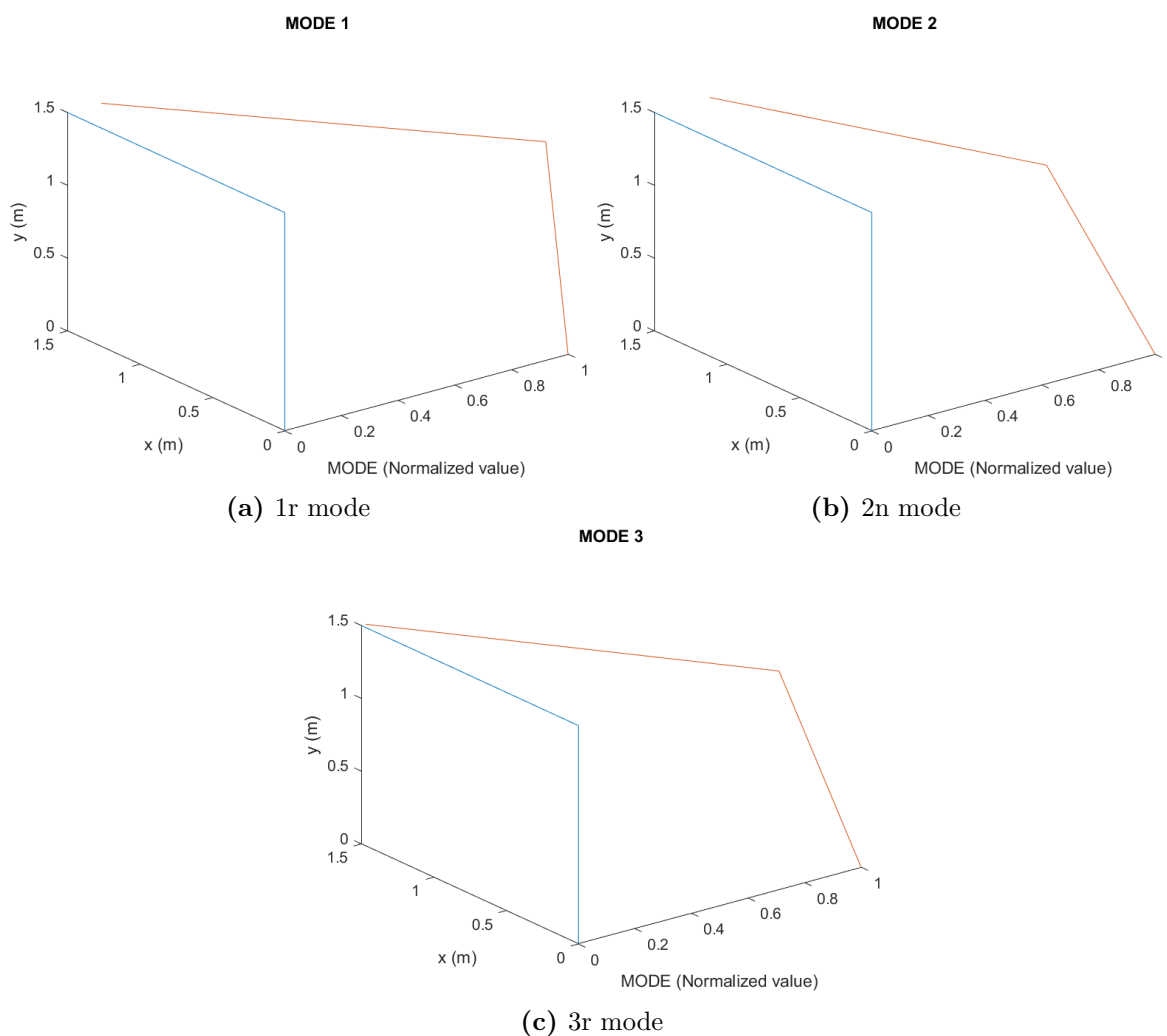
des d'on s'ha realitzat el cop: des del lateral interior de l'estructura i des de la paret externa de l'estructura, transversalment a la part superior en forma de biga. Havent especificat la posició del cop es generen els gràfics que s'han mostrat en la secció 4.3 en les Figures 47 i 48.

A partir d'observar els gràfics de la Figura 48 es requereix a l'usuari que identifiqui les freqüències de ressonància i un cop aquestes són identificades el programa ja té totes les dades necessàries per poder generar els gràfics pertinents i aportar les matrius MAC per verificar la correcta realització de l'estudi modal que es duu a terme.

Remarcant que pels diferents tests realitzats sobre l'estructura i un cop analitzades les dades obtingudes en la gran totalitat de les proves realitzades la quarta freqüència acostuma a no ser identificable. Per aquest motiu es readapta el codi de post-processat per tal de que pugui seguir realitzant els mateixos processos que anteriorment, però només requerint la identificació dels tres primers pics de freqüències. En conseqüència, només es representaran 3 modes i la matriu MAC correspondrà a una  $3 \times 3$ .

## 5.2 Resultats de la caracterització modal

Un cop el codi ha estat modificat i l'usuari ha introduït totes les dades pertinents per completar el post-processat de les dades es generen els resultats de la caracterització modal. Primerament, es generen diversos gràfics en tres dimensions, com es poden veure en la Figura 49, per a cada mode generat a partir de les freqüències identificades.



**Figura 49** Representació dels modes a partir de les dades dels acceleròmetres en 3D

El cas mostrat correspon a la representació per un dels tests on les vibracions s'han generat a partir d'un cop transversal.

Per tal de poder identificar millor la forma del mode es disposa de color blau la forma simplificada de l'estructura i de color vermell els valors normalitzats que dona forma al mode en la respectiva posició d'on es trobava l'acceleròmetre.

Com es pot apreciar, la precisió en la forma del mode no és gaire bona ja que al final es parteix només de tres valors i, a més, la forma més complexa de l'estructura dificulta una fàcil comprensió de les dades ja que el factor 3D pot ser perjudicial a l'hora de poder veure amb claredat la forma del mode.

Igual que en l'anterior post-procés, de forma simultània a la caracterització modal es realitza la AUTOMAC i la MAC, per tal d'aportar una major validesa i credibilitat als resultats que s'obtinguin. A continuació, en les Figures 50 i 51 es poden veure els valors que prenen cada una de les matrius respectivament.

**AUTOMAC:**

1.0000	0.9786	0.9063
0.9786	1.0000	0.9732
0.9063	0.9732	1.0000

**Figura 50** AUTOMAC obtinguda a partir dels valors dels sensors

**MAC:**

0.9939	0.9238	0.9663
0.9940	0.9823	0.9910
0.9435	0.9981	0.9703

**Figura 51** MAC comparativa entre els valors del sistema desenvolupat i el sistema comercial

La Figura 51 pot ser considerada de poca rellevància donat que, encara mostrar la "qualitat" de la relació entre les dades obtingudes pel sistema desenvolupat i les obtingudes pel sistema comercial, els valors de l'AUTOMAC són molt elevats. El fet de ser números tan alts i d'obtenir-ne també de molt alts no ens assegura que un sistema s'assembli realment a l'altre. Per tant, és pot tenir en consideració la MAC obtinguda, però no es tractarà donat que no aporta gaire valor.

## 6 Anàlisi i valoració de les implicacions ambientals i socials

En el que respecta a les implicacions ambientals i socials que pot tenir aquest treball no han estat aspectes fonamentals sobre els que s'ha pogut treballar donat que tot el treball ha estat realitzat de forma individual i en cap dels procediments s'ha realitzat quelcom que pogués ferir o malmetre a nivell ambiental el medi ambient.

Cal remarcar que l'ús d'elements computacionals en la majoria dels cassos contribueix a la generació de  $CO_2$ , ja que les companyies que ofereixen els seus serveis de navegació per Internet utilitzen servidors, els equips dels quals sostenen el seu funcionament per a tota la població contribueixen de forma negativa en les emissions perjudicials pel medi ambient.

Si es tracta a nivell ambiental el projecte realitzat es pot dir que tot el treball realitza a contribuït molt poc en perjudicar el medi ambient, ja que a part del sistemes computacionals utilitzats els quals requereixen d'electricitat pel seu funcionament, l'estructura amb la que s'ha realitzat l'estudi, els objectes utilitzats i el sistema comercial ja havien estat adquirits anteriorment i es pot veure com una reutilització d'aquests elements.

En referència a les implicacions socials, aquest projecte pretén aportar una solució més econòmica per a les empreses en cas de voler realitzar estudi de vibracions i caracteritzacions modals. Per tant, la funció social del treball està majoritàriament enfocada en suplir una necessitat que algunes empreses del sector de l'enginyeria o la construcció poden arribar a tenir, però també en donar la possibilitat de que un usuari qualsevol, independent a una empresa, pugui tenir un sistema de certa fiabilitat per a la mesura de vibracions a un preu molt més econòmic que un sistema comercial.



## 7 Conclusions

Després de completar el disseny i desenvolupament d'un sistema de vibracions multicanal de baix cost, es poden remarcar algunes lliçons apreses i els punts forts del treball acabat.

L'objectiu del treball tenia un abast de tres àmbits. Primerament, s'havia de desenvolupar el sistema multicanal, partint d'un sistema inicial proporcionat pel tutor del treball, el qual requeria d'una revisió i una readaptació en diferents àmbits com ara el software o la interfície de control. El segon àmbit consistia en un cop finalitzat el desenvolupament del sistema calia realitzar una campanya de verificació que demostrés la fiabilitat dels sistema i aportés de forma empírica resultats analitzables per a poder obtenir unes conclusions adequades sobre el correcte funcionament del sistema. Finalment, havent realitzat totes les anteriors seccions, per tal de tancar el treball es volia realitzar la caracterització modal d'un sistema mecànic el qual mostrés en resultats l'eficàcia del sistema desenvolupat.

Tots els àmbits del treball estaven íntegrament relacionats, ja que al final corresponien a diferents fases per les que anava passant el desenvolupament d'un sistema com el tractat per tal de poder considerar-lo com a un sistema real i de confiança.

La revisió inicial del sistema va permetre observa les carències d'aquest en quant als objectius que es tenien i va assentar unes bases pel treball. Un cop analitzat el desenvolupament del software i simultàniament de la interfície d'usuari va ser un procés lent, on molt cops es van produir encalls a l'hora de voler avançar per falta d'experiència prèvia en programació o per no saber com enfocar certs aspectes per falta de coneixement sobre l'àmbit. Amb l'ajuda i suport del tutor es va poder completar els desenvolupament dels algorismes i codis de post-processat els quals van acabar complint amb al finalització de la primera etapa del treball.

Si bé el procés de determinació i elecció de l'algoritme que implementa la correlació ha tingut dues fases, el fet d'haver realitzat dos plantejaments diferents ha enriquit el projecte mostrant com un sistema aparentment òptim, basant-se en conceptes teòrics i que aportava molt poca desviació dels resultats esperats ha sigut menys adequat per a la seva implementació que un procés optimitzat on de forma directe s'ha buscat obtenir la millor correlació sense realitzar pas per pas la detecció i correcció dels errors en temps i freqüència, sinó que de forma iterativa s'ha pogut obtenir una solució molt més precisa.

El post processat dels resultats junt amb la campanya de verificació van ser processos certament més ràpids en quant a dedicació ja que un cop obtinguts els resultats de forma sincronitzada per part del codi principal el seu tractament va ser molt menys complexe. A més, un cop realitzats els diferents tests de la campanya de verificació, tenint ja dissenyat el codi de post-processat la seva adaptació a les noves circumstàncies a estudi van ser més ràpides en qüestió de dedicació.

Finalment la caracterització modal del sistema mecànic va ser un procés molt menys el·laborat en qüestió de desenvolupament de codi, ja que el post-tractament de dades per a la seva correcta comparació i anàlisi va ser realitzada durant la campanya de verificació. La readaptació del codi de post-processat per la realització d'una caracterització modal era un procés en el que calia reconstruir el sistema de representació gràfica dels modes donada l'estructura tridimensional, però a nivell conceptual el procediment que calia seguir era el mateix que per a una estructura bidimensional com la biga.

Els resultats mostrats i comentats en anteriors seccions han volgut col·laborar el fet de que el sistema desenvolupat permet realitzar un estudi de vibracions per a caracterització modal certament bo, encara que demostra tenir carències en diversos aspectes si es compara amb el sistema d'alta precisió comercial utilitzat per a la campanya de verificació.

Un dels objectius principals del treball consistia en no només desenvolupar el sistema, sinó poder analitzar fins a quin punt pot arribar a competir amb un de comercial, i un cop finalitzat el projecte es pot dir que els resultats han sigut òptims i compleixen amb l'esperat. L'objectiu principal del treball i els altres objectius plantejats s'han complert assolint els requeriments que s'havien contemplat inicialment per a la seva culminació i, encara havent-hi aspectes a millorar de cara a una continuació del projecte, l'anàlisi de tot el progrés en el desenvolupament d'un sistema de mesura de vibracions multicanal de baix cost ha complert satisfactòriament amb les expectatives.

## 8 Treball futur

El present treball s'ha enfocat principalment en aconseguir assolir aquells objectius que s'havien plantejat a l'inici del projecte de la forma més òptima possible, però certs aspectes han sigut complicats d'aplicar en la seva perfecció i, encara permetent l'evolució del treball i la seva culminació, han condicionat certes situacions. És per això, que en cas de que el projecte hagi de ser continuat i es vulguin realitzar millores en la seva aplicació cal tenir en ment certes casuístiques que s'han anat comentant al llarg del treball.

Un dels aspectes més importants és el fet de les limitacions que s'han trobat pel nombre d'acceleròmetres utilitzat. Cal enfocar aquest problema de manera que es pugui obtenir de forma òptima dades sincronitzades de molts més acceleròmetres, de forma simultània i sense retard en la seva representació.

Clarament, l'aspecte del retard, no només condicionat pel nombre d'acceleròmetres connectats, sinó també per la mesura de dades seleccionada o les opcions escollides per l'usuari és un tema que cal analitzar per tal de millorar l'experiència de l'usuari en el moment de realitzar les mesures i també per aconseguir la millor obtenció de dades de forma simultània en la realització d'un test.

En quant a la verificació del sistema desenvolupat, s'han detectat certes carències en quant a precisió i sensibilitat. Considerant que aquests aspectes no han condicionat de forma negativa els resultats obtinguts, però si podrien ser perjudicials en segons quines aplicacions es volgués donar al sistema desenvolupat, cal analitzar de forma més específica l'origen d'aquests errors, i en cas de considerar que poden provenir dels acceleròmetres o del sistema utilitzat es podria contemplar l'adquisició d'acceleròmetres de major qualitat.

Finalment, respecte l'últim aspecte en el que s'ha treballat en el projecte, la caracterització modal d'una estructura per mitjà del post-processat desenvolupat és complicada d'analitzar. Evidentment, utilitzant un sistema d'elements finits i un altre tipus d'anàlisi es podrien aconseguir resultats molt més satisfactoris. Per això, un altre aspecte a contemplar seria la possible integració d'un sistema d'elements finits a partir de les dades obtingudes dels acceleròmetres per tal de poder construir una caracterització modal el més completa possible.

## 9 Pressupost

En la següent secció es presenta el pressupost estimat per a la realització del present treball. S'exposa de forma desglossada les diferents parts del pressupost amb una breu descripció per tal de facilitar la comprensió i els motius dels costos estimats.

Com que la part de continuació del projecte realitzada en aquest treball no requereix de la compra de material ja que inicialment ja es partia amb tots els estris necessaris per al seu desenvolupament el cost d'acceleròmetres i altres components físics no és contemplat.

Bloc de treball	Dedicació [h]	Cost unitari [€/h]	Cost [€]
Recerca d'informació	40	15	600
Programació de codi	220	15	3300
Redacció i documentació	60	15	900
<b>Ús d'equip i material</b>			
Ús llicència de MATLAB			200
Ús portàtil MSI GS66 Stealth			400
<b>Cost total</b>			<b>5400 €</b>

**Taula 4** Pressupost segons principals blocs de treball i costos associats

El preu per hora ha estat estimat a partir del sou d'enginyer júnior, el qual s'assigna a 15€/hora. La recerca d'informació inclou tots els processos relacionats amb la familiarització de la documentació necessària per a la comprensió dels diferents aspectes del projecte. El bloc de programació de codi correspon al temps dedicat a la familiarització amb el llenguatge de programació *Python* i amb el codi inicial, junt amb el temps dedicat a la creació de les noves parts del codi, el seu testeig i verificació. Finalment, el bloc de redacció i documentació del codi explica el desenvolupament d'aquest treball, així com la presentació del codi.

Els costos derivats de l'ús de MATLAB i del portàtil han esta estimats a partir del preu complet d'aquests considerant que el seu ús no ha de ser completament subvencionat. Per a l'ús de la llicència de MATLAB s'ha estimat un 10% del preu total de la llicència, mentre que pel portàtil s'ha considerat un 20% del seu preu total.

## Referències

- [1] Brüel Kjør. Guía completa para la medición de vibraciones. <https://www.bksv.com/es/knowledge/blog/vibration/measuring-vibration>. [En línia]; Últim accés: 16 juny 2022.
- [2] Zoran Gajic. *Linear dynamic systems and signals*. Prentice Hall/Pearson Education Upper Saddle River, 2003.
- [3] Miroslav Pastor, Michal Binda, and Tomáš Harčarik. Modal assurance criterion. *Procedia Engineering*, 48:543–548, 2012. Modelling of Mechanical and Mechatronics Systems.
- [4] Tony Schmitz and K. Smith. *Mechanical vibrations. Modeling and measurement*. 08 2013.
- [5] Tim South. *Managing noise and vibration at work: A practical guide to assessment, measurement and control*. 05 2013.
- [6] Robert Arcos Villamarín. Vibracions mecàniques, 2020. Últim accés: 22 setembre 2022.
- [7] Paolo L Gatti. *Applied structural and mechanical vibrations: theory, methods and measuring instrumentation*. CRC Press, 1999.
- [8] Anders Brandt. *Noise and vibration analysis: signal analysis and experimental procedures*. John Wiley & Sons, 2011.
- [9] ASC. 3-axis accelerometer asc os-315ln-pg. <https://www.directindustry.com/prod/asc/product-54033-2242661.html>. [En línia]; Últim accés: 16 juny 2022.
- [10] Baker Hughes. Proximity probes, sensors and transducer systems. <https://www.bakerhughes.com/bently-nevada/sensors/proximity-sensors>. [En línia]; Últim accés: 16 juny 2022.
- [11] NATIONAL INSTRUMENTS CORP. Measuring vibration with accelerometers. <https://www.ni.com/es-es/innovations/white-papers/06/measuring-vibration-with-accelerometers.html>, 05/2022. [En línia]; Últim accés: 16 juny 2022.
- [12] MachineDesign. What's the difference between vibration sensors? <https://www.machinedesign.com/mechanical-motion-systems/article/21837036/whats-the-difference-between-vibration-sensors>, 08/2018. [En línia]; Últim accés: 16 juny 2022.

- [13] Dewesoft. Vibration measurement. <https://training.dewesoft.com/online/course/vibration-measurement>, 2020-2022. [En línia]; Últim accés: 16 juny 2022.
- [14] Manish Kumar Saini. What is correlation in signals and systems? <https://www.tutorialspoint.com/what-is-correlation-in-signals-and-systems>, 03/2022. [En línia]; Últim accés: 15 juny 2022.
- [15] NumPy Developers. numpy.correlate. <https://numpy.org/doc/stable/reference/generated/numpy.correlate.html>, 2008-2022. [En línia]; Últim accés: 4 juny 2022.
- [16] Mohammad Farshchin. Frequency domain decomposition (fdd). <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/50988-frequency-domain-decomposition-fdd>, 2015. [En línia]; Últim accés: 31 agost 2022.
- [17] Robert D. Blevins and R. Plunkett. Formulas for Natural Frequency and Mode Shape. *Journal of Applied Mechanics*, 47(2):461–462, 06 1980.
- [18] SIEMENS. Simcenter scadas mobile and scadas recorder. <https://community.sw.siemens.com/s/article/simcenter-scadas-mobile-and-scadas-recorder>, 2022. [En línia]; Últim accés: 29 agost 2022.
- [19] William Menke and Joshua Menke. 9 - detecting correlations among data. In William Menke and Joshua Menke, editors, *Environmental Data Analysis with MatLab*, pages 167–201. Elsevier, Boston, 2012.
- [20] Donald W. Boyd. Chapter 8 - stochastic analysis. In Donald W. Boyd, editor, *Systems Analysis and Modeling*, pages 211–227. Academic Press, San Diego, 2001.
- [21] EPFL Technical University. Correlation and cross-correlations. [https://www.epfl.ch/labs/apr1/wp-content/uploads/2018/08/05\\_correlations.html](https://www.epfl.ch/labs/apr1/wp-content/uploads/2018/08/05_correlations.html), 2018. [En línia]; Últim accés: 4 juny 2022.