



Universitat de Girona

DESENVOLUPAMENT D'UNA METODOLOGIA PER LA CARACTERITZACIÓ EN TERRA D'INSTRUMENTACIÓ ESPACIAL

Albert CATALÁN ARTIGAS

Dipòsit legal: GI. 1810-2012

<http://hdl.handle.net/10803/96382>

ADVERTIMENT. L'accés als continguts d'aquesta tesi doctoral i la seva utilització ha de respectar els drets de la persona autora. Pot ser utilitzada per a consulta o estudi personal, així com en activitats o materials d'investigació i docència en els termes establerts a l'art. 32 del Text Refós de la Llei de Propietat Intel·lectual (RDL 1/1996). Per altres utilitzacions es requereix l'autorització prèvia i expressa de la persona autora. En qualsevol cas, en la utilització dels seus continguts caldrà indicar de forma clara el nom i cognoms de la persona autora i el títol de la tesi doctoral. No s'autoritza la seva reproducció o altres formes d'explotació efectuades amb finalitats de lucre ni la seva comunicació pública des d'un lloc aliè al servei TDX. Tampoc s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant als continguts de la tesi com als seus resums i índexs.

ADVERTENCIA. El acceso a los contenidos de esta tesis doctoral y su utilización debe respetar los derechos de la persona autora. Puede ser utilizada para consulta o estudio personal, así como en actividades o materiales de investigación y docencia en los términos establecidos en el art. 32 del Texto Refundido de la Ley de Propiedad Intelectual (RDL 1/1996). Para otros usos se requiere la autorización previa y expresa de la persona autora. En cualquier caso, en la utilización de sus contenidos se deberá indicar de forma clara el nombre y apellidos de la persona autora y el título de la tesis doctoral. No se autoriza su reproducción u otras formas de explotación efectuadas con fines lucrativos ni su comunicación pública desde un sitio ajeno al servicio TDR. Tampoco se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al contenido de la tesis como a sus resúmenes e índices.

WARNING. Access to the contents of this doctoral thesis and its use must respect the rights of the author. It can be used for reference or private study, as well as research and learning activities or materials in the terms established by the 32nd article of the Spanish Consolidated Copyright Act (RDL 1/1996). Express and previous authorization of the author is required for any other uses. In any case, when using its content, full name of the author and title of the thesis must be clearly indicated. Reproduction or other forms of for profit use or public communication from outside TDX service is not allowed. Presentation of its content in a window or frame external to TDX (framing) is not authorized either. These rights affect both the content of the thesis and its abstracts and indexes.



Universitat de Girona

TESI DOCTORAL

**DESENVOLUPAMENT D'UNA METODOLOGIA
PER LA CARACTERITZACIÓ EN TERRA
D'INSTRUMENTACIÓ ESPACIAL**

Albert CATALÁN ARTIGAS

Any 2011



Universitat de Girona

TESI DOCTORAL

**DESENVOLUPAMENT D'UNA METODOLOGIA
PER LA CARACTERITZACIÓ EN TERRA
D'INSTRUMENTACIÓ ESPACIAL**

Albert CATALÁN ARTIGAS

Any 2011

PROGRAMA DE DOCTORAT DE PROJECTES D'INNOVACIÓ
TECNOLÒGICA EN L'ENGINYERIA DE PRODUCTE I PROCÉS

Dirigida per:

Director de Tesi: Dr. Jaume Gibert Pedrosa, UPC
Tutor de Tesi: Dr. Joaquim de Ciurana Gay, UdG

Memòria presentada per optar al títol de doctor per la Universitat de Girona



Universitat de Girona

Dr. JAUME GIBERT PEDROSA, doctor enginyer industrial de la Universitat Politècnica de Catalunya.

Dr. QUIM DE CIURANA GAY, catedràtic d'universitat del Departament d'Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial de la Universitat de Girona.

CERTIFIQUEM:

Que la memòria que porta per títol '*Desenvolupament d'una metodologia per la caracterització en terra d'instrumentació espacial*', que presenta Albert CATALAN ARTIGAS, recull el treball realitzat sota la nostra direcció i tutoria i que constitueix la seva Tesi per optar al grau de Doctor per la Universitat de Girona.

Per tal que tingui els efecte que correspongui, signem el present certificat.

Girona, novembre 2011

Dr. JAIME GIBERT PEDROSA

Dr. QUIM DE CIURANA GAY

*A les persones que més estimo i
per les persones que més m'han estimat*

Agraïments

Amb la voluntat de no oblidar-me a ningú, m'agradaria des d'aquestes línies fer explícit el meu agraïment a totes les persones que m'han ajudat durant el llarg camí de realització d'aquesta tesi doctoral. I més particularment a les següents persones:

Primer de tot, al director de tesi Dr. Jaume Gibert de la UPC, la seva experiència i sabies indicacions m'han guiat durant el complexa camí de la investigació aconseguint així arribar a l'objectiu.

Al tutor de tesi i coordinador responsable del programa interuniversitari Dr. Quim de Ciurana de la UdG, li agraeixo l'ànim i el respecte que sempre n'he obtingut d'ell.

A la gent de NTE-SENER, la seva experiència en el camp que tracta la tesi m'ha sigut de gran ajut.

Als companys del grup de recerca LITEM, per les trifulgues compartides durant la campanya de test del Sistema VIF.

Als meus companys del departament d'Enginyeria Mecànica de la UPC, pels ànims i les forces que m'han transmès per continuar endavant.

A la Gemma per la seves valuoses indicacions en tot allò referent a referències, articles i bibliografia. Els seus consells han sigut sempre de gran utilitat.

Als meus amics que han hagut de suportar explicacions, queixes i retrets però que sempre els hem sabut amenitzar per treure'n profit i créixer plegats.

Agrair l'esforç, comprensió, ànims i recolzaments que m'ha aportat la Marta. Sense la seva energia i forma d'encarar les adversitats, m'hauria sigut molt difícil poder portar a bon terme tot aquest esforç.

A la meva germana i al meu cunyat, pel seu ajut durant el llarg camí de la carrera d'enginyeria industrial. És sempre difícil compaginar treball i estudis, i les seves indicacions i consells sempre van ser molt bon rebuts i d'una ajuda inestimable.

I per últim però no per això menys importat, als meus pares, a qui els dec ser qui soc. Agrair, per sobre de tot, la seva confiança en mi com a persona. Sense el seu recolzament incondicional al llarg dels anys no hauria arribat mai fins aquest final d'etapa docent. Gràcies de tot cor.

Llista d'abreviatures

A	<i>Article (veure Capítol 7)</i>
C.A.	<i>Corrent alterna</i>
C.C.	<i>Corrent contínua</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CdG	<i>Centre de Gravetat</i>
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
DR	<i>Document de referència</i>
ESA	<i>European Space Agency</i>
EMG	<i>Electromyography</i>
EMI	<i>Electromagnetic Interference</i>
FEM	<i>Finite Element Model</i>
FRF	<i>Funcions de resposta en freqüència</i>
HRF	<i>Human Research Facility</i>
ICD	<i>Interface Control Document</i>
IDD	<i>Interface Definition Document</i>
IF	<i>Interface</i>
ISPR	<i>International Standard Payload Rack</i>
ISS	<i>International Space Station</i>
L	<i>Llibre (veure Capítol 7)</i>
LITEM	<i>Laboratori per la Innovació Tecnològica d'Estructures i Materials</i>
LL	<i>Lower Left</i>

LR	<i>Lower Right</i>
MARES	<i>Muscle Atrophy Research and Exercise System</i>
M.d.i.	<i>Moment d'inèrcia</i>
MEF	<i>Mètode d'elements finits</i>
N	<i>Norma (veure Capítol 7)</i>
N/A	<i>No Aplicable</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NCR	<i>Non Conformance Report</i>
PEMS	<i>Percutaneous Muscle Simulator</i>
RDP	<i>Rack Datum Point</i>
UdG	<i>Universitat de Girona</i>
UL	<i>Upper Left</i>
UPC	<i>Universitat Politècnica de Catalunya</i>
UR	<i>Upper Right</i>
VIF	<i>Vibration Isolation Frame</i>
W	<i>Pàgina web (veure Capítol 7)</i>

Índex General

	pàg.
LLISTA D'ABREVIATURES	6
ÍNDEX GENERAL	8
RESUM	11
ABSTRACT	12
CAPITOL 1. INTRODUCCIÓ. ESTAT DE L'ART	13
1.1 CONTEXT, DESCRIPCIÓ I FUNCIÓ DE L'EQUIP D'ESTUDI	15
1.1.1 <i>Condicions ambientals de la instrumentació</i>	15
1.1.2 <i>Equip MARES i Sistema VIF</i>	18
1.2 OBJECTIU DE LA TESI	20
1.3 ESTAT DE L'ART	21
1.3.1 <i>Aplicació dels models FEM a la indústria mecànica</i>	21
1.3.2 <i>Metodologia seqüencial d'aplicació dels models d'elements finits</i>	22
1.3.3 <i>Metodologia correlada d'aplicació dels models d'elements finits</i>	23
1.3.4 <i>Articles de revisió de l'estat de l'art</i>	25
1.4 ESTRUCTURA DE LA TESI	26
1.5 CONDICIONANTS DELS PROJECTES ESPACIALS	27
1.5.1 <i>Característiques de la instrumentació espacial</i>	27
1.5.2 <i>Condicionants espacials en el disseny d'instrumentació espacial</i>	28
1.5.3 <i>Condicionants d'anàlisi</i>	33
1.5.4 <i>Condicionants de fabricació</i>	36
1.5.5 <i>Condicionants de test</i>	37
1.5.6 <i>Condicionants de qualitat</i>	44
CAPITOL 2. DESENVOLUPAMENT DE LA METODOLOGIA	46
2.1 OBJECTIUS DE LA METODOLOGIA	47
2.2 PROCÉS METODOLÒGIC GENERAL	47
2.3 CAMP D'APLICACIÓ DE LA METODOLOGIA GENERAL.....	50
2.4 PROCÉS METODOLÒGIC PARTICULARITZAT AL SISTEMA VIF	51
2.4.1 <i>Paràmetres a analitzar del Sistema VIF</i>	51
2.4.2 <i>Procés metodològic particularitzat al Sistema VIF</i>	52
CAPITOL 3. APLICACIÓ AL SISTEMA VIF: TEST	56
3.1 DESCRIPCIÓ DEL SISTEMA VIF	57
3.1.1 <i>Disseny del Sistema VIF</i>	57
3.1.2 <i>Funcions principals del Sistema VIF</i>	58
3.2 INTERFÍCIES DEL SISTEMA VIF	59
3.3 DESCRIPCIÓ DE L'EQUIP DE TEST	59
3.4 DESCRIPCIÓ DEL L'EQUIP MARES	60
3.5 DESCRIPCIÓ DEL ISPR RACK.....	62
3.5.1 <i>Instal·lació del Sistema VIF al ISPR Rack</i>	63
3.6 DESCRIPCIÓ DEL L'EQUIP DE TEST	64
3.6.1 <i>Bancada de test</i>	65
3.6.2 <i>Eixos de Suport</i>	66
3.6.3 <i>Conjunt excitador</i>	66

3.7	OBJECTIU DEL TEST	68
3.8	DESCRIPCIÓ DELS TESTS	68
3.8.1	<i>Test de fricció</i>	69
3.8.2	<i>Test de forces i moments.....</i>	70
3.8.3	<i>Test de desplaçaments</i>	70
3.8.4	<i>Test d'acceleracions.....</i>	71
3.9	SEQÜÈNCIA D'OPERACIONS.....	73
3.10	DISPOSICIONS PRELIMINARS PER LA REALITZACIÓ DELS TEST.....	74
3.10.1	<i>Determinació de la velocitat de gir del motor.....</i>	74
3.10.2	<i>Determinació del tipus de forces i moments als eixos de suport.....</i>	75
3.10.3	<i>Ubicació de les galgues extensomètriques</i>	77
3.10.4	<i>Determinació del valor de tensió màxima degut a la flexió.</i>	77
3.10.5	<i>Determinació de forces i moments usant galgues extensomètriques.....</i>	78
3.11	CALIBRACIÓ DE GALGUES EXTENSOMÈTRIQÜES, I VALIDACIÓ DELS ACCELERÒMETRES	81
3.11.1	<i>Test de validació dels acceleròmetres.....</i>	82
3.11.2	<i>Instal·lació de les Galgues Extensomètriques</i>	83
3.11.3	<i>Calibració prèvia de Galgues Extensomètriques</i>	85
3.12	RESULTATS DE TEST.....	89
3.12.1	<i>Condicions generals de test.....</i>	89
3.12.2	<i>Resultats del Test de Fricció</i>	89
3.12.3	<i>Resultats del test de forces tallants i moments flectors</i>	97
3.12.4	<i>Resultats del Test de Desplaçaments.....</i>	122
3.12.5	<i>Resultats del Test d'Acceleracions.....</i>	132
3.12.6	<i>Resum dels resultats de test.....</i>	165
CAPITOL 4. APLICACIÓ AL SISTEMA VIF: MODEL FEM I CORRELACIÓ		166
4.1	ELECCIÓ DEL SOFTWARE D'ELEMENTS FINITS	167
4.2	DESCRIPCIÓ DEL MODEL FEM	168
4.3	PROCÉS DE CORRELACIÓ.....	173
4.3.1	<i>Paràmetres a correlar en el model FEM.....</i>	173
4.3.2	<i>Paràmetres que permeten la correlació del model FEM.....</i>	174
4.3.3	<i>Criteri de correlació.....</i>	175
4.3.4	<i>Gràfiques de Correlació.....</i>	176
4.3.5	<i>Resultats de Correlació</i>	186
CAPITOL 5.....		188
APLICACIÓ AL SISTEMA VIF:SIMULACIÓ DEL COMPORAMENT EN μG		188
5.1	DESCRIPCIÓ DEL MODEL FEM COMPLERT (EQUIP MARES, SISTEMA VIF I RACK)	189
5.1.1	<i>Model FEM del Rack.....</i>	190
5.1.2	<i>Model FEM de l'equip MARES</i>	190
5.2	CONDICIONS DE CÀRREGA SOBRE L'EQUIP MARES	192
5.3	NIVELLS D'EXCITACIÓ DE L'EQUIP MARES	195
5.4	RESULTATS EN CONDICIONS DE MICROGRAVETAT	197
5.4.1	<i>Valors admissibles de forces, moments i desplaçaments.....</i>	198
5.4.2	<i>Resultats de càrrega transmesa pel Sistema VIF i factors de seguretat.....</i>	199
5.4.3	<i>Resultats de desplaçament al Sistema VIF i factors de seguretat.....</i>	201
5.5	CONCLUSIONS DELS RESULTATS OBTINGUTS	202
CAPITOL 6. CONCLUSIONS		203
6.1	PRINCIPALS CONCLUSIONS I APORTACIONS	203
6.2	FUTURES LÍNIES DE TREBALL.....	205
6.3	ESTAT FINAL DEL PROJECTE.....	206
6.4	PUBLICACIONS RELACIONADES AMB L'EQUIP MARES.....	207

CAPITOL 7.	REFERENCIES BIBLIOGRÀFIQUES	208
▪	LIBRES	209
▪	ARTICLES	209
▪	NORMES	211
▪	PAGINES WEB	212

Resum

El desenvolupament d'equips espacials ha portat associat en molts casos la dificultat de poder comprovar el comportament que aquests equips tindran en unes condicions significativament diferents a les condicions en que aquests equips s'han desenvolupat aquí a la terra. El cas més evident és segurament el desenvolupament d'equips de tipus mecànics que requereixen un pes optimitzat, però que a contrapartida no és possible validar el seu comportament final en idèntiques condicions de treball amb absència de gravetat.

El present treball planteja una metodologia que, basant-se fonamentalment en models d'elements finits caracteritzables, permet analitzar, a la fase de desenvolupament del projecte, el comportament que aquests equips i sistemes mecànics tindran un cop es trobin instal·lats en condicions de microgravetat.

Per aconseguir aquest propòsit, inicialment es desenvolupa una metodologia general que permet ser aplicada a qualsevol equip o sistema espacial on sigui necessari conèixer el comportament de qualsevol paràmetre d'enginyeria que es trobi afectat per les particulars condicions de l'espai. Posteriorment, la teoria general es particularitza pel cas concret d'un sistema mecànic, el Sistema VIF, plantejant així una metodologia particular que permet predir a terra el comportament que tindran un seguit de paràmetres mecànics quan el Sistema VIF es trobi en condicions de microgravetat.

Un cop definits els paràmetres mecànics que es volen analitzar i caracteritzar del Sistema VIF (forces, moments, velocitats, acceleracions, etc), s'inicia la fase de test. En aquesta fase es desenvolupa un equip de test on s'hi instal·la el Sistema VIF. L'excitació externa que s'efectua sobre el Sistema VIF permet recollir, usant els sensors adients (acceleròmetres, galgues extensomètriques, sensors de posició, etc), el comportament del Sistema VIF per diferents nivells d'excitació. D'aquesta manera, s'obté la caracterització del Sistema VIF a terra.

Una vegada es disposa del Sistema VIF ja caracteritzat a terra, cal realitzar un model d'elements finits (FEM) del Sistema VIF. Aquest model es caracteritza adequadament per tal que assoleixi el mateix comportament que mostrava el Sistema VIF durant la fase de tests. Finalment, s'aplica sobre el model FEM la condició d'ingravedesa imposant un valor de gravetat nul·la. D'aquesta manera, s'obté el comportament del Sistema VIF en aquestes particulars condicions de microgravetat que proporciona l'espai.

La predicció del comportament d'equips espacials és necessària en molts casos per tal de certificar el compliment d'especificacions i requeriments marcats des de l'inici de desenvolupament del projecte.

Abstract

The development of space equipment has led in many cases associated the difficulty to verify the behavior that these equipments would be in significantly different conditions in compare with the conditions that they have been developed here on earth. The most obvious is probably the development of mechanical equipment that requires an optimized weight, but however it is not possible to validate their final behavior in identical working conditions in absence of gravity.

This document presents a methodology that (using tunable finite element models) allow validating during the development phase of the project, the behavior that such equipment and mechanical systems will have once they are installed in microgravity.

To achieve this purpose, a general methodology is developed initially. It can be applied to any space system or equipment necessary to know the behavior of any engineering parameter in case this parameter is affected by the particular space conditions. Later, the general methodology is applied over the VIF System. Thus, a concrete methodology for a mechanical system (VIF System) is developed in order to analyze a set of mechanical parameters that allow predicting on ground the mechanical behavior of this system once it is in microgravity.

Once defined the mechanical parameters that are required to be analyzed and characterized from the VIF System (forces, moments, velocities, accelerations, etc), then the test phase started. In this phase, test equipment is developed and the VIF System is installed on. The VIF System is externally excited and it is acquired the VIF System behavior, for different levels of excitement, using the appropriate sensors (accelerometers, strain gauges, position sensors, etc). In this way, it is obtained the characterization of VIF System on ground.

Once the VIF system has been already characterized on ground, a finite element model (FEM) of the VIF System is performed. This model is properly characterized to achieve the same behavior that the VIF System showed during previous tests. Finally, the FEM model is modified applying a zero gravity condition. This allows getting the VIF System behavior under these particular microgravity conditions.

Predicting the behavior of space equipment is necessary in many cases to certify the compliance with specifications and requirements defined at the beginning of the project.

Capítol 1. INTRODUCCIÓ. ESTAT DE L'ART

Des de sempre la humanitat ha tingut curiositat per l'exploració de l'espai exterior. No obstant, no ha pogut ser fins a finals de la dècada dels cinquanta que l'home va adquirir la tecnologia suficient per poder iniciar el somni de viatjar per l'espai. Va ser aleshores quan va sorgir la indústria aeroespacial, centrada en proporcionar la tecnologia necessària per aconseguir l'objectiu d'explorar l'univers.

Des d'aleshores fins l'actualitat, la indústria aeroespacial ha crescut i ha evolucionat enormement i ja són molts els països que disposen d'empreses dedicades específicament al sector de l'espai. Aquest creixement ha estat motivat en molts casos pels desenvolupaments de grans infraestructures espacials, com és ara l'Estació Espacial Internacional (ISS), que ha implicat directament a les cinc agències espacials mundials de major rellevància: NASA (EE.UU.), ESA (Europa), Agència Espacial Canadenca, Agència Espacial Federal Russa i Agència Japonesa d'Exploració Espacial.

Així, la ISS resulta ser el major laboratori en òrbita al voltant de la terra construït mai per l'esser humà. Allí s'hi poden efectuar tot tipus d'experiments, aprofitant les condicions de microgravetat que proporciona l'estació espacial a l'òrbita al voltant de la terra. Investigadors i científics d'arreu del món poden utilitzar aquesta gran obra d'enginyeria per dur a terme experiments relacionats amb les ciències de la vida, ciència dels materials, experimentació bàsica, experimentació aplicada, etc. Per la realització d'aquests experiments són necessaris, per un costat, uns equips i una instrumentació adequada, dissenyats específicament per aquest propòsit, i per un altre costat, uns astronautes capacitats per realitzar els experiments previstos.

En aquest sentit, s'entén el concepte d'instrumentació espacial com aquell conjunt d'equips pensats, dissenyats i fabricats expressament per ser embarcats en vehicles espacials (ja siguin coets llançadora, satèl·lits, sondes interplanetàries, estacions espacials, observatoris astronòmics espacials, etc). Aquesta instrumentació té com a funció principal permetre el desenvolupament d'experiments que només són possibles gràcies a les particulars condicions que aporta l'espai.

Els requeriments de qualitat que han de complir els equips d'instrumentació espacial són molt estrictes i es regeixen utilitzant normes militars i normes aeroespacials específiques. Aquesta normativa d'obligat compliment, es troba present en totes i cadascuna de les fases del projecte que es segueix pel desenvolupament dels equips.

Els principals factors diferenciadors que cal tenir en compte alhora de desenvolupar un projecte d'enginyeria d'un instrument espacial són els següents:

- **A la fase de disseny:** factors de seguretat més estrictes i necessitat de diferents models que permetin la validació i anàlisi del disseny (models CAD, models FEM, models de control, models tèrmics, models cinemàtics, etc).
- **A la fase de fabricació:** elecció de materials d'acord amb els materials aprovats, normativa específica per un seguit de processos com soldadura, recobriments, acabats superficials i imprimacions.
- **A la fase de test:** nivells d'acceptació dels tests més estrictes (per casos de tests de vibracions, tèrmics, acústics, etc). Necessitat d'efectuar tests específics del camp aeroespacial (tests de *offgasing*, *outgassing*, etc).

Aquests, junt amb altres factors que es detallen posteriorment, fan que el cost d'un instrument espacial sigui molt superior al cost que podria tenir el mateix equip desenvolupat per una aplicació terrestre. Només aquest fet ja és suficient per justificar la necessitat de definir una metodologia que serveixi per validar i caracteritzar el comportament dels instruments espacials abans de la seva posada en òrbita. Aquesta metodologia ha de permetre predir el comportament de l'equip abans de que aquest es trobi sotmès a les condicions tant particulars que patirà un cop a l'espai.

El propòsit de la present tesi és desenvolupar aquesta metodologia per tal de caracteritzar els instruments espacials abans de la seva posada en òrbita, permetent així predir el comportament de l'equip en unes condicions que no són reproduïbles a la terra.

No obstant, la tesi no es vol quedar simplement en la definició d'una metodologia, sinó que un cop definida, aquesta s'aplica sobre un instrument espacial concret, el Sistema VIF (*Vibration Isolation Frame*) que és un sistema que treballa de forma conjunta amb l'instrument espacial MARES (*Muscle Atrophy Research and Exercise System*). D'aquesta manera, s'aconsegueix comprovar d'aplicabilitat de la metodologia desenvolupada.

1.1 Context, descripció i funció de l'equip d'estudi

Per tal de centrar l'estudi, en aquest apartat es detallen una sèrie de conceptes que són necessaris per tal de contextualitzar tot el treball realitzat. De manera que, a continuació es detallen les funcions bàsiques de l'equip MARES i del Sistema VIF, objecte d'estudi, es realitza una exposició de l'estat de l'art, i s'expliquen un conjunt de condicionants que afecten als instruments espacials.

1.1.1 Condicions ambientals de la instrumentació

Les condicions ambientals que ha de suportar la instrumentació embarcada en vehicles espacials és força diferent de les condicions a que està sotmesa la instrumentació a la terra, al trobar-se protegida per l'atmosfera terrestre. Tot aparell situat fora de l'atmosfera sofreix unes condicions radicalment diferents que es detallen a continuació.

Cal partir de la base que no hi ha una frontera definida entre l'atmosfera i l'espai exterior (3/4 parts de la massa total de l'atmosfera es troben en els primers 11km d'alçada). Malgrat que l'última capa de l'atmosfera (exosfera) s'inicia als 500km respecte la superfície terrestre, és freqüent usar com a límit de l'atmosfera terrestre la línia de *Karman*, situada a 100km d'alçada respecte la superfície terrestre, i que marca l'inici de l'espai exterior. Malgrat aquest criteri, les condicions de temperatura, pressió i gravetat van disminuint de forma gradual a mesura que ens allunyem de la superfície.

- **Temperatura:** A la terra, la transferència de calor es produeix a través de tres mecanismes bàsics: *convecció, conducció i radiació*. L'absència d'atmosfera i l'estat gaire bé de buit absolut fan que a l'espai no sigui possible la transferència per convecció. Com que la conducció es limita als sòlids que es troben en contacte, aleshores, el mecanisme predominant de transferència de calor a l'espai entre diferents cossos és la radiació. Així doncs, la temperatura que assoleix un cos orbitant a l'espai depèn únicament de la radiació que emet i la radiació que absorbeix. Tenint el compte que la màxima temperatura és la temperatura superficial del sol (5780K) i la menor temperatura és la del fons còsmic de microones (3K). Aleshores, el marge de temperatures és elevadíssim. Suposant que el cos es trobi en equilibri tèrmic, aleshores s'ha de complir que la radiació absorbida sigui igual que la radiació emesa. La radiació que s'emet està en funció del coeficient d'emissivitat (ϵ) del cos, mentre que la radiació que s'absorbeix depèn de coeficient d'absorció (α) del cos.

Per exemple un satèl·lit que disposi d'una coberta d'alumini polit ($\alpha=0.19$ i $\epsilon=0.042$) tindria una temperatura a la superfície radiada pel sol de 140°C mentre que si s'escull un alumini anoditzat ($\alpha=0.19$ i $\epsilon=0.7$) la temperatura baixaria a -68°C.

D'aquesta manera no és gens estrany que una superfície tèrmicament aïllada d'una nau espacial en òrbita al voltant de la terra pateixi variacions tèrmiques que oscil·len entre -200°C durant la zona d'ombra, i fins a 350°C quan hi incideix la radiació solar.

En aquest sentit, és evident que la instrumentació allotjada en vehicles espacials necessita d'un control tèrmic capaç de mantenir la temperatura dins dels marges acceptables que requereixen els components dels instruments. El disseny tèrmic va en funció de si l'instrument va allotjat en vehicles espacials tripulats o no tripulats:

- **Per vehicles no tripulats:** Els únics mecanismes possibles de transferència tèrmica de que disposa el vehicle per adequar la temperatura dels instruments són la radiació i la conducció. Així doncs, l'instrument evacua el calor generat per conducció cap a la carcassa del vehicle on es fa la transferència final per radiació. La temperatura que assoleix l'instrument dins del vehicle depèn per tant del balanç de fluxos de radiació que actuen sobre el vehicle i de l'eficàcia de com l'instrument és capaç d'evacuar el calor per conducció.
- **Per vehicles tripulats:** és possible usar la convecció com a tercer mecanisme de transferència de calor de l'instrument cap a la nau. En absència de gravetat, la convecció natural no és possible, i per tant s'utilitza convecció forçada per mitjà de ventiladors i radiadors que poden ser ajudats en alguns casos per sistemes actius de regulació de la temperatura com els elements Peltiers.
- **Pressió:** La pressió va disminuint a mesura que ens allunyem de la superfície terrestre. A la següent imatge es mostra una gràfica on s'observa la pressió en cadascuna de les capes de l'atmosfera així com la temperatura corresponent.

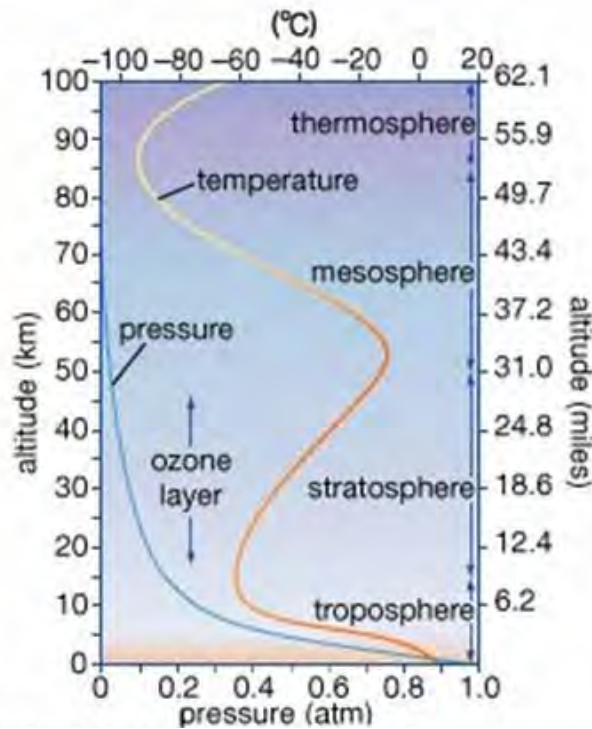


Figura 1-1: Variació de pressió amb l'alçada

Un cop s'arriba a l'espai exterior, l'absència d'atmosfera elimina gaire bé del tot la pressió. Malgrat aquest fet, encara hi resta una certa pressió, la pressió interestel·lar. Aquesta s'estima que és de l'ordre de 10^{-15} kPa en comparació dels 101.3 kPa de la superfície terrestre.

Un ambient de baixa pressió o de buit provoca sobre molts materials el fenomen de *Outgassing*. Els metalls normalment tenen una capa superficial on han quedat absorbits una sèrie de gasos mentre es trobaven a la terra. Aquest gasos volàtils són fàcilment llibertats un cop es troba el material a l'espai degut a la baixa pressió. Posteriorment, aquests gasos poden condensar en superfícies fredes, com lents òptiques, provocant així la reducció de prestacions en certa instrumentació. Aquest efecte és destacable en materials com el Zinc i el Cadmi que estan expressament prohibits per aplicacions espacials degut a la toxicitat dels gasos que emeten.

Aquest fenomen de *Outgassing* cal ser tingut sempre en compte a l'hora de realitzar l'elecció d'un material destinat a una aplicació espacial.

En el cas de vols tripulats, la instrumentació present dins el vehicle espacial pateix la mateixa pressió que tindria a terra ja que l'habitacle es troba pressuritzat per tal de permetre la seva habitabilitat.

- **Microgravetat i Ingravidesa:** Són conceptes que habitualment s'utilitzen indiscriminadament però presenten certes diferències. S'entén com a ambient de microgravetat (μG) aquell ambient on hi ha una molt baixa acceleració (de l'ordre de 10^{-6}G) ocasionant una força de gravetat molt petita, però no pas nul·la. En canvi, la ingravidesa o falta de gravetat és una aproximació del terme anterior perquè realment sempre sobre un cos existirà una certa atracció del cos o planeta més proper.

En el cas de vehicles espacials que es trobin orbitant al voltant de la terra, cal tenir en compte que patiran un valor de gravetat inversament proporcional al quadrat de la distància respecte el centre de la terra. Per exemple, l'Estació Espacial Internacional (ISS) que orbita a 400 km de la superfície terrestre, tindrà un valor de gravetat de 8.72 m/s^2 en comptes dels 9.81 m/s^2 . No obstant, aquesta acceleració gravitacional és compensada per l'acceleració centrífuga que assoleix l'estació al girar a gran velocitat (8km/s) al voltant de la terra. Així s'arriba a un equilibri amb compensació de forces, aconseguint un estat de microgravetat. Es pot interpretar doncs que l'estació es troba orbitant al voltant de la terra sense caure en un estat permanent de caiguda lliure.

1.1.2 Equip MARES i Sistema VIF

L'equip *MARES* consisteix en un instrument espacial que té com a funció mesurar com els astronautes pateixen pèrdua de massa muscular degut a llargs períodes en microgravetat. Està format per d'un equip principal (*Main Box*) on hi ha allotjat un motor i altres caixes d'electrònica al seu interior i on es fixa un pantògraf de tres braços articulats que suporta una cadira al seu extrem (veure la figura següent). A l'eix motor és possible muntar diferents adaptadors humans (*Human adaptors*) que s'usen per fixar la part mòbil del grup muscular que es vol analitzar de l'astronauta, mentre que la resta del cos va fixat a la cadira. D'aquesta manera s'obté un sistema reconfigurable que permet analitzar fins a 11 articulacions i vàlid des del 5 fins al 95 percentil humà.

Per mesurar la pèrdua de massa muscular, és possible configurar i programar l'equip (des de la terra o des de la ISS) per realitzar una sèrie d'experiments:

- **Experiments en mode concèntric:** amb perfils de velocitat definits pel científic i mesura de parell.
- **Experiments en mode excèntric:** amb perfils de parell definits pel científic i mesura de velocitat.
- **Experiments en mode isomètric:** mesurar només parell sense velocitat.

Totes les dades que d'aquí se'n deriven es transmeten per telemetria a la terra on són analitzades per científics per tal d'avaluar la pèrdua de massa muscular que ha patit l'astronauta durant la seva estada en microgravetat.

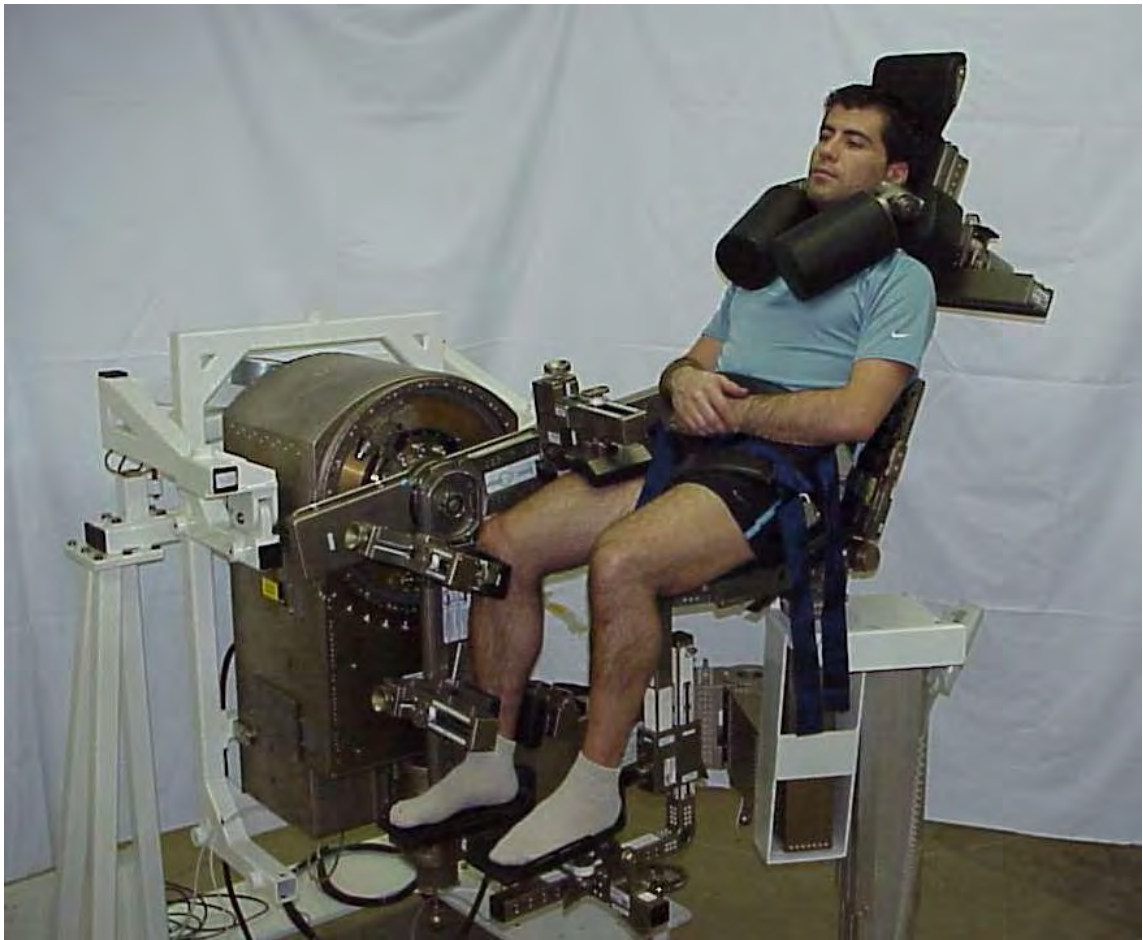


Figura 1-2: Equip MARES amb subjecte de test en configuració 'Knee Flexion/Extension'

L'equip MARES anirà instal·lat al mòdul *Columbus* de la ISS. Degut a les seves dimensions, ha d'anar muntat al mig del passadís del mòdul i es fixa sobre d'un ISPR Rack. Per tal d'esmortir les vibracions i les càrregues que l'equip transmetria al Rack (i aquest a tot el mòdul de l'estació) mentre l'astronauta realitza exercici, és necessari un sistema d'esmoreïment de les vibracions anomenat *VIF* (*Vibration Isolation Frame*) basat en molles i esmoreïdors.

El Sistema VIF és l'encarregat d'esmoreir les forces i moments que arriben des de MARES cap al Rack del mòdul i d'allí cap al resta de l'estació. Així mateix, el Sistema VIF també permet que l'equip MARES disposi de tres graus de llibertat en X, Y i Z amb un mecanisme de molla i esmoreïdor en cadascuna de les direccions. D'aquesta manera, el moviment de l'equip MARES i del subjecte està permès dins d'un rang mentre s'està efectuant l'exercici. Això permet minimitzar la transmissió de forces. Per tant, es pot interpretar que l'equip MARES i el subjecte que executa l'exercici es troben semi lliures ja que el seu desplaçament a l'espai està permès dins dels límits que marca el Sistema VIF.

La següent imatge mostra l'equip *MARES* instal·lat en el Sistema VIF i fixat en un ISPR Rack:

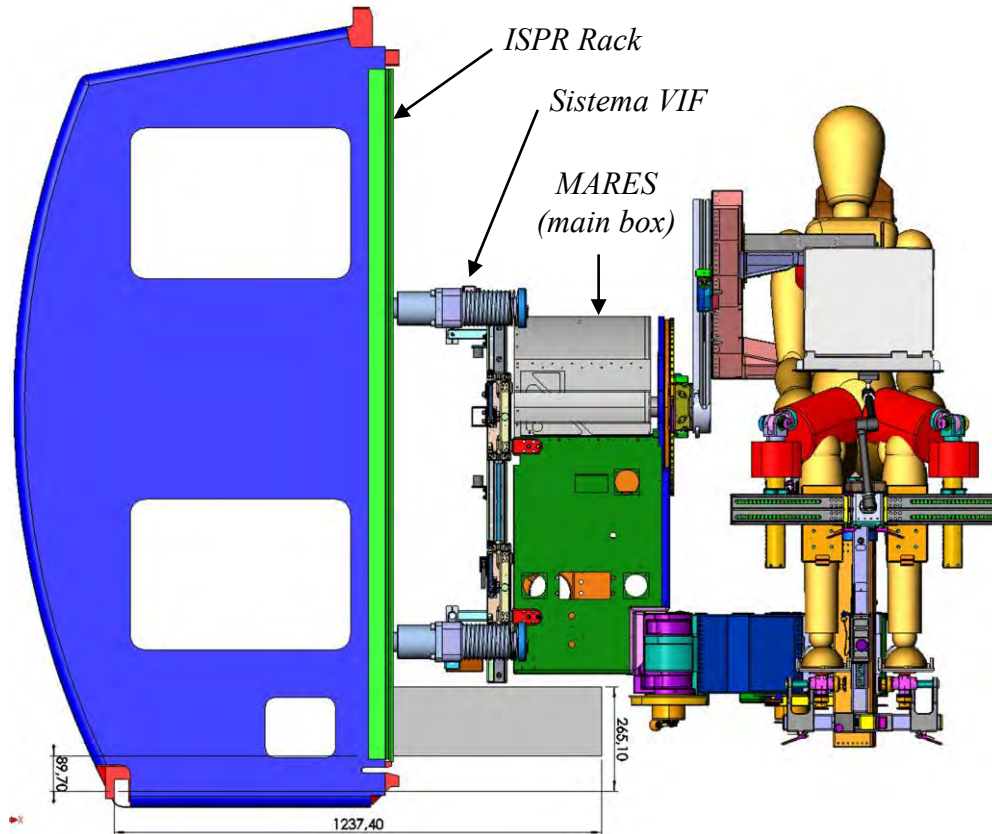


Figura 1-3: Equip *MARES* en configuració de vol (subjecció al Sistema VIF i enclavament al Rack)

1.2 Objectiu de la tesi

La present tesi doctoral desenvolupa una metodologia per caracteritzar un instrument espacial abans de la seva posada en òrbita i també comprova l'aplicabilitat de la metodologia sobre el Sistema VIF. D'aquesta manera es pretén analitzar els valors de forces, moments i desplaçaments que permet el Sistema VIF, provinents de l'equip *MARES* (i generats pel subjecte durant l'exercici). Aquests valors cal que siguin admissibles pel ISPR Rack on va muntat el Sistema VIF i també pel mòdul *Columbus* de l'estació on es troba el ISPR Rack. Aquesta validació sobre el Sistema VIF requereix, primer de tot, una fase de test d'on extreure les dades empíriques del comportament experimental de Sistema VIF. Posteriorment es requereix un model d'elements finits ajustat d'acord amb els paràmetres extrets de l'experimentació i que s'utilitzarà per validar el sistema sota les particulars condicions que es produeixen a l'espai.

1.3 Estat de l'Art

A continuació es presenta l'estat de l'art corresponent al tema de la present tesi doctoral: 'metodologia per la caracterització en terra d'instrumentació espacial'.

D'acord amb l'objectiu de la tesi, es pretén desenvolupar una metodologia per caracteritzar instrumentació espacial basant-se en un seguit de tests i models FEM. Més concretament, es pretén correlar una sèrie de paràmetres d'un model FEM utilitzant els resultats de test obtinguts sobre aquests paràmetres en el Sistema VIF. Així, un cop correlat el model FEM, ja és possible analitzar el comportament del Sistema VIF en unes condicions de càrrega no reproduïbles a la terra, com són les condicions de microgravetat.

La metodologia es centra en l'utilització de tests experimentals i models FEM per aconseguir el propòsit de predir el comportament del Sistema VIF en condicions de microgravetat. En aquest sentit, a continuació s'ha avaluat l'aplicabilitat dels model FEM, així com les vies d'ajust d'aquests models FEM amb els models experimentals.

1.3.1 Aplicació dels models FEM a la indústria mecànica

El mètode d'elements finits és un mètode àmpliament usat per analitzar el comportament dinàmic i estàtic de sistemes estructurals. En aquest sentit, es pot dir que els models d'elements finits permeten l'anàlisi de dissenys sencers, el seu refinament i la seva optimització abans que aquests dissenys passin a la fase de fabricació.

La cada cop més freqüent introducció del mètode d'anàlisi per elements finits a la indústria mecànica ha permès reduir el marge de temps per evolucionar conceptes fins a la línia de producció. En aquest sentit, la millora dels dissenys i dels prototips inicials utilitzant el mètode dels elements finits ha permès accelerar les fases de test i desenvolupament. Segons *Hastings, Judd i Brauer (DR[AI])*, es poden resumir els beneficis del mètode d'elements finits en:

- Alta precisió de resultats
- Permet la millora del disseny
- Permet identificar els paràmetres crítics del disseny
- Redueix el número de prototips necessaris
- Redueix el temps del cicle de disseny
- Incrementa la productivitat

Les àrees d'enginyeria on el mètode és més àmpliament aplicat per la resolució de problemes són bàsicament l'anàlisi de problemes de mecànica de medis continus, problemes de transmissió de calor, o problemes de mecànica de fluids.

El cas que ens ocupa es trobaria englobat dins el cas d'anàlisi d'estructures de sòlids deformables de la mecànica de medis continus.

1.3.2 Metodologia seqüencial d'aplicació dels models d'elements finits

La metodologia habitual per la resolució de problemes d'àmbit mecànic estructural per mitjà del mètode d'elements finits acostuma a ser una metodologia seqüencial. A continuació es mostra un diagrama on s'exposen les fases d'aquesta metodologia:

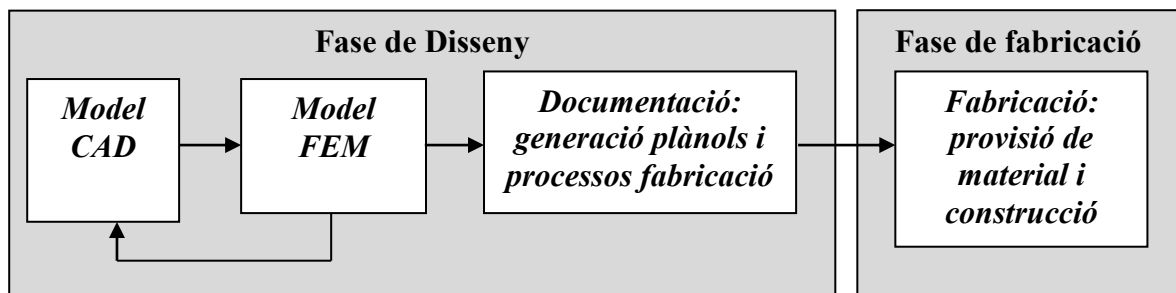


Figura 1-4: Diagrama de la metodologia habitual d'aplicació de models d'elements finits

Es parteix del disseny generat a partir d'eines CAD que defineixen la geometria amb el nivell de detall adequat per facilitar la importació al programa d'elements finits escollit. El model FEM permet importar el disseny, generar nova geometria, mallar, assignar materials, condicions de contorn, restriccions i càrregues, i finalment solucionar el model FEM generat. La resolució del model FEM permet predir, sense necessitat de prototips, si és necessari un redisseny del model CAD per tal d'optimitzar els paràmetres analitzats, o bé si el disseny és troba prou consolidat com per permetre la documentació, fabricació i integració de l'equip.

El propòsit principal del mètode d'elements finits radica en predir la resposta del model FEM degut a les condicions de contorn, restriccions i càrregues a que es troba sotmès. Així mateix, el mètode també permet analitzar el sistema en front a pertorbacions i canvis en la seva configuració.

Aquesta metodologia és la més comunament aplicada per l'aplicació d'elements finits en la resolució de problemes, i es troba detallada en la majoria de llibres d'elements finits de la bibliografia consultada (veure DR[L10] i DR[L11]).

No obstant, es poden presentar casos on cal augmentar la confiança i fiabilitat del model FEM en front a noves condicions de contorn, pertorbacions o canvis de configuració. Aleshores, pot ser necessari correlar el model FEM a partir d'un model experimental i una campanya de tests que permeti determinar el comportament del model experimental i traspassar aquest comportament al model FEM, obtenint així un model correlat.

1.3.3 Metodologia correlada d'aplicació dels models d'elements finits

S'ha comprovat que, en alguns casos, la predicció que oferia la resolució per elements finits seguint la metodologia anterior, diferia considerablement dels resultats obtinguts a partir d'estudis experimentals. D'acord amb *Friswell* i *Mottershead* (DR[A9]), els principals causants d'aquests desajusts entre els resultats teòrics i els experimentals són els següents errors en el model FEM:

- **Error a l'estructura del model:** degut a la incertesa en les equacions lineals (això succeeix per exemple quan el model té un fort component no lineal).
- **Error en els paràmetres del model:** bàsicament correspon a condicions de contorn inapropiades i suposicions imprecises per simplificar el model.
- **Error en l'ordre del model:** degut a la discretització de sistemes complexos que pot arribar a provocar models d'ordre insuficient.

Per tal d'ajustar el model FEM al comportament experimental, cal actuar principalment sobre els paràmetres de massa, rigidesa i esmorteïment del model FEM. També cal tenir en compte paràmetres no lineals com friccions i contactes entre superfícies segons *Hemez* i *Doebling* (DR[A10]). Això ha de permetre optimitzar la relació entre els resultats teòrics del model FEM i el comportament experimental.

Per obtenir el comportament experimental del sistema, caldrà efectuar un seguit de tests experimentals. Aquests tests es poden classificar en tests parcials, exclusius pels elements crítics del sistema, o bé, tests globals on s'experimenta sobre un prototip que ja inclou els elements crítics. Les característiques de cada cas s'exposen a continuació:

- **Tests parcials:** tests dedicats exclusivament a testejar el comportament particular dels elements crítics inclosos en el disseny. S'atorga el qualificatiu de crític a tot element que presenti un comportament no lineal (friccions, contactes, impactes, etc).

S'obté així el comportament experimental d'aquests elements i s'inclou al model FEM. Només és necessari un equip de test, prou simple perquè permeti la caracterització d'aquests elements (no és necessari un prototip de l'equip final). Les condicions del test han de ser condicions prou representatives respecte les que patiran els elements a l'equip final.

A continuació es mostra un diagrama de la metodologia correlada per un test parcial.

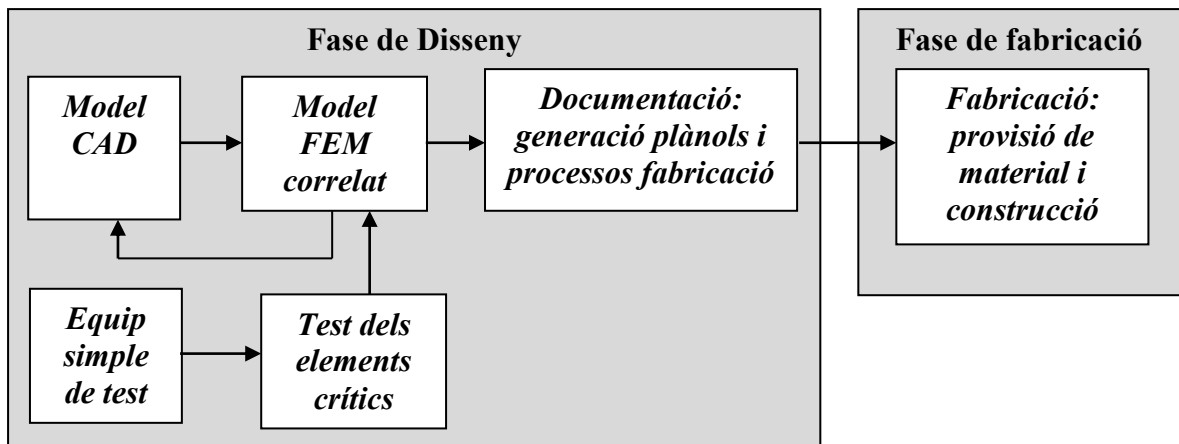


Figura 1-5: Diagrama de la metodologia correlada per un test parcial

- **Tests globals:** tests sobre un prototip prou fidedigne del disseny final. Es sotmet el prototip a unes condicions semblants a les que patirà el disseny final i s'obté així el seu comportament sota aquestes condicions similars a les finals. Un cop obtingut el comportament del prototip, es correla el comportament del model FEM per tal que aquest tingui un comportament raonablement similar al del prototip testejat. S'obté així un model FEM correlat i llest per ser sotmès a les condicions finals que partirà el sistema (no reproduïbles durant el test).

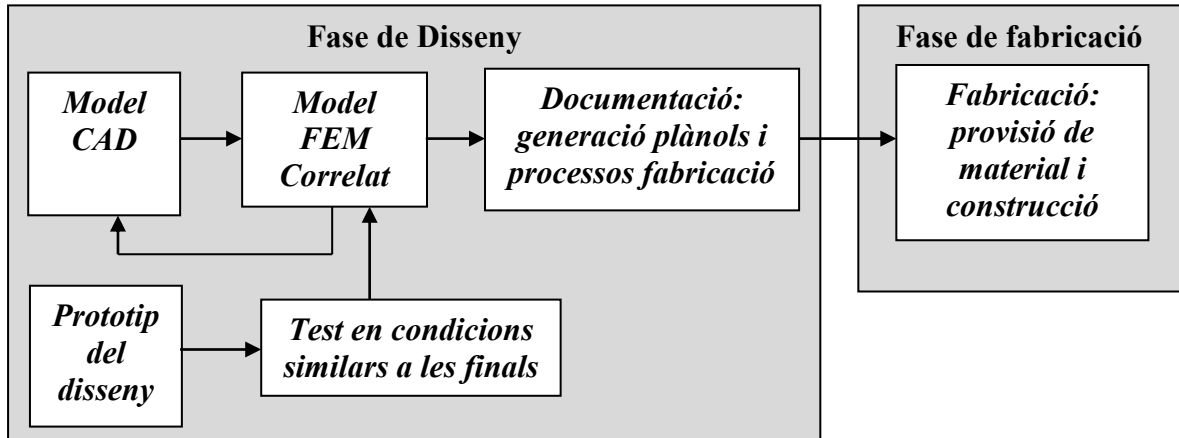


Figura 1-6: Diagrama de la metodologia correlada per un test global

1.3.4 Articles de revisió de l'estat de l'art

L'article de *Friswell i Mottershead (DR[A9])* és una de les referències essencials per l'ajust de models d'elements finits. En aquest document apareixen descripcions sobre els mètodes directes i els mètodes iteratius basats en la sensibilitat. Promou l'utilització de dades modals i funcions de resposta en freqüència (FRF).

Els articles que segueixen a continuació s'han centrat més en la formulació de noves metodologies i en l'avaluació d'aquestes. *Dunn (DR[A11])* va centrar el seu estudi en la relació entre els mètodes d'ajust i els número d'incògnites, i entre les avantatges i desavantatges en l'ús de dades modals i de FRF.

Hemez i Doebling (DR[A10]) es van centrar més en la revisió de l'estat de l'art per l'ajust de models en sistemes no lineals.

Datta (DR[A12]) presenta una revisió dels mètodes directes d'ajust de models, i afegeix dos enfocaments alternatius a l'anàlisi de la correlació de models.

Ahmadian, Friswell i Mottershead (DR[A13]) revisen diferents tècniques de regularització i inclouen la seva aplicació per estimar paràmetres que permetin l'ajust de models.

Altres estudis es centren més en l'adequada modelització dels contactes i les unions entre les diferents peces que formen un conjunt. S'ha comprovat que les unions i contactes entre peces constitueix normalment una de les principals fonts d'error en els models d'elements finits. En aquest sentit, cal destacar la contribució feta pels següents autors en la investigació d'aquesta problemàtica i en l'ajust dels models:

Ibrahim i Pettit (DR[A14]) exposen un anàlisi sobre la problemàtica relacionada amb la dinàmica d'unions cargolades. En aquest sentit, es presenten tècniques, basades en ajustos del model, per identificar la linealitat i la no linealitat aquest tipus d'unions.

Palmonella, [et. al.], (DR[A15]) aborden la forma de tractar i ajustar models destinats a les unions amb soldadura punt a punt.

1.4 Estructura de la tesi

La tesi s'estructura en 7 capítols que s'enumeren a continuació:

CAPITOL 1. INTRODUCCIÓ. ESTAT DE L'ART

CAPITOL 2. DESENVOLUPAMENT DE LA METODOLOGIA

CAPITOL 3. APLICACIÓ AL SISTEMA VIF: TEST

CAPITOL 4. APLICACIÓ AL SISTEMA VIF: MODEL FEM I CORRELACIÓ

***CAPITOL 5. APLICACIÓ AL SISTEMA VIF: SIMULACIÓ DEL
COMPORTAMENT EN μG***

CAPITOL 6. CONCLUSIONS

CAPITOL 7. REFERENCIES BIBLIOGRÀFIQUES

En el primer capítol es descriu el context on es centre l'estudi, el camp espacial, i es detallen els aspectes més rellevants d'aquest camp.

En el segon capítol, es desenvolupa la metodologia que ha de permetre la validació d'instrumentació espacial.

En el tercer capítol, s'inicia l'aplicació de la metodologia descrita prèviament amb una sèrie de tests sobre el Sistema VIF.

En el quart capítol, es descriu el model FEM obtingut pel Sistema VIF i es valida el model correlant el seu comportament amb el comportament esperat segons el test anterior.

En el cinquè capítol, es simula el comportament del model FEM del Sistema VIF amb les condicions espacials de microgravetat que tindrà el sistema un cop instal·lat.

En el sisè capítol s'estableixen les conclusions de l'estudi, es proposen futures línies de treball i s'exposa l'estat final del projecte.

En el setè i últim capítol es detallen les referències bibliogràfiques usades al llarg de l'estudi: llibres, articles, normes i pàgines web.

1.5 Condicionants dels projectes espacials

En aquest apartat es descriuen els principals condicionants que cal tenir en compte alhora d'afrontar el desenvolupament d'un instrument destinat a funcionar en les particulars condicions espacials. Primerament, s'enumeren les característiques de la instrumentació espacial, i posteriorment s'exposen els condicionants que afecten al disseny d'instrumentació espacial. És en aquest apartat on s'expliquen les peculiaritats específiques que presenta aquest tipus d'equips.

La descripció dels condicionants de disseny que es fa a continuació engloba des de les fases inicials, on l'instrument no és més que un concepte, fins a les últimes fases de fabricació i test. D'aquesta manera, es detalla cadascun dels condicionants que actuen en cadascuna de les fases en que transcorre el disseny.

Es presenta un enfoc generalista dels condicionants del procés de disseny de la instrumentació espacial sense entrar en dissenys particulars restringits a tipus concrets d'instruments que donaria una visió massa restringida.

1.5.1 Característiques de la instrumentació espacial

Comprendre per què s'han dissenyat els instruments d'una determinada manera i no d'una altra, que per aplicacions terrestres podria semblar molt més adequada, no seria possible si no s'exposessin els condicionants que limiten el disseny d'aquests equips. Les característiques més importants que ha de complir tot instrument espacial es pot resumir en els següents punts:

- Màxima optimització: en potència consumida, massa i volum de l'instrument.
- Limitacions en l'utilització de materials, lubricants, adhesius, processos, etc, per qüestions de *Offgasing*, SCC, flamabilitat, toxicitat, etc.
- Compliment de normativa espacial i/o militar: utilització de components electrònics de qualitat militar.
- Capacitat de suportar les càrregues de llançament: normalment, les càrregues de llançament seran les majors que haurà de suportar al llarg de la vida de l'instrument.
- Comportament dinàmic validat: anàlisi i tests per determinar freqüències i modes propis.
- Rigidesa mecànica contrastada: Anàlisi per predir tensions, deformacions i factors de seguretat per càrregues estàtiques usant Models d'Elements Finites (FEM) i anàlisi de fatiga.

1.5.2 Condicionants espacials en el disseny d'instrumentació espacial

La instrumentació embarcada en vehicles espacials ha d'estar dissenyada i construïda complint amb els estàndards de qualitat necessaris per qualsevol missió espacial. Aquests condicionants són especialment restrictius i condicionen el disseny en molts dels seus aspectes habituals.

Els condicionants que afecten a un instrument espacial es poden classificar en funció de l'etapa de disseny on actuen (*DR[NII]*). Així, hi haurà condicionants que afecten a la fase de disseny, anàlisi, fabricació i test. A continuació es presenta un esquema on s'exposen els condicionants que actuen a cada fase i que s'analitzen posteriorment:

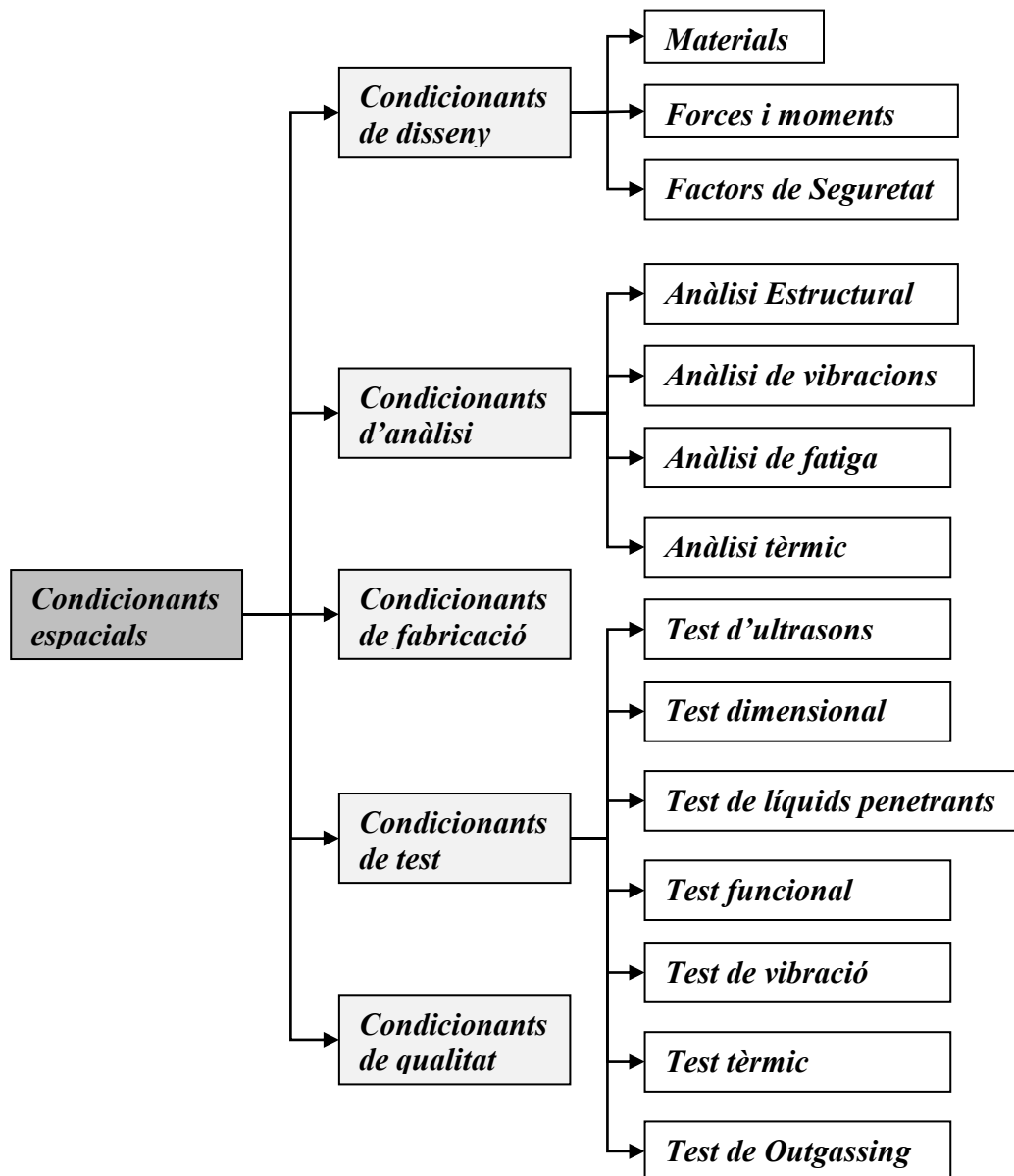


Figura 1-7: Esquema dels condicionants espacials

Tots aquests condicionants es detallen a continuació fent incís en les seves peculiaritats pel camp espacial.

Cal destacar que els equips espacials són, en la majoria dels casos, equips únics (no són equips per produccions seriades) on s'acostuma a realitzar un primer equip de qualificació que ha de servir per validar el disseny, funcionament, tests, prestacions, etc. I posteriorment, un segon equip que és el model de vol:

- **Model de qualificació (QM):** Equip inicial amb idèntiques prestacions i requeriments que el model de vol, i que s'utilitza per fer campanya de tests i validacions dels subsistemes.
- **Model de vol (FM):** Equip final que presenta un disseny, fabricació i test el més semblant possible al model de qualificació. Pot presentar millores respecte el model de qualificació detectades durant la realització i test del model de qualificació.

En projectes complexes, també s'acostuma a realitzar un prototip inicial, abans del model de qualificació, que serveix per validar incerteses de disseny i dubtes d'execució dels subsistemes o mecanismes més crítics i complexes (*DR[L4]*).

1.5.2.1 Condicionants de disseny

Cal que el disseny mecànic d'un instrument espacial sigui:

- Adequat a les forces que ha de suportar (durant els tests de validació del seu comportament, en llançament i durant el funcionament nominal de l'equip)
- Tingui una rigidesa adequada per minimitzar deformacions.
- Permeti obtenir un mínim pes a un cost raonable.

Per aconseguir-ho cal tenir en compte la selecció de materials, les càrregues que ha de suportar, i els factors de seguretat que cal aplicar (*DR[N1]*).

1.5.2.1.1 Materials

L'elecció dels materials a usar per instrumentació espacial ve marcada pels següents factors de disseny que depenen de l'aplicació i de la funció que fa la peça (*DR[L3]* i *DR[L4]*):

- **Rigidesa:** Capacitat per oposar-se a les deformacions.
- **Resistència a càrregues mecàniques:** Capacitat per suportar forces i moments sense patir deformacions permanents.
- **Resistència a la fatiga:** Capacitat per suportar càrregues oscil·lants.

- **Resistència a la corrosió:** Capacitat per suportar el deteriorament a conseqüència d'un atac químic.
- **Procés de fabricació:** Passos seguits per la construcció de la peça.
- **Necessitats tèrmiques:** Dissipació de calor o aïllament tèrmic.
- **Límit de pes de l'equip:** El límit de pes assignat a l'equip pot condicionar els materials a usar. Sempre cal tendir a escollir com a materials estructurals, aquells que tinguin baix pes específic i alta resistència mecànica (duraluminis, acers d'alta resistència, fibra de carboni, fibra de vidre, etc). Estimacions de cost indiquen que llançar un 1kg a l'espai costa al voltant d'uns 25.000 dòlars.

A part d'aquests factors, tot material que hagi de ser embarcat en un vol espacial, ha de complir també amb aquests altres condicionants menys comuns a la indústria però força presents per aplicacions espacials:

- **Outgassing:** en estat de buit alguns materials alliberen gasos (veure apartat 1.5.5.7 i *DR[N7]* per més detalls del fenomen). Els materials que presenten aquest fenomen en major intensitat són:
 - **Polímers:** Igual que tots els materials compostos d'elements volàtils, els polímers perden grans fraccions de la seva massa inicial quan es troben en estat de buit. Això pot comportar grans canvis en les seves propietats inicials.
 - **Materials higroscòpic (compòsits de grafit-epoxi):** Són materials que poden absorbir vapor d'aigua de l'aire terrestre i que després el cedeixen quan es troben en estat de buit. Això pot provocar condensacions en lents òptiques afectant així les prestacions dels instruments. Fins i tot, sense condensar, aquest vapor d'aigua també pot afectar a les prestacions dels telescopis d'infraroig.
 - **Lubricants:** Es fa molt difícil de poder usar lubricants en les aplicacions espacials ja que és imprescindible que suportin les agressives condicions espacials i que a més no es degradin al llarg del temps. Si el lubricant pateix *outgassing*, tots els condicionants de selecció passaran a un segon terme perquè això provocarà que les propietats del lubricant no siguin estables per molt de temps. Aquest fet provoca que siguin molt pocs els lubricants aptes per ús espacial.
- **Stress Corrosion Cracking (SCC):** És un procés de propagació de fissures d'un material provocada per la influència combinada de tensió junt amb un ambient corrosiu. Per aplicacions espacials és necessari que els materials seleccionats tinguin una alta resistència al SCC. Aquesta restricció limita força la selecció dels materials a usar. La norma de l'Agència Espacial Europea PSS-01-736 classifica la majoria de materials estructurals en 3 taules en funció de si la resistència a SCC és alta, moderada o baixa. És necessari que el material escollit i també que l'estat metal·lúrgic, es trobi classificat dins la taula d'alta resistència al SCC per

aplicacions estructurals. Exemples de materials amb alta resistència al SCC són: acer al carboni sèrie 1000, acer inoxidable PH 15-5, al·leacions d'alumini de les series 6000, 5000 i 3000, titani 6Al-4V, etc. (DR/N2).

- **Flamabilitat i toxicitat:** És imprescindible que els materials embarcats en vehicles espacials presentin bona o molt bona resistència a la flamabilitat i també que no siguin materials tòxics (sobretot en instruments destinats a vols tripulats).

El compliment d'aquests factors és condició necessària per tal de poder usar un material per instrumentació espacial. És igualment necessari que els elements comercials també superin aquests condicionants. Per fer aquesta tasca més suportable, NASA té a disposició una extensa base de dades de materials anomenada *MAPTIS* (DR/N11) on apareixen les característiques tècniques de *Outgassing*, *SCC*, flamabilitat i toxicitat, etc. per un gran número de materials, de manera que en facilita la seva selecció.

1.5.2.2 Càrregues

Cal diferenciar entre les càrregues que ha de suportar l'equip durant el llançament, de les càrregues pròpies degudes al funcionament nominal de l'equip. Per les característiques dels equips d'instrumentació, normalment les càrregues de llançament són força més crítiques que les nominals (DR/N10 i DR/N1).

- **Càrregues de llançament:** les acceleracions i vibracions i en definitiva les forces sobre els instruments depenen de molt factors com són ara:
 - **Tipus de coet llançadora usat pel llançament:** els disseny i rigideses de les naus difereixen entre si i per tant també les forces i moments que es transmet fins a la càrrega que transporten.
 - **Allotjament de l'instrument durant el llançament:** en funció de si l'instrument es troba allotjat en un espai destinat a minimitzar les càrregues de llançament que li arriben, o bé, si està ja muntat al seu allotjament definitiu.
 - **Posició de l'instrument a la nau durant el llançament:** Les càrregues i vibracions que arriben al instrument difereixen en funció del lloc de la nau on es trobi allotjat l'instrument durant el llançament.

Les càrregues principals de llançament que apareixen sobre l'equip es poden classificar en:

- Càrregues quasi-estàtiques
- vibracions sinodals
- càrregues de xoc
- càrregues aleatòries i de soroll acústic.

- **Càrregues nominals:** són les forces i moments produïdes durant el funcionament nominal de l'equip. Seran degudes als motors (normalment servomotors, motors de continua sense escombretes o motors pas a pas) que accionen els mecanismes dels equips i que ocasionen càrregues sobre les peces. Cal tenir en compte que l'instrument es trobarà en condicions de microgravetat durant el període de funcionament a l'espai. Tot i això, rares vegades es deixa de tenir en compte la força de la gravetat sobre l'equip degut a que l'instrument cal verificar-lo i testejar-lo a terra.

Malgrat que la majoria d'equips no precisen resistir múltiples llançaments, ja que molts d'ells no es recuperen després de la missió, si que és més habitual requerir per disseny que l'equip sigui capaç de suportar un cert nombre de llançaments sense pèrdua de prestacions i amb uns mínims factors de seguretat ($DR[L4]$ i $DR[N1]$).

1.5.2.3 Factors de seguretat

Els factors de seguretat de disseny depenen bàsicament de l'aplicació de l'equip. Per un equip espacial, uns factors de disseny assumibles correspondrien a:

- **Factor de seguretat de disseny:** (aprox. 1.25) S'aplica per dimensionar peces crítiques.
- **Factor d'incertesa:** (aprox. 1.1) S'aplica sobre els resultats de tensions obtinguts de l'anàlisi d'elements finits.
- **Factor límit elàstic:** (aprox. 1.1) S'aplica sobre el valor tabulat del límit elàstic del material utilitzat.
- **Factor de ruptura:** (aprox. 1.4) S'aplica sobre el valor del límit de ruptura del material utilitzat.

Els valors dels factors de seguretat normalment són assignats pel client en funció del tipus d'equip, aplicació, responsabilitat de l'equip, etc. Sinó és així, la següent taula mostra els factors de seguretat mínims per equipament espacial en funció de l'estructura i per ser muntat en estructures primàries o secundàries del 'shuttle' ($DR[N1]$ i $DR[L4]$).

**MINIMUM SAFETY FACTORS FOR PAYLOAD FLIGHT STRUCTURES
MOUNTED TO PRIMARY AND SECONDARY STRUCTURE**

	YIELD	ULTIMATE	PROOF
Metallic Structures			
- Untested Shuttle (analysis only)	1.25	2.0	-
- Untested on orbit (analysis only)	1.25	2.0	-
- Tested Shuttle (analysis & test)	1.0	1.4	1.2
- Tested on orbit (analysis & test)	1.1	1.5	1.2
Beryllium Structures			
- Static test and analysis		2.0	1.4
Composite Structures			
- Non-discontinuity Shuttle	-	1.4	1.2
- Non-discontinuity on orbit	-	1.5	1.2
- Discontinuity	-	2.0	1.2
- Discontinuity on orbit	-	2.0	1.2
Ceramics & Glass			
- Static test & analysis (non-pressurized)	-	3.0	(accept.) 1.2
- Static test & analysis (pressurized)	-	3.0	(accept.) 2.0 (see note 2)
- Analysis only (non-pressurized)	-	5.0	-
Structural Bonds			
- Bonded to glass (analysis & test)	-	2.0	(accept.) 1.2 (qual.) 1.4
- Other (analysis & test)	-	2.0	(accept.) 1.2

Figura 1-8: Mínims factors de seguretat per equipament espacial (DR[N1]).

1.5.3 Condicionants d'anàlisis

Els anàlisi següents són normalment emprats per validar el comportament de peces, mecanismes i conjunts:

- **Anàlisi estructural:** validació de les tensions i deformacions
- **Anàlisi de vibracions:** freqüències pròpies i modes propis
- **Anàlisi de fatiga:** influència de càrregues oscil·lants al llarg del temps sobre les peces mecàniques.
- **Anàlisi tèrmic:** temperatures màximes, i nominals sobre els elements crítics (components electrònics, motors, etc)

Aquests anàlisi, freqüentment es realitzen per mitjà del Mètode d'Elements Finitos (*Finite Element Method*, FEM) utilitzant programes d'enginyeria CAE (*Computer Aided Engineering*) com ara *Cosmos*, *Nastran* o *Ansys*. Aquests programes necessiten com a dades d'entrada, la geometria de la peça, el material, i les forces i moments aplicats, o bé les càrregues tèrmiques i focus de calor aplicats, en funció de l'anàlisi que es vulgui efectuar. Un cop introduïdes aquestes dades, es procedeix al mallat i després s'executa la resolució. S'obtenen finalment les dades de vibració, tensions, deformacions o mapa tèrmic de la peça.

L'Agència Espacial Europea (*ESA*) i la *NASA* requereixen que els Models d'Elements Finitos realitzats per analitzar les característiques mecàniques dels seus equips siguin processats usant el *solver NASTRAN*.

Les càrregues que s'apliquen sobre la instrumentació per avaluar tots aquests anàlisi acostumen a ser de tres tipus diferents (*RD [N1]*, *[N9]* i *[L4]*):

- **Càrregues de llançament:** Per instrumentació que es llança ja instal·lada en els racks corresponents, les majors forces que hauran de suportar serà, en molts dels casos les càrregues de llançament.
- **Càrregues nominals de funcionament de l'equip:** en el cas d'instrumentació no muntada o d'aquella instrumentació en que les càrregues nominals superin les de llançament (rars vagades, cal tenir en compte aquests valors per efectuar els anàlisi).
- **Càrregues induïdes per la tripulació (*Crew Induced Loads*):** en el cas d'instrumentació destinada a vols tripulats, cal tenir en compte les forces i els moments que la tripulació pot aplicar sobre la instrumentació de forma voluntària o involuntària.

1.5.3.1 Anàlisi estructural

Els anàlisi estructurals han de validar que tot el conjunt de peces estructurals, és a dir, aquelles que es troben en el camí de càrrega (*Load Path*), suportin les forces i moments amb els factors de seguretat requerits pel disseny. Si no es compleixen aquests factors de seguretat, cal redissenar la geometria o redefinir el material fins obtenir-los.

Amb l'anàlisi estructural es pretén comprovar els següents factors:

- **Mapa de tensions:** Comportament de les tensions de l'element analitzat segons el criteri de falla escollit en la resolució (Von Misses, Rankine, Tresca, etc) a partir de les tensions principals. Permet detectar el punt de màxima tensió de la peça.
- **Mapa de deformacions:** Comportament de les deformacions de l'element analitzat i els punts on es produeixen. Permet detectar el punt de màxima deformació de la peça.

L'anàlisi manual de tensions i deformacions és possible per casos de peces prou simples.

1.5.3.2 Anàlisi de vibracions

L'anàlisi de vibracions permet predir el comportament dinàmic que tindrà l'equip. És a dir, el seu comportament enfront a les pertorbacions que rebí l'equip durant les fases de llançament, funcionament nominal i aterratge de la nau.

En aquest sentit, s'analitza el següent:

- **Anàlisi de freqüències pròpies:** s'obté els modes propis de vibració de l'equip així com la freqüència natural a la que vibra. Cal discriminar entre els modes propis locals (actuen sobre peça) dels globals (actuen sobre tot l'equip).
- **Anàlisi de la resposta a baixes freqüències.**

Normalment es compara la primera freqüència pròpia en front d'un valor mínim de primera freqüència especificat per l'equip (*DR[N9]*). Cal així que la freqüència obtinguda del primer mode propi de vibració es trobi per sobre del valor mínim especificat per l'equip. Els valors de freqüències mínimes especificades per estructures espacials acostuma a estar al voltant dels 100Hz (*DR[A2]*).

1.5.3.3 Anàlisi de fatiga

Les peces que pateixin tensions fluctuants caldrà que siguin analitzades a fatiga. Aquestes tensions fluctuants poden ser degudes a:

- **Forces o moments cíclics, variables al llarg del temps:** ocasionen tensions fluctuants al llarg del temps, i per tant fatiga.
- **Eixos en rotació que suporten forces i moments constants:** La rotació de l'eix ocasiona que les tensions fluctuïn entre un valor màxim i mínim ocasionant igualment fatiga.

L'anàlisi de fatiga per instrumentació espacial es realitza normalment segons el criteri de dany acumulatiu a fatiga estipulat segons la regla de Miner per l'avaluació del procés de creixement de l'esquerda (*DR[N1]*). No s'acostuma a utilitzar el procés d'anàlisi més habitual a fatiga basat en els diagrames de *Goodman* o *Soderberg*.

Programari subministrat i realitzat per l'Agència Espacial Europea (ESA) com són el programa *ESACRACK* i *ESAFATIG* permet realitzar aquests anàlisis.

1.5.3.4 Anàlisi tèrmic

L'anàlisi tèrmic té per funció validar les següents funcions:

- L'evacuació de calor de l'equip es realitza de forma adequada.
- Les fonts de calor habituals de l'equip (motors elèctrics, components electrònics (DC-DC, bobines, transformadors, mosfets, FPGA, etc.) assoleixen temperatures dins del seu rang admissible de funcionament. Si no és així, és necessari redisseny de les interfícies tèrmiques.
- El sistema previst per evacuació de calor (intercanviador per aigua, peltiers, ventilació forçada, radiador, etc.) és capaç d'evacuar el calor generat.

Per tal de comprovar que es compleixen aquestes funcionalitats, pot ser necessari realitzar un model tèrmic amb un nivell de detall adequat a la fase en que es trobi el projecte. Per fases inicials i sistemes prou simples, anàlisi manuals sobre elements concrets poden ser suficients. Mentre que, models més detallats seran de necessària realització per les fases finals de disseny de l'equip (*DR[N1]* i *DR[N9]*).

Programari subministrat i realitzat per l'Agència Espacial Europea com és el programa *ESATAN* que permet realitzar aquests anàlisis.

1.5.4 Condicionants de fabricació

Els condicionants de fabricació no són tant restrictius com altres condicionants. No importa massa el procés de fabricació mentre aquest procés no modifiqui les característiques del material de base, ni afegeixi material d'aportació no acceptat per aplicacions espacials. En aquest sentit, els processos més usuals no difereixen massa dels processos comunament usats a la indústria per la fabricació de peces de series limitades:

- **Mecanització per torn i fresa**
- **Tall per làser**
- **Tall per aigua**
- **Tall per fil**
- **Electroerosió**
- **Doblegat**
- **Soldadura**

Rarament s'utilitzen motlles o matrius per conformar les peces degut a l'alt cost que implica la seva realització per petites series de peces. Així doncs, per obtenir peces de plàstic s'acostumen a usar plàstics aprovats com el *Delrin* (poliacetal), *PTFE* (tefló) o *Nylon* que són perfectament mecanitzables.

L'obtenció de peces per soldadura s'acostuma a reduir a aquelles aplicacions on no es pot realitzar la unió d'una altra manera. La raó principal és que la unió per soldadura implica anàlisis previs, certificació del procés, de les instal·lacions i del soldador, i també tests posteriors (per ultrasons i de càrrega) per verificar la unió. Tot això és evitable si s'utilitza un altre procés d'unió alternatiu.

Un cop fabricades les peces, cal tractar-les superficialment per evitar corrosió i per aconseguir l'acabat desitjat.

- **Tractament tèrmics**

Els tractament tèrmics més usats acostumen a ser els canvis d'estat metal·lúrgic o passivats:

- Canvis d'estat metal·lúrgic efectuat sobre l'alumini en brut (per exemple per passar d'un alumini AA-7075 en estat metal·lúrgic T651 a un altre estat T7351 millorant així la resistència a fatiga).
- Estabilitzat sobre peces d'acer ja acabades per aconseguir un alliberament de tensions.

▪ **Acabats superficials**

Els acabats superficials més comuns per les peces d'alumini i les normes militars que permeten els seu ús per la indústria espacial són:

- Anoditzat i anoditzat dur: segons norma MIL-A-8625 (DR[N3])
- Alodinat: segons norma MIL-C-5541 (1200S Class 3) (DR[N4])
- Níquel Químic: segons norma MIL-C-26074E (DR[N5])
- Níquel amb PTFE: segons norma MIL-C-26074E (DR[N5])

Moltes peces cal que vagin pintades, ja sigui per qüestions tèrmiques (per modificar l'emissivitat de la peça), o òptiques (per adaptar la reflexió de la peça). En aquest sentit, el negre acostuma a ser el color més usual quan es vol aconseguir alta absorció i mínima reflexió (instrumentació òptica i astronòmica).

El pintat en negre de les superfícies desitjades s'acostuma a fer amb una pintura amb imprimació de baixa emissivitat. El tipus de pintura aprovada més comuna és la pintura d'acabat Aeroglaze Z306 que s'utilitza sobre del Primer P123 (forma d'aplicació especificada a la norma RD[N8]).

1.5.5 Condicionants de test

A la fase de test es valida el disseny i la fabricació de l'equip per mitjà d'una sèrie de tests que assegurin el correcte funcionament de l'instrument. Els condicionants de test es poden classificar en funció de si el test afecta a una peça o be a un assemblatge (DR[N1] i [N9]):

- **Tests a nivell de peça**
 - Test d'ultrasons
 - Test dimensional
 - Test de líquids penetrants
- **Tests a nivell de conjunt**
 - Test funcional
 - Test de vibració
 - Test de *Outgassing*
 - Test tèrmic

Així mateix, cal destacar que sovint s'apliquen magnituds de test diferents en funció de si s'està testejant un Model de Qualificació (QM) o be un model de vol (FM)

- **Model de qualificació (QM):** S'hi efectuaran tests amb nivells més severes per comprovar-ne el comportament.
- **Model de vol (FM):** Equip final sobre el qual s'efectuen tests menys severes.

1.5.5.1 Test d'ultrasons

- **Propòsit del test:** Test no destructiu que permet verificar que el material base a utilitzar per realitzar les peces es troba lliure de cavitats interiors degudes a la colada. També es pot efectuar sobre la peça acabada per comprovar possibles esquerdes sorgides durant el mecanitzat.
- **Equip de test:** Equip d'ultrasons generador d'eco amb representació i sortida a vídeo o suport informàtic.
- **Muntatge de test:** Material o peça a testejar situat dins l'equip d'ultrasons.
- **Seqüència de test:** Introduir el material a testejar dins l'equip de test. Interpretació dels resultats per tal de determinar l'existència de cavitats o esquerdes en el material.
S'aplica normalment la norma ASME V (*DR[N6]*)
- **Criteri d'acceptació:** Es considera el test superat si no es detecta cap cavitat, o bé si la cavitat detectada es troba en una zona que serà rebuidada durant el mecanitzat.

1.5.5.2 Test dimensional

- **Propòsit del test:** Verificar que les dimensions de la peça o del conjunt ja muntat, es corresponen amb les dimensions del plànol. S'utilitza bàsicament per:
 - Comprovar les dimensions crítiques de les peces que poden afectar a les prestacions i al muntatge de l'equip.
 - Verificar les dimensions d'interfície del conjunt.
 - Analitzar les dimensions funcionals i d'evolvent de l'equip.
- **Equip de test:** Taula tridimensional, peu de rei i palmer. Tot dins del període de calibració.
- **Muntatge de test:** Es fixa la peça sobre la taula tridimensional i s'anota temperatura i humitat relativa del test.
- **Seqüència de test:** Es parteix d'un plànol de peça o conjunt on s'han indicat les cotes crítiques a verificar amb les seves toleràncies admissibles. Es va mesurant dimensió per dimensió usant en cada cas l'element més adequat (palmer, peu de rei, taula dimensional, etc).
- **Criteri d'acceptació:** Si les mides obtingudes durant la mesura es troben dins del marge de toleràncies que indica el plànol, la dimensió es considera correcta.

Si la mida es troba fora de toleràncies, aleshores es considera errònia. Segons la criticitat de la mesura i el grau de desviació del marge de toleràncies pot ser necessari prendre alguna d'aquestes accions:

- Omissió: la mesura tot i trobar-se fora de marge de toleràncies, no és crítica i s'accepta.
- Reparació: la mesura és crítica i no s'admet la desviació però és possible reparar la peça.
- Repetició: la mesura és crítica i no es pot aconseguir que es situï dins del marge de toleràncies.

1.5.5.3 Test de líquids penetrants

- **Propòsit del test:** Test no destructiu que permet verificar si s'han produït discontinuïtats superficials (esquerdes o micro-esquerdes) durant la mecanització de les peces. Aquest test no detecta les esquerdes o cavitats interiors.
- **Equip de test:** Sala ventilada amb lluminositat controlada.
- **Muntatge de test:** No es requereix cap muntatge específic, tant sols disposar de les peces desmuntades i netejades.
- **Seqüència de test:** consisteix en aplicar un líquid de color o fluorescent a la superfície a examinar, el qual penetra per les discontinuïtats del material per capil·laritat. Es deixa passar un cert temps i es neteja l'excés de líquid penetrant i s'aplica un revelador, generalment de pols blanca, que absorbeix el líquid que ha penetrat a la discontinuïtat de manera que sobre la capa del revelador se delinea el contorn de la discontinuïtat.
S'aplica normalment la norma ASME V (*DR[N6]*)
- **Criteri d'acceptació:** Es considera el test superat si no es detecta cap discontinuïtat, o bé si la discontinuïtat detectada és inferior a la discontinuïtat límit especificada.

1.5.5.4 Test funcional

- **Propòsit del test:** En aquest test es comparen els valors de prestacions que té l'equip amb els valors requerits per les especificacions inicials definides per l'equip.
- **Equip de test:** l'equip a testejar junt amb els utilatges que siguin necessaris per tal de comprovar les seves prestacions.
- **Muntatge de test:** Cal fer funcionar l'equip a les condicions més semblants possibles a les que es trobarà durant el període d'operació nominal (temperatura, humitat, pressió, etc). S'efectuarà un muntatge de test que sigui adequat en funció de l'especificació a verificar.
- **Seqüència de test:** Cal comprovar les especificacions funcionals i anotar els resultats que s'obtenen de l'equip per cada especificació. Per exemple: Pes de l'equip, consum de l'equip, etc.

- **Criteri d'acceptació:** Es comparen els resultats del test funcional amb els valors especificats inicialment per l'equip. S'avalua si les prestacions són acceptables (les prestacions compleixen amb les especificacions de l'equip) o insuficients (les prestacions no assolixen els límits especificats per l'equip). En cas de no compliment d'alguna especificació cal avaluar (sovint amb el client) si aquest no compliment és assumible, o bé implica una modificació del disseny o de la fabricació.

1.5.5.5 Test de vibració

- **Propòsit del test:** assegurar que l'instrument funcionarà de forma nominal després de ser sotmès a nivells de vibració semblants als que patirà en vol.
- **Equip de test:** vibrador, útil de fixació de l'equip al vibrador, acceleròmetres (de control i de mesura) uniaxials i triaxials, equip d'adquisició de dades.
- **Muntatge de test:** es munta l'útil de vibració sobre del vibrador. Es munta l'equip a vibrar sobre de l'útil de manera que l'eix de l'equip que es vol mesurar coincideixi amb la direcció de vibració del vibrador. Seguidament s'enganxen els acceleròmetres sobre de l'equip en llocs prou rígids (evitar centres de plaques o extrems de peces en voladís) com a mínim un per cada direcció X, Y, Z essent una d'elles la direcció de vibració).
- **Tipus de tests de vibració:** Els següents tests de vibració poden ser susceptibles de ser aplicats sobre l'equip (veure *DR/N16*).
 - **Test d'escombrat de freqüències** (*Frequency Search*): es fa vibrar l'equip en un rang de freqüències comprés entre 5 Hz i 2000Hz (per elements comercials no s'acostuma a sobrepasar els 1000Hz) a una certa amplitud (Gs). De manera que s'obté la resposta dels acceleròmetres per cada freqüència i permet obtenir els modes propis de vibració de l'equip un cop s'han discriminat els modes del útil de vibració.
 - **Test quasi-estàtic** (Sinodal): consisteix en aplicar una vibració de forma sinodal de baixa freqüència (al voltant de 50Hz) durant un cert temps (de l'ordre de pocs minuts) amb un desplaçament d'amplitud equivalent a uns certs Gs ($1G=9.81m/s^2$). Per exemple pot estar de l'ordre de 20Gs.
 - **Test aleatori** (*Random Vibration Test*): Aquest test pretén fer vibrar l'equip a nivells semblants als que es trobarà en vol. Es defineixen uns nivells de vibració de baixa freqüència (de 20 a 80Hz), uns altres de mitjana freqüència (de 80 a 400Hz) i uns altres d'alta freqüència (de 400 a 2000Hz) així com el valor RMS. Es fa vibrar l'equip a totes aquestes freqüències.
 - **Test de xoc:** Es defineix una acceleració a aplicar sobre l'equip (per exemple 70Gs) i es sotmet l'equip a aquesta acceleració en ambdós sentits de la direcció de vibració.

- **Test de caracterització de l'útil:** aquest test pretén verificar el comportament dinàmic de l'útil i el funcionament del llaç de control. Cal comprovar que l'útil és capaç de transmetre la vibració a l'equip sense pertorbar en excés la resposta de l'equip. Per això es vibra només l'útil sense l'equip, sotmetent-lo a un escombrat de freqüències. D'aquesta manera s'obtenen les freqüències pròpies de l'útil de vibració que haurien de ser prou allunyades de les freqüències pròpies de l'equip com per no afectar a la mesura.
- **Seqüència de test:** Un possible procés de test de vibració susceptible de ser aplicat sobre un instruments espacial seria el següent:
 - 1.- Test funcional inicial sobre l'instrument: comportament funcional de l'equip abans del test.
 - 2.- Test de caracterització de l'útil
 - 3.- Test d'escombrat de freqüències inicial: detecció de freqüències pròpies
 - 4.- Test quasi-estàtic
 - 5.- Test d'escombrat de freqüències entremig: comparació amb test inicial
 - 6.- Test aleatori
 - 7.- Test de xoc
 - 8.- Test d'escombrat de freqüències final: comparació amb test entremig i inicial
 - 9.- Test funcional final: comportament funcional de l'equip després del test

Un cop acabat el procés, caldria repetir la seqüència de test pels altres eixos de l'equip per tal de tenir completament caracteritzat l'instrument de forma dinàmica.

- **Criteri d'acceptació:** El test es considera superat si es compleixen els següents punts:
 - Es supera el test funcional final de l'equip
 - El primera freqüència de ressonància de l'equip es troba per sobre del valor mínim especificat. Per validar l'anàlisi, caldria també que aquesta freqüència coincidís aproximadament amb la calculada.
 - La inspecció visual de l'equip mostra que l'equip no ha sofert desperfectes.
 - La normativa aplicable per aquest cas és recollida a *DR[N1]*, *DR[N9]* i *DR[N10]*.

1.5.5.6 Test tèrmic

- **Propòsit del test:** verificar el comportament tèrmic de l'equip (*DR/N16*).
 - Validar que l'equip és capaç de suportar les temperatures a les que estarà sotmès durant el llançament.
 - És capaç de funcionar correctament en l'interval de temperatures d'operació.
 - Si l'instrument ha de suportar condicions de buit, es complementa aquest test tèrmic amb un ambient de buit (*Vacum-Thermal Test*) per tal de validar ambdós condicionants ambientals.
- **Equip de test:** Cambra climàtica de temperatura controlada i amb possibilitat de buit si és el cas.
- **Muntatge de test:** Es situa l'equip dins la cambra climàtica. Es monitoritza la temperatura de la cambra i també la del equip amb dues o més sondes de temperatura (mínim una sonda de mesura més una altra de seguretat).
- **Condicions del tests tèrmic:** Cal definir les següents temperatures indicades per ordre de major a menor:
 - Temperatura màxima d'acceptació: màxima temperatura que haurà de suportar l'equip sense funcionar. Per exemple: 55°C
 - Temperatura màxima d'operació: màxima temperatura que haurà de suportar l'equip en funcionament. Per exemple: 30°C
 - Temperatura normal d'operació: temperatura normal a que funcionarà l'equip. Per exemple: 24°C
 - Temperatura mínima d'operació: mínima temperatura que haurà de suportar l'equip en funcionament. Per exemple: 18°C
 - Temperatura mínima d'acceptació: mínima temperatura que haurà de suportar l'equip sense funcionar. Per exemple: -6°C

Cal anotar també la humitat relativa per cada temperatura de test.

El ciclat tèrmic d'exemple correspon a un instrument per vols tripulats on els valors de les temperatures s'han acordat conjuntament amb el client (veure la següent figura). Les temperatures de ciclat per instruments destinats a satèl·lits presenten unes variacions molt més elevades.

- **Seqüència de test:** Una possible seqüència de test podria ser sotmetre l'equip a us seguit de cicles tèrmics on es fluctuï de temperatura d'acceptació màxima a temperatura d'acceptació mínima, deixant establir una hora a cadascuna d'aquestes temperatures, tal i com mostra la següent figura per una seqüència de dos cicles:

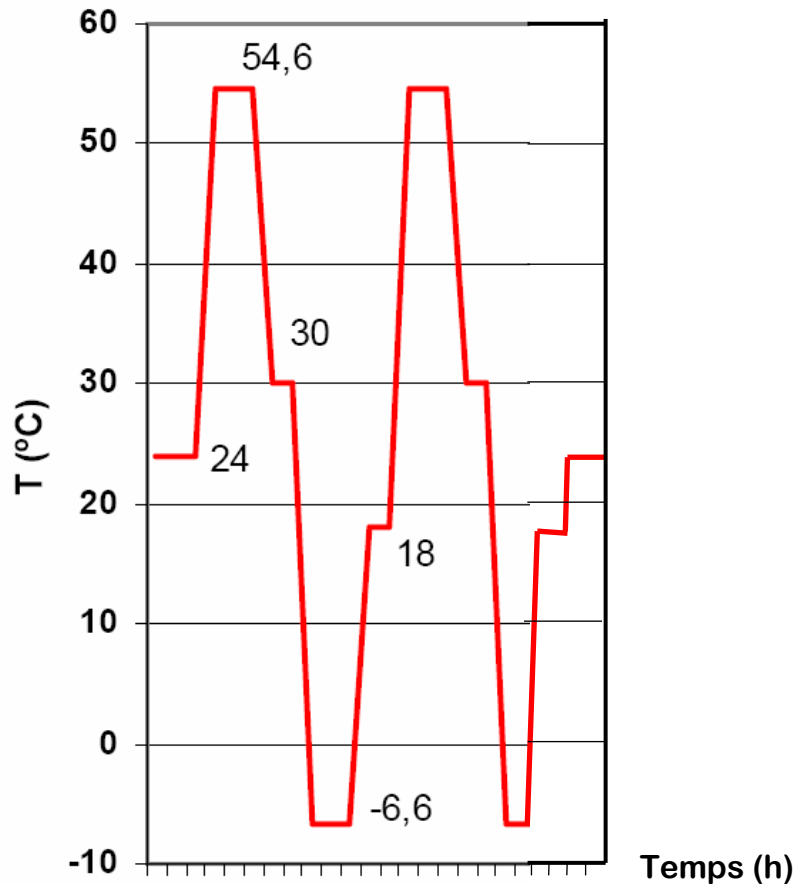


Figura 1-9: Seqüència temperatura temps per un test tèrmic.

- **Criteri d'acceptació:** El test es considera superat si no es detecta cap mal funcionament de l'equip dins del període tèrmic d'operació ni cap defecte produït pel cicle tèrmic (*DR[N9]* i *DR[N14]*).

1.5.5.7 Test de *Outgassing*

- **Propòsit del test:** en estat de buit alguns materials alliberen gasos que poden ser perjudicials o que poden condensar en llocs indesitjats (veure apartat 1.5.2.1.1 i *DR[N7]*). Per tal de verificar que un material supera el requeriment de *Outgassing* degut a l'estat de buit cal testear-lo segons indica la norma ASTM E-595-77/84. Aquest criteri també és d'aplicació per equips i instruments destinats al camp espacial no només a materials en brut.
- **Equip de test:** equip de buit amb control tèrmic
- **Seqüència de test:** El test consisteix en col·locar el material a testear en un ambient de buit de 10^{-4} Pa a 125°C durant 24 hores i analitzar quina és la massa perduda i la massa volàtil condensable.

- **Criteri d'acceptació:** . El criteri que indica la norma és el següent:
 - Massa total perduda (*TML*) < 1.0%
 - Massa volàtil condensable (*CVCM*) < 0.10%

NASA disposa d'una web (*DR[W10]*) que recull els resultats del test de *Outgassing* de múltiples materials segons la norma ASTM E-595-77/84 i que permet saber si el material compleix amb el criteri anterior.

1.5.5.8 Altres tests

En funció de la naturalesa i aplicació de l'instrument poden ser necessaris altres tests que certifiquin que les prestacions de l'equip superen a les especificades. Així, pot ser necessari efectuar algun d'aquests altres tests:

- **Test de soroll:** mesura del soroll que realitza l'equip en funcionament nominal i verificació que no sobrepassi el valor especificat.
- **Test d'alineació òptica:** S'utilitzen auto-col·limadors i *corner reflectors* per tal de mesurar l'alineament de miralls i filtres amb grans exactituds i poder-ho comparar amb el valor especificat.
- **Test de EMI (*Electromagnetic Interference*):** Es mesuren les freqüències radiades i induïdes de l'equip elèctric per tal d'assegurar que són valors admissibles (*DR[N16]*)
- **Test de pressió:** Es sotmet el sistema hidràulic o pneumàtic de l'equip a una prova de pressió amb pressions majors que les nominals per tal d'assegurar estanquitat i funcionalitat.
- **Test de conductivitat i posta a terra (*Bonding*):** Es comprova que totes les peces de l'instrument es troben elèctricament connectades.
- **Examen de soldadura:** test no destructiu de les soldadures de l'equip per comprovar que la unió s'ha aconseguit de forma satisfactòria. S'acostuma a usar ultrasons per realitzar aquesta verificació.

1.5.6 Condicionants de qualitat

Els condicionants de qualitat són condicionants transversals que afecten a totes les fases del procés. Cal destacar com a condicionants transversals de qualitat presents en tot el procés de disseny, fabricació i test, els condicionants de traçabilitat i les no conformitats (NCRs).

- **Condicionants de Traçabilitat**

És requisit indispensable en els projectes espacials que existeixi traçabilitat de tots els materials utilitzats en l'equip. Això implica sol·licitar al proveïdor certificats de

traçabilitat a nivell de número de colada del material o número de sèrie de l'element comercial i documentar i gestionar aquesta informació fins la peça final.

Aquesta traçabilitat des del material base fins a la peça final es documenta usant Fulls de Ruta (*Travelling Files*) on s'indica també el procés que ha de seguir el material base, ja recepcionat i numerat amb el número de traçabilitat, fins a obtenir-ne la peça final. De cada procés efectuat sobre la peça s'ajunta el certificat corresponent i es firma la fulla de ruta per tenir en tot moment l'historial dels processos que ha seguit cada peça.

Fulls de ruta de muntatge a nivell de conjunt també s'efectuen per tal de documentar el procés que cal seguir per l'assemblatge de l'equip.

- **No conformitats (NCRs)**

Quan es produeix una incidència sobre una peça, a part d'indicar-ho a la fulla de ruta, cal realitzar també un informe de No Conformitat (*NCR*) per formalitzar, documentar i traçar la incidència. Les causes més comunes que requereixen la realització d'una No Conformitat són:

- Alguna o algunes dimensions de la peça no es correspon amb les especificades en el plànol. Pot suposar la repetició o reparació de la peça.
- El tractament superficial no s'ajusta a la qualitat demanada. Implica, si és possible, tractar superficialment la peça de nou.
- El material utilitzat presenta defectes interns o superficials.
- Les peces no encaixen alhora d'efectuar el muntatge per error en el disseny. Implica modificar el disseny i refer o modificar les peces afectades.
- Els tests efectuats presenten alguna desviació en el procediment respecte al procediment aprovat pel client.

En definitiva, cal documentar qualsevol incidència via informe de No Conformitat ja sigui a nivell de peça o assemblatge que faci que l'equip no estigui conforme segons l'indicat en les especificacions de l'equip, en els plànols de fabricació o de muntatge o en les normes dels processos realitzats.

En el cas que la reparació del defecte sigui costosa o impossible o la repetició sigui inviable, es pot optar per acceptar el defecte sempre i quan no afecti a la qualitat final de l'equip o s'acordi amb el client.

Les No Conformitats poden ser menors (si són de poca importància i no afecten a les prestacions de l'equip) o majors (si afecten a les prestacions de l'equip). En aquest últim cas, és necessari informar al client sobre aquest fet per poder prendre una decisió consensuada.

Capítol 2. DESENVOLUPAMENT DE LA METODOLOGIA

En aquest capítol es desenvolupa la metodologia que ha de permetre la caracterització d'un instrument espacial abans de ser llançat a l'espai. D'aquesta manera, es permetrà predir el comportament que tindrà l'equip final abans de ser sotmès a les diferents condicions que patirà un cop es trobi a l'espai.

Per aconseguir aquest objectiu, la metodologia es basa en una sèrie de tests que permeten ajustar el comportament experimental dels paràmetres a analitzar. Un cop és conegut el comportament d'aquests paràmetres, es desenvolupa un model d'elements finits de l'equip que posteriorment es caracteritza amb els resultats del test. Finalment, ja amb el model validat segons els tests efectuats, s'efectua una simulació introduint en el model les particulars condicions que patirà l'equip un cop es trobi instal·lat en la seva ubicació espacial.

En aquest capítol, es descriu aquesta metodologia en profunditat i es desenvolupa un procés metodològic general i un altre de particular que tenen les següents peculiaritats:

- **Procés metodològic general:** procés genèric on no es particularitza la naturalesa dels paràmetres ni l'equip que s'analitza.
- **Procés metodològic particular:** Procés metodològic particularitzat d'acord als paràmetres que es volen analitzar del Sistema VIF. Aquest és el procés que posteriorment s'utilitza per la realització de l'estudi sobre el Sistema VIF.

2.1 Objectius de la metodologia

Els objectius que persegueix la metodologia desenvolupada en aquest capítol es poden resumir en els següents punts:

- Objectiu principal de la metodologia: Definir un procediment que permeti la predicció a terra del comportament d'una sèrie de paràmetres d'un equip espacial a partir de l'execució prèvia d'un seguit de tests i l'execució d'un conjunt de simulacions basades en models FEM.
- Altres objectius de la metodologia:
 - Permetre la comparativa entre els valors dels paràmetres obtinguts de la simulació final de l'equip (simulació en les condicions particulars de l'espai) amb els valors dels paràmetres segons els requeriments definits per l'equip (valors que marquen els límits admissibles segons la ubicació, interfície, condicions ambientals, etc)
 - Obtenir un model que tingui un comportament caracteritzat a partir d'una sèrie de tests.
 - Obtenir el comportament d'uns paràmetres en unes condicions no reproduïbles a la terra a partir de simulacions validades.

2.2 Procés metodològic general

El procés metodològic descrit a continuació, és aplicable a qualsevol instrument espacial que requereixi la validació i caracterització de paràmetres d'enginyeria sigui quin sigui l'àmbit d'aquests paràmetre. Així doncs, es pot aplicar la metodologia a paràmetres de naturalesa mecànica, tèrmica, de resistència de materials, de vibracions, etc, o de qualsevol altre tipus susceptible de poder ser modelat i simulat utilitzant el programa informàtic adequat.

El següent diagrama mostra la metodologia general proposada per la tal de permetre la caracterització d'un instrument espacial abans de ser llançat a l'espai i predir així el seu comportament un cop es trobi en les particulars condicions de l'espai. En aquest procés metodològic general no es defineix la naturalesa dels paràmetres que es volen analitzar.

El punt de partida de la metodologia consisteix en disposar d'un instrument espacial ja dissenyat i fabricat i que es troba en la fase final del seu desenvolupament, és a dir, en la fase de test de l'equip. Sobre aquest equip en fase de test s'hi efectua la metodologia proposada a continuació:

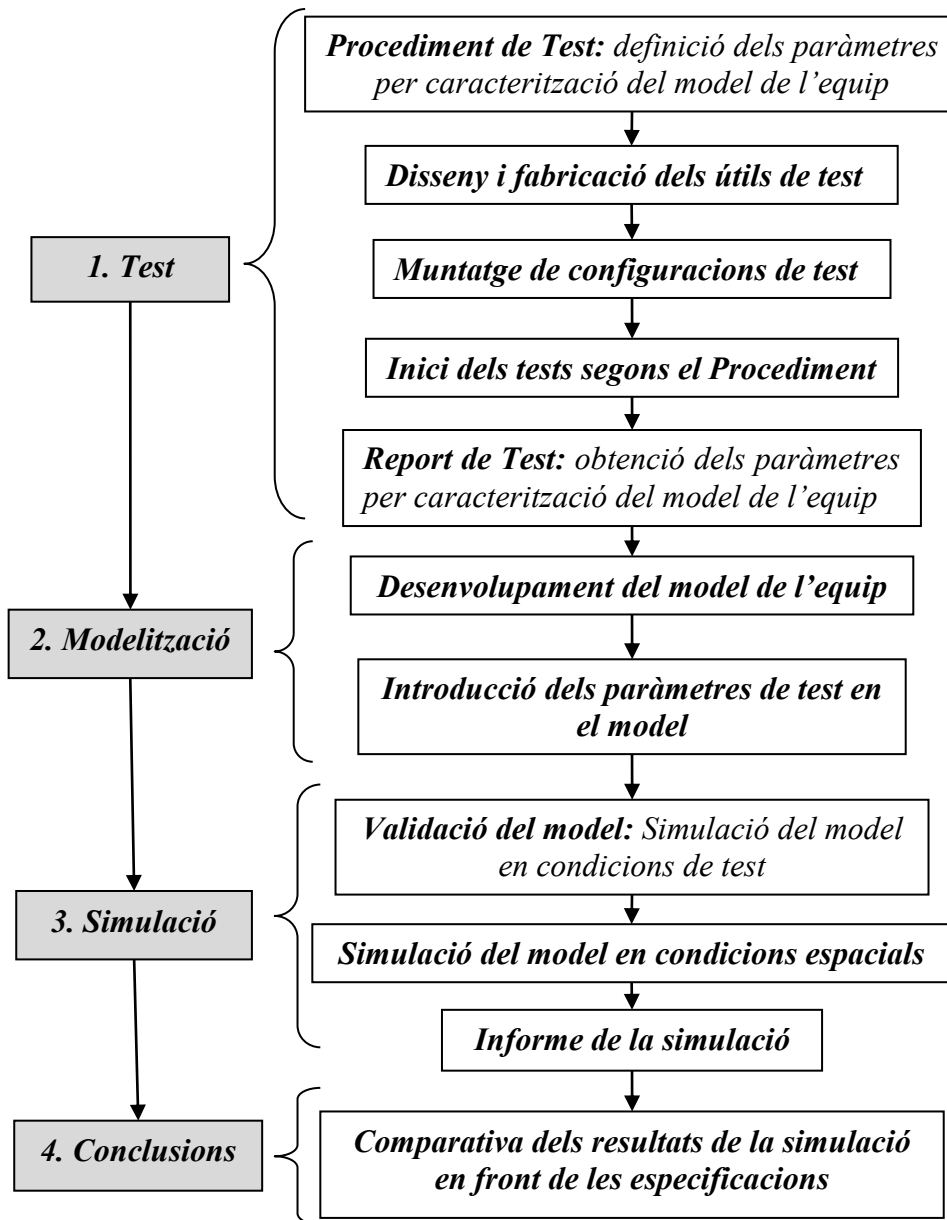


Figura 2-1: Diagrama del procés metodològic general.

A continuació es descriuen cadascun d'aquests passos.

- **Fase de Test:** El procés metodològic general s'inicia amb la fase de test. Aquesta primera fase cal iniciar-la amb la concreció d'un procediment de test que és el document clau per l'adequada realització dels tests. Hi cal fer constar clarament com a mínim els següents punts:
 - Configuració de l'equip de test
 - Objectiu dels tests
 - Descripció dels tests
 - Seqüència d'operacions
 - Resultats de Test
 - Resum dels resultats de test

Altres punts poden ser necessaris en funció del tipus i de la naturalesa dels paràmetres que es vulguin testejar.

Un cop definit el procediment de test, i concretada la configuració de test necessària que ha de tenir l'equip de test, ja se'n pot extreure la informació necessària per realitzar el disseny i fabricació dels útils de tests requerits. Amb aquests útils de test a disposició, ja és possible iniciar la integració de les configuracions de test, i tot seguit, iniciar els tests descrits en el procediment. Una vegada efectuats tots els tests, cal documentar els resultats en el Report de Test on s'exposen els valors resultants i les conclusions de cadascun dels paràmetres testejats.

- **Fase de modelització:** La següent fase és la modelització de l'equip. El model a que fa referència aquest desenvolupament metodològic és sempre un model informàtic de qualsevol dels àmbits d'enginyeria capaç de ser sotmès a una simulació per part d'un programa informàtic. En aquest sentit, el model podria ser un model de simulació de mecanismes, tèrmic, d'anàlisi de tensions i deformacions, d'anàlisi de vibracions, etc. A qualsevol d'aquests àmbits és aplicable el procés metodològic general descrit en aquest apartat. L'elecció del model va en funció del tipus i naturalesa dels paràmetres que s'han testejat i que ara es volen modelar. Així doncs, un cop escollit l'entorn informàtic adequat en funció dels paràmetres a modelar, i un cop desenvolupat el model, és l'hora d'introduir els resultats de test obtinguts anteriorment. D'aquesta manera s'obté un model amb un comportament dinàmic raonablement similar al comportament obtingut per test.
- **Fase de simulació:** Un cop obtingut el model adequadament caracteritzat, és el moment d'iniciar el procés de simulació. Es suggereix una primera simulació de validació on es simula el model en les mateixes condicions en que s'ha realitzat el test. Per tant, els resultats obtinguts d'aquesta primera simulació han de ser prou similars als resultats aconseguits a la fase de test de l'equip. Si és així, el model ja estarà validat. Si els paràmetres modelats no compleixen amb el criteri d'acceptació definit, caldrà iterar en el procés de simulació, model i test fins aconseguir un model

validat amb uns paràmetres que es trobin compresos dins del marge de toleràncies especificat. Un cop caracteritzat i validat el model, s'introdueixen les condicions particulars que patirà l'equip mentre realitzi les funcions per les que ha estat dissenyat a bord d'algun vehicle espacial (transbordador, satèl·lit, estació espacial, etc). D'aquesta simulació s'obtenen els resultats que mostren el comportament que tindrà l'equip en aquestes particulars condicions. D'aquesta manera, és possible predir el comportament que tindran els paràmetres analitzats un cop l'equip es trobi funcionant a l'espai.

- **Conclusions:** Per últim, cal comparar els resultats obtinguts durant la simulació dels paràmetres analitzats de l'equip en condicions finals amb els valors límit o admissibles dels paràmetres analitzats segons les especificacions de la ubicació on es trobarà allotjat l'equip. Amb aquesta comparativa es pot discernir si l'equip compleix les especificacions definides pel tipus de paràmetres analitzats.

2.3 Camp d'aplicació de la metodologia general

La metodologia general descrita anteriorment és aplicable bàsicament a instruments o equips dissenyats i fabricats per funcionar en les particulars condicions en que es troben sotmesos els vehicles espacials (satèl·lits, transbordadors, estacions espacials). Per tant, són equips que, un cop instal·lats a les seves ubicacions finals, patiran condicions ambientals no reproduïbles (o difícilment reproduïbles) aquí a la Terra abans de ser llançats a l'espai. Totes aquestes particulars condicions espacials han estat enumerades i descrites al capítol 1 de la present tesi.

El procés metodològic és aplicable doncs a instruments espacials on és necessari conèixer el comportament d'alguns paràmetres d'enginyeria, sigui quin sigui l'àmbit d'aquests paràmetre. En aquest sentit, es poden donar dues possibilitats:

- Que el paràmetre es vegi influït per les particulars condicions de l'espai: aleshores la metodologia és plenament aplicable tal i com ha estat descrita.
- Que el paràmetre no es vegi influït per les particulars condicions de l'espai: aleshores ens trobaríem en un cas simple on no es fa necessari efectuar la simulació d'aquest paràmetre degut a que les condicions espacials no li afecten.

Per tant, la naturalesa del paràmetre pot fer que la metodologia sigui aplicable, o bé que es pugui redirigir el procés directament a la simulació final, saltant-se la fase test i la caracterització del model.

Alguns exemples de paràmetres que es veuen influïts per les condicions de l'espai serien: forces, moments, tensions, deformacions, modes de vibració en equips per vols no tripulats (degut a l'estat de buit), transferència de calor per convecció, etc.

Alguns exemples de paràmetres no afectats per les condicions de l'espai podrien ser: rigidesa, modes de vibració en equips per vols tripulats (degut a la presència d'aire), tensió elèctrica, corrent elèctrica, etc.

2.4 Procés metodològic particularitzat al Sistema VIF

El procés metodològic descrit anteriorment es particularitza en aquest apartat pel Sistema VIF per tal de predir el seu comportament abans de que l'equip sigui llançat a l'espai. Així és possible validar que l'equip complirà amb les especificacions pel qual ha estat dissenyat.

Es tracta doncs d'aplicar la metodologia general descrita anteriorment al cas concret del Sistema VIF. Aquesta adaptació de la metodologia es fa en funció dels paràmetres que es volen analitzar del Sistema VIF.

2.4.1 Paràmetres a analitzar del Sistema VIF

La definició dels paràmetres analitzar del Sistema VIF determina el tipus de tests, tipus de modelat i simulacions posteriors. En funció dels paràmetres escollits, els tests hauran de ser uns o uns altres i els models i simulacions també es veuran afectats.

L'elecció dels paràmetres depèn de la funció de l'equip. Pel cas del Sistema VIF, tal i com es descriu a l'apartat 3.1, cal tenir present que es tracta d'un equip que anirà embarcat a la ISS i destinat a permetre que l'equip MARES (i el subjecte subjectat a l'equip) disposi d'una sèrie de graus de llibertat en les tres direccions espacials X, Y i Z.

Degut a la falta de gravetat de l'espai, el conjunt de forces, moments, tensions, deformacions, velocitats, acceleracions i desplaçaments es veuran pertorbats un cop el Sistema VIF es trobi en microgravetat en comparació dels seus valors terrestres. Per tant, aquest seran els paràmetres bàsics que cal analitzar del Sistema VIF:

- Forces en les tres direccions X, Y i Z
- Moments en les tres direccions X, Y i Z
- Velocitats en les tres direccions X, Y i Z
- Acceleracions en les tres direccions X, Y i Z
- Desplaçaments en les tres direccions X, Y i Z

2.4.2 Procés metodològic particularitzat al Sistema VIF

Un cop definits els paràmetres, ja es pot particularitzar la metodologia. Així doncs, el procés metodològic general s'ha particularitzat tenint en compte els següents factors concrets per permetre l'anàlisi del Sistema VIF per cadascuna de les fases:

- **Fase de test:** Els procediments de tests s'han de desenvolupar per tal de permetre testejar els següents paràmetres abans esmentats: forces, moments, tensions, deformacions, velocitats, acceleracions i desplaçaments.
- **Fase de modelització:** El model que cal desenvolupar ha de ser un model mecànic capaç de poder efectuar les simulacions de tensions i deformacions, i forces i moments.
- **Fase de simulació:** La simulació final s'ha de fer en condicions de microgravetat (ingravedesa) per tal de simular les condicions que tindrà el Sistema VIF un cop instal·lat a la ISS.
- **Conclusions:** Cal comparar els resultats obtinguts durant la simulació en microgravetat amb els valors límit especificats de moments i forces transmeses d'un equip cap al Rack de la ISS.

D'acord amb aquests punts, a continuació es presenta un diagrama on es mostra el procés metodològic particularitzat al Sistema VIF.

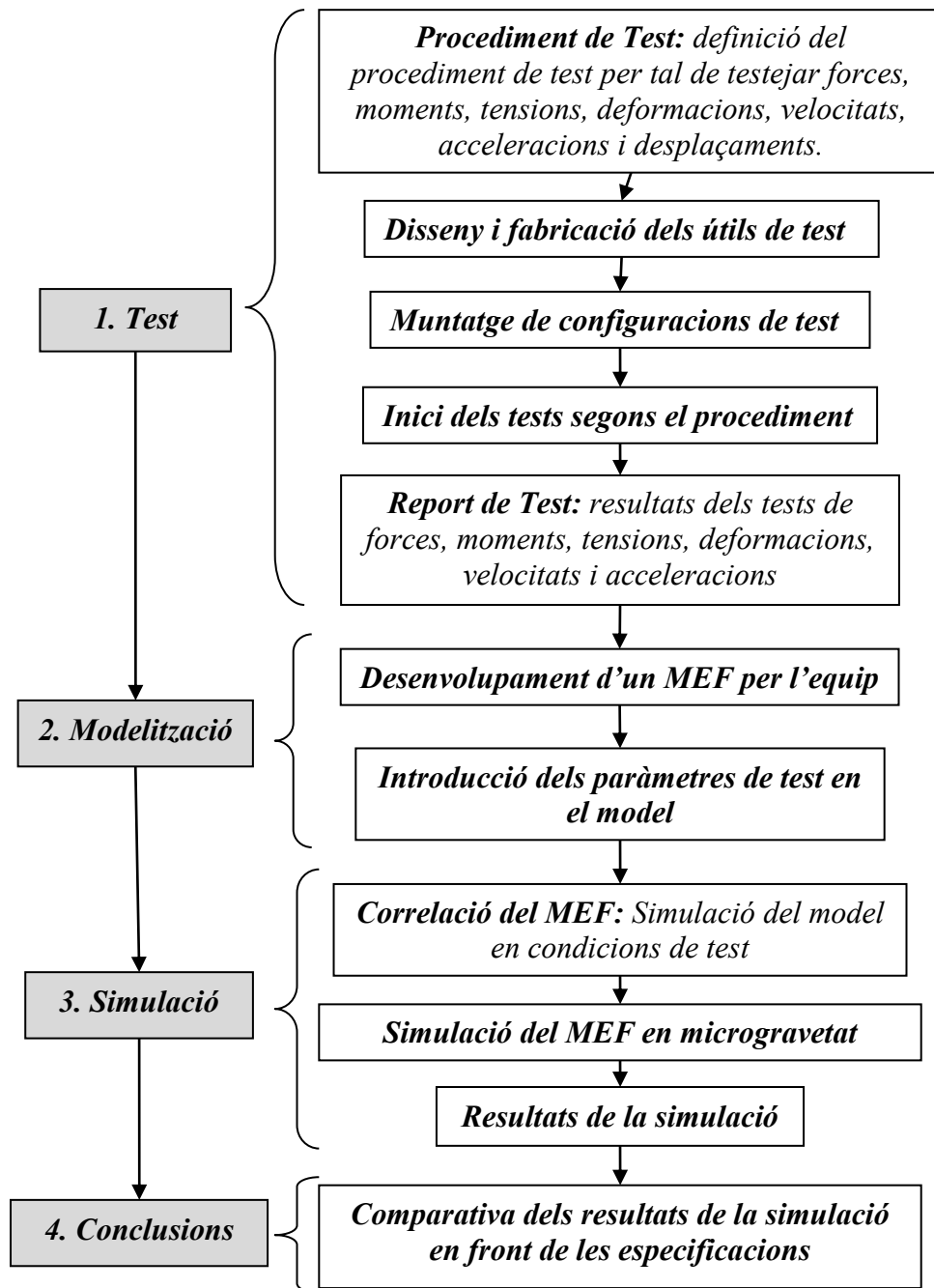


Figura 2-2: Diagrama del procés metodològic particularitzat al Sistema VIF.

A continuació es descriuen aquestes etapes contextualitzades pel Sistema VIF:

- **Fase de Test:** El procés metodològic particularitzat pel Sistema VIF s'inicia amb un procediment de test on es detalla com obtenir els valors de forces, moments, tensions,

deformacions, velocitats, acceleracions i desplaçaments pel Sistema VIF. Es desenvolupen els següents punts enfocats a l'obtenció d'aquests paràmetres:

- Configuració de l'equip de test
- Objectiu dels tests
- Descripció dels tests
- Seqüència d'operacions
- Resultats de Test
- Resum dels resultats de test

Del procediment de test s'extreu la necessitat dels útils de test requerits per l'execució del test, i es procedeix a l'aprovisionament d'aquests útils (disseny, fabricació i muntatge dels útils de test).

Amb aquests útils de test a disposició, ja és possible iniciar la realització dels tests i la documentació dels resultats en el Report de Test on s'exposen els valors resultants i les conclusions de cadascun dels paràmetres testejats.

- **Fase de modelització:** D'acord amb la naturalesa dels paràmetres a modelar, es fa necessari desenvolupar un Model d'Elements Finitos (MEF) del Sistema VIF. Un cop desenvolupat el model, cal introduir els resultats de test obtinguts anteriorment. D'aquesta manera s'obté un model del Sistema VIF amb un comportament dinàmic raonablement similar al comportament obtingut per test.
- **Fase de simulació:** Es preveu una primera simulació de validació on es simula el MEF en les mateixes condicions en que s'ha realitzat el test. Per tant, els resultats obtinguts d'aquesta primera simulació han de ser similars als resultats aconseguits a la fase de test de l'equip. Si és així, el MEF ja estarà validat. Si els paràmetres modelats no compleixen amb el criteri d'acceptació definit, caldrà iterar en el procés efectuat (simulació, model i test) fins aconseguir un MEF validat amb uns paràmetres que es trobin compresos dins del marge de toleràncies especificat.

Un cop caracteritzat i validat el MEF, s'introdueixen les particulars condicions de l'espai al MEF. D'aquesta simulació s'obtenen els resultats que mostren el comportament que es preveu pel Sistema VIF per aquestes particulars condicions.

- **Conclusions:** Finalment es comparen els resultats obtinguts durant la simulació dels paràmetres analitzats del Sistema VIF en les particulars condicions de l'espai, amb els valors límit o admissibles dels paràmetres analitzats segons les especificacions. Aquesta comparativa permet discernir si el Sistema VIF compleix amb les especificacions definides.

Aquestes conjunt d'etapes indiquen el procés que cal aplicar sobre el Sistema VIF per aconseguir el propòsit que s'ha marcat la tesi. L'estructura de capítols que segueix a continuació es regeix d'acord amb aquestes etapes descrites anteriorment.

Des del punt de vista dels tests i models FEM requerits i d'acord amb les etapes anteriors, es preveu necessari desenvolupar els següents models FEM i tests per aconseguir l'objectiu establert:

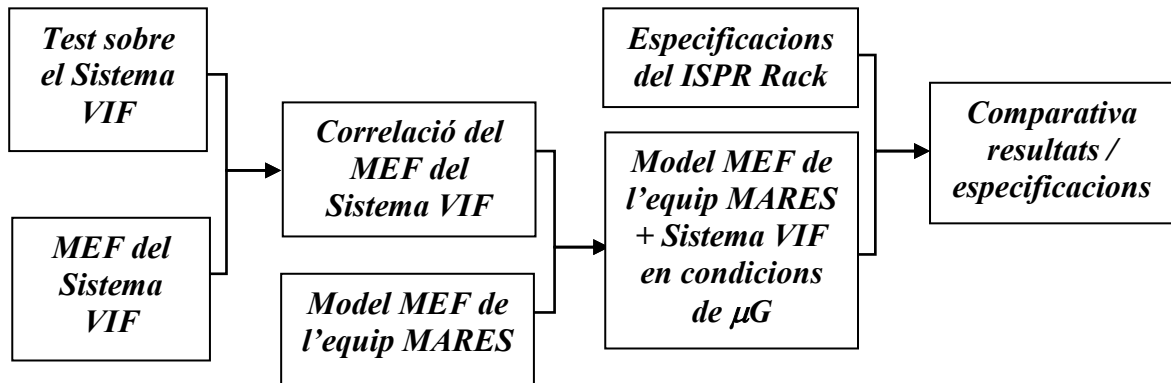


Figura 2-3: Diagrama del procés evolutiu de models FEM i tests necessaris.

Capítol 3.

APLICACIÓ AL SISTEMA VIF: TEST

En aquest capítol s'exposen el conjunt de tests efectuats sobre el Sistema VIF que permet obtenir les dades necessàries per la caracterització del MEF (Model d'Elements Finitis).

Les dades que es volen aconseguir a partir de l'execució dels tests per tal d'esbrinar el comportament del Sistema VIF són les següents:

- Determinació de forces de fricció a les guies del Sistema VIF
- Determinació de forces i moments transmesos pel Sistema VIF
- Determinació dels desplaçaments al Sistema VIF
- Determinació de les acceleracions al Sistema VIF

El capítol es s'estructura d'acord als següents apartats que segueixen la seqüència de test:

- Descripció de l'equip de test
- Objectiu dels tests
- Descripció dels tests
- Seqüència d'operacions
- Disposicions preliminars per la realització dels test
- Calibració de galgues extensomètriques, i validació acceleròmetres
- Resultats de test
- Resum dels resultats de test

3.1 Descripció del Sistema VIF

3.1.1 Disseny del Sistema VIF

El Sistema VIF està format per dues guies lineals horitzontals i dues guies lineals verticals connectades entre si per tal de garantir moviments en X-X i Z-Z. Les guies horitzontals disposen a cada extrem d'uns rodaments lineals amb recirculació de boles per permetre el moviment també en direcció Y-Y, proporcionant així 3 graus de llibertat. La limitació del moviment està garantida per finals de carrera mecànics en cada direcció. Així mateix, la posició d'equilibri s'aconsegueix a través de molles i esmorteïdors situats en les direccions X-X i Z-Z, i molles en la direcció Y-Y.

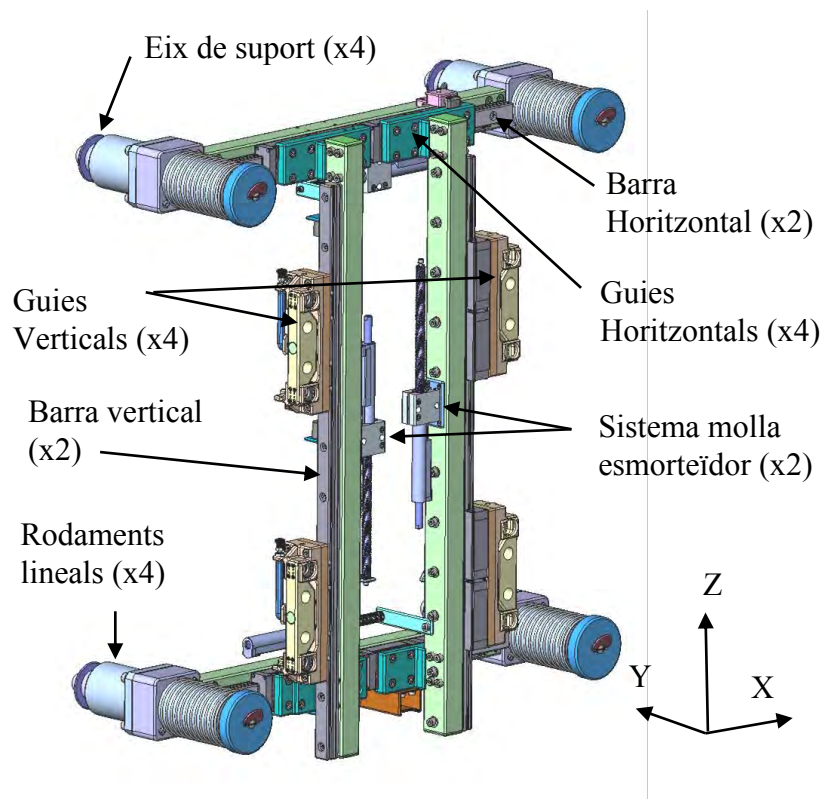


Figura 3-1: Elements principals del Sistema VIF i sistema de coordenades

Tot el sistema es munta sobre 4 eixos per on llisquen els rodaments lineals. Aquests eixos van cargolats sobre els Eixos de Suport detallats més en davant.

Els desplaçaments que permet el Sistema VIF d'acord als 3 graus de llibertat proporcionats per les guies verticals, horitzontals i els eixos de suport, queden definits a la següent taula:

Direcció	Desplaçaments admissibles
X-X	±79mm
Y-Y	±25mm
Z-Z	±124.5mm

Taula 3-1: Desplaçaments admissibles al Sistema VIF

Els graus de llibertat i els desplaçaments que proporciona el Sistema VIF han de ser suficients per permetre el moviment relatiu que efectua l'equip MARES durant l'exercici del subjecte sense arribar als finals de carrera (fet que provocaria impactes que pertorbarien la ISS).

Les dimensions del Sistema VIF es poden veure a la següent figura, on la caixa transparent representa la MARES *Main Box* en posició centrada respecte el Sistema VIF. El pes del Sistema VIF és de 121.5kg.

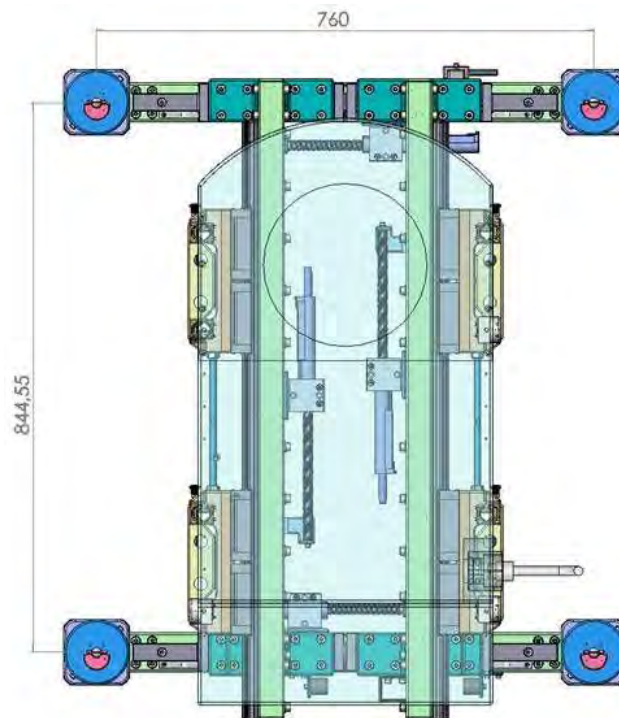


Figura 3-2: Dimensions entre Eixos de Suport del Sistema VIF

3.1.2 Funcions principals del Sistema VIF

El Sistema VIF va muntat entre el ISPR Rack de l'estació espacial ISS i l'equip MARES. Té com a funció principal la reducció dels nivells de pertorbació que provoca l'equip MARES durant el seu funcionament cap al Rack i cap a la resta del mòdul i estació. En aquest sentit el Sistema VIF disposa de les següents funcions:

- Reduir el valor de forces i moments transmesos cap al Rack durant l'utilització de l'equip MARES.
- Limitar el rang de desplaçament de l'equip MARES durant la seva utilització.
- Quan l'equip MARES no està essent utilitzat, el Sistema VIF permet ser bloquejat, proporcionant una fixació ferma al Rack.

3.2 Interfícies del Sistema VIF

El Sistema VIF es troba connectat mecànicament amb el ISPR Rack i amb l'equip MARES. A la següent figura, s'observa la ubicació del Sistema VIF en la configuració de treball, situat entre el ISPR Rack i l'equip MARES (*Main Box*) on es troba el subjecte executant l'exercici.

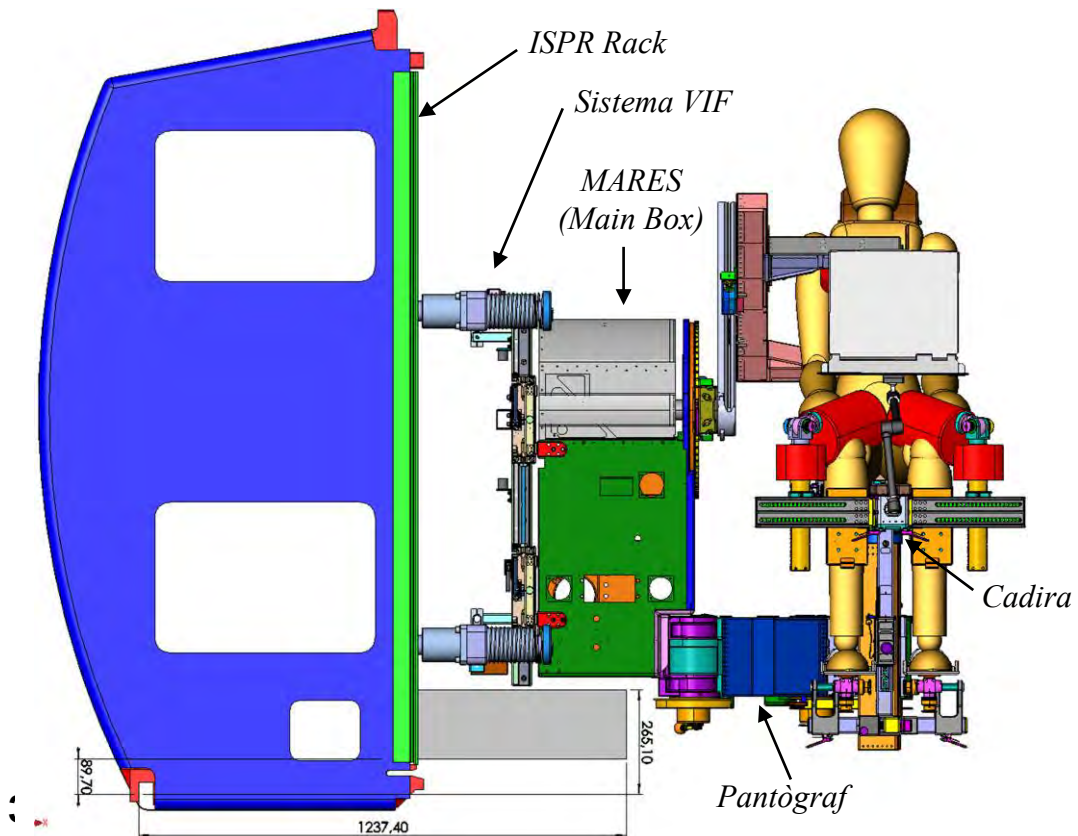


Figura 3-3: Sistema VIF en posició de treball junt amb elements d'interfície

Durant els períodes d'utilització, l'equip MARES es recolza mecànicament sobre el Sistema VIF pels quatre punts d'ancoratge situats a la *Main Box*. Els tres graus de llibertat que li proporciona el Sistema VIF, permet que l'equip MARES i el subjecte que fa l'exercici es trobin en situació semi lliure de manera que el Sistema VIF els permet un cert moviment en cada eix però restringit a unes carreres màximes, d'aquesta manera s'aconsegueix reduir el nivell de pertorbació cap al Rack i cap a l'estació.

Cal destacar que la integració de tot aquest sistema a terra no és possible sense un punt de recolzament auxiliar situat sota la cadira que permeti suportar el pes del subjecte, el pes de la cadira i part del pes del pantògraf, evitant així que tot aquest pes recaigui al Sistema VIF (veure l'útil sota la cadira mostrat a la figura 3-4). Sense aquest punt de recolzament usat a terra per testejar les diferents configuracions d'exercicis, el Sistema VIF hauria de suportar molta més càrrega per l'acció de la gravetat que no pas per la que ha estat dissenyat.

A continuació es descriu l'equip MARES i també el ISPR Rack, que són els elements amb que es troba connectat mecànicament el Sistema VIF. L'equip MARES transmet les forces i moments efectuats pel subjecte durant l'exercici cap al Sistema VIF, i aquest les acaba transmeten al ISPR Rack que es troba anclat al mòdul de la ISS.

3.4 Descripció del l'equip MARES

L'equip MARES és un instrument que té com a finalitat la investigació de l'atrofia muscular que es produeix en els astronautes degut a llargs períodes en condicions d'ingravidesa. L'equip MARES junt al Sistema VIF aniran embarcats a l'Estació Espacial Internacional (ISS).

L'equip MARES pot ser configurat a través d'ajustos a la cadira, al pantògraf i al conjunt d'adaptadors humans per permetre l'execució d'un conjunt de moviments en diferents articulacions del cos humà (*DR[W15]*). A continuació es llisten els moviments angulars i lineals que l'equip MARES és capaç de configurar-se:

- Moviments angulars:
 - o Turmell: flexió dorso-plantar
 - o Genoll: flexió-extensió
 - o Maluc: flexió-extensió
 - o Tronc: flexió-extensió
 - o Espatlla: flexió-extensió
 - o Colze: flexió-extensió
 - o Canell: flexió-extensió, desviació radial-ulnar, prono-supinació

- Moviments lineals:
 - o *Press* de braços: amb un braç o amb ambdós braços
 - o *Press* de cames amb una cama o amb ambdues cames

Tots aquests exercicis es poden executar en subjectes de diferents mides antropomètriques gràcies a un seguit d'ajustos sobre la cadira, el pantògraf i els adaptadors humans. El marge antropomètric que permet l'equip MARES per cada exercici va del 5 percentil al 95 percentil (*DR[W13]*).

La següent imatge mostra l'equip MARES configurat per un exercici de turmell:



Figura 3-4: Equip MARES per configuració de turmell

Aquest instrument és capaç d'avaluar la força dels grups musculars aïllades al voltant de les articulacions mitjançant el control i la mesura de les relacions entre la posició / velocitat i de parell / força en funció del temps. Durant l'exercici, el subjecte fa força contra un motor i això acaba provocant un moviment relatiu entre l'equip MARES i el subjecte.

L'equip MARES va instal·lat sobre del Sistema VIF i aquest va muntat sobre un ISPR Rack. Pot ser instal·lat al mòdul del laboratori *Destiny* d'EEUU o bé al mòdul del laboratori europeu *Columbus* de la ISS.

Sensors, motor d'accionament directe, bateria, motor elèctric i electrònica es troben a la *Main Box*. La cadira i els adaptadors humans proporcionen les restriccions sobre el subjecte per tal d'aïllar el grup muscular objecte d'estudi.

MARES és capaç d'adquirir un seguit de dades referents a l'exercici en execució i de transferir-les en temps real cap al centre de control a terra per tal d'avaluar el progrés muscular del subjecte. Així mateix, també subministra energia a dispositius externs (HRF PC, PEMS, amplificadors de EMG, etc).

3.5 Descripció del ISPR Rack

El ISPR Rack és l'armari estàndard utilitzat a l'estació espacial ISS destinat a allotjar els equips (*payloads*) que realitzen experimentació. Proporciona així una interfície definida i unes característiques mecàniques, elèctriques i tèrmiques conegudes per tal de permetre el disseny d'equips i instruments que hi puguin anar allotjats.

Les característiques principals del Rack es detallen a continuació (*DR[N10]*):

- El material de fabricació és *composite*
- Volum màxim utilitzable de 1.6m³
- Dimensions màximes utilitzables de 1422 x933x725mm
- Sistema actiu d'atenuació de baixes freqüències per vibracions en orbita

A la següent figura mostra una imatge amb els elements estructurals més importants de ISPR Rack.

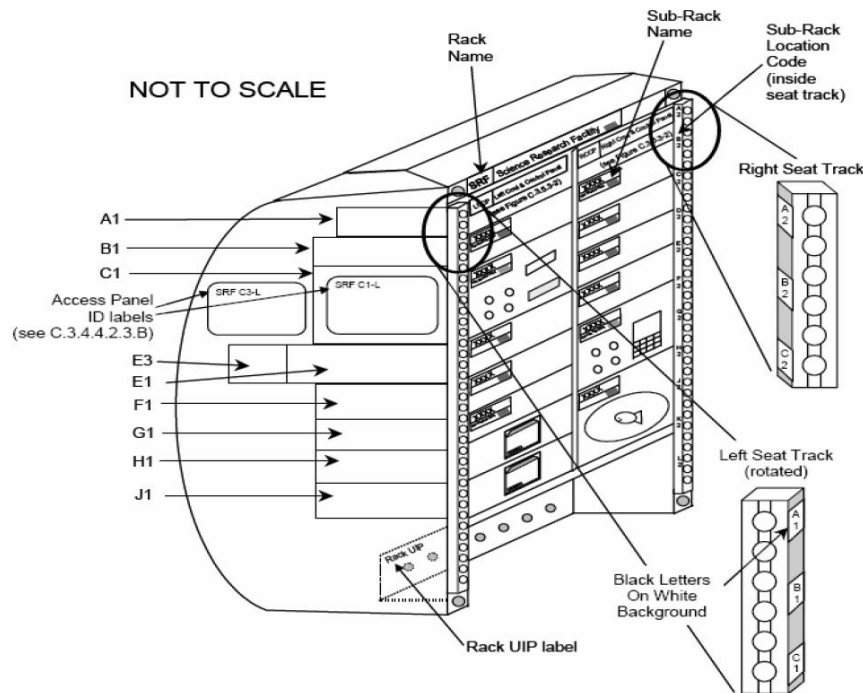


Figura 3-5: Vista de ISPR Rack i detall dels Seat Tracks

El Sistema VIF no va allotjat a l'interior del Rack, com la majoria d'equips, sinó que penja fora del Rack. Per aconseguir una correcta subjecció, s'utilitzen els *Seat Tracks* del Rack que és on van fixats els eixos de suport del Sistema VIF.

3.5.1 Instal·lació del Sistema VIF al ISPR Rack

La connexió mecànica del Sistema VIF al ISPR Rack s'implementa per mitjà d'un disseny que permet un ajust angular i també un ajust en direcció Z-Z (veure següent figura).

La peça de seient esfèric, es fixa als *Seat Tracks* del ISPR Rack i posteriorment s'hi cargola a sobre l'eix de suport que disposa d'un seient en forma de ròtula. Els rodaments lineals de recirculació de boles situats als extrems de les dues barra horitzontal del Sistema VIF, roden sobre els 4 eixos l'eix de suport, permeten el desplaçament en direcció Y-Y

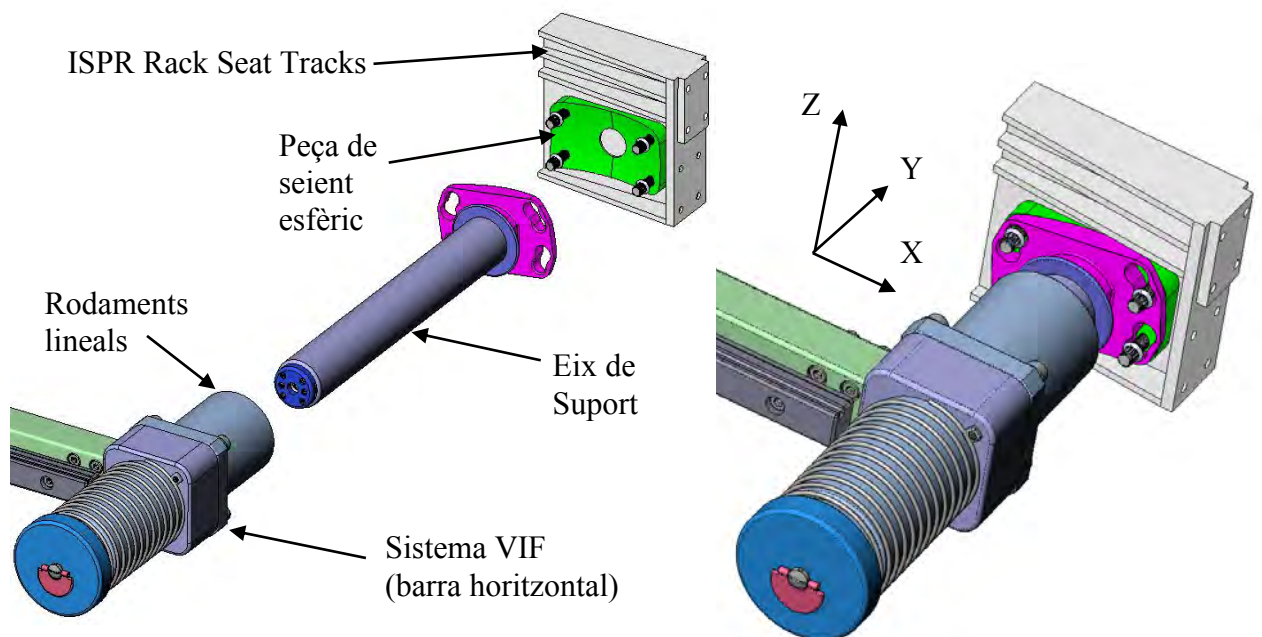


Figura 3-6: Interfícies dels eixos de suport amb ISPR Rack

3.6 Descripció del l'equip de test

La configuració nominal de l'equip a testejar està format pel Sistema VIF muntat sobre quatre eixos de suport (UL, UR, LL, LR) que simulen la connexió que tindrà l'equip al Rack de la ISS. Aquests quatre eixos de suport es fixen a la bancada de test. La funció principal de la bancada de test és mantenir el sistema a la posició adequada per tal de permetre la realització del test.

Per tal d'introduir una excitació externa al Sistema VIF, es munta un conjunt excitador dissenyat exclusivament pel test. Aquest conjunt consta d'una estructura tubular que va fixada en quatre punts a les guies verticals del VIF. Sobre d'aquesta estructura s'instal·la un motor de C.A. de 0.33kw amb un volant d'inèrcia que connecta a un reductor 1:7 que transmet la potència fins un altre volant d'inèrcia on es troba una massa descentrada respecte l'eix de gir.

La següent imatge mostra la configuració nominal del test detallada anteriorment, així com els elements citats anteriorment:

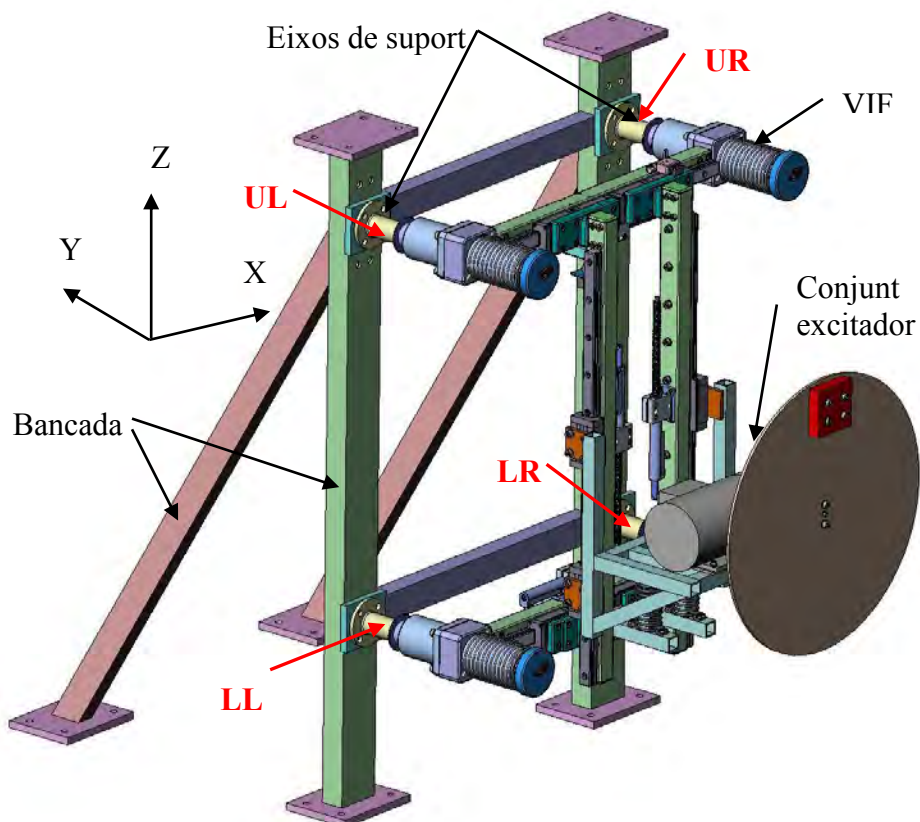


Figura 3-7: Equip de Test

A continuació es descriuen tots aquests elements.

3.6.1 Bancada de test

La bancada de test està formada per una estructura de perfils d'alta rigidesa per tal d'evitar deformacions que pertorbin les mesures a adquirir. Aquesta estructura es fixa a terra i permet la fixació dels quatre eixos de suport que són els elements d'interfície amb el Sistema VIF. Les quatre cares de la bancada de test on es fixen aquests eixos de suport s'han mecanitzat després de la soldadura de l'estructura per garantir el paral·lelisme i planitud de les cares, evitant així deformacions inicials de muntatge sobre el Sistema VIF.

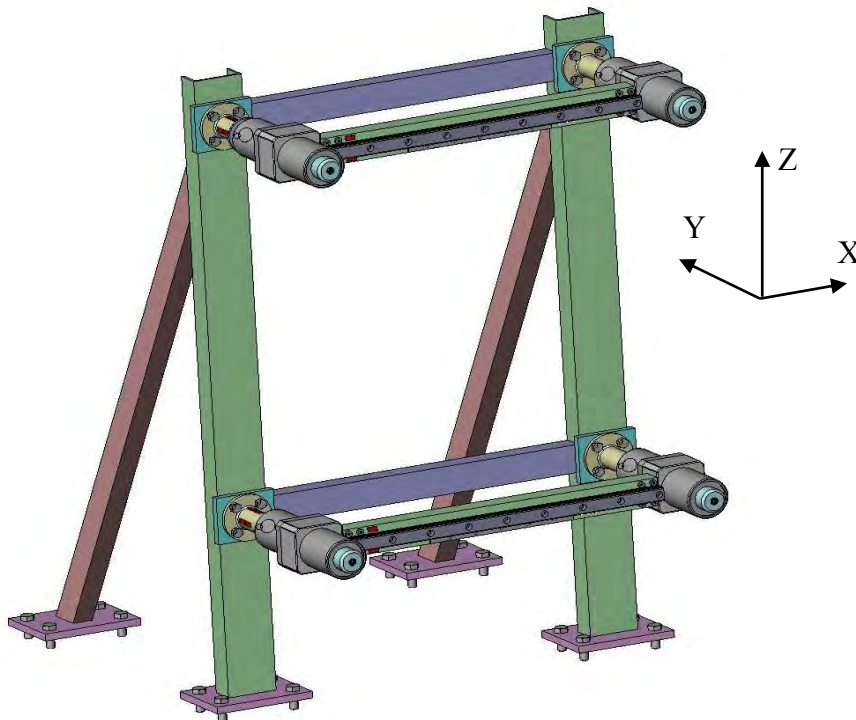


Figura 3-8: Bancada de Test i eixos de coordenades

3.6.2 Eixos de Suport

Els eixos de suport són les peces que serveixen de fixació entre el Sistema VIF i la bancada de test. Són els elements que transmeten les forces i moments que s'originen en el Sistema VIF cap a la bancada de test. El Sistema VIF disposa de 4 eixos de suport que s'han enumerat de la següent manera:

UR (*Upper Right*), UL (*Upper Left*), LR (*Lower Right*), LL (*Lower Left*).

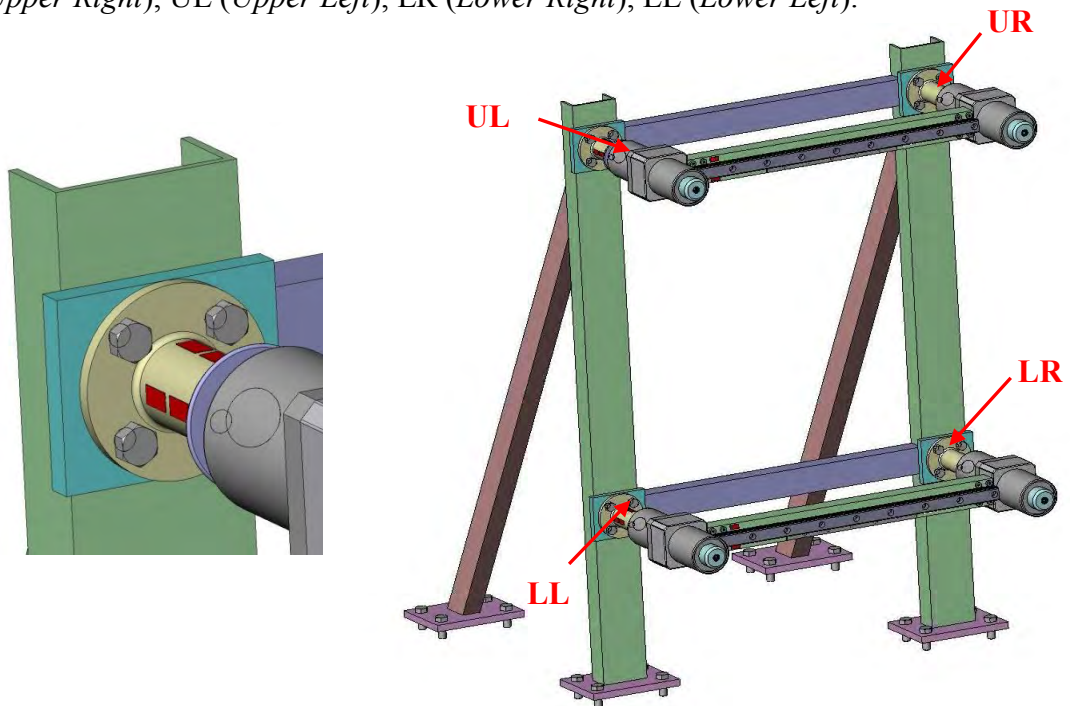


Figura 3-9: Eixos de Suport

3.6.3 Conjunt excitador

Aquest conjunt pretén excitar el Sistema VIF de forma controlada en funció de la velocitat del motor del conjunt excitador. D'aquesta manera s'aconsegueix una excitació que simula la introduïda pel subjecte sobre de l'equip MARES durant l'exercici.

Aquest conjunt es troba fixat als quatre carros de les dues guies verticals del Sistema VIF utilitzant els mateixos llocs d'anclatge que posteriorment s'utilitzaran per la fixació de l'equip MARES.

El conjunt consta d'una estructura tubular que suporta un motor de corrent alterna. A la sortida d'aquest motor s'instal·la un volant d'inèrcia i un reductor amb reenvio d'angle de 90° que transmet la potència fins un altre volant d'inèrcia de major diàmetre. En aquest volant, es fixa una massa excèntrica que al girar produirà l'excitació del sistema.

Tot aquest conjunt descansa sobre de dues molles de compressió per garantir el moviment oscil·latori durant l'excitació.

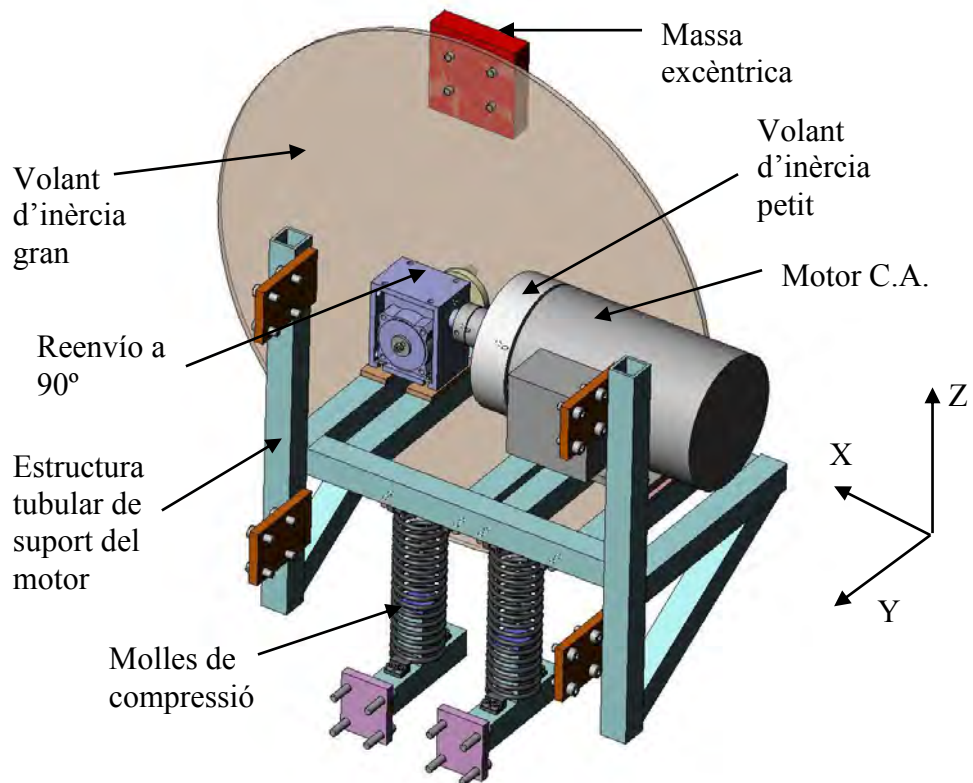


Figura 3-10: Conjunt excitador

Les característiques principals d'aquest conjunt són:

- Motor de corrent alterna de parell nominal de 2,62 Nm i velocitat de 1350 rpm a 50 Hz de freqüència.
- Volant d'inèrcia amb m.d.i. a la sortida de motor de 0.011 kgm^2
- Reductor amb reenvió d'angle a 90° amb relació de transmissió de 1:7
- Volant d'inèrcia amb m.d.i. a sortida del reductor de 0.527 kgm^2 amb una massa excèntrica de 1.5kg a 0,25m respecte el centre de gir.
- Un convertidor de freqüència per assignar-li al motor la velocitat de gir desitjada en funció del test a realitzar.
- Dues molles que s'utilitzen per compensar el pes d'aquest conjunt i permetre la seva oscil·lació en direcció vertical (direcció Z-Z). Aquestes molles van encaixades a uns suports que es fixen als carros de la guia horitzontal inferior del Sistema VIF.
- Estructura tubular soldada que es fixa en quatre punts als carros de les guies verticals del Sistema VIF.

3.7 Objectiu del test

L'objectiu principal del test és determinar els valors dels paràmetres mecànics necessaris per permetre caracteritzar un model d'elements finits (MEF) del Sistema VIF. Utilitzant aquest MEF, es pretén predir el comportament del Sistema VIF sota condicions d'ingravedesa quan l'equip MARES es trobi en funcionament.

Per tal que el comportament del MEF concordi amb la realitat, es fa necessari la realització d'una campanya de test que permeti determinar els paràmetres experimentals que, un cop introduïts al model, facin que aquest tingui validat el seu comportament en condicions de gravetat. Una vegada obtingut un model validat a partir dels resultats de test, ja és possible realitzar l'anàlisi dels paràmetres en condicions d'ingravedesa.

Així doncs, els principals objectius que es volen assolir durant la realització del test per tal d'aconseguir l'adequada parametrització del MEF s'enumeren a continuació:

- **Determinació de forces de fricció a les guies del VIF:** cal obtenir les forces mínimes necessàries per iniciar el moviment en cadascú dels tres graus de llibertat que proporciona el Sistema VIF amb diferents càrregues de pes aplicades sobre les guies.
- **Determinació de les forces i moments transmesos des del Sistema VIF cap als quatre eixos de suport:** cal adquirir, a diferents velocitats d'excitació del motor, les forces i els parells que es transmeten a través del Sistema VIF cap a la bancada de test.
- **Determinació dels desplaçaments al conjunt excitador i al Sistema VIF:** cal obtenir els desplaçaments que s'ocasionen, tant al conjunt excitador com al Sistema VIF, degut a l'excitació externa.
- **Determinació de les acceleracions al conjunt excitador i al Sistema VIF:** cal obtenir les acceleracions que es produeixen, tant al conjunt excitador com al Sistema VIF, degut a l'excitació externa.

3.8 Descripció dels tests

D'acord amb els objectius numerats anteriorment, es defineixen els següents tests a realitzar:

- Test de fricció
- Test de forces i moments
- Test de desplaçaments
- Test d'acceleracions

3.8.1 Test de fricció

- **Propòsit:** Validació inicial del muntatge del Sistema VIF per tal de garantir un correcte assemblatge del mecanisme. Verificar que els carros es desplacen de forma adequada per les guies del Sistema VIF en les direccions X-X i Z-Z, i que els rodaments lineals permeten també un moviment adequat en direcció Y-Y. Obtenir la mesura de la força de fricció deguda al lliscament del carro sobre la guia i també a possibles desalineaments entre guies.
- **Material necessari:** Dinamòmetre calibrat amb rang de mesura de 0 a 1000N
- **Configuracions de test:** aquest test es realitza a dues configuracions de test diferents:
 - **Configuració 1:** Configuració nominal de test (vector gravetat en direcció Z-Z) amb el conjunt excitador muntat. Permet mesurar les friccions a les guies horitzontals (direcció X-X) i als coixinets lineals (direcció Y-Y) per diferent pesos situats sobre l'excitador (de 10 a 90kg).
 - **Configuració 2:** Sistema VIF desmuntat de la bancada de test i situat en el pla de terra (vector gravetat en direcció Y-Y) sense el conjunt excitador però amb el suport tubular del conjunt muntat. Permet mesurar la fricció a les guies que anteriorment eren les horitzontals (direcció X-X) i a les guies que anteriorment eren les verticals (direcció Z-Z).
- **Procediment de test:**
 - S'utilitza un dinamòmetre, muntat per treballar a tracció, per impulsar manualment el conjunt excitador en la direcció de la guia on es vol testejar la fricció. S'anota el valor mínim i el valor màxim de força necessària per realitzar el recorregut. S'intenta realitzar el recorregut a una velocitat constant prou baixa per tal d'evitar forces d'impacte i d'acceleracions.
 - Es repeteix el test 5 vegades per tenir prou comprovar la repetibilitat dels resultats i per evitar la influència de l'experimentador sobre la mesura.
 - Es realitza el test de dreta a esquerra i d'esquerra a dreta.
 - Es realitza el test amb l'equip en Configuració 1 (vector gravetat en direcció Z-Z): es mesura la fricció en direcció X-X i Y-Y.
 - Es realitza el test amb l'equip en Configuració 2 (vector gravetat en direcció Y-Y): es mesura la fricció en direcció X-X i Z-Z.

3.8.2 Test de forces i moments

- **Propòsit:** Determinar les forces i moments que es transmeten a la bancada de test en els quatre eixos de suport degut a l'excitació externa que introdueix la massa desequilibrada que fa girar el motor.
- **Material necessari:** Galgues extensomètriques, situades als quatre eixos de suport que mantenen el Sistema VIF fixat a la bancada de test, i equip d'adquisició i processament de dades. El disseny dels eixos de suport s'ha realitzat ja preveient un rebaix en el diàmetre extern per assegurar que les forces i moments permetin la deformació necessària per la correcta lectura de les galgues extensomètriques. Aquest rebaix és present tant en els eixos de suport usats pel test com en els eixos de suport definitius.
- **Configuració de test:** aquest test es realitza amb la configuració nominal de test (vector gravetat en direcció Z-Z) amb el conjunt excitador muntat amb motor, reductor i massa desequilibrada.
- **Procediment de test:**
 - Un cop muntat el Sistema VIF d'acord amb la configuració de test, es prepara l'equip d'adquisició per obtenir les dades del primer eix de suport, s'inicia el moviment al motor a baixa velocitat i es manté a aquesta velocitat durant uns 15 segons per evitar transitoris de càrrega.
 - Es realitza la lectura de forces i moments en el primer eix de suport.
 - Es repeteix la seqüència per la velocitat mitjana i per la velocitat alta.
 - Es repeteix la seqüència per cadascú dels quatre eixos de suport del Sistema VIF.

Les velocitats de gir del motor (baixa, mitjana i alta) s'han calculat a l'apartat 3.10.1.

3.8.3 Test de desplaçaments

- **Propòsit:** Determinar els desplaçaments del Sistema VIF i del conjunt excitador per les direccions X-X i Z-Z degut al gir de la massa excèntrica a baixa velocitat. És necessari utilitzar la baixa velocitat de gir del motor per evitar excitar el sistema per sobre de la freqüència de ressonància (veure apartat 3.10.1 per la determinació de la freqüència de ressonància). Els palpadors usats per adquirir els desplaçaments no suportarien l'excitació de ressonància del sistema.
- **Material necessari:** Palpadors amb sensors òptics de desplaçament lineal i equip d'adquisició de dades.

- **Configuració de test:** aquest test es realitza amb la configuració inicial de test (vector gravetat en direcció Z-Z) amb el conjunt excitador muntat amb motor, reductor i massa desequilibrada.
- **Procediment de test:**
 - Per la mesura de desplaçaments sobre l'excitador:
 - Es fixa un sensor de desplaçament lineal a la guia vertical contactant l'extrem del sensor al conjunt excitador per determinar els desplaçaments de l'excitador en Z-Z.
 - Es fixa un sensor de desplaçament lineal a la guia horitzontal contactant l'extrem del sensor a la guia vertical per determinar el desplaçament de l'excitador + guia vertical en X-X.
 - S'alimenta el motor per fer girar la massa descentrada a baixa velocitat.
 - S'adquireix el desplaçament del conjunt excitador en direcció X-X i en Z-Z.
 - Per la mesura de desplaçaments sobre el Sistema VIF:
 - Es fixa un sensor de desplaçament lineal amb l'extrem del sensor a la cara vertical del cub de connexió que hi ha entre la guia horitzontal i el rodament lineal per determinar el desplaçament del Sistema VIF en X-X.
 - Es fixa l'altre sensor de desplaçament lineal amb l'extrem del sensor a la cara horitzontal del cub de connexió entre la guia horitzontal i el rodament lineal per determinar el desplaçament del Sistema VIF en Z-Z.
 - S'alimenta el motor per fer girar la massa descentrada a baixa velocitat.
 - S'adquireix el desplaçament de l'excitador en X-X i Z-Z.
 - Es repeteix aquest procés per cadascun dels quatre cubs que connecten les dues guies horitzontals amb els quatre rodaments lineals.

3.8.4 Test d'acceleracions

- **Propòsit:** Anàlisi de les acceleracions que es provoquen a l'excitador i al Sistema VIF degut al gir de la massa excèntrica a diferents velocitats.
- **Material necessari:** tres acceleròmetres uniaxials, amb l'equip d'adquisició corresponent.

- **Configuració de test:** aquest test es realitza amb la configuració nominal de test (vector gravetat en direcció Z-Z) amb el conjunt excitador muntat amb motor, reductor i massa desequilibrada.

- **Procediment de test:**
 - Per la mesura d'acceleracions sobre l'excitador:
 - Es fixen els acceleròmetres sobre de l'estructura tubular del conjunt excitador de tal manera que cadascun mesuri l'acceleració en les direccions X-X, Y-Y, i Z-Z.
 - S'alimenta el motor per fer girar la massa descentrada a baixa velocitat.
 - S'adquireix les acceleracions produïdes per l'excitador en les direccions X-X, Y-Y, i Z-Z.
 - Es repeteix el procés a mitjana velocitat i a alta velocitat.

 - Per la mesura d'acceleracions sobre el Sistema VIF:
 - Es fixen els acceleròmetres sobre del cub de connexió entre la guia horitzontal i el rodament lineal de tal manera que cadascun mesuri l'acceleració en les direccions X-X, Y-Y, i Z-Z.
 - S'alimenta el motor per fer girar la massa descentrada a baixa velocitat.
 - S'adquireix les acceleracions produïdes per l'excitador en les direccions X-X, Y-Y i Z-Z.
 - Es repeteix el procés a mitjana velocitat i a alta velocitat.
 - Es repeteix el procés per cadascú dels quatre cubs de connexió per tenir així les acceleracions en el Sistema VIF.

3.9 Seqüència d'operacions

El següent esquema mostra la seqüència d'operacions seguida en la realització dels tests:

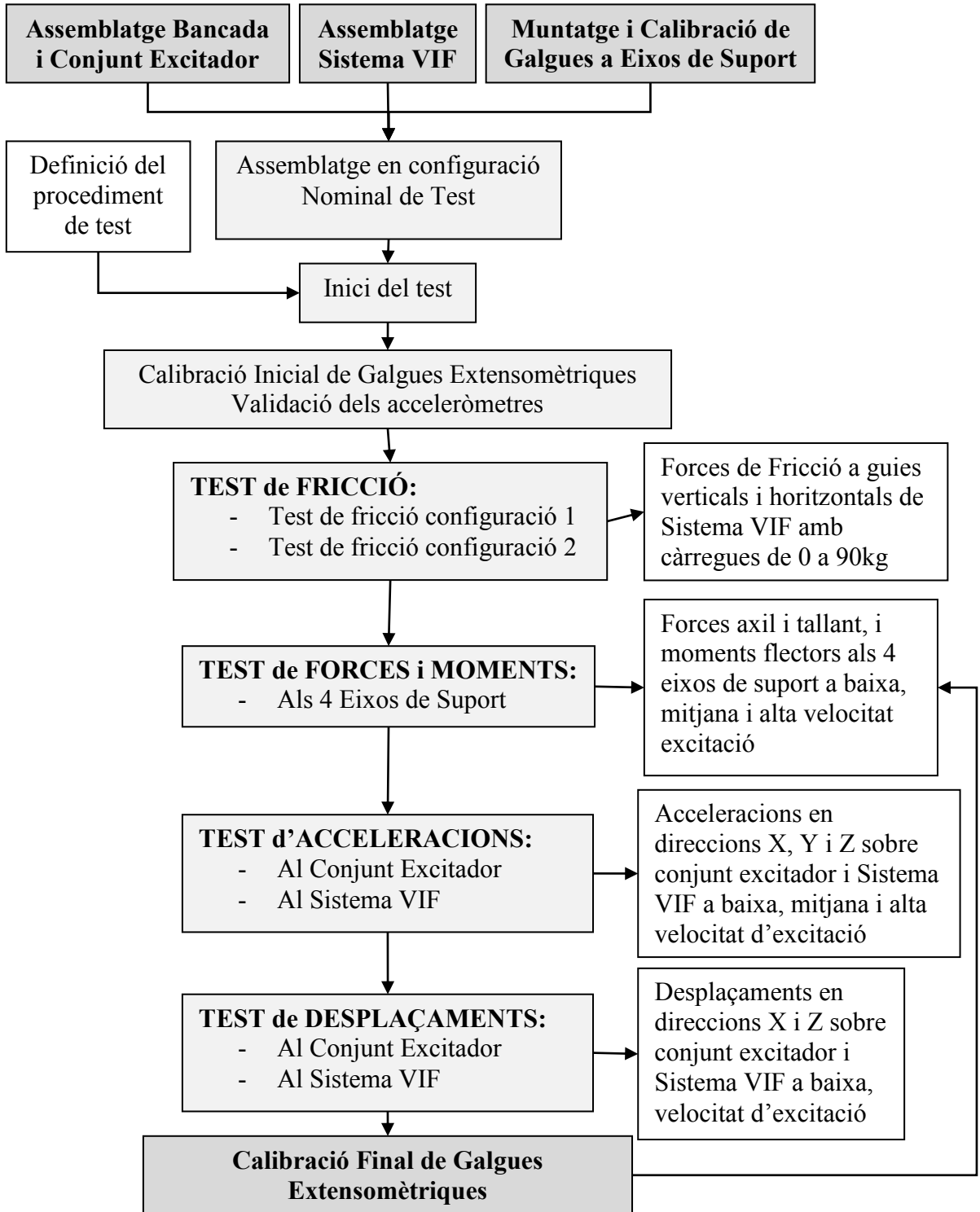


Figura 3-11: Seqüència d'Operacions

3.10 Disposicions preliminars per la realització dels test

Abans d'iniciar els tests, es fa necessari l'avaluació d'un seguit de disposicions preliminars per tal de garantir els resultats de test.

3.10.1 Determinació de la velocitat de gir del motor

La velocitat de gir del motor marca el grau d'excitació a que es sotmès l'equip de test. Una velocitat massa baixa no produiria excitació suficient per l'avaluació de les càrregues transmeses, ni dels desplaçaments que s'hi ocasionen, mentre que una excitació massa elevada pot fer entrar l'equip en ressonància o provocar desperfectes al sistema.

En aquest sentit, l'excitació adequada serà aquella més semblant a l'excitació que patirà el Sistema VIF un cop en òrbita. De cara al test i anàlisi del sistema, és interessant obtenir una excitació que provoqui els majors desplaçaments i acceleracions possibles.

És possible estimar el resultat de desplaçaments que s'esperen obtenir en funció de la velocitat de gir del motor a partir de l'anàlisi del següent model simbòlic de l'equip de test:

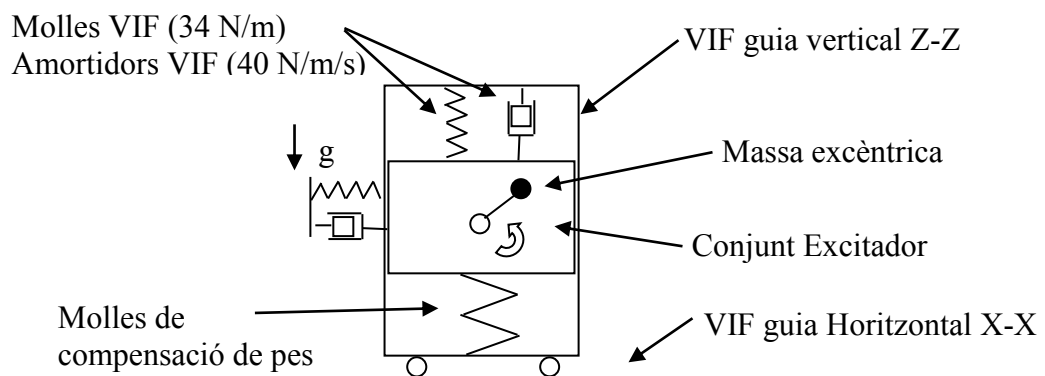


Figura 3-12: Model simbòlic dinàmic de l'equip de test

La següent taula mostra l'estimació de desplaçaments i velocitats realitzada en funció de la velocitat de gir del motor.

Freqüència de gir motor (F), Hz	Velocitat de gir motor (ω_m), rpm	Velocitat de gir del conjunt. Sortida reductor (ω_c), rad/s	Freqüència del conjunt (f) Hz	Amplitud d'oscil·lació (Z_{max}), mm
20	600	9.0	1.4	-7 +5
25	750	11.2	1.8	-14 +11
31.5	945	14.1	2.3	-49 +46
40	1200	18.0	2.9	-44 +41
50	1500	22.4	3.6	-21 +18
100	3000	44.9	7.2	-13 +10

Taula 3-2: Desplaçaments i velocitats en funció de la velocitat de gir del motor

De la taula anterior se'n poden extreure les següents conclusions:

- Freqüències d'excitació de la massa excèntrica per sota de 1.4 Hz: s'obtenen desplaçament massa petits del Sistema VIF.
- Freqüències d'excitació de la massa excèntrica entre de 2.3 Hz i 2.9 Hz: s'obtenen desplaçament massa grans al trobar-se el sistema funcionant dins la zona de ressonància. S'estima una freqüència de ressonància pròpia del sistema en 2.6Hz.
- Freqüències d'excitació de la massa excèntrica per sobre dels 7.2 Hz: això equival a velocitats del motor superiors a 3000 RMP, per sobre del que el motor està preparat.

D'acord amb això, es proposa realitzar el test a les següents velocitats del motor:

- **Velocitat d'excitació baixa:** freqüència d'excitació de la massa excèntrica de 1,8 Hz (equival a una velocitat de gir del motor de 750 rpm).
- **Velocitat d'excitació mitja:** freqüència d'excitació de la massa excèntrica de 3,7 Hz al motor (equival a una velocitat de gir del motor de 1550 rpm).
- **Velocitat d'excitació alta:** freqüència d'excitació de la massa excèntrica de 5,25 Hz al motor (equival a una velocitat de gir del motor de 2200 rpm).

3.10.2 Determinació del tipus de forces i moments als eixos de suport

El Sistema VIF es desplaça axialment en direcció Y guiat per 4 rodaments lineals que roden a sobre dels 4 eixos de suport. Així mateix, el conjunt excitador es troba allotjat sobre dues molles de compressió en direcció Z fixades al Sistema VIF. Per tant, les forces i moments que arriben a cadascú dels eixos de suport provenen de:

- El pes del Sistema VIF
- El pes del conjunt excitador
- Les reaccions provocades pel gir de la massa excèntrica del conjunt excitador.

Aquest és un sistema hiperestàtic on no és immediat el càlcul de les forces i moments de reacció que arribarien als eixos de suport provinents de les càrregues abans citades. En aquest sentit, es preveu realitzar mesures experimentals per obtenir les forces i moments de reacció que arriben a cadascun dels eixos de suport.

Tenint en compte els graus de llibertat que permeten i que restringeixen els quatre rodaments lineals del Sistema VIF, es pot arribar al següent model simbòlic:

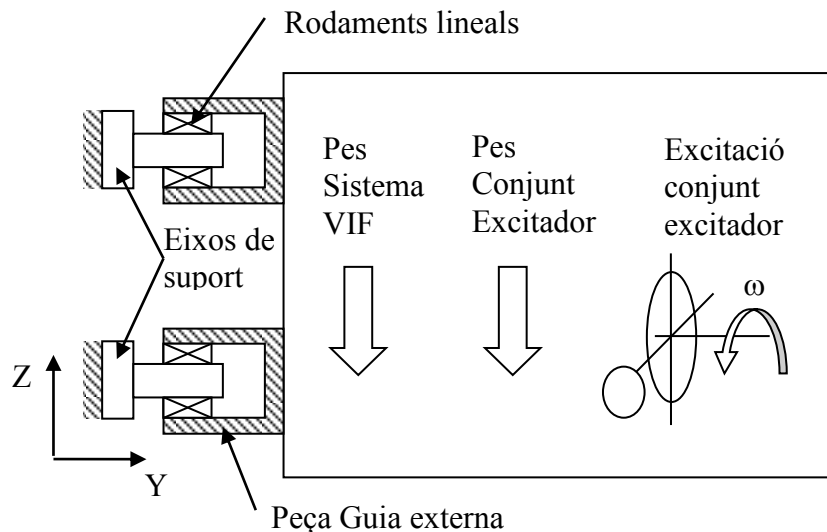


Figura 3-13: Model simbòlic sobre els eixos de suport

Per tant, les forces de reacció i moments de reacció que ha de suportar un eix de suport són les següents:

- **Força axial en direcció Y-Y:** degut a certa component que pugui tenir la força total suportada per l'eix de suport. Valor despreciable en comparació a la força tallant i per tant no és necessària per la modelització.
- **Força tallant en direcció X-X:** degut a les forces introduïdes pel sistema d'excitació.
- **Força tallant en direcció Z-Z:** degut al pes del Sistema VIF, al pes del conjunt excitador i a les forces introduïdes pel sistema d'excitació.
- **Moment flector respecte l'eix X-X:** degut al moment que crea el pes del Sistema VIF i el pes del conjunt excitador, i el moment degut a les forces introduïdes pel sistema d'excitació. Aquest moment es transmet a l'eix de suport a través del rodament lineal.
- **Moment flector respecte l'eix Z-Z:** degut al moment que creen les forces introduïdes pel sistema d'excitació i que es transmet a través del rodament lineal.
- **Moment torçor:** nul. No hi ha moment torçor degut a que el rodament permet el gir respecte l'eix Y-Y.

3.10.3 Ubicació de les galgues extensomètriques

Les galgues van col·locades a una zona rebaixada de l'eix de suport amb un diàmetre extern de 36mm, un diàmetre intern de 28mm i una longitud de 42mm. Aquest rebaix és present tant en els eixos de suport usats pel test com en els eixos de suport definitius

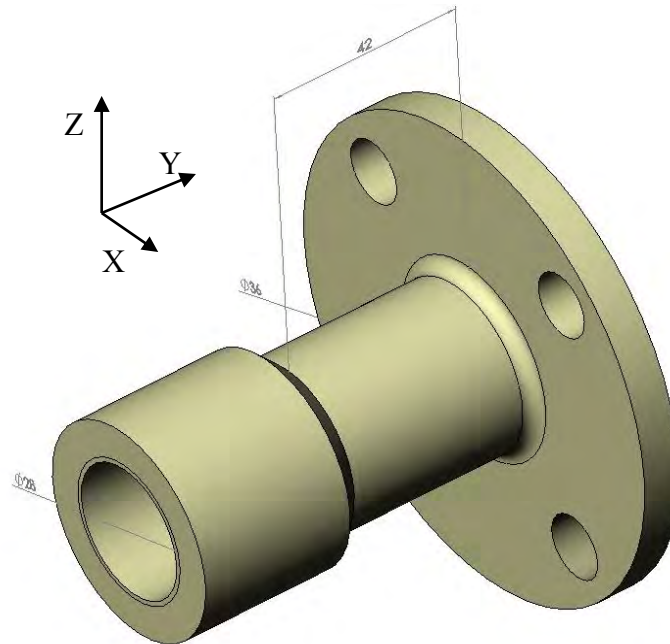


Figura 3-14: Ubicació de galgues en els eixos de suport

3.10.4 Determinació del valor de tensió màxima degut a la flexió.

L'estimació d'un valor màxim de tensió degut a la flexió que han de suportar els eixos de suport permetrà tenir una idea del marge de tensions que hauran de suportar els eixos de suport durant el test amb el sistema excitador. Posteriorment aquest valor també s'utilitza per predir el marge de calibració sobre les galgues extensomètriques. Assumint la hipòtesi certament permissiva que la càrrega es repartirà de forma uniforme en els 4 eixos de suport, és possible calcular aquest valor de tensió de flexió tenint en compte les càrregues del pes del Sistema VIF, el pes del conjunt excitador i la força d'inèrcia deguda al gir de la massa excèntrica.

Dades:

- Pes del Sistema VIF (P_{VIF}): 121.5kg
- Pes del conjunt excitador (P_{exc}): 42.1kg
- Número d'eixos de suport (n): 4
- Pes total del Sistema VIF + conjunt excitador ($P_T = P_{VIF} + P_{exc}$): 163.6kg (1605N)
- Pes que suporta un eix de suport ($P = (P_{VIF} + P_{exc}) / n$): 40.9kg (401.2N)
- Alta freqüència de gir de massa excèntrica (f): 5.25Hz

- Velocitat de gir de massa excèntrica (ω): 33rad/s
- Massa excèntrica (M_e): 1.5kg
- Radi de gir de massa excèntrica (r): 0.25m
- Distància en Y-Y de l'eix de suport al pla de gir de massa excèntrica (d_e): 330mm
- Distància en Y-Y del CdG de conjunt excitador + Sistema VIF a eix de suport (d): 210mm
- **Moment d'inèrcia de la secció crítica de l'eix de suport (I_{xx}):** sabent l'eix de suport té, a la secció de l'empotrament, un diàmetre extern de 36mm i un diàmetre intern de 28mm ($DR/L9$):

$$I_{xx} = \frac{\pi \cdot (R^4 - r^4)}{4} = \frac{\pi \cdot (18^4 - 14^4)}{4} = 52276.1 \text{mm}^4$$

- **Càlcul de la força tallant màxima:** D'acord amb la figura 3-13, la força tallant màxima sobre un eix de suport s'obté a partir del pes total que suporta un eix de suport (pes del Sistema VIF i del conjunt excitador, repartit als 4 eixos de suport) i la força d'inèrcia de la massa excèntrica:

$$F_Z = P + (M_e \cdot \omega^2 \cdot r) / n = 401.2 + (1.5 \cdot 33^2 \cdot 0.25) / 4 = 503.3 \text{ N}$$

- **Càlcul del moment flector màxim:** D'acord amb la figura 3-13, el moment flector total s'obté a partir del moment provocat pel pes total que suporta un eix de suport (pes del Sistema VIF i del conjunt excitador, repartit als 4 eixos de suport) i del moment provocat per la força d'inèrcia de la massa excèntrica:

$$M_X = P \cdot d + (M_e \cdot \omega^2 \cdot r) \cdot d_e / n = 401.2 \cdot 0.21 + (1.5 \cdot 33^2 \cdot 0.25) \cdot 0.33 / 4 = 117.9 \text{ Nm}$$

- **Càlcul de la tensió de flexió màxima:** la fórmula de *Navier* permet obtenir el valor de la tensió de flexió ($DR/L9$):

$$\sigma_f = \frac{M_{f\bar{x}-x} \cdot Z}{I_{xx}} = \frac{117.9 \cdot 10^3 \cdot 18}{52276.1} = 40.6 \text{MPa}$$

Per tant, la tensió màxima obtinguda a l'eix de suport degut a la sol·licitació de flexió és de 40.6MPa.

3.10.5 Determinació de forces i moments usant galgues extensomètriques

La instal·lació de les galgues extensomètriques als 4 eixos de suport que es troben entre el Sistema VIF i la bancada de test ha de permetre la mesura de les forces i moments de reacció que es transmeten des del Sistema VIF cap a la Bancada de Test deguts al pes i a l'excitació a que es troba sotmès el sistema.

La instal·lació i calibració inicial de les galgues extensomètriques s'ha efectuat als laboratoris d'Elasticitat i Resistència de Materials de la UPC al Campus Terrassa.

Aquestes galgues han de permetre la mesura de les següents forces i moments a l'eix de suport:

- **Moments flectors:** moments respecte els eixos X-X i Z-Z
- **Forces tallants:** forces en direccions X-X i Z-Z

Es comprova que les forces i moments a mesurar per les galgues extensomètriques es produeixen suficientment lluny de la zona instrumentalitzada dels eixos de suport com perquè el sistema de forces es pugui substituir per les seves accions equivalents.

A continuació es descriuen les connexions de les galgues per tal d'obtenir aquestes càrregues.

3.10.5.1 Moments flectors

La mesura dels moments flectors que actuen sobre l'eix de suport s'efectua a través de 8 galgues extensomètriques unidireccionals. La següent imatge mostra la posició de les galgues extensomètriques situades en el pla vertical YZ i en el pla horitzontal XY on es mesuren les deformacions que permeten el càlcul dels moments flectors M_x i M_z respectivament:

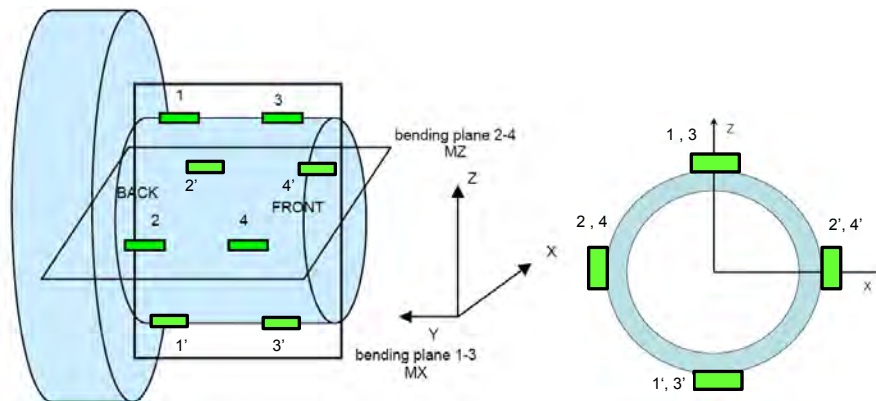


Figura 3-15: Situació de les galgues en els eixos de suport

La connexió que s'efectua de les galgues extensomètriques és de mig pont, tal i com mostra a la següent figura, enllaçant les galgues oposades entre si (1-1', 2-2', 3-3', 4-4').

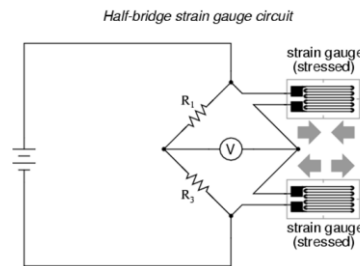


Figura 3-16: Connexió de mig pont per les galgues (DR[W14])

D'acord amb aquest muntatge, s'obté una diferència de potencial (V) proporcional a la deformació patida per l'eix de suport. Aplicant la llei de Hook (DR[L12]) que relaciona tensió i deformació, i coneixent el mòdul resistent de l'eix de suport, és possible obtenir els moments M_x i M_z . El moment resultat total és doncs la composició dels dos moments anteriors i s'obté aplicant la fórmula:

$$M = \sqrt{(M_x^2 + M_z^2)}$$

3.10.5.2 Esforç tallant

El muntatge anterior, no només permet la mesura del moment flector sinó que també permet obtenir l'esforç tallant que està patint l'eix de suport. Es per aquest motiu que s'han situat galgues extensiomètriques en dos plans XZ diferents i separats una distància 'd'. D'aquesta manera, les forces tallants que actuen sobre l'eix de suport es poden obtenir a partir dels valors de moments flexors calculats anteriorment. Coneixent el moment flector a la secció A (on hi ha les galgues 1, 1', 2, 2') i el moment flector a la secció B (on hi ha les galgues 3, 3', 4, 4'), es pot obtenir l'esforç tallant T que actua sobre l'eix de suport (DR[L9]):

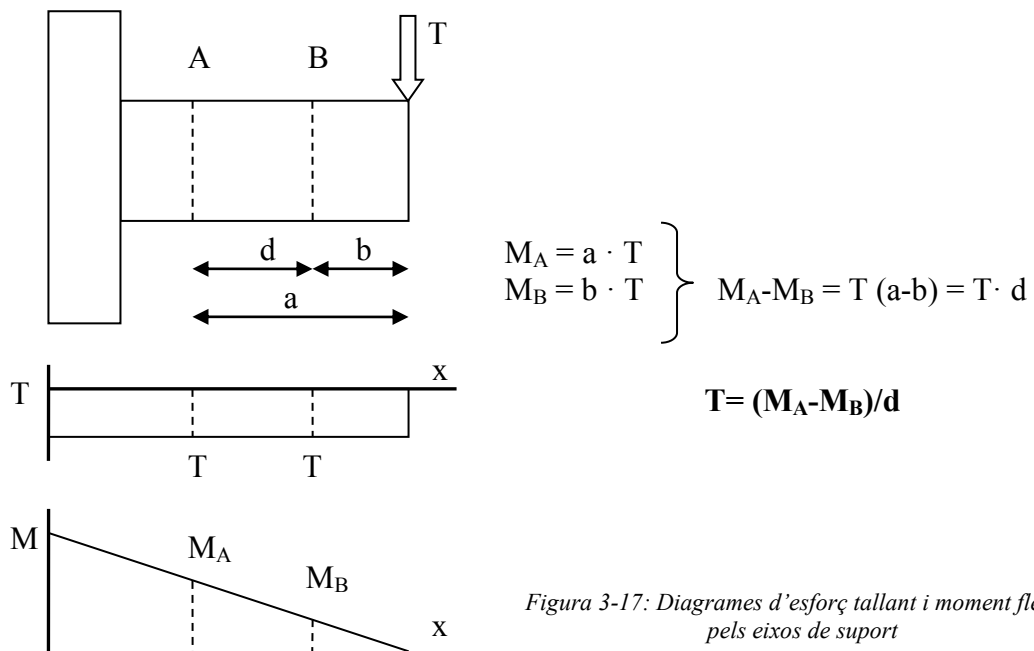


Figura 3-17: Diagrames d'esforç tallant i moment flector pels eixos de suport

La fórmula anterior permet obtenir l'esforç tallant a partir de les dades de moments flectors en dues seccions diferents a partir de la distància entre seccions. D'aquesta manera és possible obtenir l'esforç tallant en direcció X-X i en direcció Z-Z.

Les distàncies a que estan situades les galgues entre elles es mostren a la següent taula:

Eix de Suport	Distància Y entre galgues extensomètriques, d (mm)
UL	23.0
UR	22.0
LL	22.0
LR	22.0

Taula 3-3: Distància entre galgues extensomètriques

3.11 Calibració de Galgues Extensomètriques, i validació dels acceleròmetres

El primer pas en la realització del test consisteix en la validació dels acceleròmetres i la instal·lació i calibració de les galgues extensomètriques, per tal d'obtenir uns resultats de test fiables:

- **Instal·lació de les galgues extensomètriques:** S'ha efectuat el muntatge de les galgues extensomètriques necessàries per mesurar les sol·licitacions requerides en els quatre eixos de suport.
- **Calibració de galgues extensomètriques:** ha servit per poder determinar les forces i moments als eixos de suport en funció de les deformacions que pateixen les galgues extensomètriques. La calibració de les galgues extensomètriques s'ha efectuat en dues etapes diferents. La calibració inicial, realitzada abans del test, i la calibració final, realitzada després del test. En el següent apartat es detalla la calibració inicial del test (veure apartat 3.11.3), mentre que la calibració final s'exposa després dels resultats de test (veure apartat 3.12.3.6).
- **Validació dels acceleròmetres:** ha servit per assegurar que els 4 acceleròmetres usats per la mesura d'acceleració tenen comportaments raonablement similars un cop sotmesos al mateix estímul extern.

3.11.1 Test de validació dels acceleròmetres

Per tal de garantir les mesures d'acceleració que s'obtenen durant el test, prèviament s'han realitzat unes comprovacions que validen el comportament dels acceleròmetres. Les comprovacions efectuades són les següents:

- **Situar els quatre acceleròmetres junts en un mateix punt:** S'han instal·lat els quatre acceleròmetres junts en un mateix punt del suport del motor i mesurant en direcció Z-Z (veure següent foto).

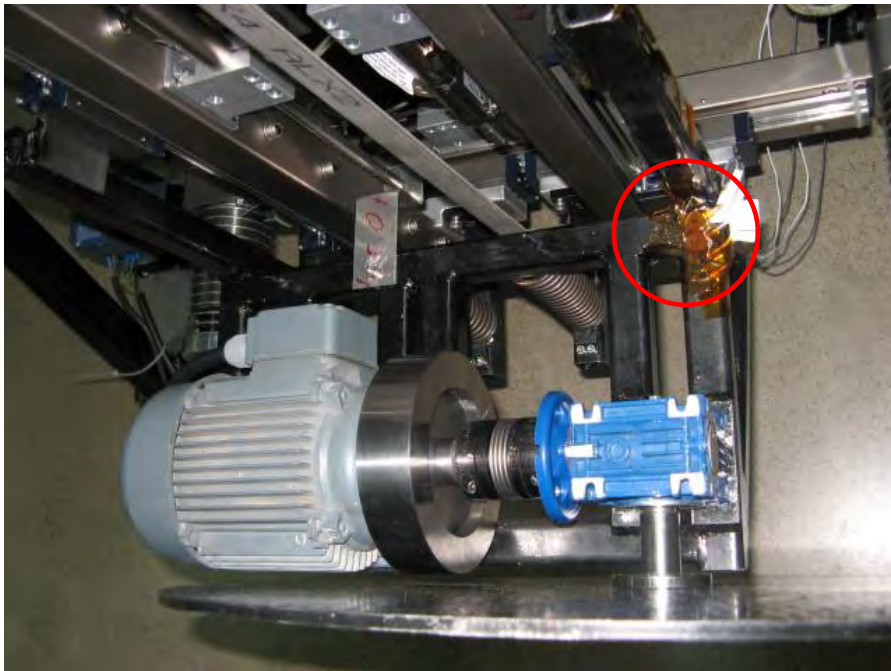


Figura 3-18: Posició dels acceleròmetres en el suport del motor

D'acord a la següent gràfica, s'ha comprovat que mesuren valors molt semblants (variacions d'amplitud $\pm 4\%$) quan s'accionava el motor del conjunt excitador a mitjana freqüència (3.7Hz).

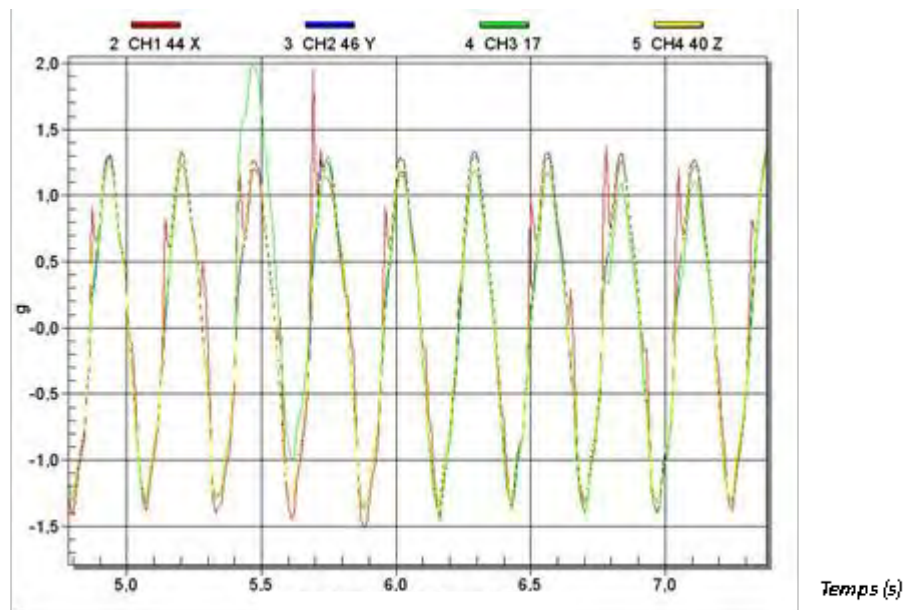


Figura 3-19: Mesura dels acceleròmetres sobre el suport del motor

Aquesta lleugera variació en el comportament dels acceleròmetres s'atribueix a diferències intrínseques dels propis sensors i és acceptable pels posteriors tests a realitzar.

3.11.2 Instal·lació de les Galgues Extensomètriques

La instal·lació de les galgues extensomètriques als eixos de suport l'ha dut a terme personal qualificat del departament de LITEM de la UPC. Les característiques de les galgues utilitzades són:

- Fabricant: *Vishay Micro-measurements*
- Referència: 120Ω
- Resistència (Ω): $120.0 \pm 0.3 \%$
- Factor de galga (24°C): $2.100 \pm 0.5 \%$
- Sensitivitat transversal: $0.7 \pm 0.2 \%$

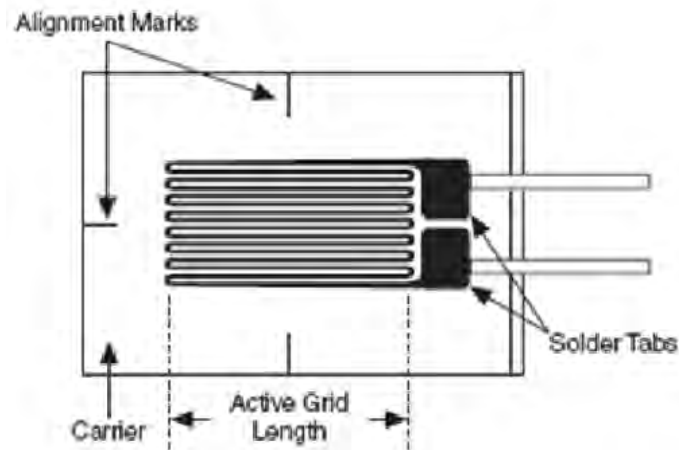


Figura 3-20: Marques d'alineació en galgues extensomètriques (DR[W14])

L'eix de suport on s'han situat les galgues té les següents característiques:

- Material: Acer estirat en calent (S235JR, St37-2)
- Mòdul elasticitat longitudinal (E): 210.000 MPa
- Mòdul elasticitat transversal (G): 81.000 MPa
- Coeficient de Poisson (ν): 0.3
- Tensió límit elàstic: 235 MPa
- Tensió límit ruptura: 370 MPa

Un cop situades les galgues extensomètriques a l'eix de suport, cal fer el traçat dels cables i finalment es protegeix tot amb una espuma per evitar curtcircuits involuntaris. La següent imatge mostra un eix de suport amb les galgues instal·lades i el connexionat de cables efectuat:

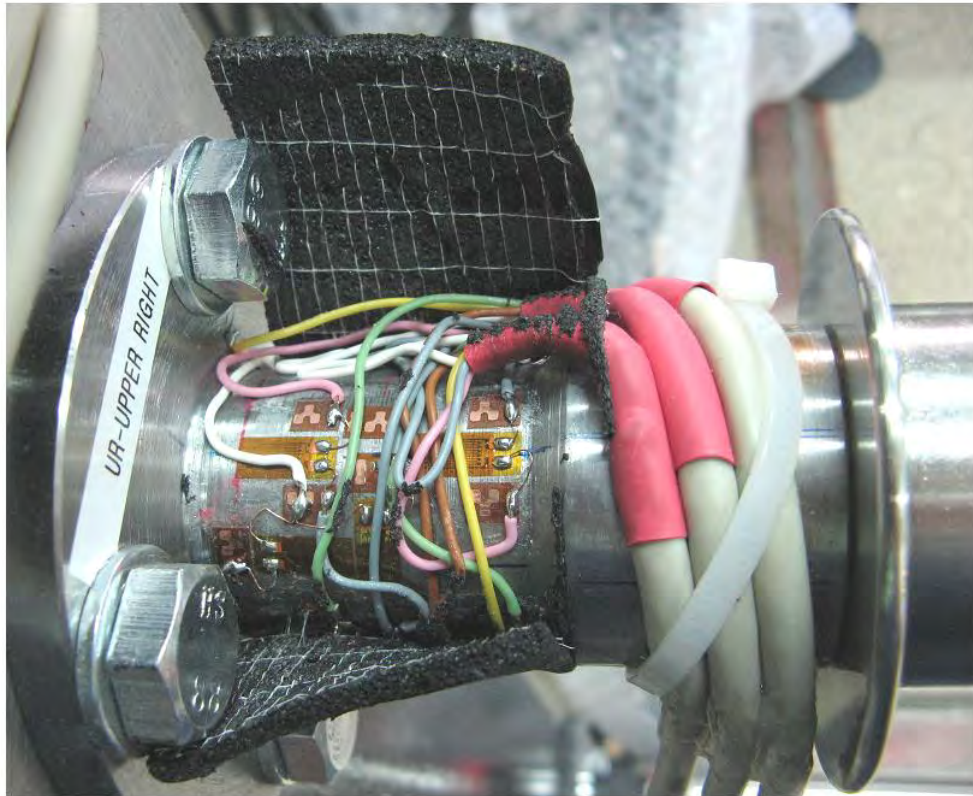


Figura 3-21: Eix de suport amb les galgues ja instal·lades

En total s'han instal·lat 48 galgues extensomètriques. És a dir, 12 galgues en cada eix de suport que corresponen a 8 galgues extensomètriques unidireccionals per la mesura del moment flector i 4 galgues extensomètriques actives per la mesura de la força axial. Finalment les galgues extensomètriques per la mesura de la força axial no s'han usat perquè la força axial és despreciable en front a l'esforç tallant.

3.11.3 Calibració prèvia de Galgues Extensomètriques

Un cop instal·lades les galgues extensomètriques als quatre Eixos de Suport, d'acord amb les configuracions abans descrites que permeten obtenir moments flectors i esforços tallants, s'ha procedit a la calibració de les galgues.

Tenint en compte l'anàlisi de tensions de flexió sobre de l'eix de suport efectuat a l'apartat 3.10.4, on s'obté una tensió de flexió de 40.1MPa, s'estima una marge de calibració dels moments flectors des del 0 fins al voltant dels 118Nm (valor de moment flector corresponent als 40.1MPa, veure apartat 3.10.4).

La calibració consisteix en situar l'eix de suport en una premsa calibrada amb control de càrrega de manera que s'apliquen diferents valors de força sobre l'eix de suport i es mesuren les lectures de les galgues extensomètriques.

D'aquesta manera s'obté la corba de calibració en el rang de tensions previst que relaciona la mesura de les galgues amb la força que s'efectua sobre l'eix de suport.

Aquest procés de calibració s'ha repetit pels 4 eixos de suport i s'ha calibrat la mesura de l'esforç tallant i la mesura del moment flector. A la següent imatge s'observa el test de calibració efectuat.



Figura 3-22: Calibració de moment flector i esforç tallant de les galgues extensomètriques

Amb aquest test de calibració, s'ha obtingut la relació entre la força (en Newtons) efectuada per la premsa i la mesura de sensibilitat (en mV/V) que s'obté de les galgues. Així s'ha pogut obtenir la corresponent recta de calibració per cada un dels eixos de suport. A continuació es presenta la recta de calibració del moment flector per l'eix de suport UL.

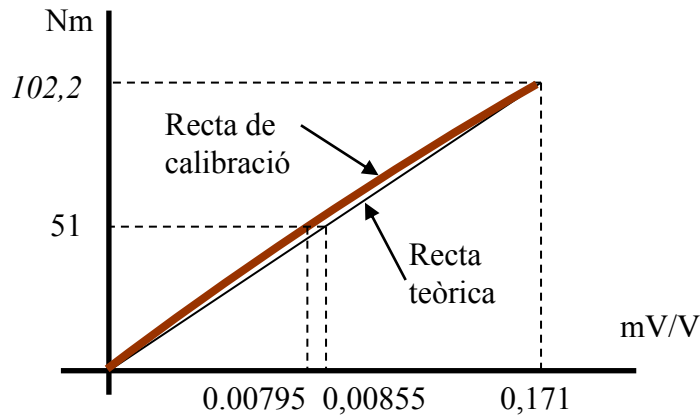


Figura 3-23: Recta de calibració per l'eix de suport UL per moment flector

Fent una lectura de la mesura de les galgues, és possible determinar l'error de mesura en relació al valor teòric que hauria de tenir. Per aquest cas (calibració del moment flector per l'eix de suport UL), l'error màxim coincideix a la posició de mitjana càrrega i és 7%.

Aquest procés de determinació de la recta de calibració i de l'error màxim s'ha realitzat pels quatre eixos de suport en les dues sol·licitacions analitzades (esforç tallant i moment flector), de manera que s'han obtingut les següents taules de calibració:

- Taula de calibració del moment flector i l'esforç tallant:

Eix de suport	Pla de flexió	Càrrega Premsa (N)	Distància en Y-Y ⁽¹⁾ (mm)	Moment (Nm)	Sensibilitat (mV/V)	Error màxim (%)
UL	XY	$F_Z = 1400$	96	$M_x = -134,4$	0,177	7%
	XY	$F_Z = -1400$	73	$M_x = 102,2$	0,171	
	YZ	$F_X = 1390$	96	$M_Z = 133,4$	0,171	
	YZ	$F_X = -1390$	73	$M_Z = -101,5$	0,171	
UR	XY	$F_Z = 1192$	98	$M_x = -116,8$	0,153	11%
	XY	$F_Z = -1192$	76	$M_x = 90,6$	0,145	
	YZ	$F_X = 1273$	98	$M_Z = 124,8$	-0,167	
	YZ	$F_X = -1273$	76	$M_Z = -96,7$	-0,154	

LL	XY	$F_Z = 1197$	96	$M_x = -114,9$	0,157	6%
	XY	$F_Z = -1197$	74	$M_x = 88,6$	0,144	
	YZ	$F_X = 1187$	96	$M_Z = 113,9$	0,156	
	YZ	$F_X = -1187$	74	$M_Z = -87,9$	-0,142	
LR	XY	$F_Z = 1215$	96	$M_x = -116,6$	-0,153	7%
	XY	$F_Z = -1215$	74	$M_x = 89,9$	-0,144	
	YZ	$F_X = 1180$	96	$M_Z = 113,3$	0,151	
	YZ	$F_X = -1180$	74	$M_Z = -87,3$	0,139	

Taula 3-4: Calibració moment flector i esforç tallant

(1): La distància en Y-Y correspon a la distància des del punt d'aplicació de la càrrega per part de la premsa fins al punt on es troben fixades les galgues extensomètriques a l'eix de suport.

3.12 Resultats de Test

Un cop establert el procediment de test, realitzades les disposicions preliminars i efectuades les calibracions i validacions necessàries, s'ha procedit a la realització del conjunt de tests previstos. A continuació s'exposen els resultats obtinguts.

3.12.1 Condicions generals de test

Tots els tests s'han realitzat sota les següents condicions ambientals:

- Temperatura: 22°C ± 5°C
- Humitat relativa: 50% ± 25%
- Pressió atmosfèrica: Ambient
- Instal·lació: Sala blanca

3.12.2 Resultats del Test de Fricció

S'ha realitzat el test de fricció per tal de mesurar les forces màxima, mínima i mitjana necessàries per desplaçar tant les guies verticals com les horitzontals del Sistema VIF amb 5 repeticions per test. Aquesta força de fricció és deguda al fregament dels carros al desplaçar-se sobre les guies i a possibles desalineacions de muntatge o defectes de paral·lelisme entre guies.

3.12.2.1 Equip de test

Per la realització del test de fricció s'ha utilitzat el següent instrumental:

- **Dinamòmetre digital:**
 - Marca: *Advanced Force Gauge*
 - Model: AFG 100N
 - Fabricant: Mecmesin
 - Data final de calibració: 5/11

3.12.2.2 Resultat de Test en Configuració 1

Configuració nominal de test amb el vector gravetat en direcció Z-Z i amb el conjunt excitador muntat. Permet mesurar les friccions a les guies horitzontals (direcció X-X) i als coixinets lineals (direcció Y-Y).

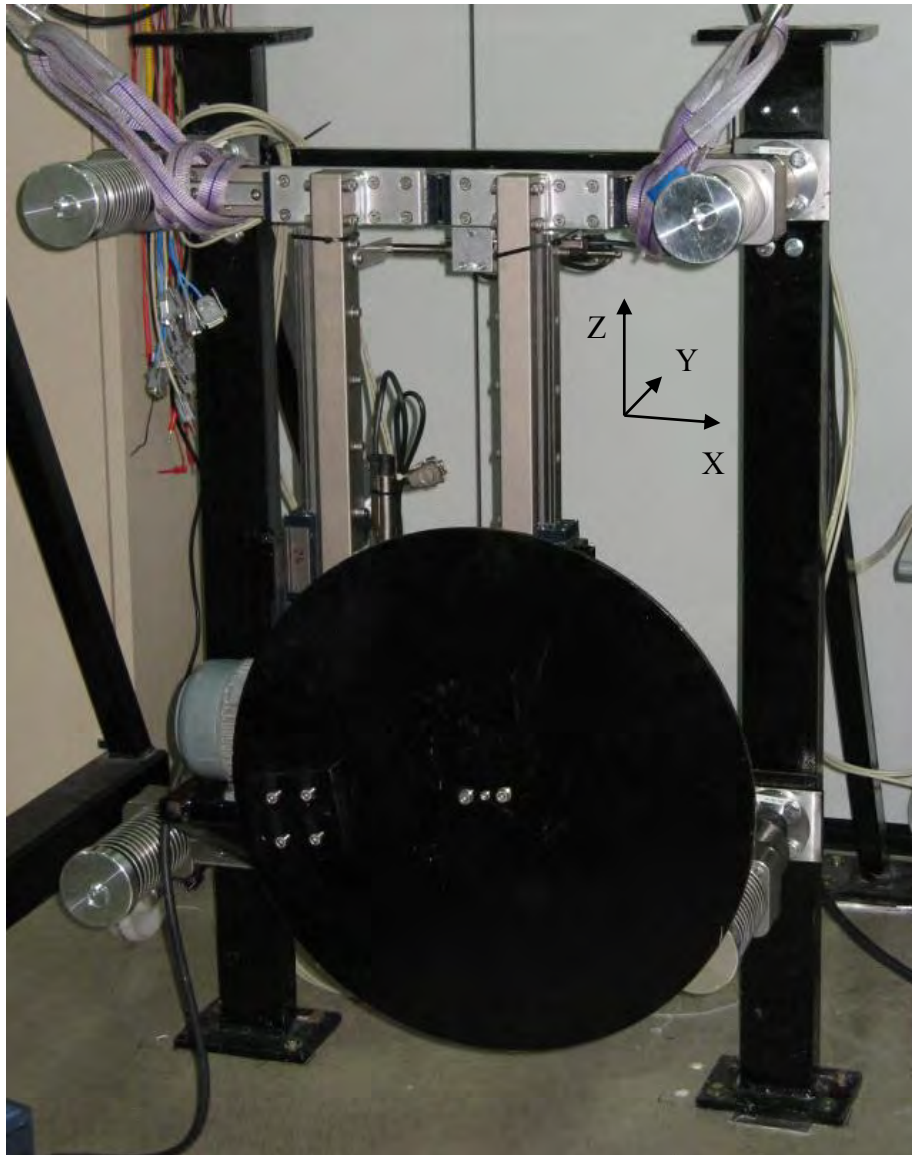


Figura 3-24: Configuració 1 nominal de test

A cada test s'han realitzat 5 repeticions, anotant els valors màxims i mínims de la força de fricció per cada repetició. Així doncs, la força mínima és el valor mínim dels 5 valors mínims, la força màxima és el valor màxim dels 5 valors màxims, i la força mitjana és el valor mig dels 10 valors mesurats (5 valors mínims i 5 valors màxims).

A continuació es mostra la seqüència de test i els resultats obtinguts:

- **Resultat de Test en Configuració 1**

Número del Test	Configuració de test	Valors de forces de fricció, F_f (N)		
		F_f mínima	F_f mitjana	F_f màxima
1	Configuració 1 movent guies verticals en direcció X-X d'esquerra a dreta	40	52,2	61
2	Ídem Test 1 afluixant cargols superiors de fixació entre guies verticals i horitzontals	30	43,5	58
3	Ídem Test 2 afluixant tots els cargols de fixació entre guies verticals i horitzontals	31	38,1	45
4	Ídem Test 3 traient tot el conjunt excitador	12	18,8	26
5	Ídem Test 4 ara en direcció de dreta a esquerra	10	14	17
6	VIF desmuntat de la bancada de test (per evitat friccions de muntatge). Movent guia vertical dreta en direcció X-X d'esquerra a dreta i cargols afluixats	8	10,7	14
7	VIF desmuntat de la bancada de test (per evitat friccions de muntatge). Movent guia vertical esquerra en direcció X-X de dreta a esquerra i cargols afluixats	4	6,6	8

Taula 3-5: Resultat de Test en Configuració 1

- **Resultat de Test amb guies lliures per obtenir la fricció mínima assolible**

Número del Test	Configuració de test	Valors de forces de fricció, F_f (N)		
		F_f mínima	F_f mitjana	F_f màxima
8	Guia lliure, no muntada enlloc. Fricció de 4 carros desplaçant-se de dreta a esquerra	1,6	2,05	2,6
9	Guia lliure, no muntada enlloc. Fricció de 4 carros desplaçant-se d'esquerra a dreta	1,5	2,61	3,6

Taula 3-6: Resultat de Test amb guies lliures per obtenir la fricció mínima assolible

- **Resultat de Test en configuració 1 afegint pes a estructura suport excitador**

Número del Test	Configuració de test	Valors de forces de fricció, F_f (N)		
		F_f mínima	F_f mitjana	F_f màxima
10	Ídem Test 4 afluixant els cargols entre cubs i barres horitzontals per millorar paral·lelisme	11	16,5	22
11	Ídem Test 4 amb els cargols entre cubs i barres horitzontals ja apretats	11	16,75	22,5

12	Ídem test anterior afegint estructura tubular del suport de l'excitador (14kg)	16	24	33
13	Ídem test anterior afegint 10kg a sobre de l'estructura de l'excitador (14kg)	20	26,75	33
14	Ídem test anterior afegint 20kg a sobre de l'estructura de l'excitador (14kg)	24	28,75	34
15	Ídem test anterior afegint 30kg a sobre de l'estructura de l'excitador (14kg)	26	29,75	34
16	Ídem test anterior afegint 40kg a sobre de l'estructura de l'excitador (14kg)	27	28,75	34
17	Ídem test anterior afegint 50kg a sobre de l'estructura de l'excitador (14kg)	29	32,5	36
18	Ídem test anterior afegint 60kg a sobre de l'estructura de l'excitador (14kg)	32	38	44
19	Ídem test anterior afegint 70kg a sobre de l'estructura de l'excitador (14kg)	38	43,5	38
20	Ídem test anterior afegint 90kg a sobre de l'estructura de l'excitador (14kg)	47	50,75	55

Taula 3-7: Resultat de Test en configuració 1 afegint pes a estructura suport excitador

- **Resultat de Test repetint tests en configuració 1**

Número del Test	Configuració de test	Valors de forces de fricció, F_f (N)		
		F_f mínima	F_f mitjana	F_f màxima
21	Ídem Test 4	12	18,1	25
22	Ídem Test 4 afegint estructura de suport excitador (14kg), motor, volant d'inèrcia, i reductor (11,4kg)	20	27,25	35
23	Ídem Test 3 muntant totalment el conjunt excitador	25	31,25	36
24	Ídem Test 1 apretant els cargols que uneixen les guies verticals i horitzontals	37	41,9	46

Taula 3-8: Resultat de Test repetint tests en configuració 1

3.12.2.3 Resultat de Test en Configuració 2

Correspon als resultats obtinguts amb el Sistema VIF desmuntat de la bancada de test i situat en útil en el pla de terra (vector gravetat en direcció Y-Y) sense el conjunt excitador ni molles però amb el suport tubular del conjunt excitador muntat. Permet mesurar la fricció a les guies que anteriorment eren les horitzontals (direcció X-X) i a les guies que anteriorment eren les verticals (direcció Z-Z).

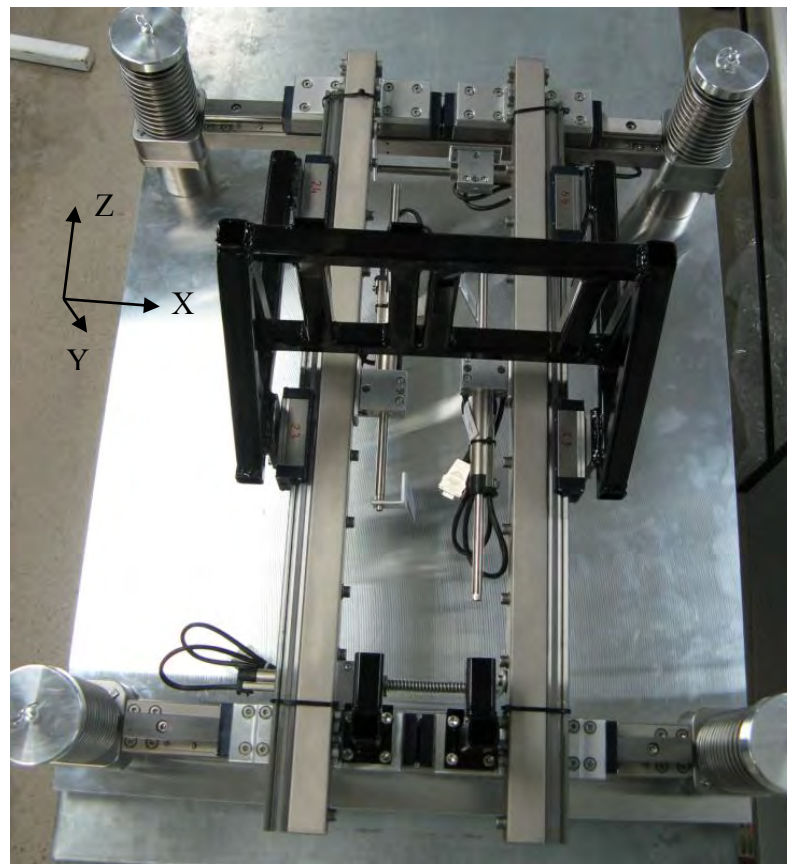


Figura 3-25: Configuració 2 nominal de test

A continuació es mostra la seqüència de test amb els resultats obtinguts:

- **Resultat de Test en Configuració 2**

Nom del Test	Configuració de test	Valors de forces de fricció, F_f (N)		
		F_f mínima	F_f mitja	F_f màxima
A	En configuració 2 mesurant Sistema VIF en direcció X-X d'esquerra a dreta	20	30	40
B	En configuració 2 mesurant Sistema VIF en direcció X-X de dreta a esquerra	25	28	30
C	En configuració 2 mesurant Sistema VIF en direcció Z-Z de -Z a +Z	19	26	33
D	En configuració 2 mesurant Sistema VIF en direcció Z-Z de +Z a -Z	19	29	38
C	Ídem test 1 però sense el suport del conjunt excitador. En direcció X-X d'esquerra a dreta	16	20	34
E	Ídem test 1 però sense el suport del conjunt excitador. En direcció X-X de dreta a esquerra.	21	22	23

F	Ídem test 1 però sense el suport del conjunt excitador. En direcció Z-Z de -Z a +Z	13	16	19
G	Ídem test 1 però sense el suport del conjunt excitador. En direcció Z-Z de +Z a -Z	15	17	20

Taula 3-9: Resultat de Test en configuració 2

3.12.2.4 Conclusions del Test de Fricció

Un cop avaluats els resultats del test de fricció, es poden extreure les següents conclusions:

- **El valor de la força mitjana de fricció obtinguda per desplaçar les guies verticals en direcció X-X amb el Sistema VIF en configuració 1 és de 41,9N (Test 24).**
- **El valor de la força mitjana de fricció obtinguda per desplaçar el conjunt excitador en direcció Z-Z amb el Sistema VIF en configuració 2 és de 29N (Test D).**
- **La variabilitat de resultats mostra la incidència de diferents factor que afecten sobre el valor de la força de fricció.** Del conjunt de factors, cal destacar:
 - **Fricció de rodadura dels carros sobre les guies:** s'ha mesurat una fricció de rodadura sense càrrega de 2,6N necessària per moure 4 guies sobre un carro (veure Test 8 i 9). Aquesta seria el valor mínim de fricció assolible si no afectessin la resta de factors.
 - **Tolerància de muntatge entre guies verticals i entre guies horitzontals:** s'observa com la força de fricció disminueix de 52,2N (Test 1) a 31,1N (Test 3) a l'afluixar els cargols entre les guies horitzontals i les verticals, de manera que es corregeix l'error de paral·lelisme de muntatge. I s'observa com s'incrementa la fricció de 31,25N (Test 23) a 41,9N (Test 24) a l'apretar els cargols.
 - **Toleràncies de fabricació de les guies:** els errors de planitud i paral·lelisme entre cares de les guies també acaben ocasionant un increment de fricció un cop realitzat el muntatge.
 - **No lubricació dels carros (efecte de *Stick-slip*):** La fricció estàtica dels carros s'accentua pel fet que els carros no estan lubricats. Això provoca

una increment en els valors de fricció estàtica i dinàmica, així com una major dispersió dels resultats de fricció. La no lubricació dels elements de rodadura és habitual en equips espacials per evitar el risc de desprendiment de partícules lubricants no contingudes.

- **Les guies en configuració 2 presenten menys força de fricció que les guies en configuració 1:** s'atribueix això al fet que les guies en configuració 2 suporten únicament una força pura sense cap moment, mentre que els carros de les guies en configuració 1 han de suportar el moment flector provocat pel pes desplaçat.
- **Els tests efectuats amb les guies en configuració 1 són els tests representatius per la posterior caracterització del model FEM:** No només pel fet que corresponen a la mateixa configuració final de l'equip, sinó també pel fet que és en aquesta configuració on els carros de les guies han de suportar càrregues de moment flector sense cap força deguda al pes (igual que quan el Sistema VIF es trobi en microgravetat). Cal recordar que el pes del conjunt excitador es troba compensat per les molles de compressió i per tant no recau sobre les guies (quan el Sistema VIF es trobi a la ISS, el pes tampoc hi recaurà degut a l'estat de microgravetat).
- **L'increment de càrrega sobre les guies també fa augmentar la força de fricció:** Del conjunt de tests que s'han efectuat modificant el pes sobre el suport del conjunt excitador (del Test 12 al Test 20), es pot obtenir la següent taula i la següent gràfica de força de fricció en funció de la càrrega aplicada sobre el suport del conjunt excitador:

Càrrega (kg)	Força fricció mínima (N)	Força fricció màxima (N)	Força fricció mitjana (N)
0	16	33	24
10	20	33	26,75
20	24	34	28,75
30	26	34	29,75
40	27	34	28,75
50	29	36	32,5
60	32	44	38
70	38	48	43,5
90	47	55	50,75

Taula 3-10: Resultat de forces de fricció en funció de la càrrega

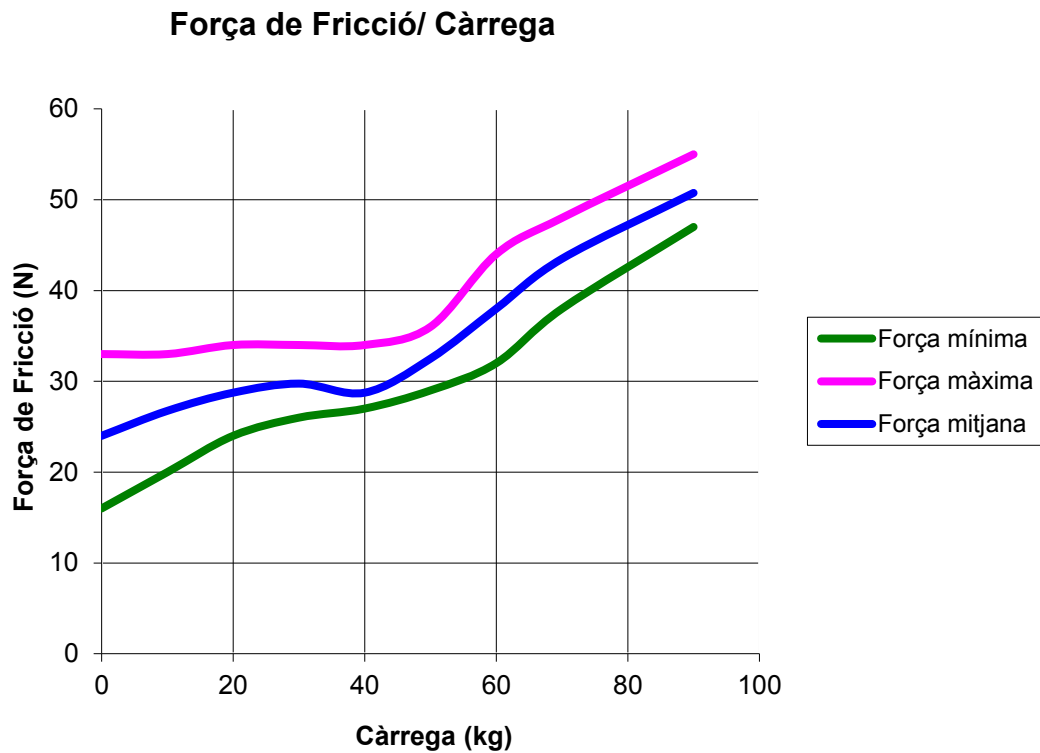


Figura 3-26: Forces de fricció en funció de la càrrega

S'observa com les forces màxima, mitjana i mínima de fricció presenten una evolució creixent a mesura que s'augmenta la càrrega de fricció. En el tram central però, el comportament de les forces presenten un tram constant mentre les guies es troben carregades entre 20kg i 40kg. S'atribueix aquest fet a la manca de lubricació dels carros que, segons el fabricant de guies, pot provocar aquest comportament de falta de linealitat en alguns trams.

3.12.3 Resultats del test de forces tallants i moments flectors

S'ha realitzat el test de forces i moments per tal de mesurar les forces i moments que es transmeten al Sistema VIF degut al moviment del conjunt excitador. S'han adquirit les dades de les galgues extensomètriques situades en els eixos de suport LR, LL, UR, UL per tal de permetre l'obtenció de les forces i moments que s'hi transmeten.

A continuació es mostra una imatge on s'observa l'eix de suport LL amb les galgues instal·lades i protegides amb espuma negra.

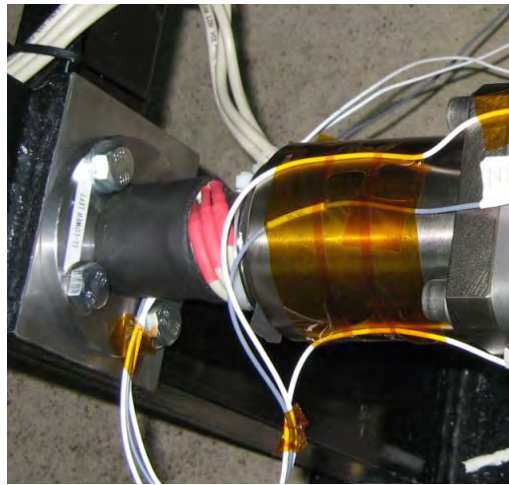


Figura 3-27: Eix de suport LL amb galgues instal·lades

3.12.3.1 Equip de test

Per la realització del test s'ha utilitzat el següent instrumental:

- **Galgues extensomètriques:**
 - Fabricant: Vishay Micro-measurements
 - Referència: 120 Ω
 - Resistència (Ω): 120.0 \pm 0.3 %
 - Factor de galga (24°C): 2.100 \pm 0.5 %
 - Sensitivitat transversal: 0.7 \pm 0.2 %

- **Equip d'adquisició de dades:**
 - Fabricant: Hottinger Baldwin Messtechnik
 - Referència: Spider 8-30
 - N° de canals: 12 (8+4)
 - N° d'unitats: 2

- **Ordinador personal amb software d'adquisició**

3.12.3.2 Taula dels tests de forces tallants i moments flectors

El fet de disposar de 2 unitats d'adquisició de dades ha permès adquirir dades de 2 eixos de suport per cada test que s'ha efectuat. La següent taula mostra els tests efectuats per la determinació de forces i moments en els quatre eixos de suport:

Test nº	Eixos de Suport Mesurats	Estat dels amortidors	Nom Arxiu de Resultat de Test
1	UL, LL	Amortidors connectats en direcció X i Z	20080212Run1_001_001.xls
			20080212Run1_test2_001_001.xls
2	UL, LL	Amortidors connectats en direcció X i Z	20080212Run2_001.xls
3	UL, LL	Amortidors connectats en direcció X i Z	20080212Run3_001.xls
4	UR, LR	Amortidors connectats en direcció X i Z	20080212Run4_001.xls
5	UR, LR	Amortidors connectats en direcció X i Z	20080212Run5_001.xls
6	UR, LR	Amortidors connectats en direcció X i Z	20080212Run6_001.xls
7	UL, LL	Amortidor en direcció Z desconnectat	20080212Run7_001.xls
8	UL, LL	Amortidors connectats en direcció X i Z	20080212Run8_001.xls
9	UL, LL	Tots amortidors connectats.	20080212Run9_001.xls
10	UL, LL	Tots amortidors connectats.	20080212Run10_001.xls
11	UL, LL	Tots amortidors desconnectats en X i Z. Sense molles en direcció X	20080212Run11_001.xls

Taula 3-11: Llistat dels tests de forces i moments efectuats per cada eix de suport

A cada test s'han obtingut les següents mesures:

- **Mesura de moment flector:** a freqüència d'excitació de 1,8Hz, 3,7 Hz i 5,2 Hz.
- **Mesura esforç tallant:** freqüència d'excitació de 1,8Hz, 3,7 Hz i 5,2 Hz.

El fet que s'hagin repetit alguns tests respon al fet que es simultaniejava l'adquisició de forces i moments amb l'adquisició d'acceleracions on ha sigut necessari realitzar més tests.

A partir del conjunt de dades dels tests de forces i moments, s'han obtingut les gràfiques en funció del temps pels esforços tallants i moments flectors per les direccions X-X i Z-Z en els 4 eixos de suport i a les 3 velocitats d'excitació, és a dir:

- Moments per UL, LL, UR, UL:
 - Moment flector en X-X: a 1.8Hz, a 3.7Hz i a 5.26Hz
 - Moment flector en Z-Z: a 1.8Hz, a 3.7Hz i a 5.26Hz
- Esforç tallant per UL, LL, UR, UL:
 - Esforç tallant en X-X: a 1.8Hz, a 3.7Hz i a 5.26Hz
 - Esforç tallant en Z-Z: a 1.8Hz, a 3.7Hz i a 5.26Hz

Això fa un total de 48 gràfiques que es recullen a l'apartat següent.

3.12.3.3 Resultat del test de moment flector

El comportament del moment flector respecte l'eix X-X (M_x) i respecte l'eix Z-Z (M_z), per cada velocitat d'excitació del motor i per cada eix de suport analitzat, queda reflectit a les següents gràfiques.

▪ **Moment flector M_x per eix de suport UL:**

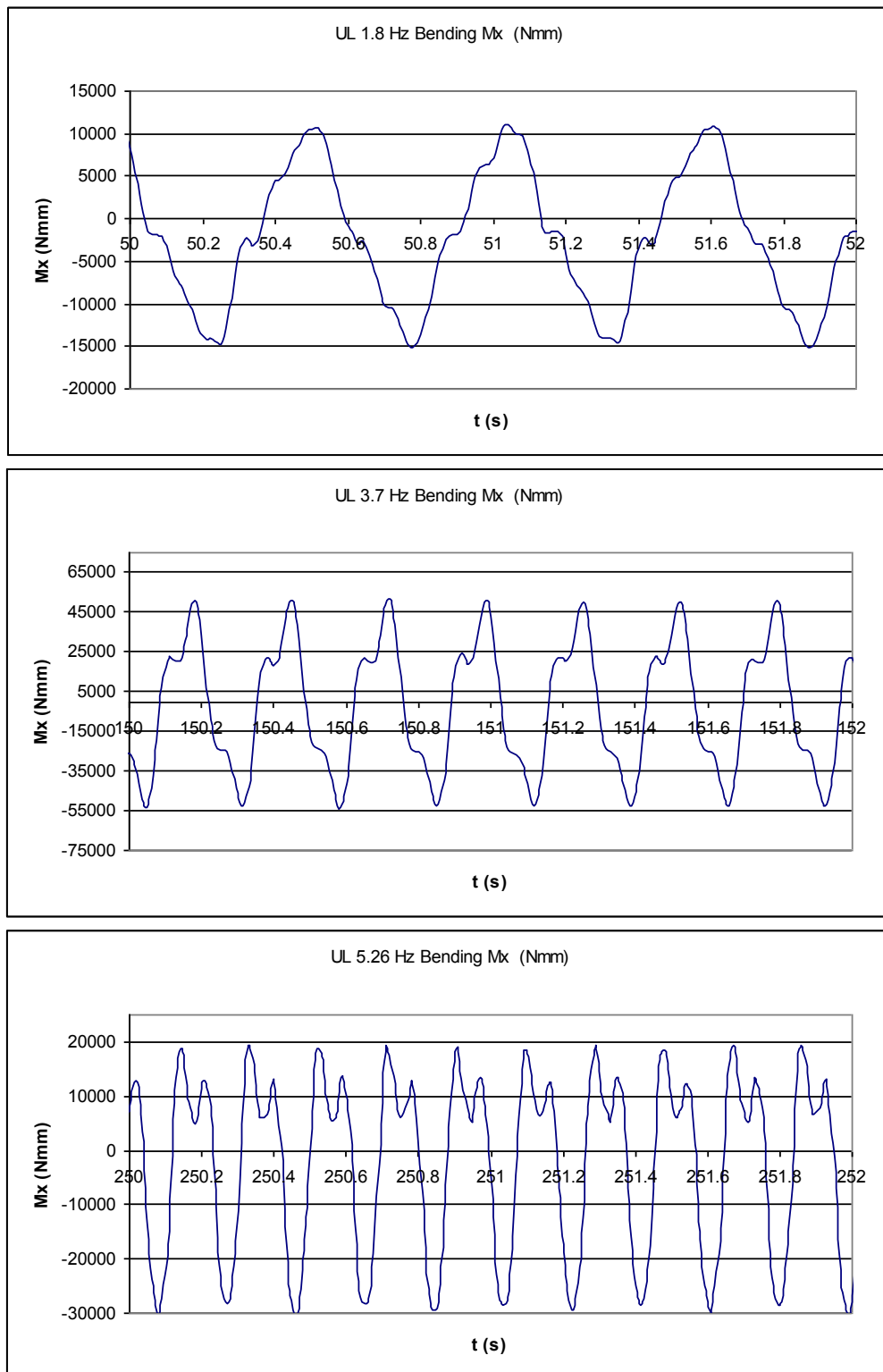


Figura 3-28: Gràfiques de moment flector M_x per eix de suport UL a les 3 velocitats d'excitació

▪ **Moment flector M_z per eix de suport UL:**

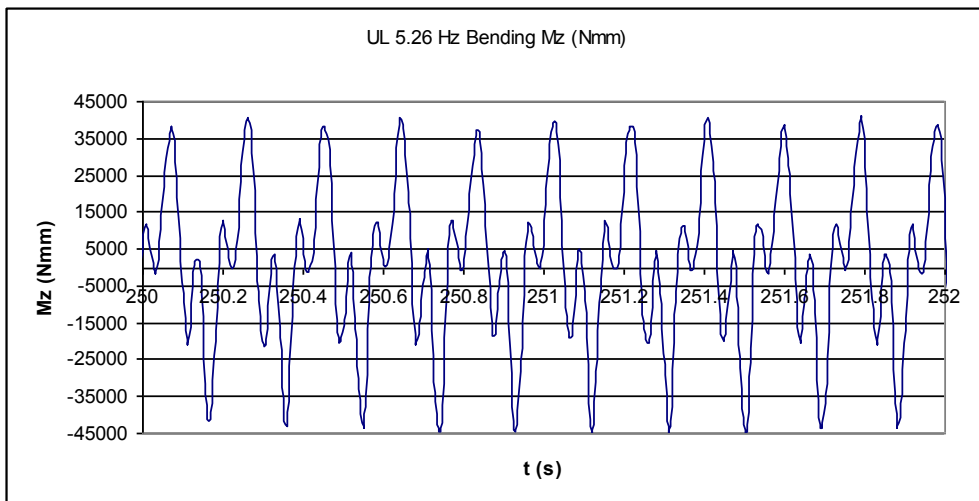
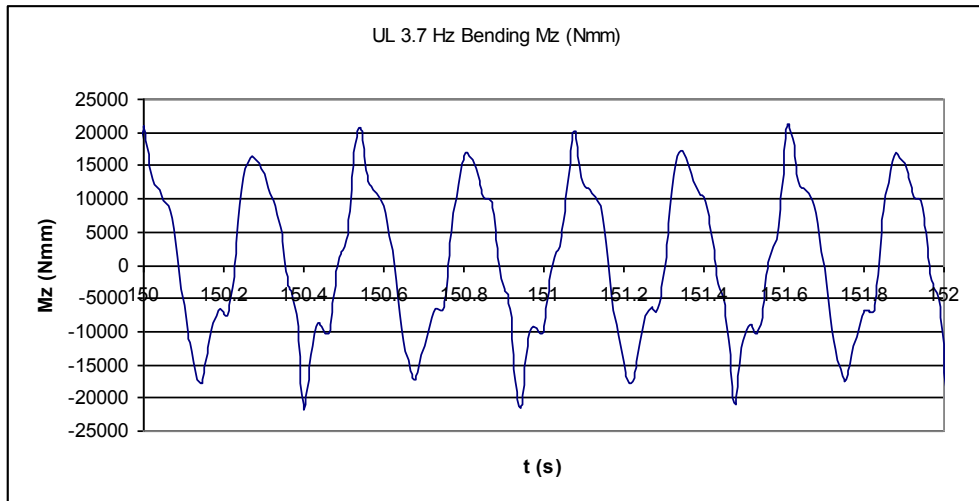
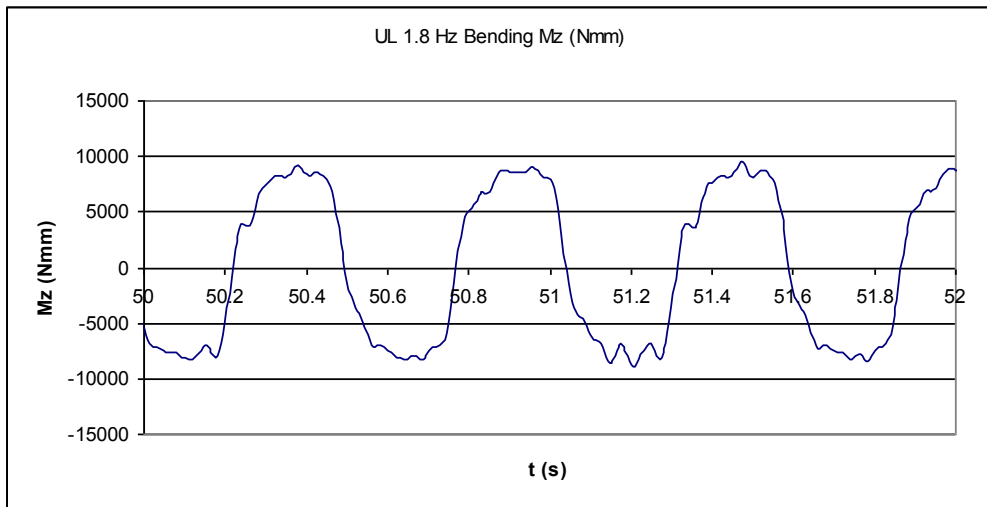


Figura 3-29: Gràfiques de moment flector M_z per eix de suport UL a les 3 velocitats d'excitació

▪ **Moment flector M_x per eix de suport LL:**

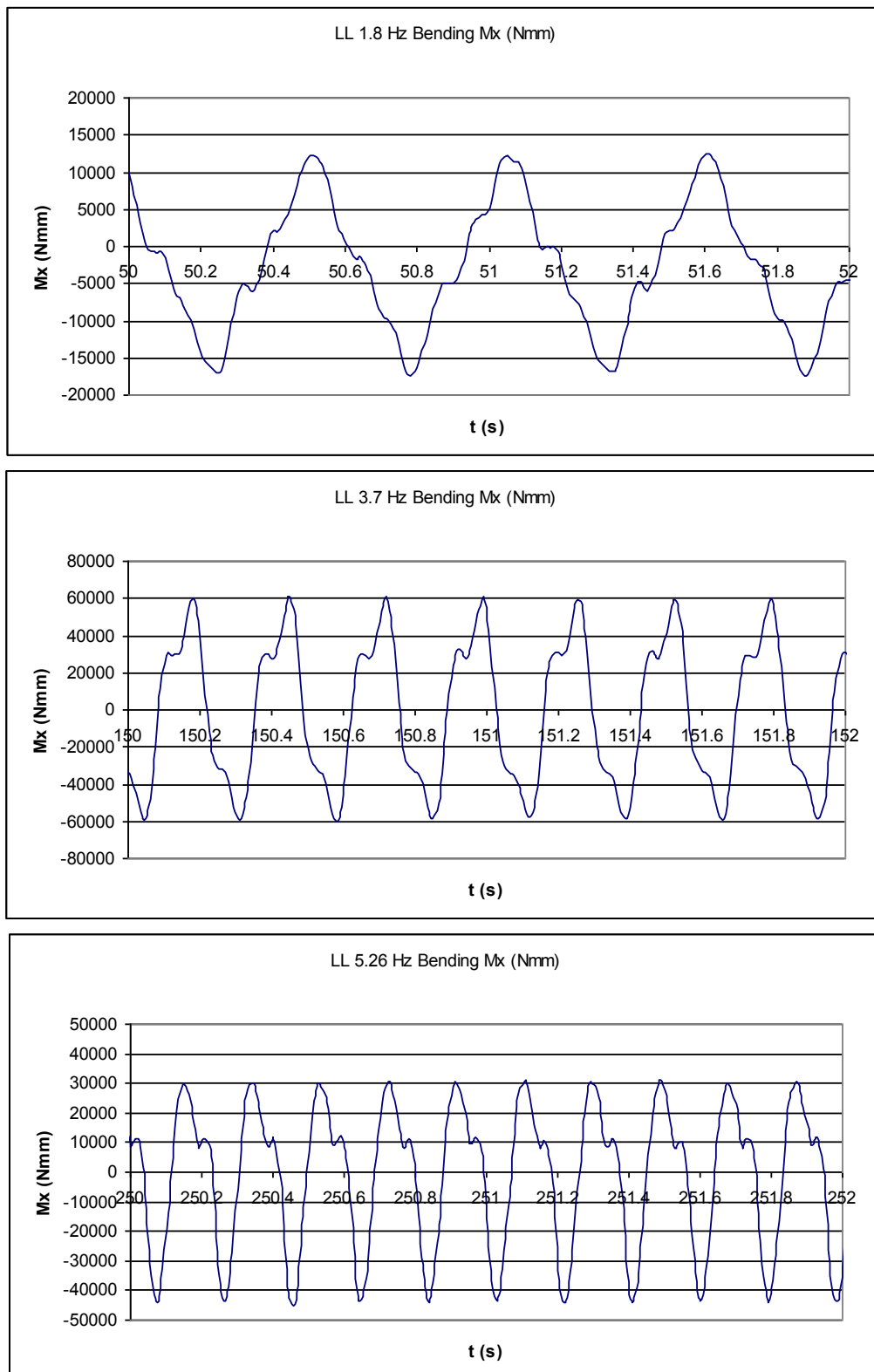


Figura 3-30: Gràfiques de moment flector M_x per eix de suport LL a les 3 velocitats d'excitació

▪ **Moment flector M_z per eix de suport LL:**

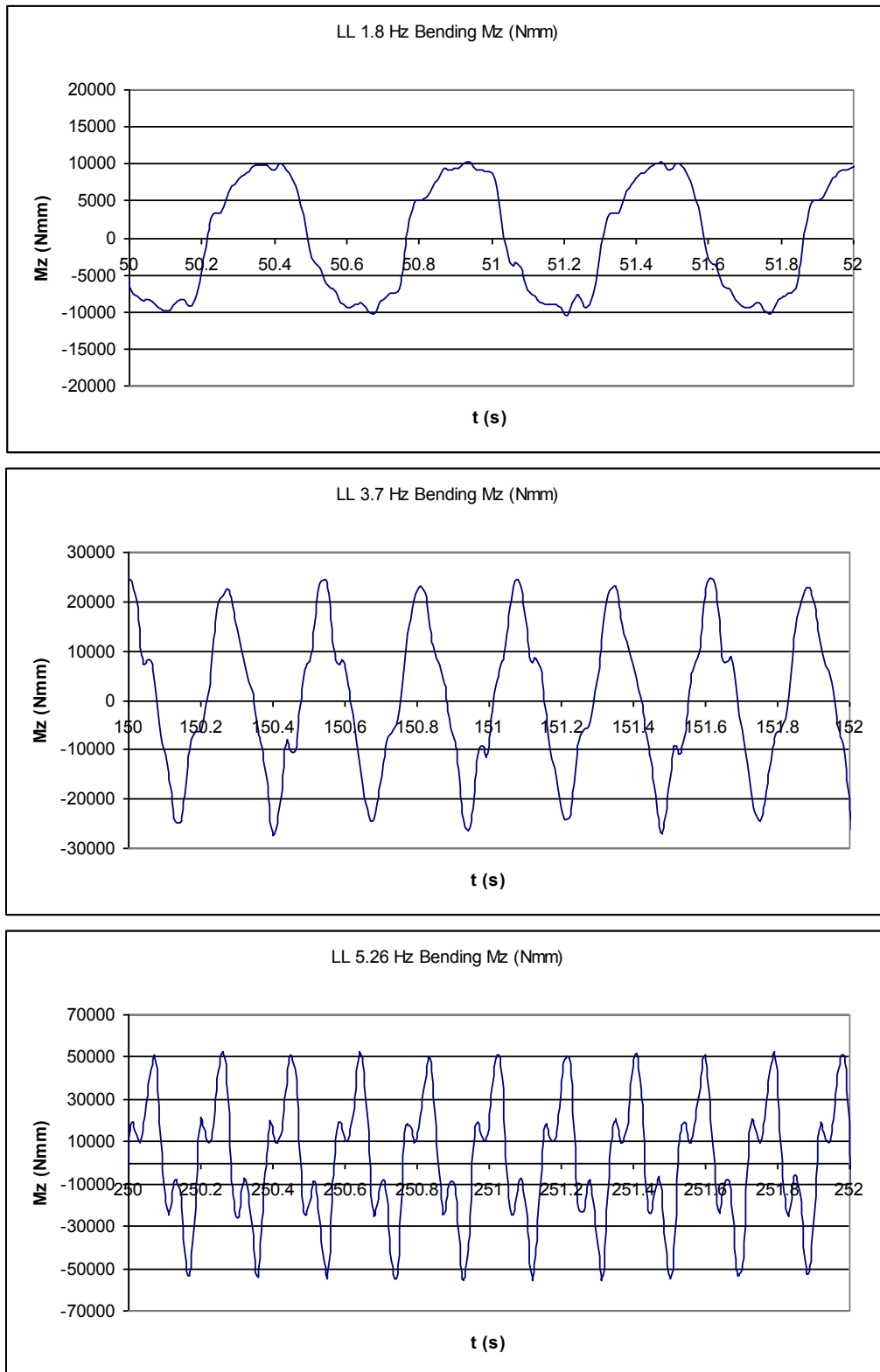


Figura 3-31: Gràfiques de moment flector M_z per eix de suport LL a les 3 velocitats d'excitació

▪ **Moment flector M_x per eix de suport UR:**

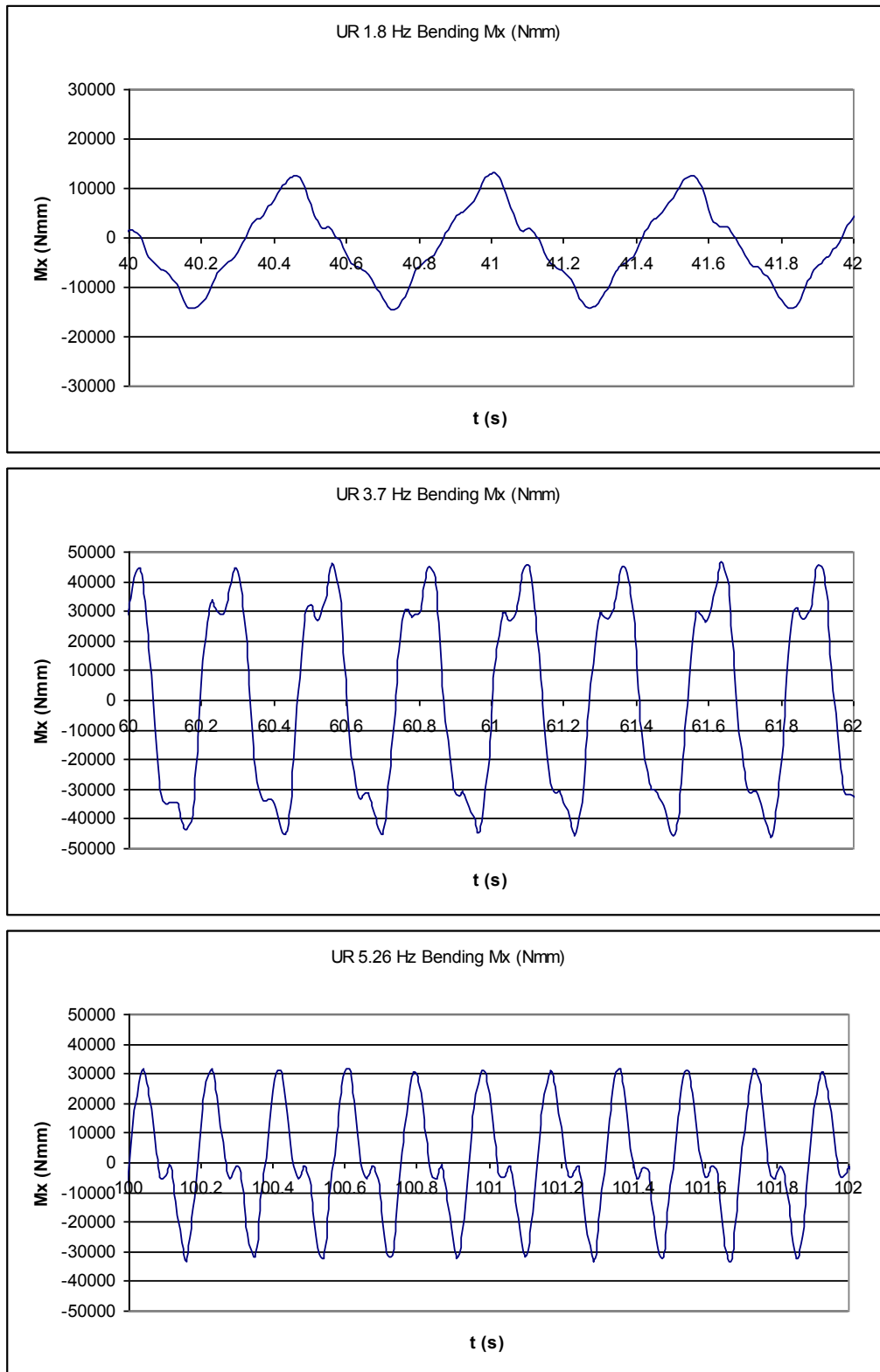


Figura 3-32: Gràfiques de moment flector M_x per eix de suport UR a les 3 velocitats d'excitació

▪ **Moment flector M_z per eix de suport UR:**

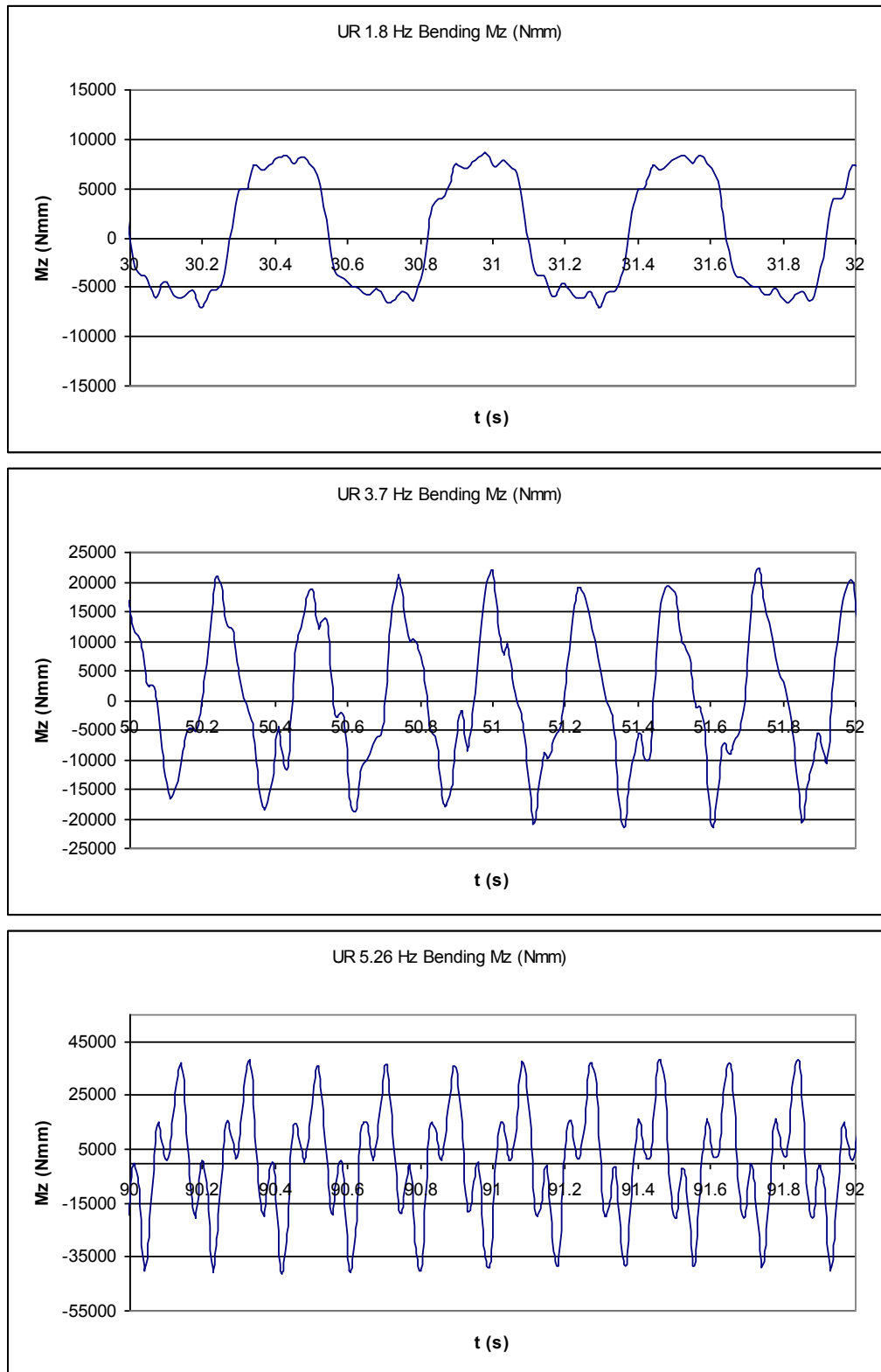


Figura 3-33: Gràfiques de moment flector M_z per eix de suport UR a les 3 velocitats d'excitació

▪ **Moment flector M_x per eix de suport LR:**

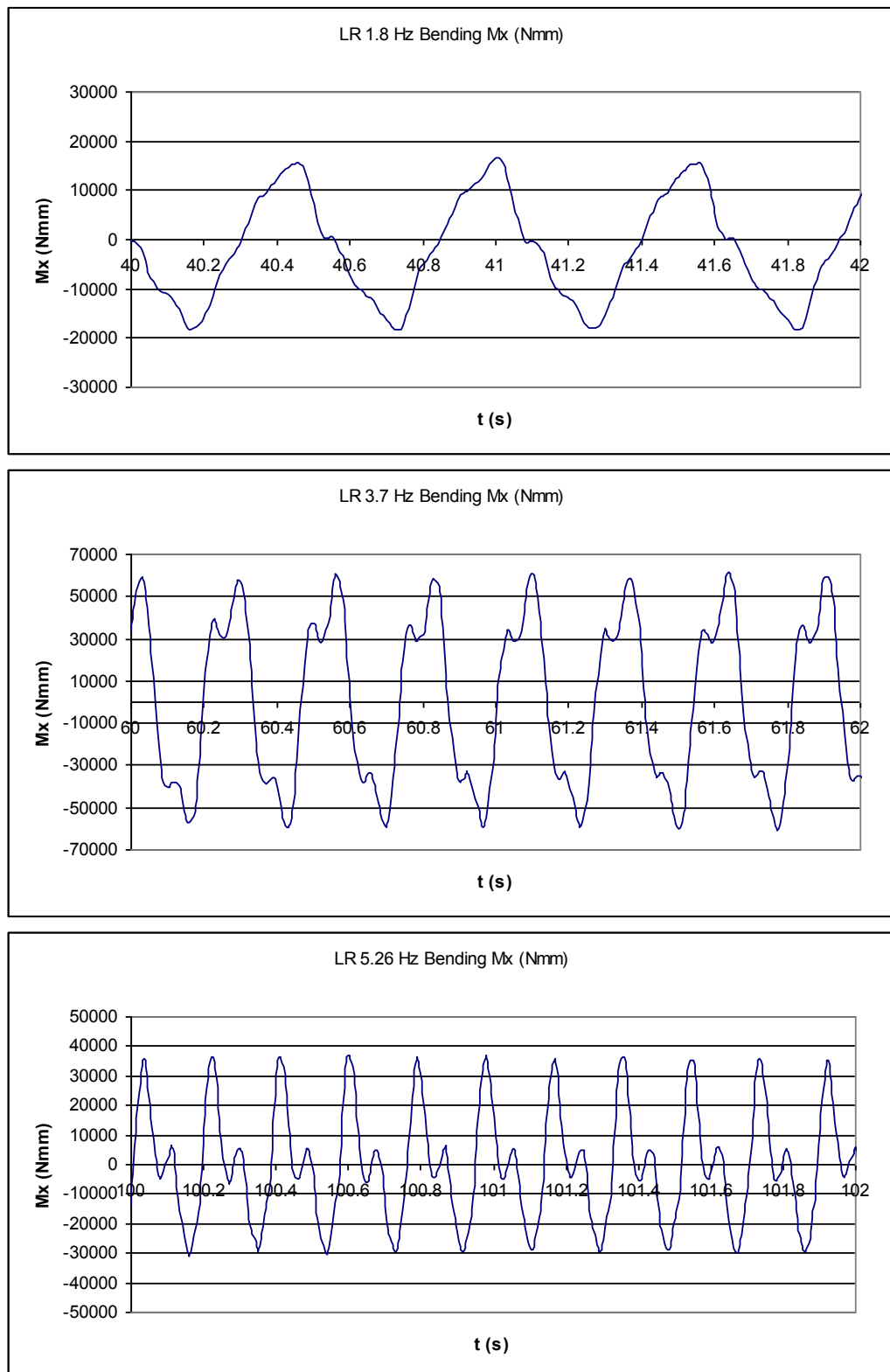


Figura 3-34: Gràfiques de moment flector M_x per eix de suport UR a les 3 velocitats d'excitació

▪ **Moment flector M_z per eix de suport LR:**

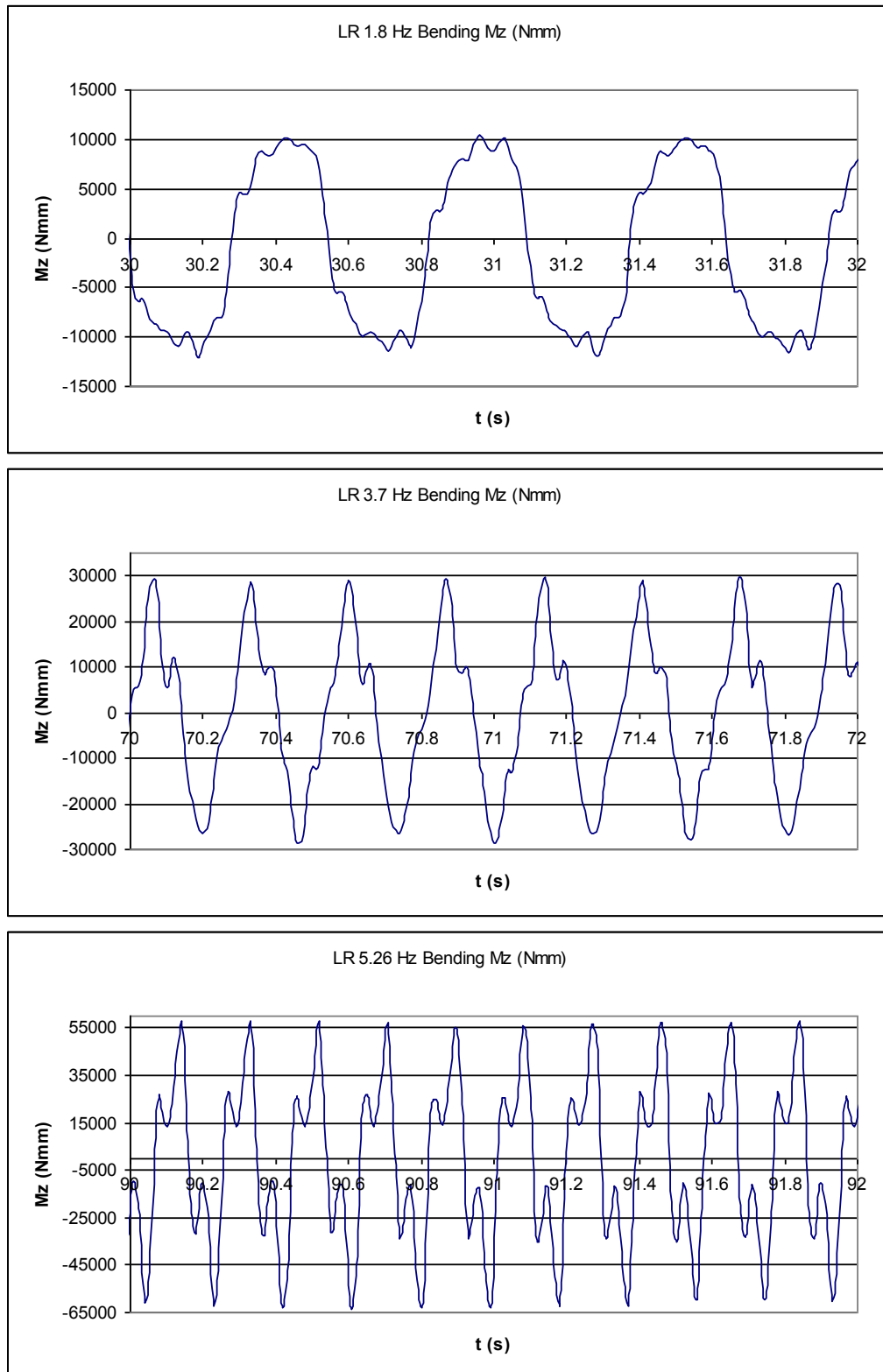


Figura 3-35: Gràfiques de moment flector M_z per eix de suport UR a les 3 velocitats d'excitació

3.12.3.4 Resultat del test d'esforç tallant

El comportament de l'esforç tallant de reacció en direcció X-X (F_x) i en direcció Z-Z (F_z), per cada velocitat d'excitació del motor i per cada eix de suport analitzat, queda reflectit a les següents gràfiques.

- ***Esforç tallant F_x per eix de suport UL:***

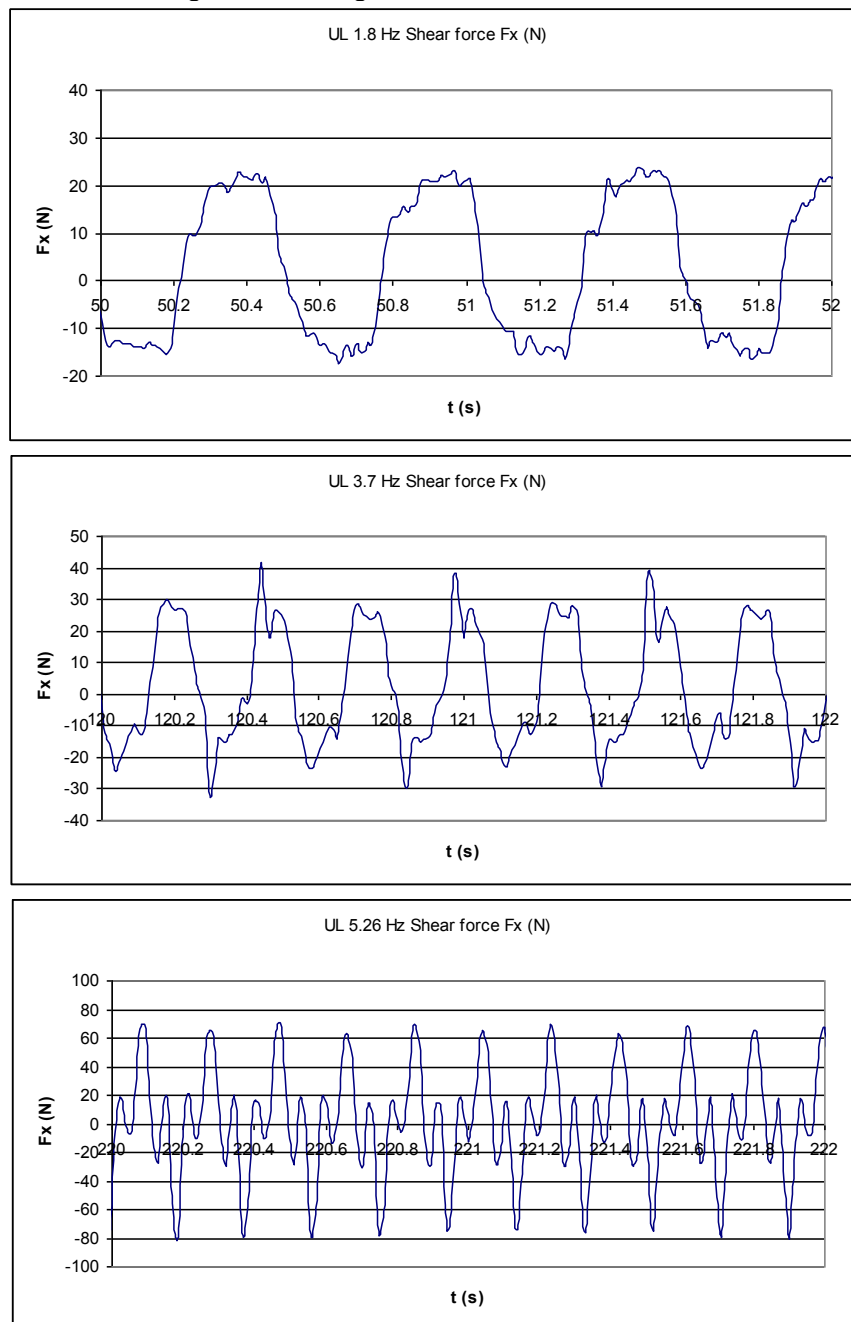


Figura 3-36: Gràfiques d'esforç tallant F_x per eix de suport UL a les 3 velocitats d'excitació

▪ **Esforç tallant F_z per eix de suport UL:**

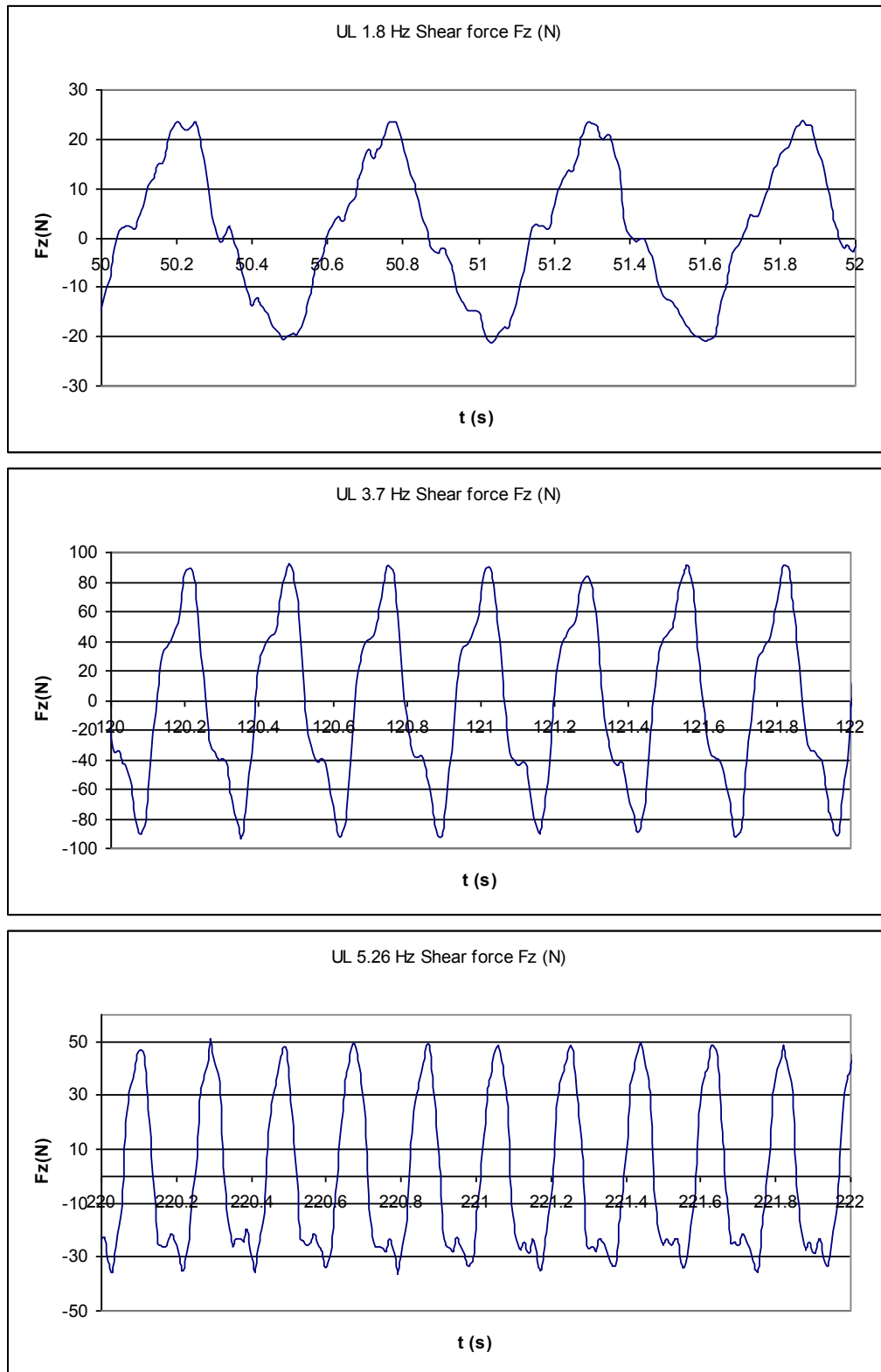


Figura 3-37: Gràfiques d'esforç tallant F_z per eix de suport UL a les 3 velocitats d'excitació

▪ **Esforç tallant F_x per eix de suport LL:**

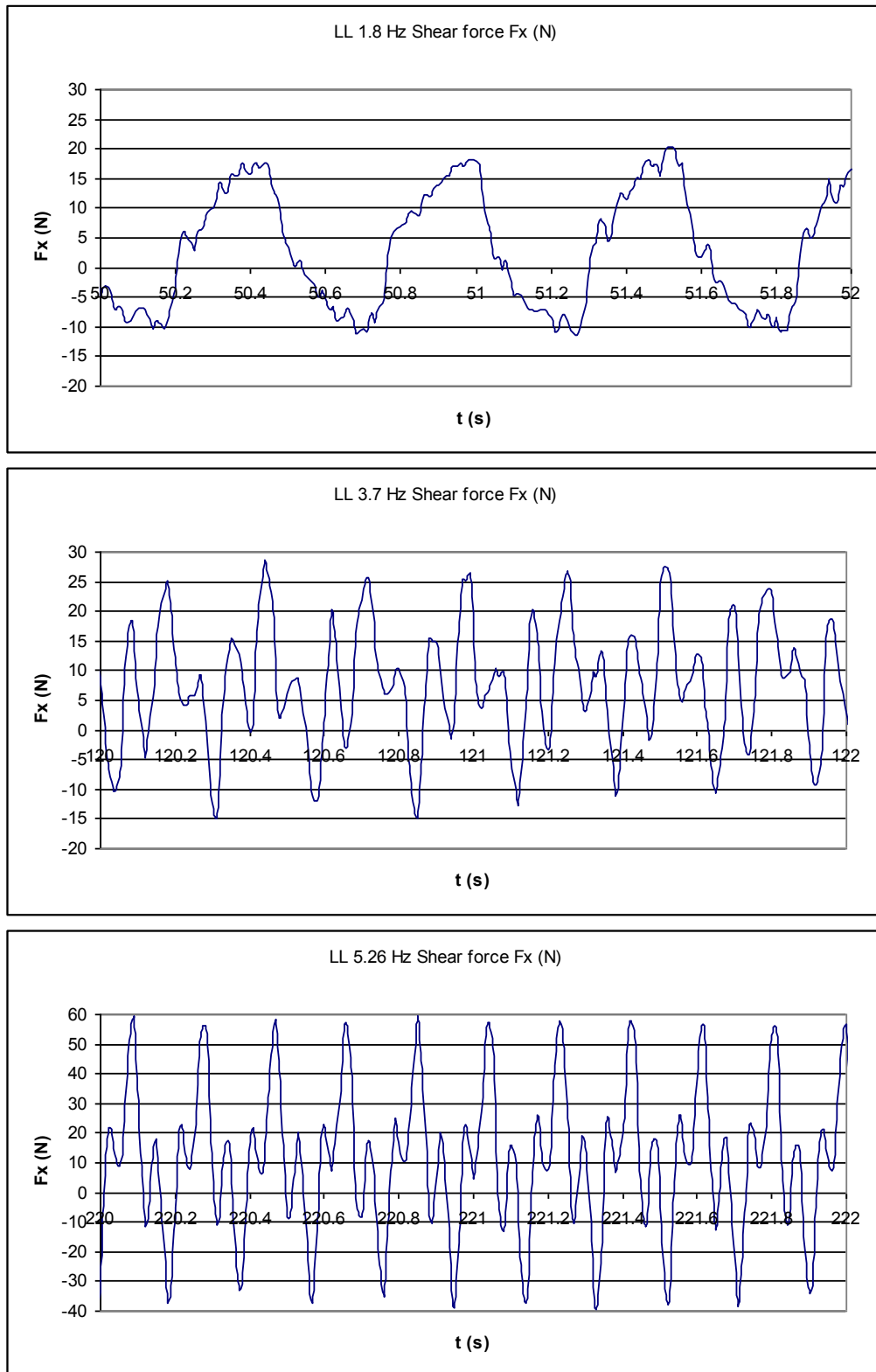


Figura 3-38: Gràfiques d'esforç tallant F_x per eix de suport LL a les 3 velocitats d'excitació

▪ **Esforç tallant F_z per eix de suport LL:**

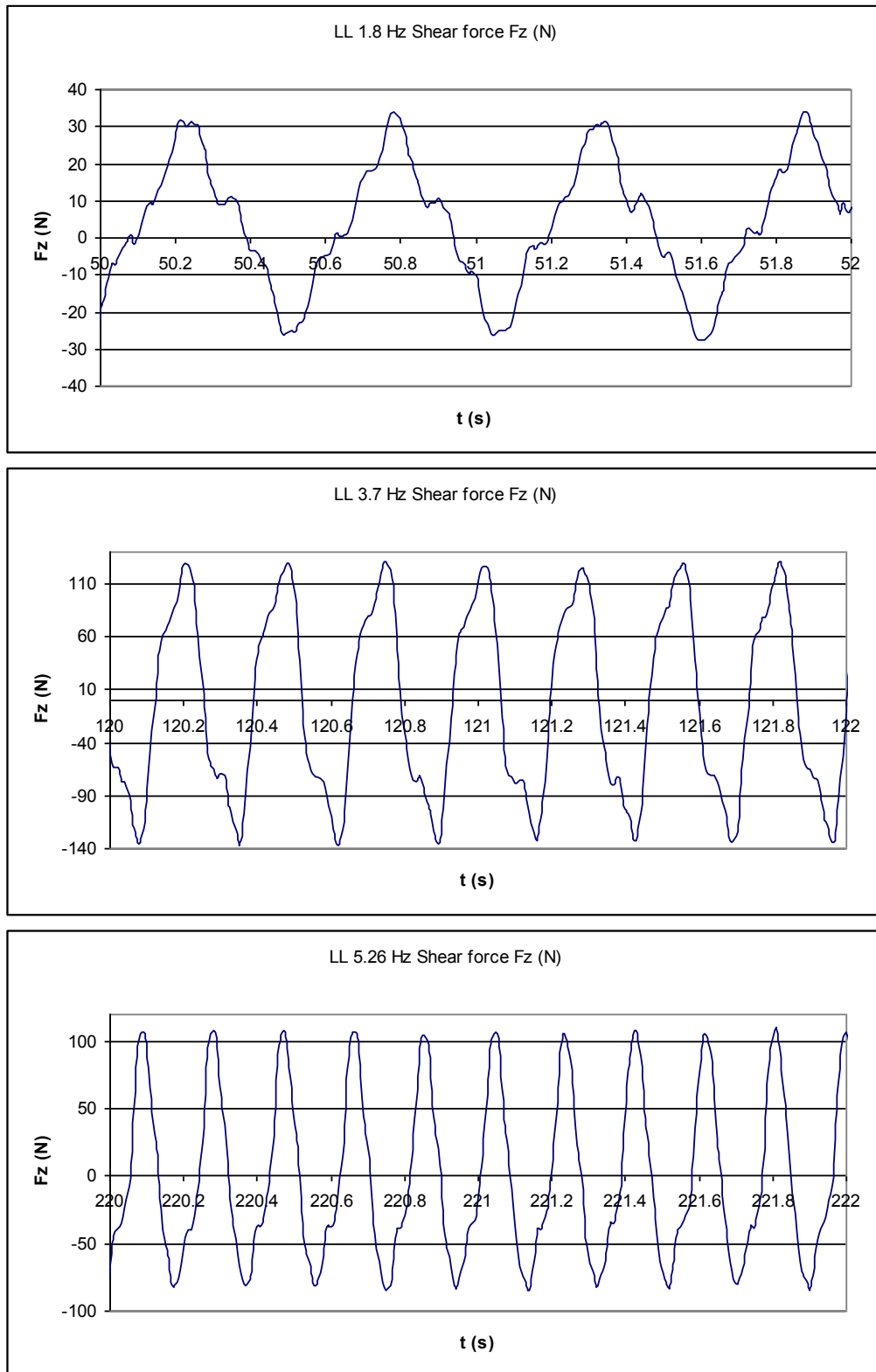


Figura 3-39: Gràfiques d'esforç tallant F_z per eix de suport LL a les 3 velocitats d'excitació

▪ **Esforç tallant F_x per eix de suport UR:**

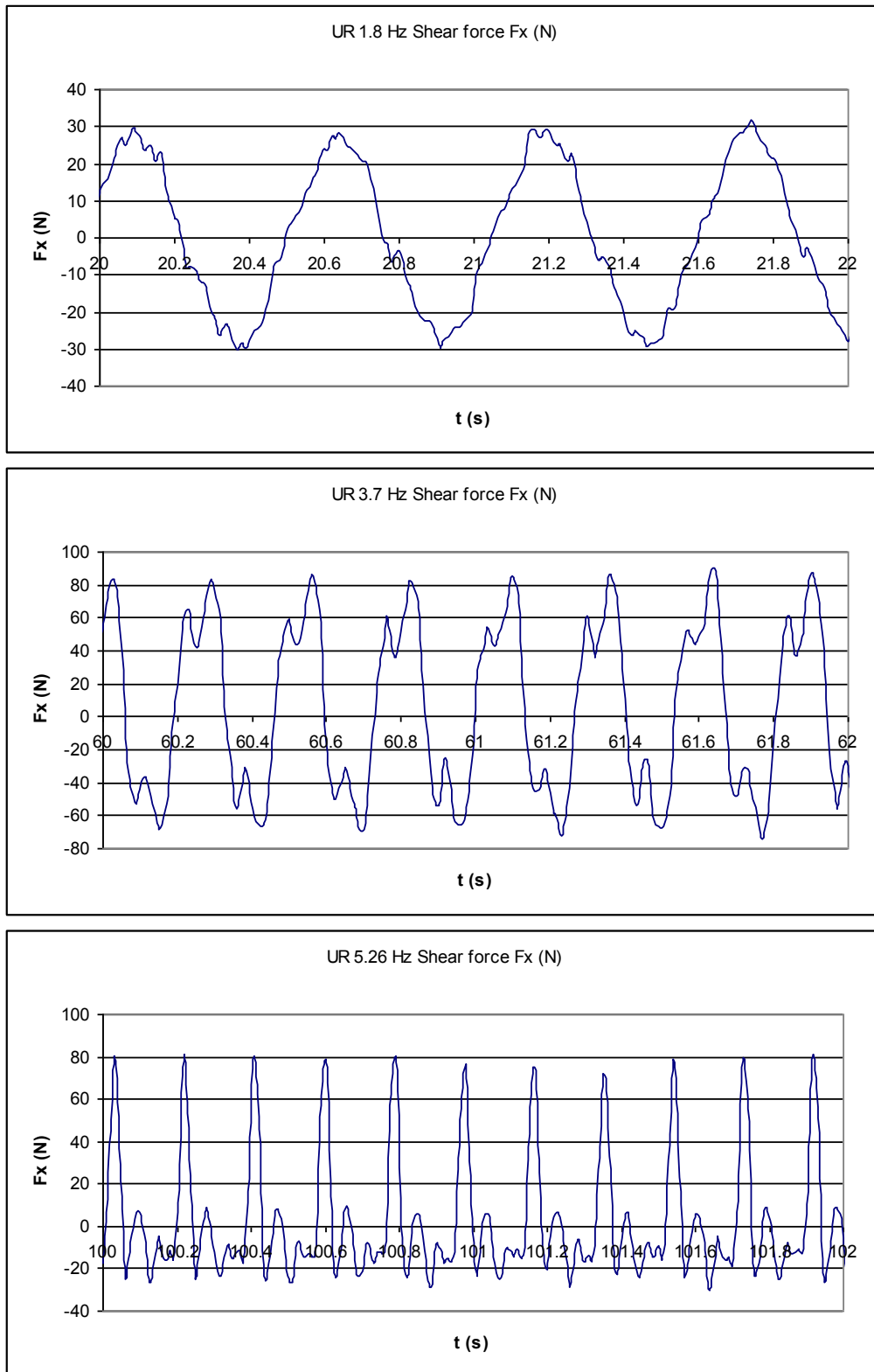


Figura 3-40: Gràfiques d'esforç tallant F_x per eix de suport UR a les 3 velocitats d'excitació

▪ **Esforç tallant F_z per eix de suport UR:**

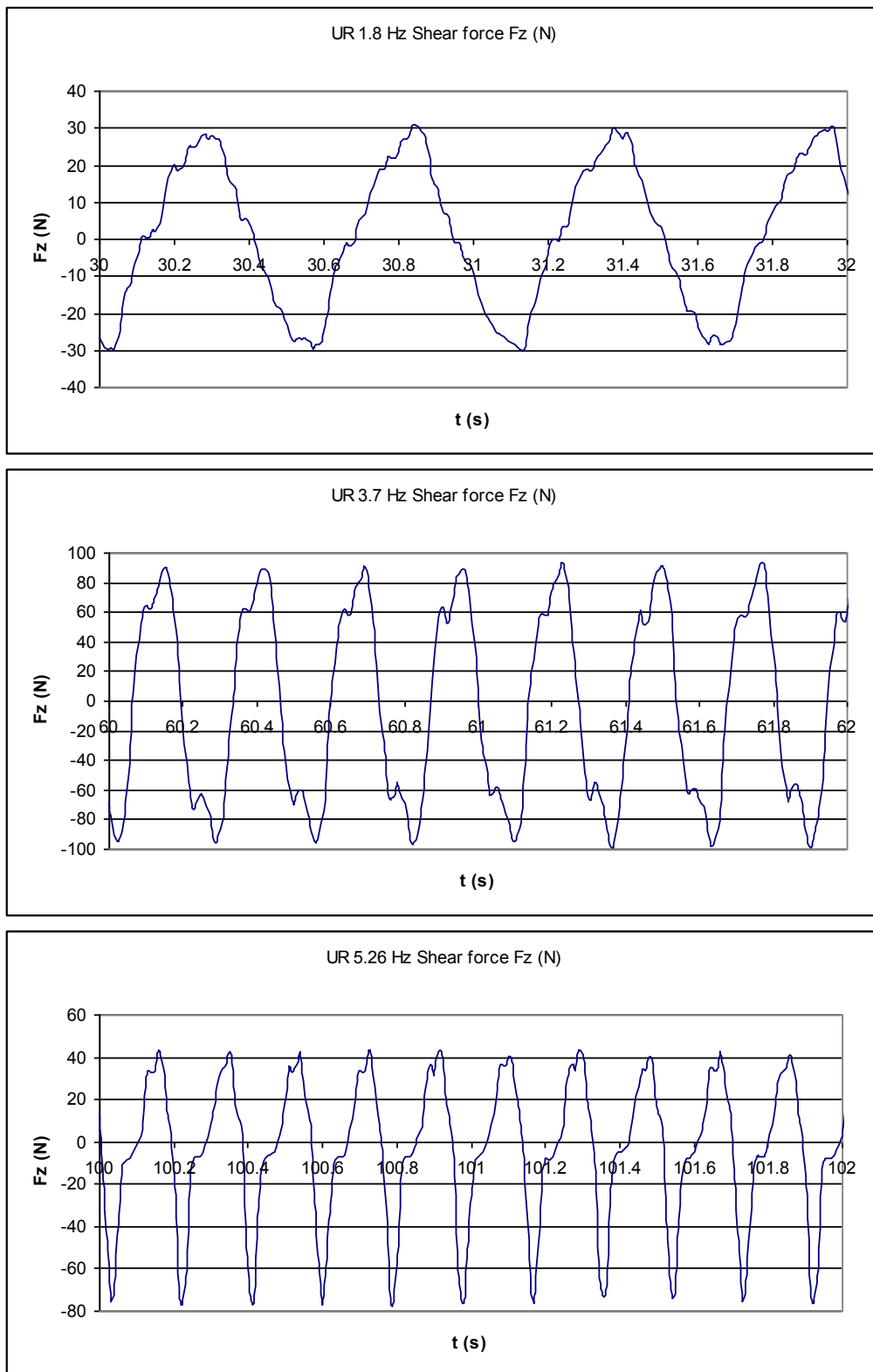


Figura 3-41: Gràfiques d'esforç tallant F_z per eix de suport UR a les 3 velocitats d'excitació

▪ **Esforç tallant F_x per eix de suport LR:**

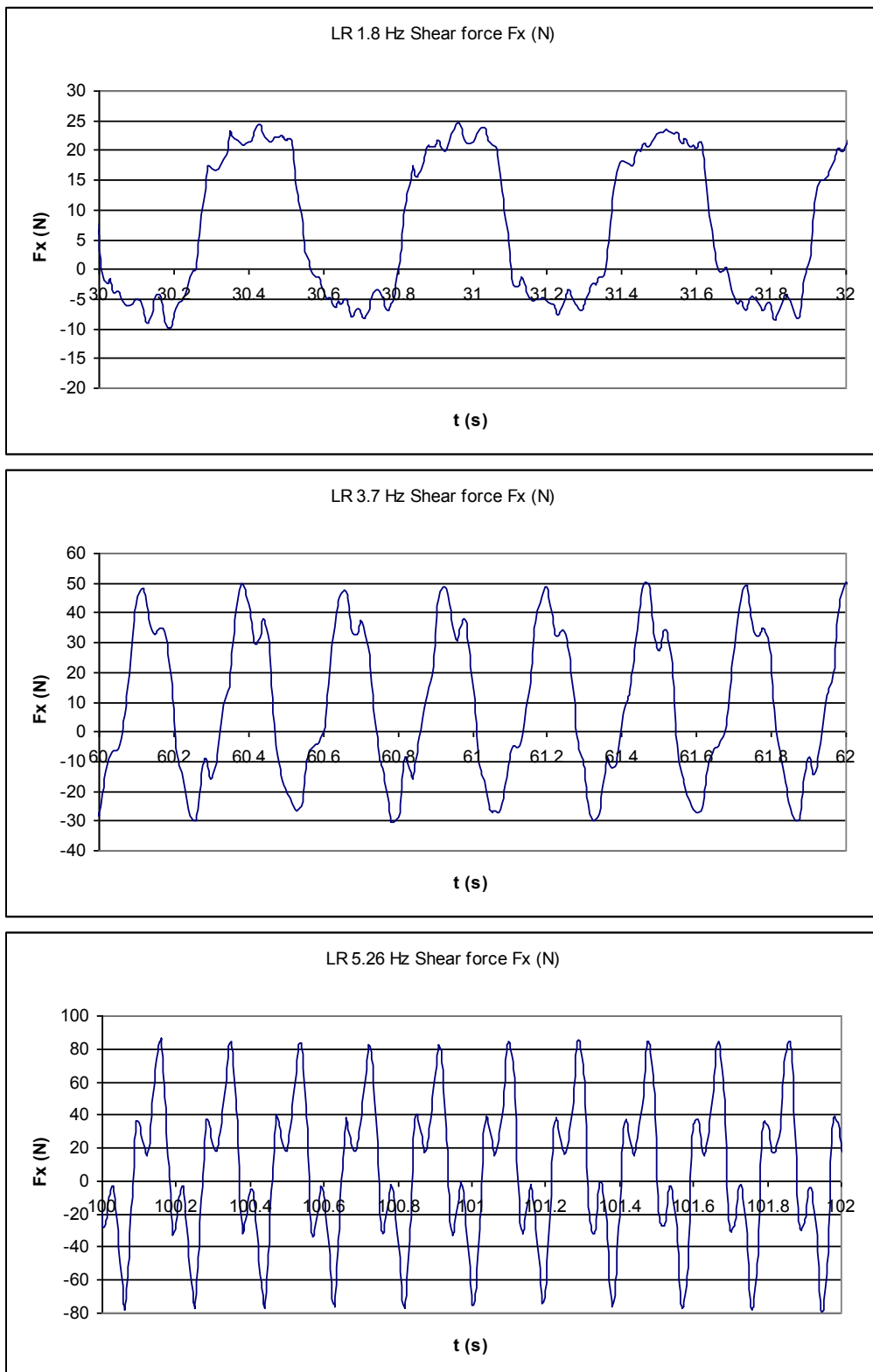


Figura 3-42: Gràfiques d'esforç tallant F_x per eix de suport LR a les 3 velocitats d'excitació

▪ **Esforç tallant F_z per eix de suport LR:**

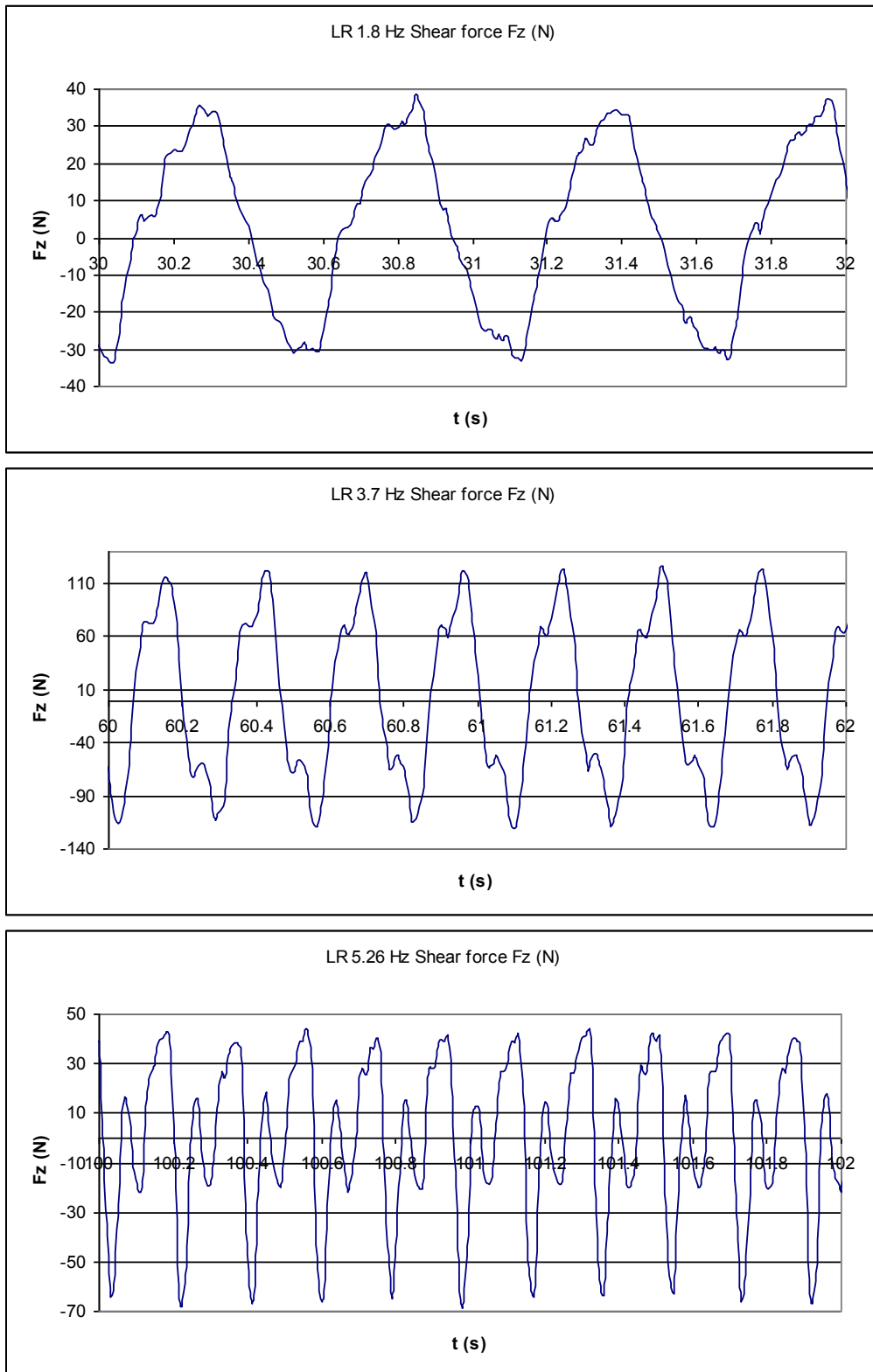


Figura 3-43: Gràfiques d'esforç tallant F_z per eix de suport LR a les 3 velocitats d'excitació

3.12.3.5 Conclusions dels tests de moment flector i esforç tallant

La següent taula mostra un resum dels valors d'amplitud pels moments flexors i els esforços tallants d'acord amb les gràfiques presentades anteriorment:

Eix de suport	Freq. Excitació (Hz)	Amplituds i intervals de les Forces i parells mesurats			
		M_x (Nm)	F_z (kN)	M_z (Nm)	F_x (kN)
UL	1.8	26 (-15,11)	43 (-21,23)	17 (-8,9)	38 (-16,22)
	3.7	101 (-54,47)	180 (-90,90)	42 (-21,21)	70 (-30,40)
	5.26	49 (-30,19)	87 (-37,50)	83 (-44,39)	148 (-80, 68)
LL	1.8	29 (-17,12)	58 (-26,32)	20 (-10,10)	27 (-10,17)
	3.7	120 (-60,60)	268 (-138,130)	50 (-26,24)	41 (-15,26)
	5.26	74 (-44,30)	188 (-80,108)	102 (-52,50)	96 (-38,58)
UR	1.8	27 (-14,13)	60 (-30,30)	14 (-6,8)	60 (-30,30)
	3.7	89 (-44,45)	188 (-98,90)	41 (-20,21)	151 (-68,83)
	5.26	63 (-32,31)	117 (-75,42)	75 (-39,36)	106 (-26,80)
LR	1.8	34 (-18,16)	69 (-34,35)	21 (-11,10)	35 (-10,25)
	3.7	120 (-60,60)	233 (-115,118)	56 (-26,30)	80 (-30,50)
	5.26	65 (-30,35)	107 (-65,42)	121 (-65,56)	162 (-79,83)

Taula 3-12: Resum dels valors de moments flexors i esforços tallants

De la taula anterior se'n poden extreure les següents conclusions:

- El valor màxim de moments flexors és 121 Nm, i es produeix en la direcció Z-Z de l'eix de suport LR per una freqüència d'excitació de 5.26Hz. Es comprova que aquest valor, obtingut experimentalment, s'aproxima adequadament al valor teòric esperat (error del 2.6% respecte el valor teòric de 117.9Nm, calculat a apartat 3.10.4).
- El valor màxim de força tallant es troba en la direcció Z-Z, tal i com era d'esperar ja que en aquesta direcció és també on actua el pes del Sistema VIF i el pes del conjunt excitador. No obstant, presenta un valor màxim de 268kN que no es correspon amb el valor teòric esperat (503.3N, calculat a apartat 3.10.4). L'explicació d'aquest fet s'exposa al següent apartat (apartat 3.12.3.6).
- Cal destacar també l'evolució que segueixen els moments flexors i les forces tallants a mesura que augmenta la freqüència d'excitació:
 - *Moments flexors que actuen en direcció Z-Z (M_z) i forces que actuen en direcció X-X (F_x):* s'observa com els valors dels moments flexors i forces tallants augmenten de valor a l'augmentar la freqüència d'excitació, tal i com era d'esperar.
 - *Moments flexors que actuen en direcció X-X (M_x) i forces que actuen en direcció Z-Z (F_z):* s'observa com els moments flexors màxims i les forces tallants màximes es produeixen a la freqüència de 3.7Hz i no pas a la

màxima freqüència de 5.26Hz. Això s'atribueix al fet que la freqüència de 3.6Hz és propera a la freqüència pròpia del conjunt excitador (2.6Hz, veure apartat 3.10.1), i per tant es produeix una certa amplificació de l'excitació (veure com les amplituds Z_{\max} a Taula 3-2 també presenten aquesta amplificació a 3.6Hz). Això té afecte sobre la magnitud de les forces tallants en direcció Z-Z (F_Z), que són les responsables del moment flector en direcció X-X (M_X). En canvi, aquesta amplificació no es produeix per les càrregues en direcció X-X (F_X) perquè aquestes no es veuen afectades pel sistema de molles del conjunt excitador que actua en direcció Z-Z, i per tant no hi ha amplificació del moment flector en direcció Z-Z (M_Z).

3.12.3.6 Calibratge final de galgues. Anàlisi de Crosstalk

Un cop realitzat el test, s'ha desmuntat el Sistema VIF dels eixos de suport on estan les galgues instrumentalitzades, i s'ha procedit al calibratge final de les galgues extensomètriques per tal de validar els resultats de tests obtinguts. S'han situat uns pesos coneguts a distància coneguda respecte les galgues extensomètriques, i s'ha comparat el valor experimental obtingut de forces i moments amb el valor teòric que hauria de ser segons anàlisi.

A la següent imatge s'aprecia la càrrega situada a l'extrem de l'eix. Aquest eix està col·lat a l'eix de suport on es troben mesurant les galgues extensomètriques.

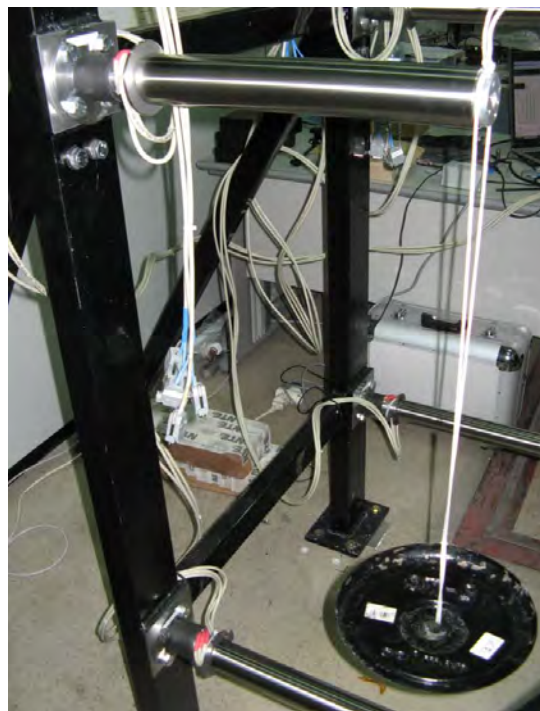


Figura 3-44: Muntatge de validació dels resultats de forces i moments

Aquesta calibració final és equivalent a la calibració inicial realitzada pel moment flector però sense necessitat de fer el desmuntatge dels eixos de suport de la bancada.

Efectuant aquesta calibració en direcció X-X i en direcció Z-Z sobre els quatre eixos de suport, s'ha obtingut els següents resultats:

Eix de suport	Direc. força	Forces i parells teòrics			Forces i parells experimentals (mesurats per les galgues)			
		Pes (N)	Dist. (m)	Parell (Nm)	M _x (Nm)	F _z (N)	M _z (Nm)	F _x (N)
UL	Z-Z	49	0,415	20,34	23	170	0,28	15
		98	0,415	40,67	45,8	343	0,47	26
		196	0,415	81,34	92,7	684	0,80	50
	X-X	93,65	0,415	38,86	1,93	21	40,36	221
		51,9	0,415	21,54	0,64	3	23,04	122
UR	Z-Z	49	0,415	20,34	23,09	150	1,00	74
		98	0,415	40,67	46,40	306	1,90	138
		196	0,415	81,34	98,85	639	3,50	268
	X-X	51,7	0,415	21,46	1,47	53	23,58	129
		101,5	415	42,12	3,12	100	45,45	256
LL	Z-Z	49	0,415	20,34	22,40	134	0,60	5
		98	0,415	40,67	45,10	271	1,20	13
		205,8	0,415	85,41	96,40	580	2,63	31
	X-X	51,5	0,415	21,37	1,14	4	24,98	106
		100,9	0,415	41,87	2,46	7	44,09	205
LR	Z-Z	49	0,415	20,34	22,60	128	0,23	10
		98	0,415	40,67	45,00	250	0,50	25
		205,8	0,415	85,41	96,42	517	1,17	60
	X-X	52,7	0,415	21,87	0,09	14	23,14	123
		100,9	0,415	41,87	0,46	31	51,04	267

Taula 3-13: Resultats de forces i moments pels 4 eixos de suport i per les direccions X-X i Z-Z

Els colors de les caselles corresponen a:

	Valors de forces i moments teòrics. ($M=F \cdot d$)
	Valors de forces i moments experimentals: mesura en la mateixa direcció que els teòrics (valor hauria de ser igual al teòric)
	Valors de forces i moments experimentals: mesura en direcció perpendicular als teòrics (valor hauria de ser nul)

Aquesta taula indica com aplicant un pes a una distància de 415mm de la secció on estan les galgues extensomètriques, s'acaben obtenint unes forces i moments mesurats experimentalment per les galgues en la direcció de la força i també unes altres forces i

moments, que no haurien d'existir, mesurats també per les galgues en les direccions perpendiculars a les galgues. Aquesta aparició de forces perpendiculars a la força teòrica s'anomena *Crosstalk* entre forces. Mentre que l'aparició de moments perpendiculars al moment teòric s'anomena *Crosstalk* entre moments.

De l'anàlisi de la següent taula s'extreuen les següents conclusions:

- Segons les lectures de les galgues, apareixen forces i moments en direccions perpendiculars on tant el valor de força com el de moment haurien de ser nul. Hi ha *Crosstalk* entre forces i també *Crosstalk* entre moments.
- S'observa com els valors de moments flectors mesurats per les galgues a la mateixa direcció que els teòrics, no difereixen massa dels valors teòrics (la quantificació del percentatge d'error es pot veure a la següent Taula 3-14).
- Els valors de forces mesurades per les galgues a la mateixa direcció que els teòrics, si que difereixen molt dels valors teòrics (fins a 3.5 vegades).
- Els valors de moments flectors mesurats per les galgues a la direcció perpendicular als teòrics representen entre 0,4% i 7,4% del valor de parell teòric.
- Els valors de les forces mesurades per les galgues a la direcció perpendiculars a les teòriques representen entre un 5% i un 150% del valor de parell teòric.

3.12.3.6.1 Calibració de forces tallants

Els valors de forces tallants que s'han obtingut en el test no presenten valors fiables degut a les següents raons:

- ***Crosstalk* entre forces:** Els valors de forces tallants estan influïts per forces tallants perpendiculars a la mesurada. Això és degut a que un petit angle en la posició angular de les galgues extensomètriques en l'eix de suport, fa que aquestes ja mesurin una certa component perpendicular a la real.
- ***Crosstalk* de moments sobre forces:** Es comprova com un moment flector pur aplicat sobre un eix de suport, també acaba ocasionant lectures de forces tallants per part de les galgues extensomètriques. Per tant, es pot concloure que també apareix l'efecte de *crosstalk* de moments sobre forces.
- **Un petit error en la mesura de moments acaba produint grans errors en les mesures de forces:** Degut a les magnituds de les dades vinculades al test, un petit error de mesura en els moments, ocasiona un gran error sobre el valor de les forces tallants. Cal recordar que les forces tallants es mesuren a partir dels moments flectors, tal i com s'ha apuntat a l'apartat 3.10.2.

Segons els raonaments anteriors, s'analitzen les possibles alternatives per l'anàlisi de les forces tallants:

a. Correlació de forces tallants: Seria possible corregir el valor mesurat de forces tallants usant els valors de *crosstalk* entre forces a partir de rectes de calibració que eliminin aquest *crosstalk* entre forces. No obstant, no és possible corregir el valor mesurat de forces amb els valors de *crosstalk* de moments sobre forces perquè no es pot discernir aquest valor. És a dir, no és possible conèixer quin percentatge del valor de força tallant és degut a un *crosstalk* de moments i quin és degut a un *crosstalk* de forces. Per tant, d'acord amb aquest raonament, no és possible corregir els valors de força tallant sense efectuar tests addicionals que permetin determinar aquestes influències de *crosstalk* de moments (tests que consistirien en aplicar moments purs sobre els eixos de suport, o bé tests modificant la distància del pes a les galgues per tal d'obtenir valors diferents de moment flector pel mateix valor de força tallant, o bé per obtenir diferents valors de força tallant pel mateix valor de moment flector).

b. Determinació de les forces tallants a partir de FEM: Les forces tallant no són imprescindibles per la correlació del model FEM. Per tant, és possible desestimar els valors experimentals obtinguts de força tallant sense penalitzar els resultats de correlació. En aquest sentit, es procediria a correlar el model FEM usant moments flexors, acceleracions i desplaçaments. Un cop correlat el model FEM seria possible determinar les forces tallants a partir del model FEM.

c. Correcció a partir de nova metodologia de test: seria possible eliminar el *crosstalk* en el test de forces tallants implementant un connexionat de galgues adequat per eliminar la influència de les forces perpendiculars sobre la mesura. No obstant, degut a les reduïdes dimensions dels eixos de suport, on van allotjades les galgues, aquesta opció no és viable.

Finalment, es procedirà d'acord amb allò expressat al punt b, correlant el model FEM a partir dels moments flexors, i obtenint les forces tallants usant el model FEM ja correlat. El fet que les forces tallants no siguin una variable imprescindible per la correlació del model FEM, ja que poden ser determinades a partir dels moments flexors, és el raonament principal que justifica aquesta decisió. En qualsevol cas, també s'ha exposat el camí a seguir per l'obtenció experimental de les forces tallants sense l'efecte de *crosstalk* (punts a. i c.).

3.12.3.6.2 Calibració de moments flexors

Tal i com s'ha explicat a l'apartat 3.12.3.6., els moments flexors obtinguts experimentalment també presenten un *Crosstalk* de moments. A continuació, s'avalua el percentatge mig d'error que s'estima pels moments flexors per cada un dels eixos de suport, a partir de comparar el moment flector teòricament calculat ($M=F \cdot f$), amb el moment flector experimentalment obtingut:

Eix de suport	Direcció de força	Moment teòric (Nm)	Moment experimental M_x (Nm)	Error (%)	Error Mig (%)
UL	F en Z-Z	20,34	23,00	13,11	13,2
		40,67	45,80	12,61	
		81,34	92,70	13,97	
	F en X-X	38,86	40,36	3,84	5,4
		21,54	23,04	6,95	
UR	F en Z-Z	20,34	23,09	13,54	16,4
		40,67	46,40	14,09	
		81,34	98,85	21,53	
	F en X-X	21,46	23,58	9,88	8,9
		42,12	45,45	7,90	
LL	F en Z-Z	20,34	22,40	10,15	11,3
		40,67	45,10	10,89	
		85,41	96,40	12,87	
	F en X-X	21,37	24,98	16,88	11,1
		41,87	44,09	5,29	
LR	F en Z-Z	20,34	22,60	11,14	11,6
		40,67	45,00	10,65	
		85,41	96,42	12,90	
	F en X-X	21,87	23,14	5,79	13,8
		41,87	51,04	21,90	

Taula 3-14: Resultats del percentatge mig d'error en els resultats de moment pels 4 eixos de suport

S'observa que l'eix de suport *Upper Right* (UR) és el que presenta major error mig entre el parell teòric i el parell mesurat per les galgues extensomètriques (16.4%). L'eix de suport *Upper Left* (UL) és el que presenta el menor error mig (5.4%). L'error mig total, promig dels errors mitjos de cada eix, és de 11.5%.

D'acord amb aquests valors d'error, i gràcies a la linealitat de les galgues extensomètriques, és possible calibrar els resultats de moment flector exposats a la Taula 3-12 per tal d'eliminar l'efecte *Crosstalk*. Així doncs, el resultat dels moments flectors ja calibrats, s'exposa a la següent taula:

Eix de suport	Freq. Excitació (Hz)	Moment flector M_x			Moment flector M_z		
		M_x (Nm)	Factor de calibració (%)	M_x Calibrat (Nm)	M_z (Nm)	Factor de calibració (%)	M_z Calibrat (Nm)
UL	1.8	26	5,4	24,60	17	13,2	14,76
	3.7	101		95,55	42		36,46
	5.26	49		46,35	83		72,04
LL	1.8	29	11,1	25,78	20	11,3	17,74
	3.7	120		106,68	50		44,35
	5.26	74		65,79	102		90,47
UR	1.8	27	8,9	24,60	14	16,4	11,70
	3.7	89		81,08	41		34,28
	5.26	63		57,39	75		62,70
LR	1.8	34	13,8	29,31	21	11,6	18,56
	3.7	120		103,44	56		49,50
	5.26	65		56,03	121		106,96

Taula 3-15: Taula de calibració: valors de moments flexors M_x i M_z calibrats

Aquestes dades de moments flexors ja calibrats seran els valors utilitzats alhora d'ajustar el comportament del model FEM.

3.12.4 Resultats del Test de Desplaçaments

S'ha realitzat el Test de Desplaçaments per tal d'obtenir les gràfiques del desplaçament que recorre el Sistema VIF i el conjunt excitador respecte la bancada de test quan l'equip s'excita a baixa freqüència (1,8Hz) usant la configuració nominal.

Per la mesura dels desplaçaments del Sistema VIF, s'han situat sensors de posició en els 4 cubs de connexió entre les barres horitzontals i la guia Y-Y. S'ha mesurat el moviment que fan aquests cubs del Sistema VIF en direcció X-Z i Z-Z degut a l'excitació del motor. Aquest cubs s'identifiquen igual que els eixos de suport: UR, UL, LR, LL.

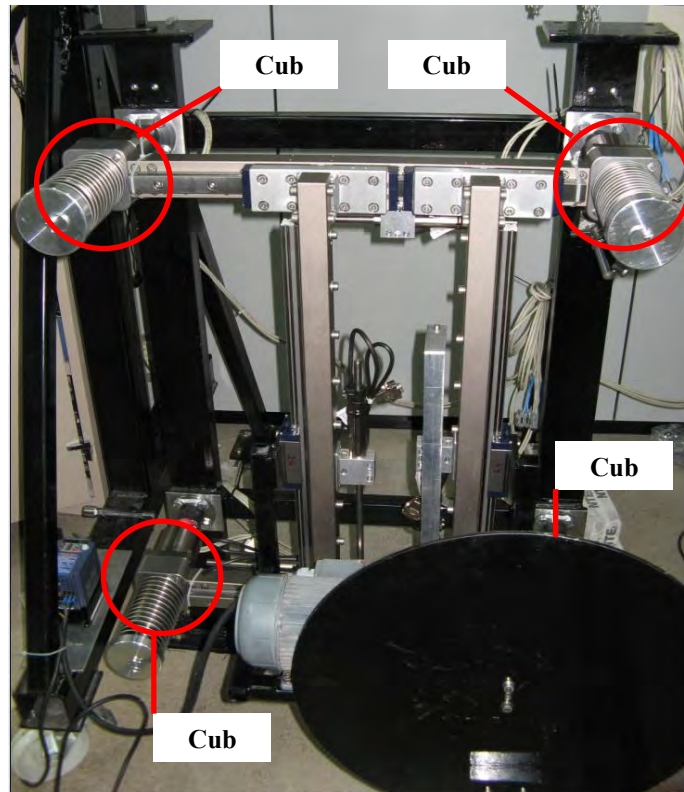


Figura 3-45: Cubs usats per la mesura dels desplaçaments

Per la mesura del desplaçament del conjunt excitador, s'han situat els sensors de posició per tal de mesurar el moviment en les tres direccions X, Y i Z. La següent imatge mostra el lloc on s'han allotjat els tres sensors de posició utilitzats pel test.

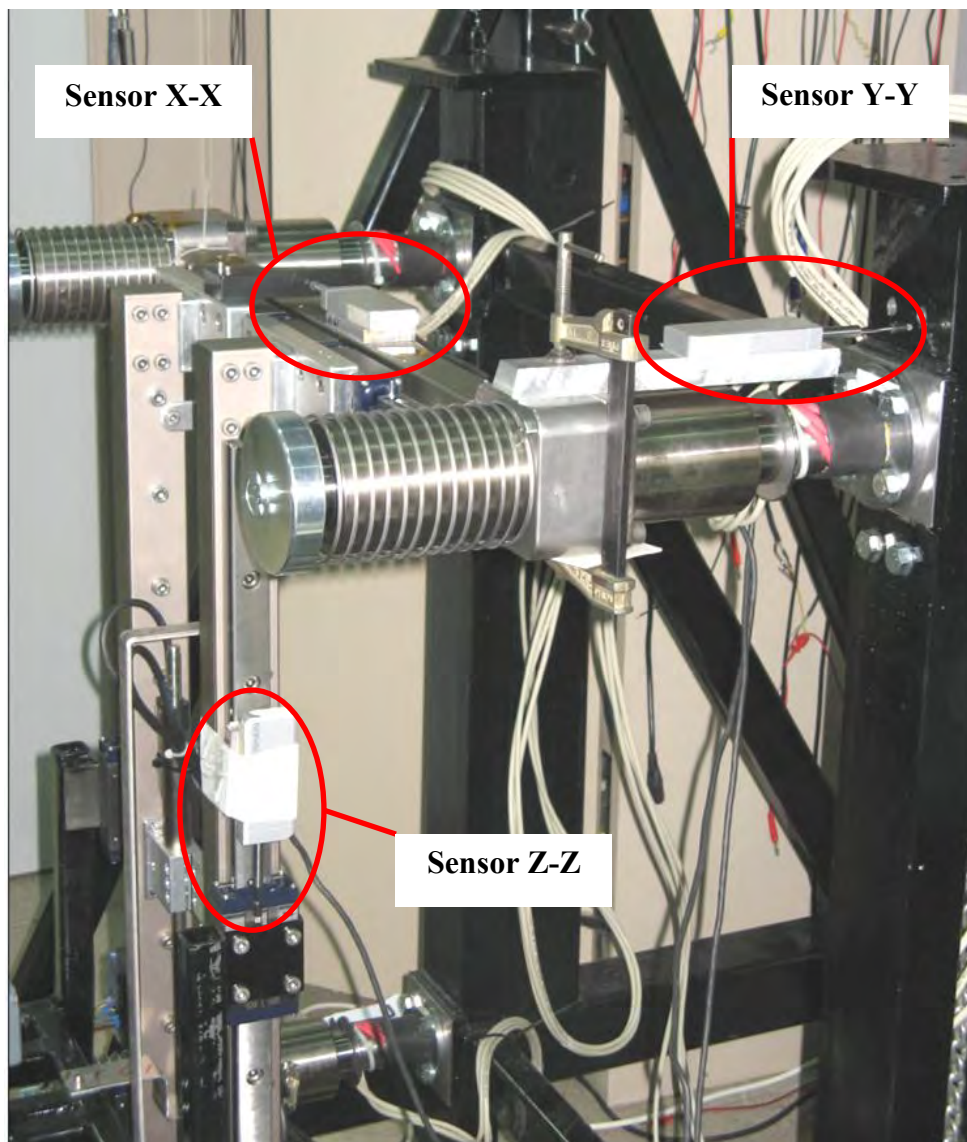


Figura 3-46: Posició dels sensors de desplaçament pel test del conjunt excitador

Cal notar que el desplaçament que es pugui produir en direcció Y-Y en el conjunt excitador coincidirà també amb el desplaçament del Sistema VIF en aquesta direcció ja que el conjunt excitador és solidari al Sistema VIF. Per tant, la mesura del desplaçament en direcció Y-Y s'ha realitzat usant la mesura entre el Cub UR i la bancada (tal i com mostra la imatge).

3.12.4.1 Equip de test

Per la realització del test de desplaçaments s'ha utilitzat el següent instrumental:

- **Sensors de posició:**
 - Fabricant: *Heidenhain*
 - Referència: High-Accuracy Length Gauges MT 25
 - Rang de mesura (mm): de 0 a 25mm
 - Precisió (μm): ± 0.2
 - Protecció (IEC 529): IP 50
- **Equip d'adquisició de dades:**
 - Fabricant: *Heidenhain*
 - Referència: PC Counter Card IK 220
 - N° de canals: 4
 - N° d'unitats: 1
- **Ordinador personal amb software d'adquisició**

3.12.4.2 Taula de test de desplaçaments

El conjunt de tests de desplaçaments realitzats es mostren a la següent taula:

Test n°	Element testejat	Nom Arxiu de Resultat de Test	Connexió del amortidors del Sistema VIF
1	Sistema VIF Cub UL	VIF_displ_7.xls	Amortidors Connectats
2	Sistema VIF Cub UR	VIF_displ_7.xls	Amortidors Connectats
3	Sistema VIF Cub LL	VIF_displ_7.xls	Amortidors Connectats
4	Sistema VIF Cub LR	VIF_displ_7.xls	Amortidors Connectats
5	Conjunt excitador	VIF_displ_7.xls	Amortidors Connectats

Taula 3-16: Llistat d'arxius dels resultats de test de desplaçament

A cada test s'ha obtingut les següents mesures:

- **Mesura de desplaçament en X, Y(UR), Y(UL), i Z pel Conjunt excitador** a freqüència d'excitació de 1,8Hz
- **Mesura de desplaçament en X i Z dels 4 cubs:** a freqüència d'excitació de 1,8Hz

3.12.4.3 Resultat de Test de desplaçaments

Els comportament del desplaçament del Sistema VIF en els quatre cubs UR, UL, LR, i LL per una freqüència d'excitació baixa (1.8Hz) en les direccions X-X i Z-Z queden exposats a les següents gràfiques. Així mateix, també es recull el desplaçament del conjunt excitador a baixa freqüència en direcció X, Y i Z.

- **Desplaçament Sistema VIF cub UL en direcció X i Z :**

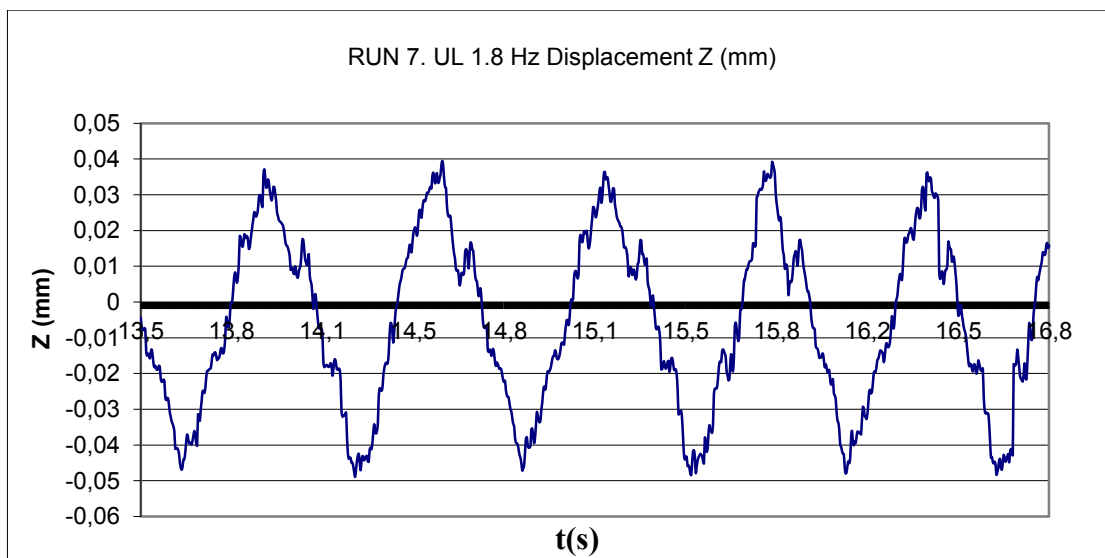
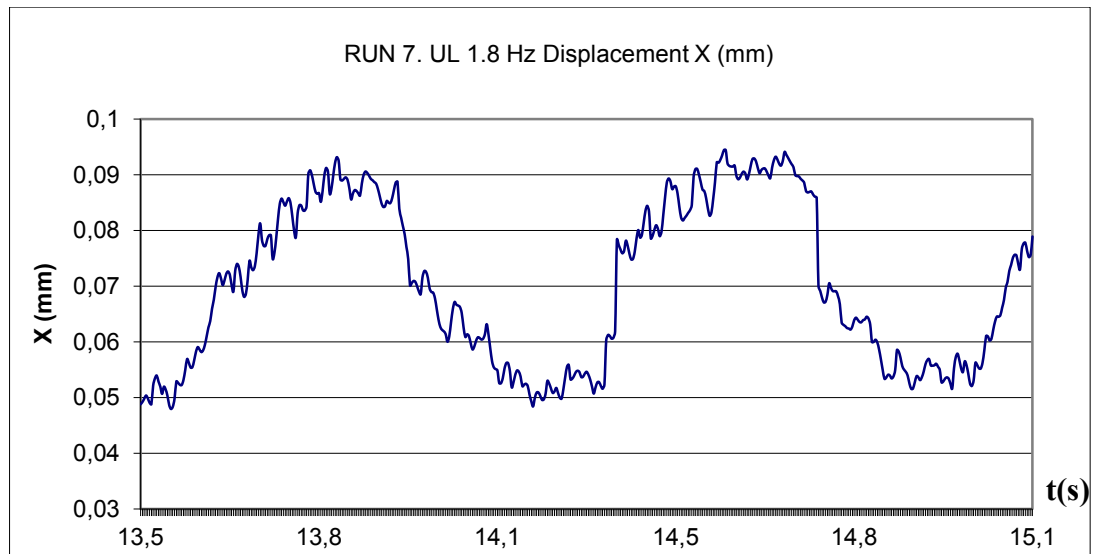


Figura 3-47: Gràfiques de desplaçament del Sistema VIF cub UL en X-X i Z-Z a 1.8 Hz de freqüència d'excitació

▪ **Desplaçament Sistema VIF cub LL en direcció X i Z :**

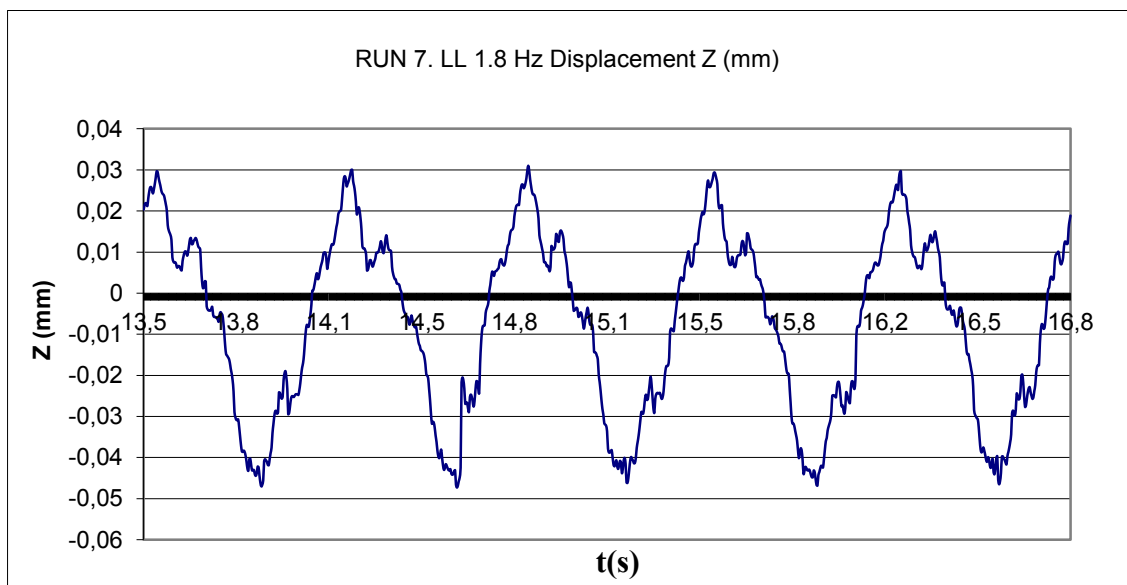
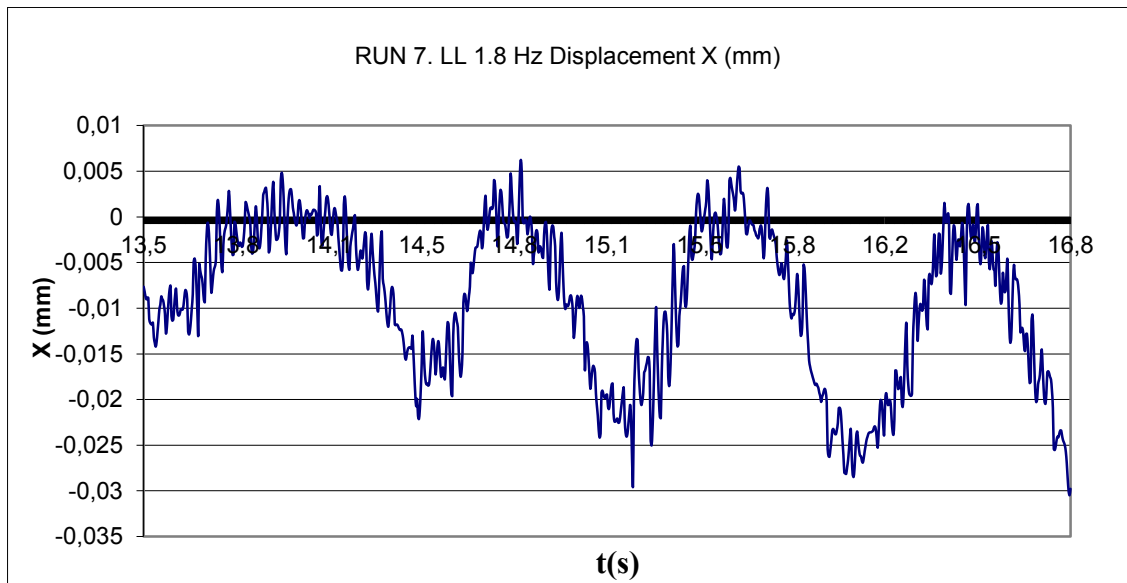


Figura 3-48: Gràfiques de desplaçament del Sistema VIF cub LL en X-X i Z-Z a 1.8 Hz de freqüència d'excitació

▪ **Desplaçament Sistema VIF cub UR en direcció X i Z :**

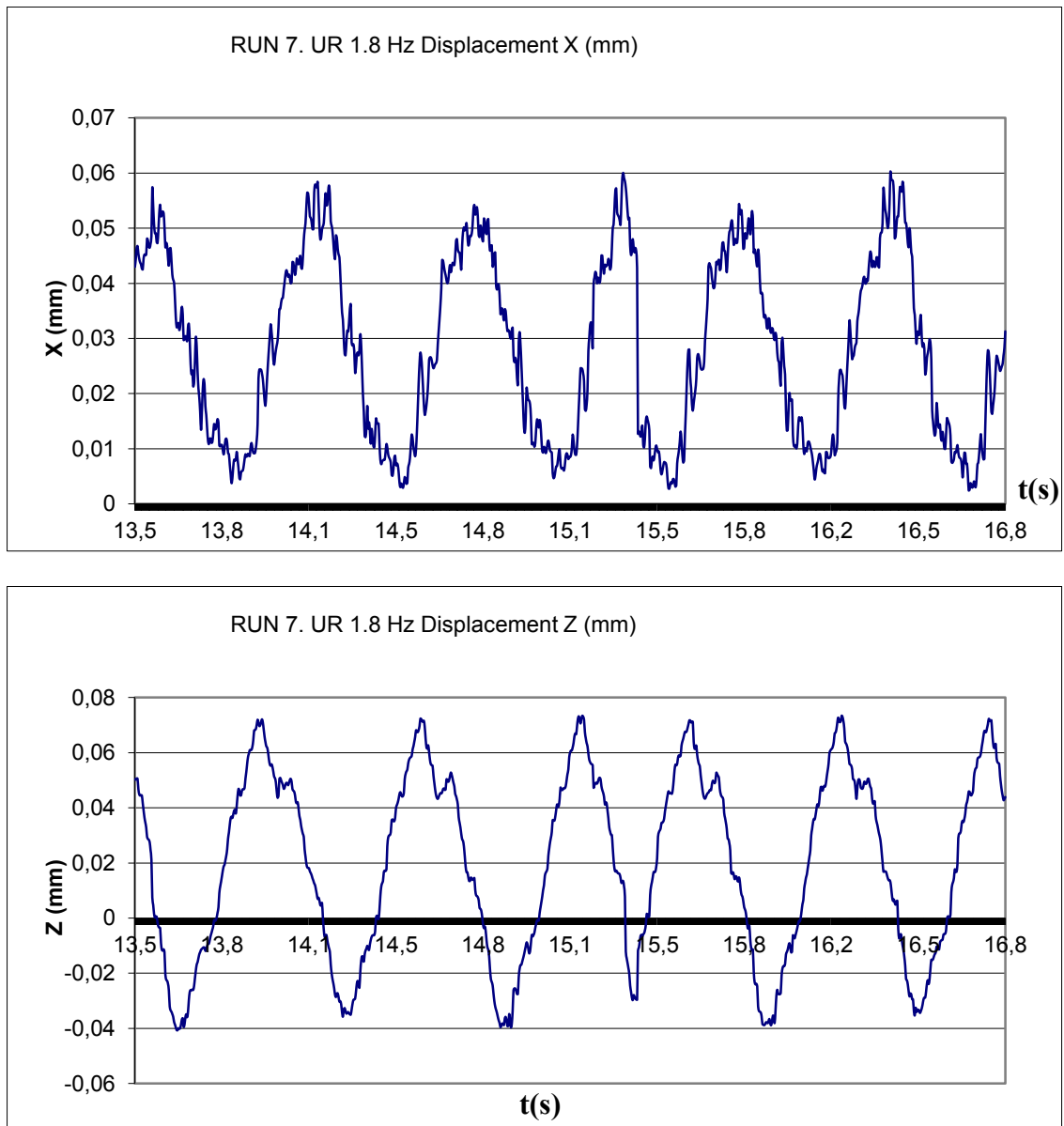


Figura 3-49: Gràfiques de desplaçament del Sistema VIF cub UR en X-X i Z-Z a 1.8 Hz de freqüència d'excitació

▪ **Desplaçament Sistema VIF cub LR en direcció X i Z :**

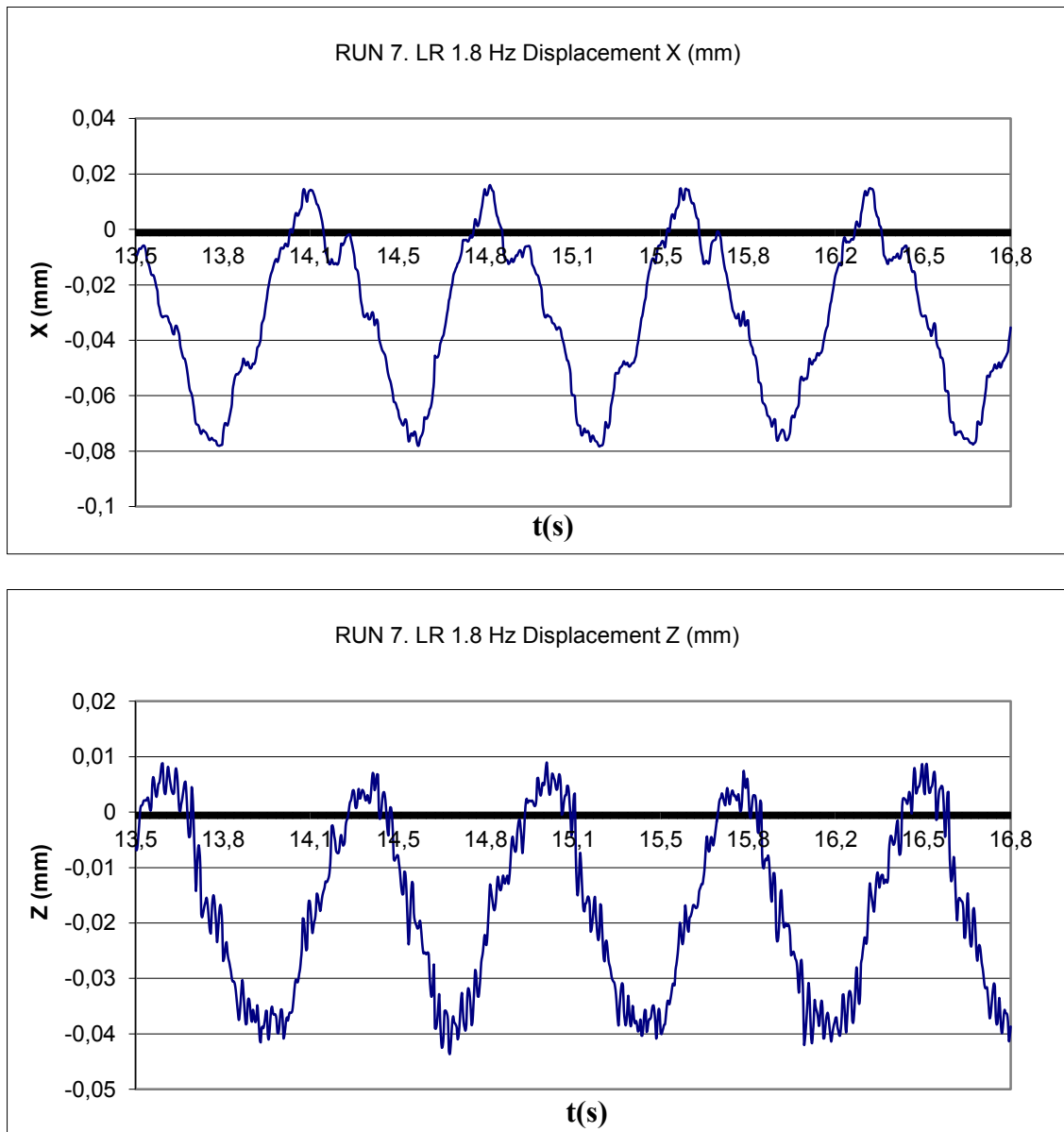
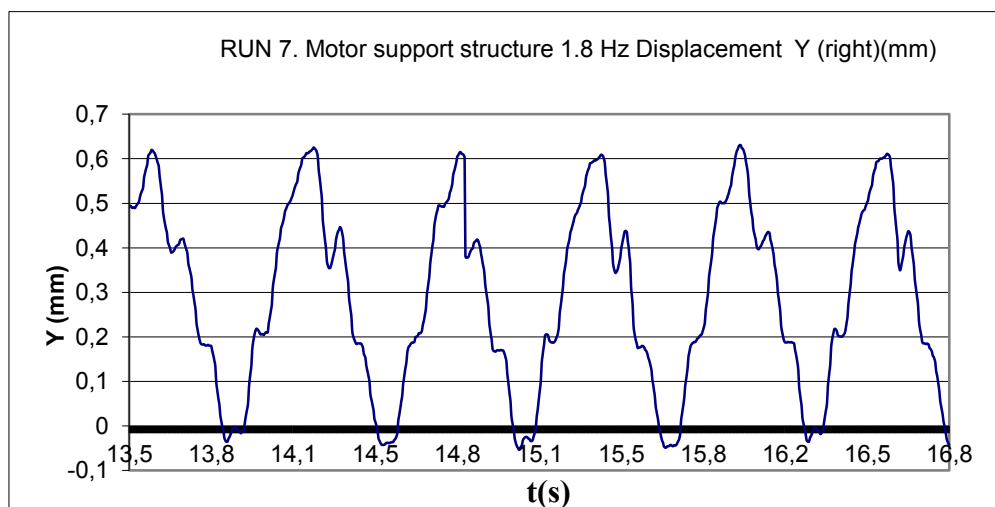
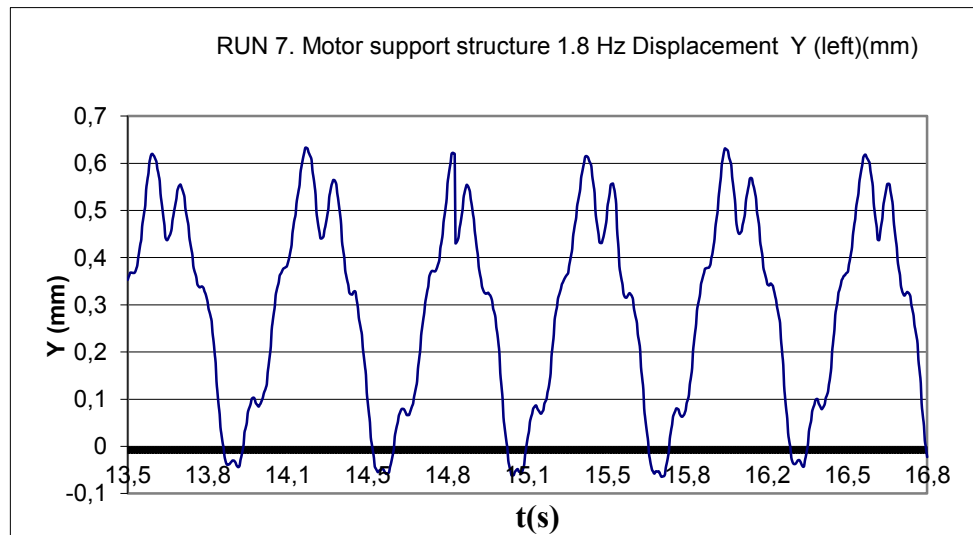
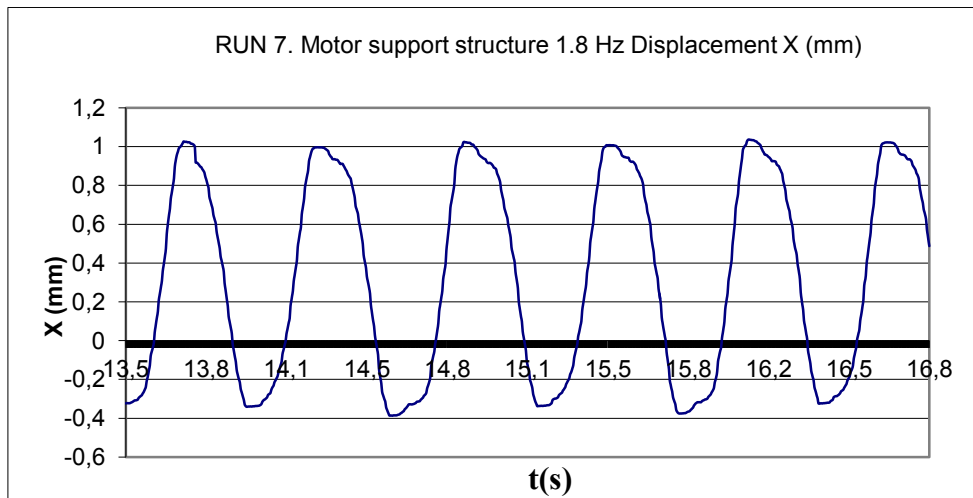


Figura 3-50: Gràfiques de desplaçament del Sistema VIF cub LR en X-X i Z-Z a 1.8 Hz de freqüència d'excitació

▪ **Desplaçament conjunt excitador en direcció X, Y i Z :**



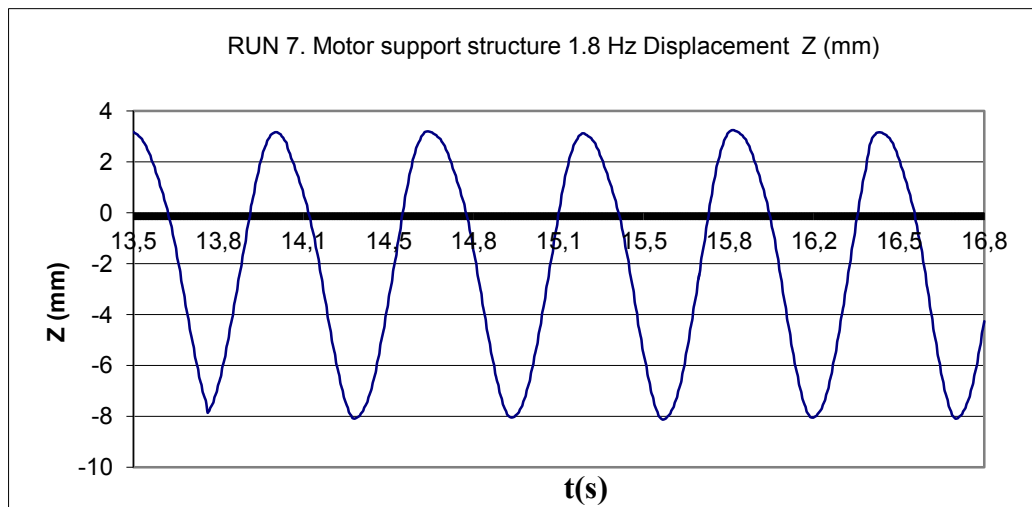


Figura 3-51: Gràfiques de desplaçament del conjunt excitador a 1.8 Hz de freqüència d'excitació

3.12.4.4 Conclusions del Test de Desplaçaments

La següent taula mostra un resum del valors d'amplitud dels desplaçaments obtinguts durant el test per una freqüència d'excitació baixa (1.8Hz):

Element	Direcció	Valors max. i min. del desplaçament (mm)	Valors d'amplitud del desplaçament (mm)
UL	X	(0.05,0.09)	0.040
	Z	(-0.05,0.04)	0.090
LL	X	(-0.03,0.005)	0.035
	Z	(-0.05,0.03)	0.080
UR	X	(0.005,0.06)	0.055
	Z	(-0.04,0.07)	0.110
LR	X	(-0.08,0.015)	0.095
	Z	(-0.04,0.01)	0.050
Sistema d'excitació	X	(-0.4,1)	1.400
	Y (esquerra)	(-0.05,0.62)	0.670
	Y (dreta)	(-0.05,0.62)	0.670
	Z	(-8,3)	12.000

Taula 3-17: Resum dels valors de desplaçaments

De la taula anterior se'n poden extreure les següents conclusions:

- El valor de desplaçament màxim en els cubs dels eixos de suport és de 0.110mm i es produeix en el cub de l'eix de suport UR en direcció Z-Z.

- El valor mig dels desplaçaments en direcció X-X pels quatre eixos de suport és de 0.056mm amb una desviació estàndard de 0.027mm.
- El valor mig dels desplaçaments en direcció Z-Z pels quatre eixos de suport és de 0.083mm amb una desviació estàndard de 0.025mm.
- La variabilitat de resultats dels desplaçaments en el Sistema VIF dona una idea de com d'elàstic és el sistema. Per un comportament ideal de sòlid rígid, els resultats de desplaçaments haurien de ser idèntics pels quatre eixos de suport.
- El desplaçament del conjunt excitador de 12mm en direcció Z-Z és degut a que el conjunt excitador es troba suportat per unes molles de compressió i sense esmorteïment (veure Figura 3.10). L'excitació sobre de les molles en aquesta direcció fa que el desplaçament assoleixi els 12mm a baixa freqüència d'excitació.

3.12.5 Resultats del Test d'Acceleracions

S'ha realitzat el test d'acceleracions per tal de mesurar les acceleracions que es produeixen tant al conjunt excitador com als quatre cubs del Sistema VIF a l'accionar el motor excitador a les 3 freqüències de gir definides. Per aconseguir-ho, s'han usat 4 acceleròmetres uniaxials (3 per mesurar les acceleracions en direccions X, Y i Z, i 1 de comprovació sempre situat al mateix lloc).

D'aquesta manera s'ha obtingut les acceleracions en els mateixos punt on abans s'han obtingut els desplaçaments. A continuació, es mostra una imatge on s'observa l'eix de suport LL amb els acceleròmetres ja instal·lats.

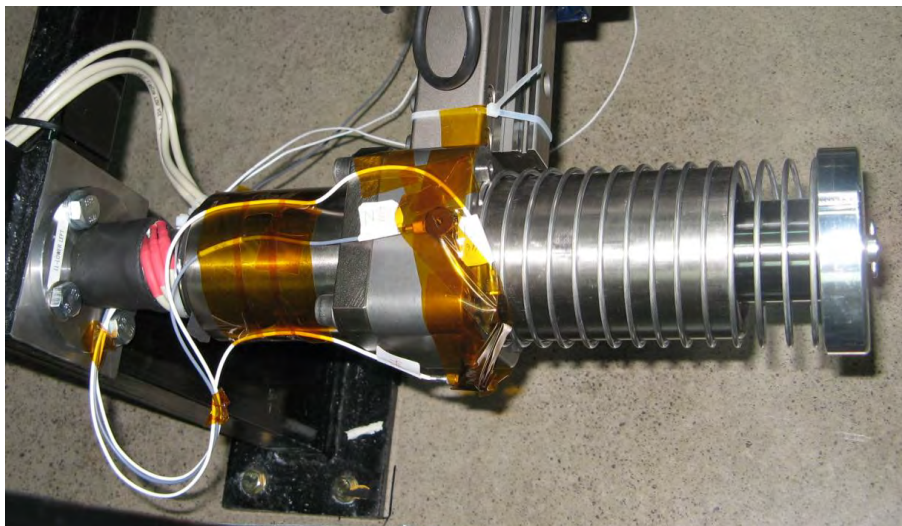


Figura 3-52: Eix de suport LL amb els acceleròmetres instal·lats

3.12.5.1 Equip de test

Per la realització del test de Forces i Moments s'ha utilitzat el següent instrumental:

- **Sensors acceleròmetres:**
 - Fabricant: *Kistler*
 - Número de sèrie (identificador): SNC192844-8628B5 (id.44)
SN2013346-8636C5 (id.46)
SNC148417-8628B5 (id.17)
SN2012740-8636C5 (id.40)
- **Equip d'adquisició de dades:**
 - Fabricant: Hottinger Baldwin Messtechnik.
 - Referència de l'equip: MGCplus
 - Número de sèrie: S/N: 801064970
- **Ordinador personal amb software d'adquisició**

3.12.5.2 Taula de test d'acceleracions

S'ha adquirit l'acceleració del motor, de l'estructura i dels quatre eixos de suport (UL, LL, UR, LR). La següent taula mostra els tests efectuats per la determinació de les acceleracions:

Test N°	Posició dels acceleròmetres	Estat dels amortidors	Nom de l'arxiu de resultat de test
1	Suport del motor	Amortidors connectats en direcció X i Z	VIF_IF_acceler_1to6.xls
2	UR	Amortidors connectats en direcció X i Z	VIF_IF_acceler_1to6.xls
3	LR	Amortidors connectats en direcció X i Z	VIF_IF_acceler_1to6.xls
4	LL	Amortidors connectats en direcció X i Z	VIF_IF_acceler_1to6.xls
5	UL	Amortidors connectats en direcció X i Z	VIF_IF_acceler_1to6.xls
6	Bancada de test	Amortidors connectats en direcció X i Z	VIF_IF_acceler_1to6.xls
7	Suport del motor	Amortidor en direcció Z desconnectat	VIF_IF_acceler_7.xls
8	Suport del motor	Amortidors connectats en direcció X i Z	VIF_IF_acceler_8.xls
9	Suport del motor	Tots amortidors connectats (2 curtcircuitats)	VIF_IF_acceler_9.xls

10	Suport del motor	Tots amortidors connectats (4 curtcircuitats)	VIF_IF_acceler_10.xls
11	Suport del motor	Tots amortidors desconnectats en X i Z. Sense molles en direcció X	VIF_IF_acceler_11.xls

Taula 3-18: Llistat d'arxius del test d'acceleracions

Per cada test, s'han realitzat les següents mesures:

- **Mesura d'acceleracions en direcció X-X:** a freqüència d'excitació de 1,8Hz, 3,7 Hz i 5,2 Hz.
- **Mesura d'acceleracions en direcció Y-Y:** a freqüència d'excitació de 1,8Hz, 3,7 Hz i 5,2 Hz.
- **Mesura d'acceleracions en direcció Z-Z:** a freqüència d'excitació de 1,8Hz, 3,7 Hz i 5,2 Hz.

Amb aquest conjunt de dades, s'han realitzat les gràfiques en funció del temps de les acceleracions en les direccions X, Y i Z per les 3 velocitats d'excitació del motor i pels 11 casos de test llistats a la taula anterior. Tenint en compte que el cas número 8 és idèntic al número 1, i que per tant s'ha descartat el cas número 8 ja que presenta resultats iguals al cas 1. I que el test 11 només s'ha realitzat a 1.8Hz, això fa un total de 84 gràfiques que es recullen a l'apartat següent.

3.12.5.3 Resultat de Test d'acceleracions

- *Acceleracions del Test 1 en direcció X, Y i Z a 1.8Hz.*

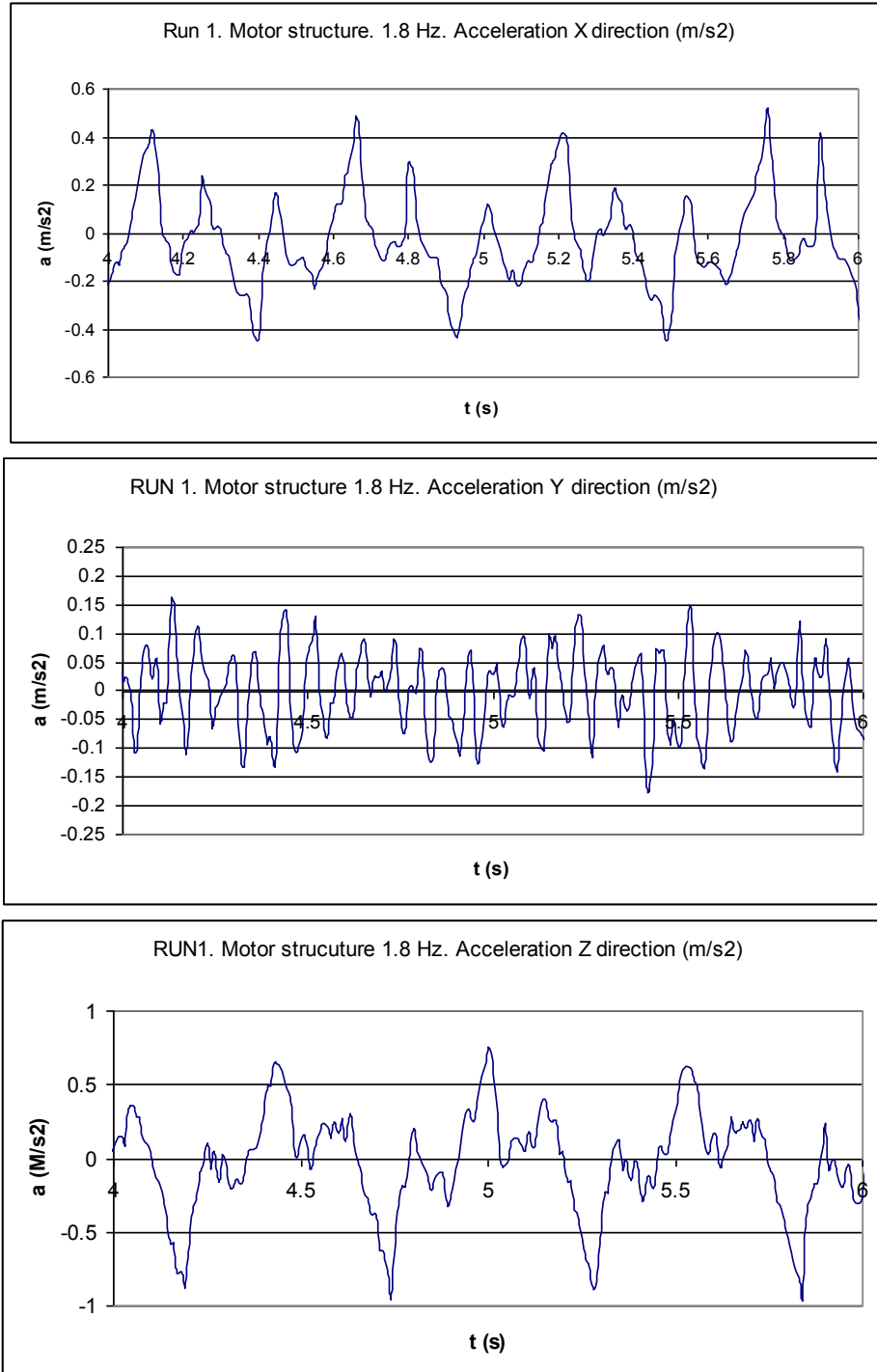


Figura 3-53: Gràfiques d'acceleracions del suport del motor a 1.8 Hz de velocitat d'excitació

▪ **Acceleracions del Test 1 en direcció X, Y i Z a 3.7Hz.**

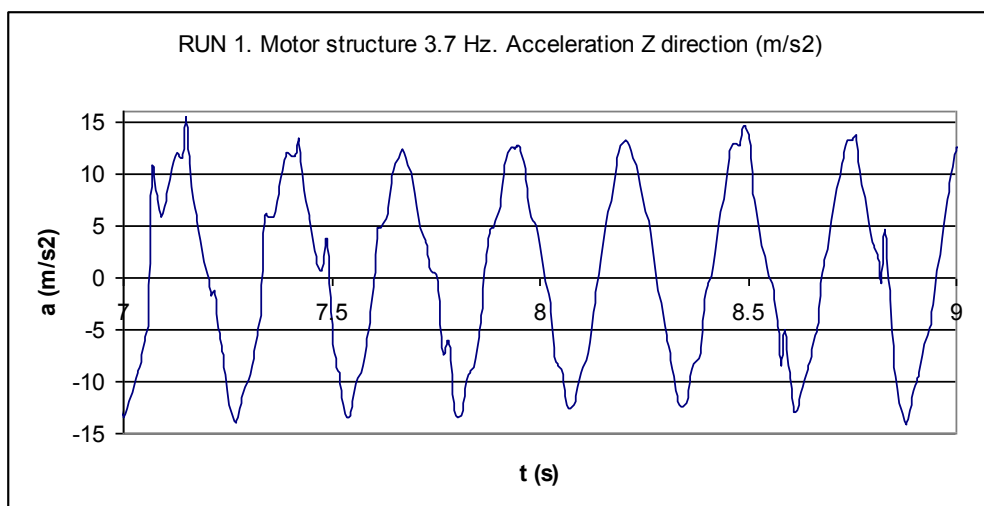
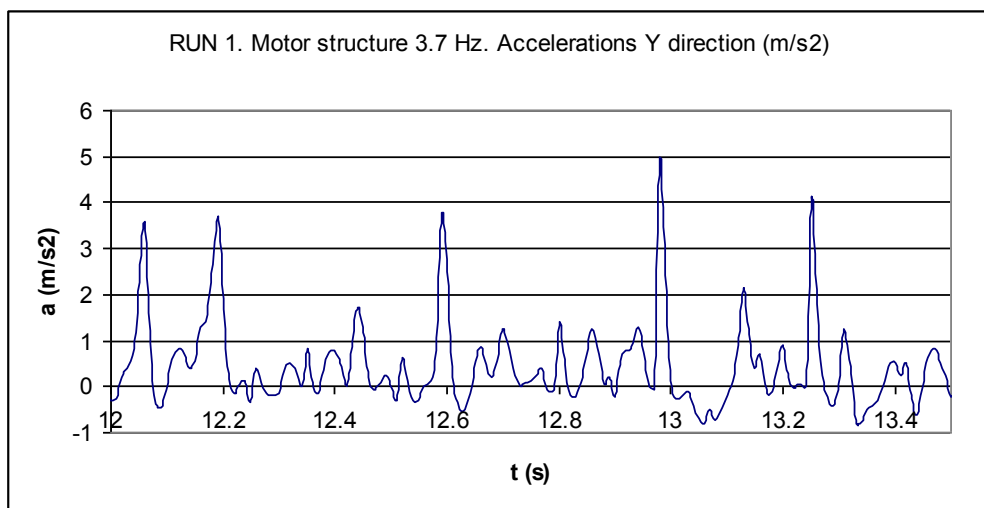
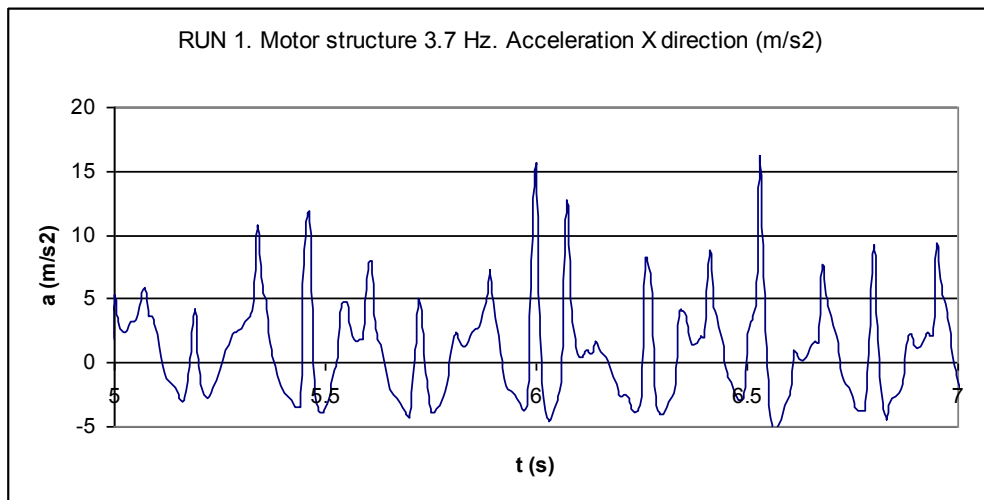


Figura 3-54: Gràfiques d'acceleracions del suport del motor a 3.7 Hz de velocitat d'excitació

▪ **Acceleracions del Test 1 en direcció X, Y i Z a 5.6Hz.**

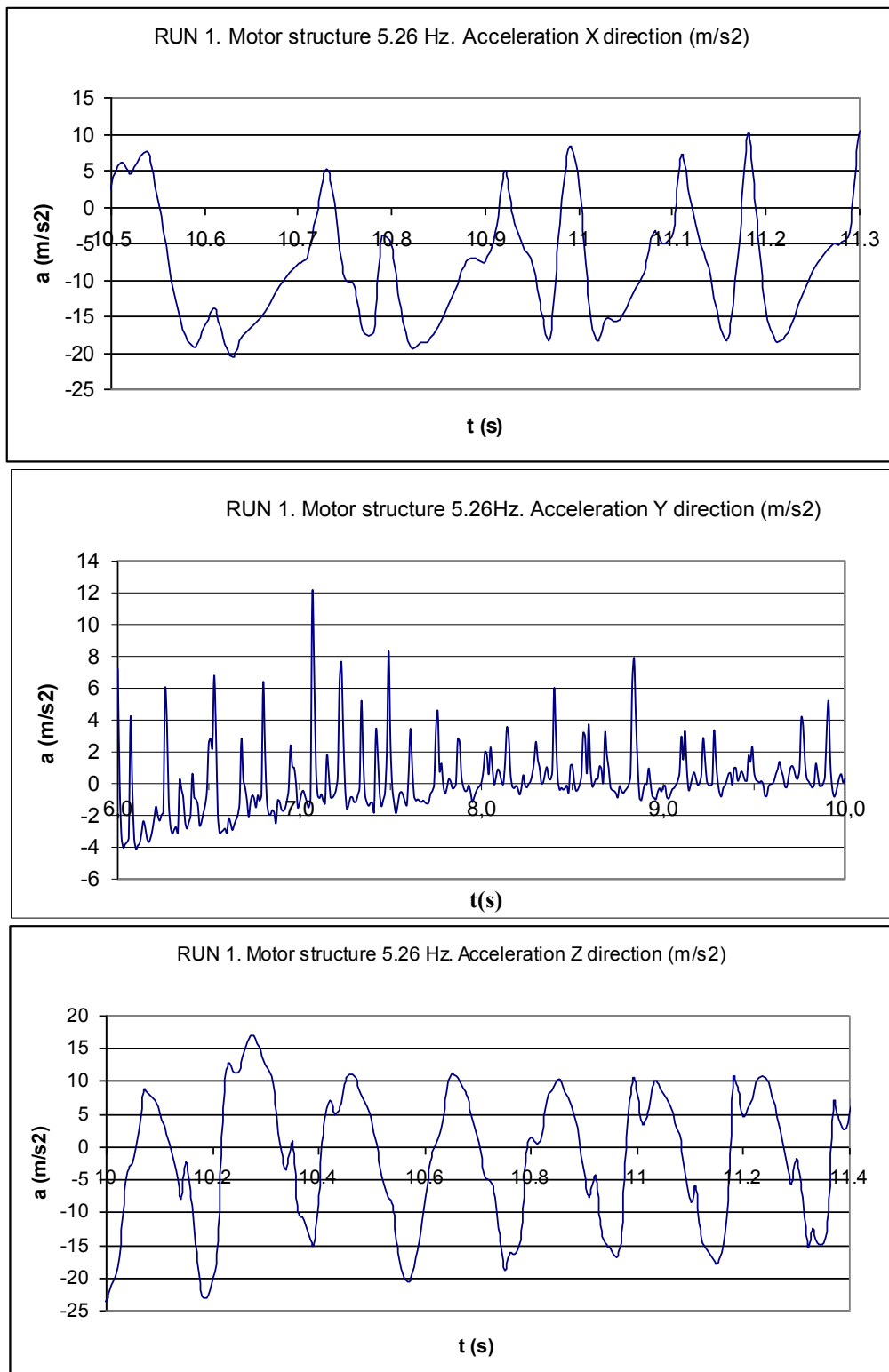


Figura 3-55: Gràfiques d'acceleracions del suport del motor a 5.6 Hz de velocitat d'excitació

▪ **Acceleracions del Test 2 en direcció X, Y i Z a 1.8Hz.**

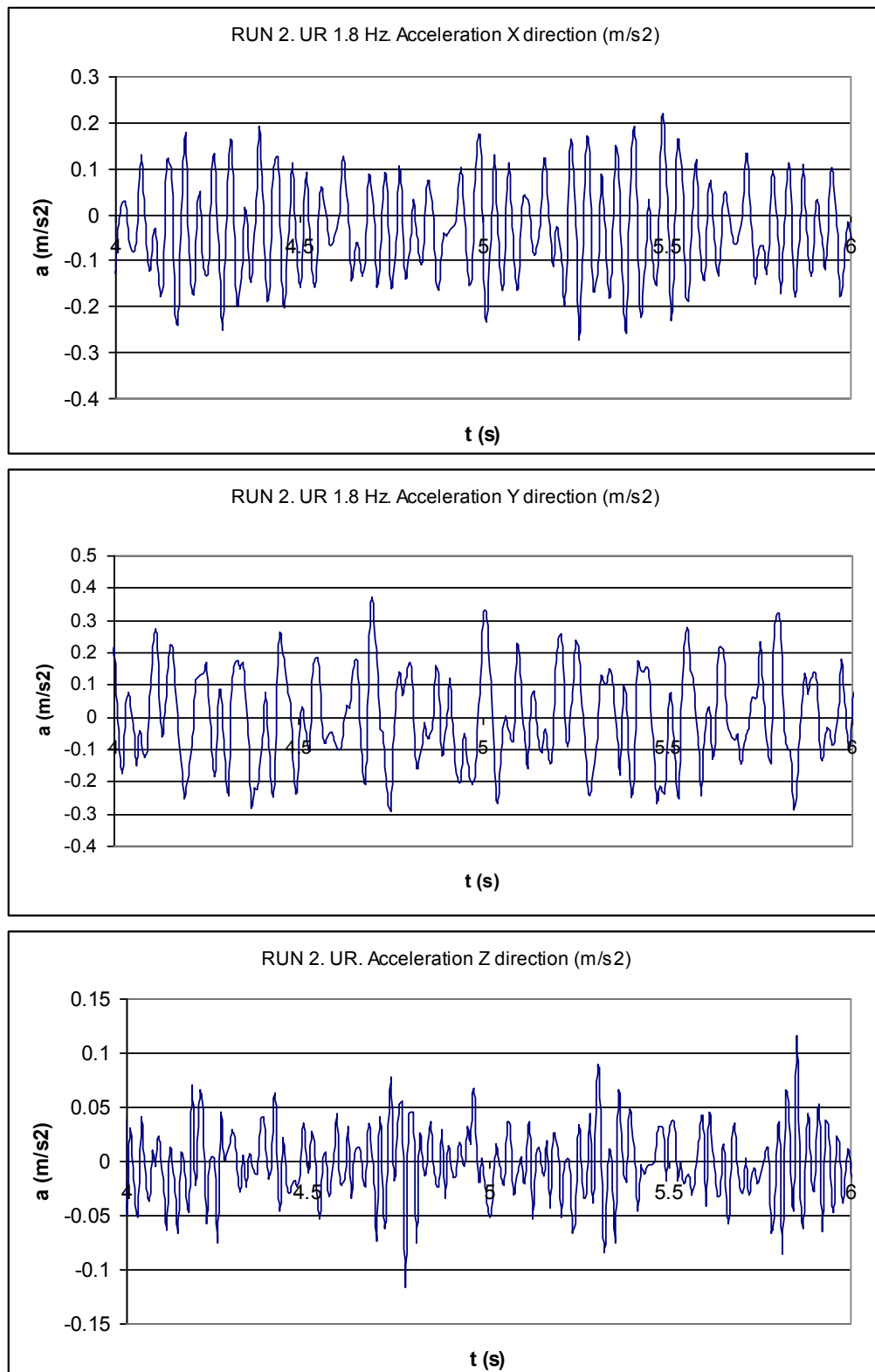


Figura 3-56: Gràfiques d'acceleracions del test 2 a 1.8 Hz de velocitat d'excitació

▪ **Acceleracions del Test 2 en direcció X, Y i Z a 3.7Hz.**

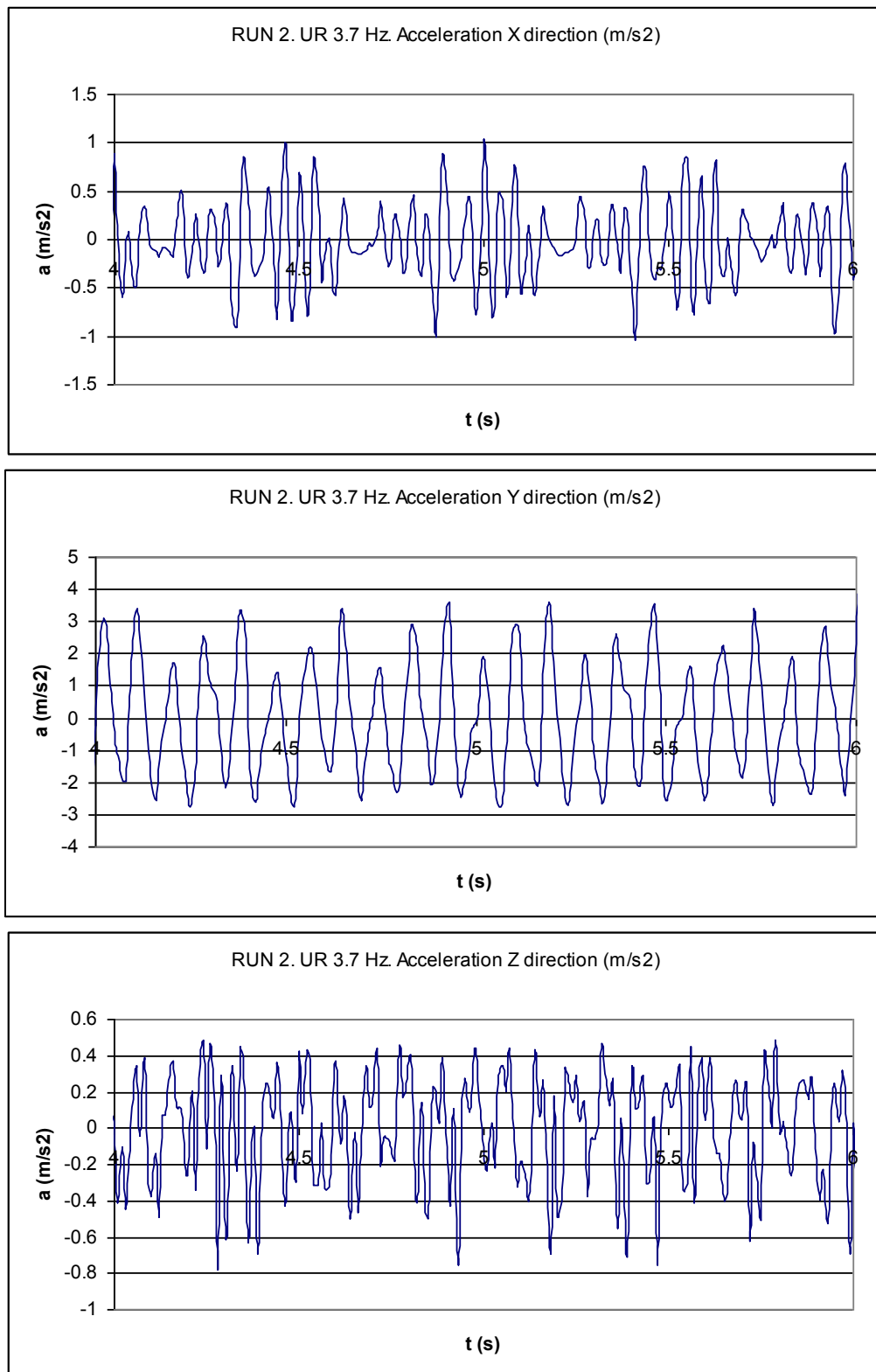


Figura 3-57: Gràfiques d'acceleracions del test 2 a 3.7 Hz de velocitat d'excitació

▪ **Acceleracions del Test 2 en direcció X, Y i Z a 5.6Hz.**

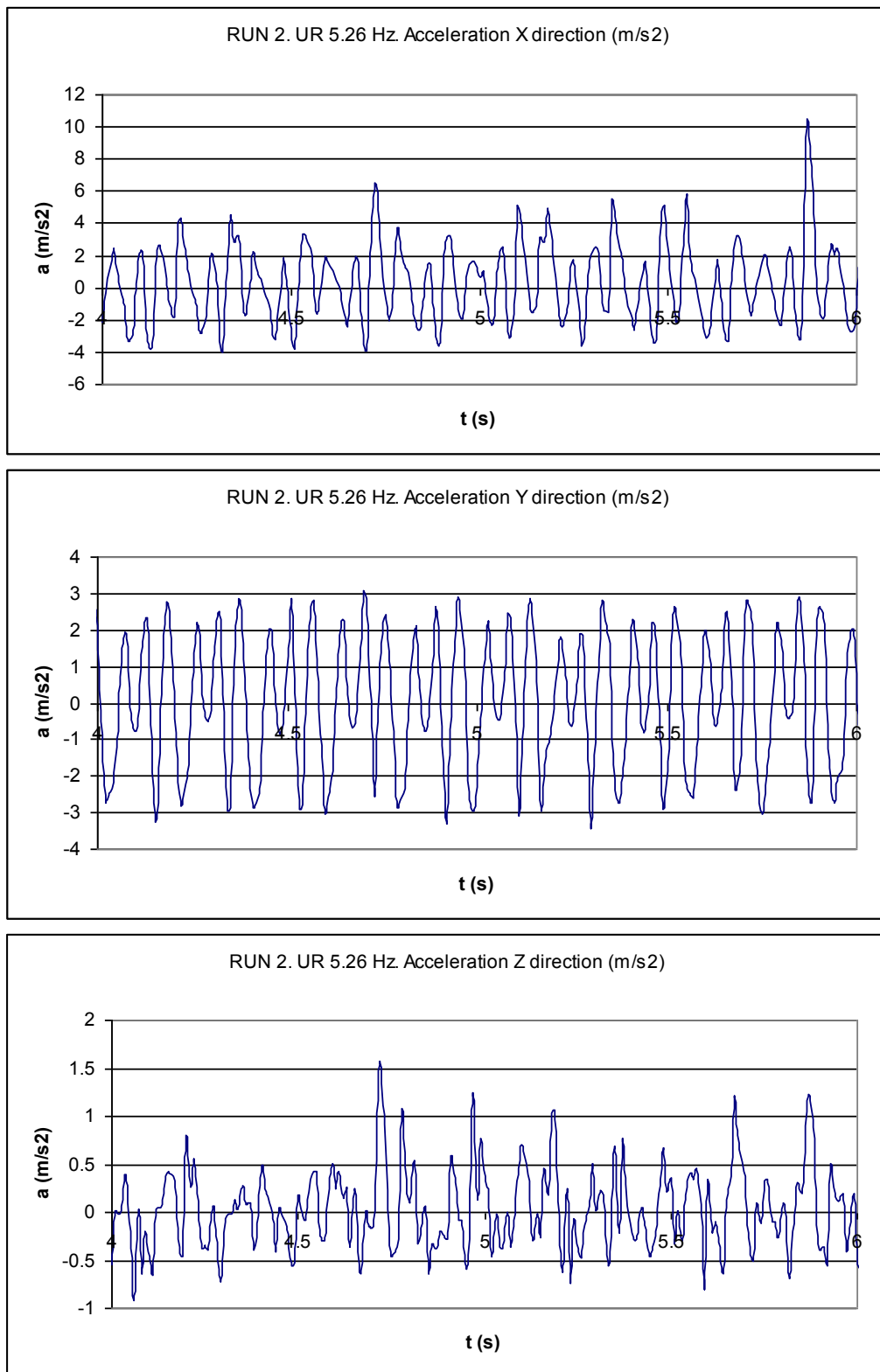


Figura 3-58: Gràfiques d'acceleracions del test 2 a 5.6 Hz de velocitat d'excitació

▪ **Acceleracions del Test 3 en direcció X, Y i Z a 1.8Hz.**

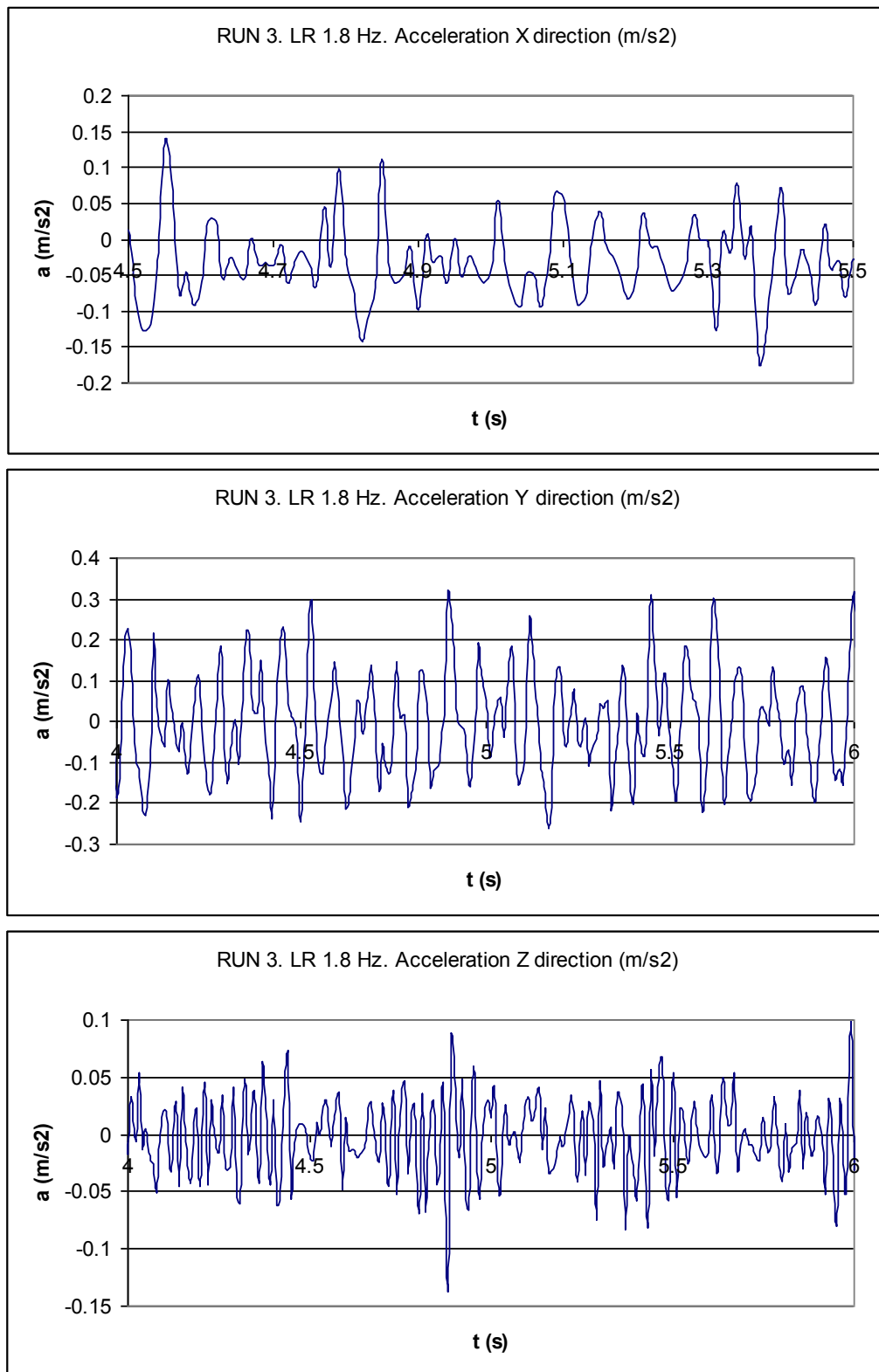


Figura 3-59: Gràfiques d'acceleracions del test 3 a 1.8 Hz de velocitat d'excitació

▪ **Acceleracions del Test 3 en direcció X, Y i Z a 3.7Hz.**

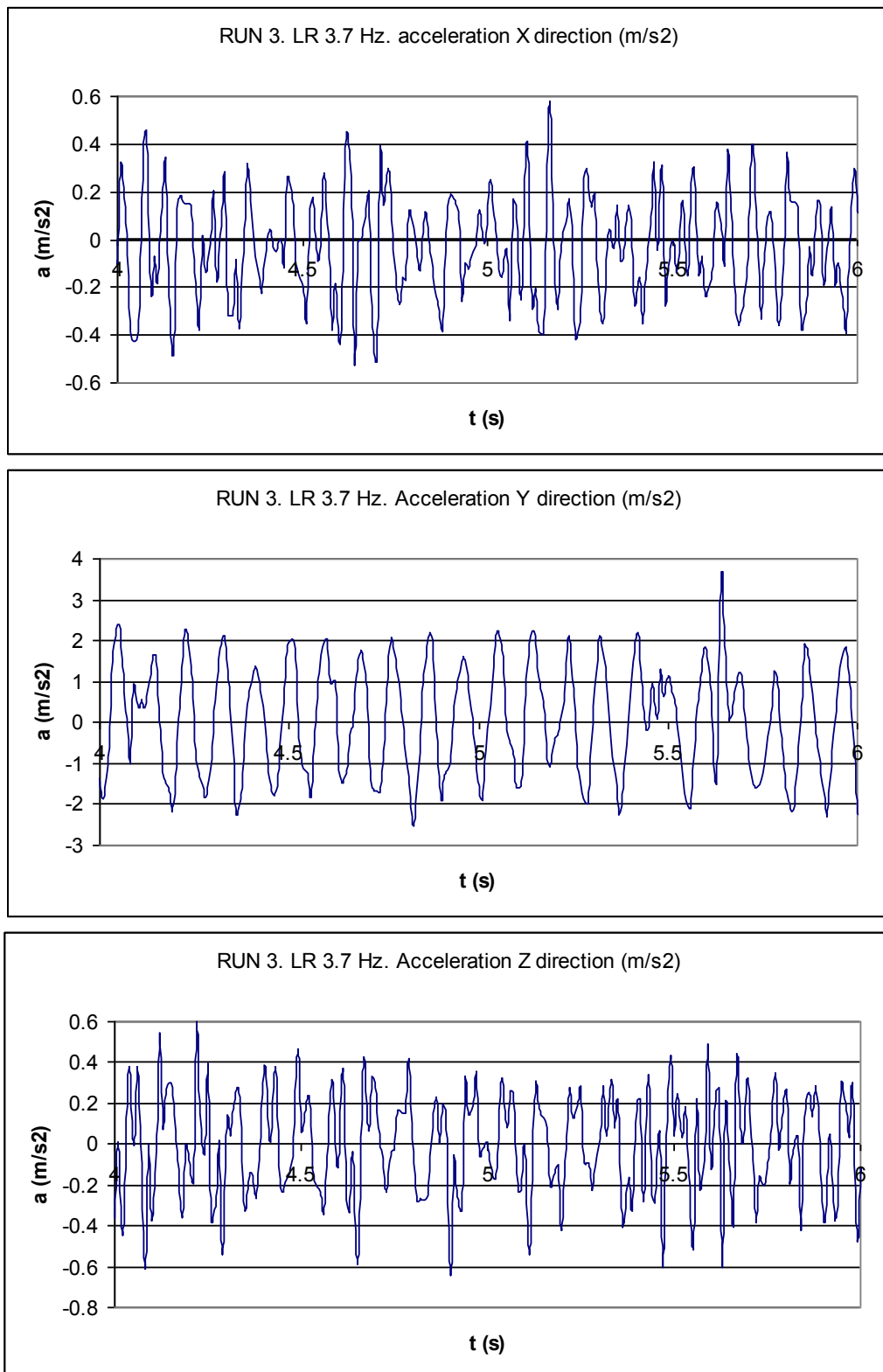


Figura 3-60: Gràfiques d'acceleracions del test 3 a 3.7 Hz de velocitat d'excitació

▪ **Acceleracions del Test 3 en direcció X, Y i Z a 5.6Hz.**

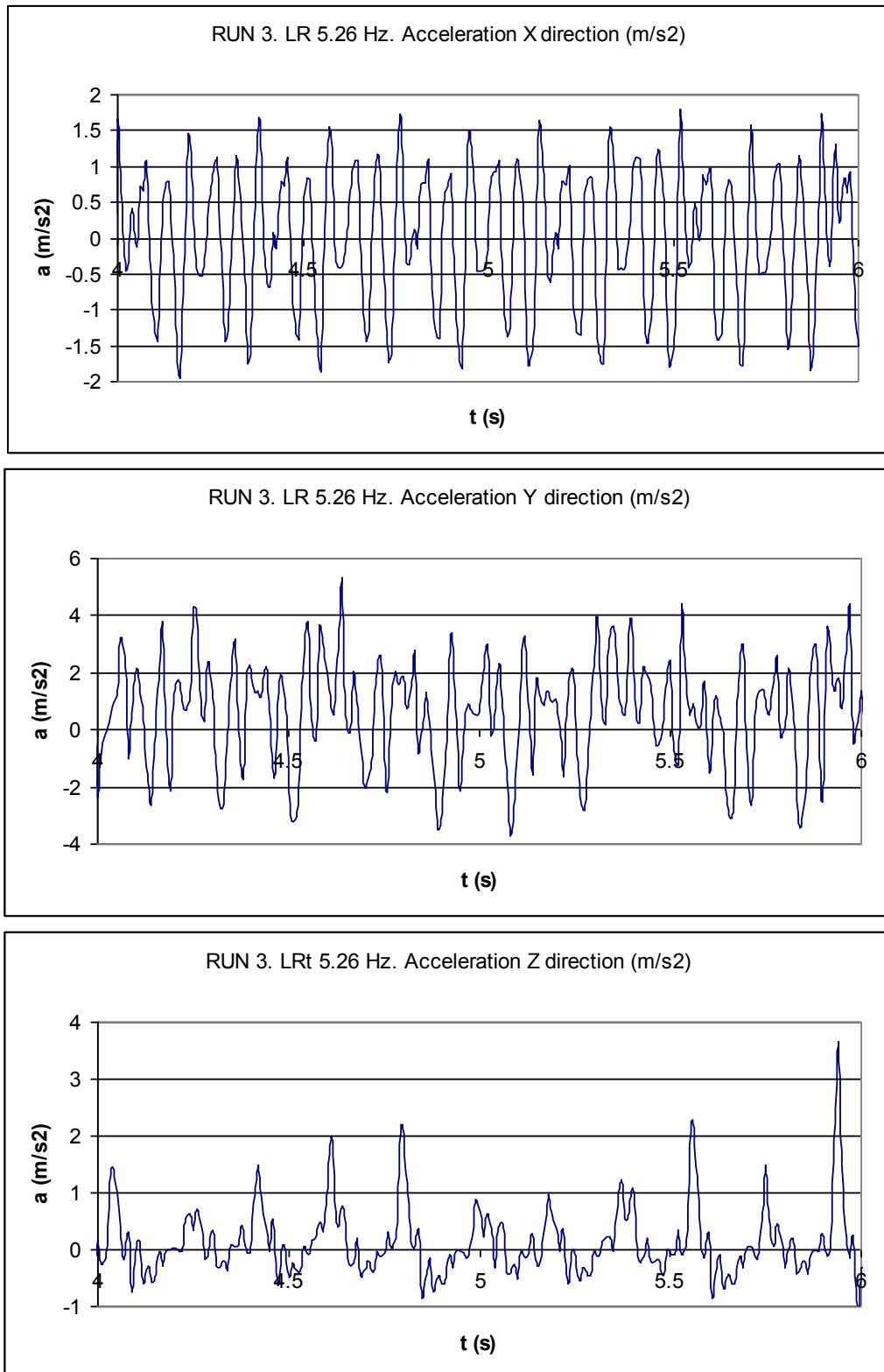


Figura 3-61: Gràfiques d'acceleracions del test 3 a 5.6 Hz de velocitat d'excitació

▪ **Acceleracions del Test 4 en direcció X, Y i Z a 1.8Hz.**

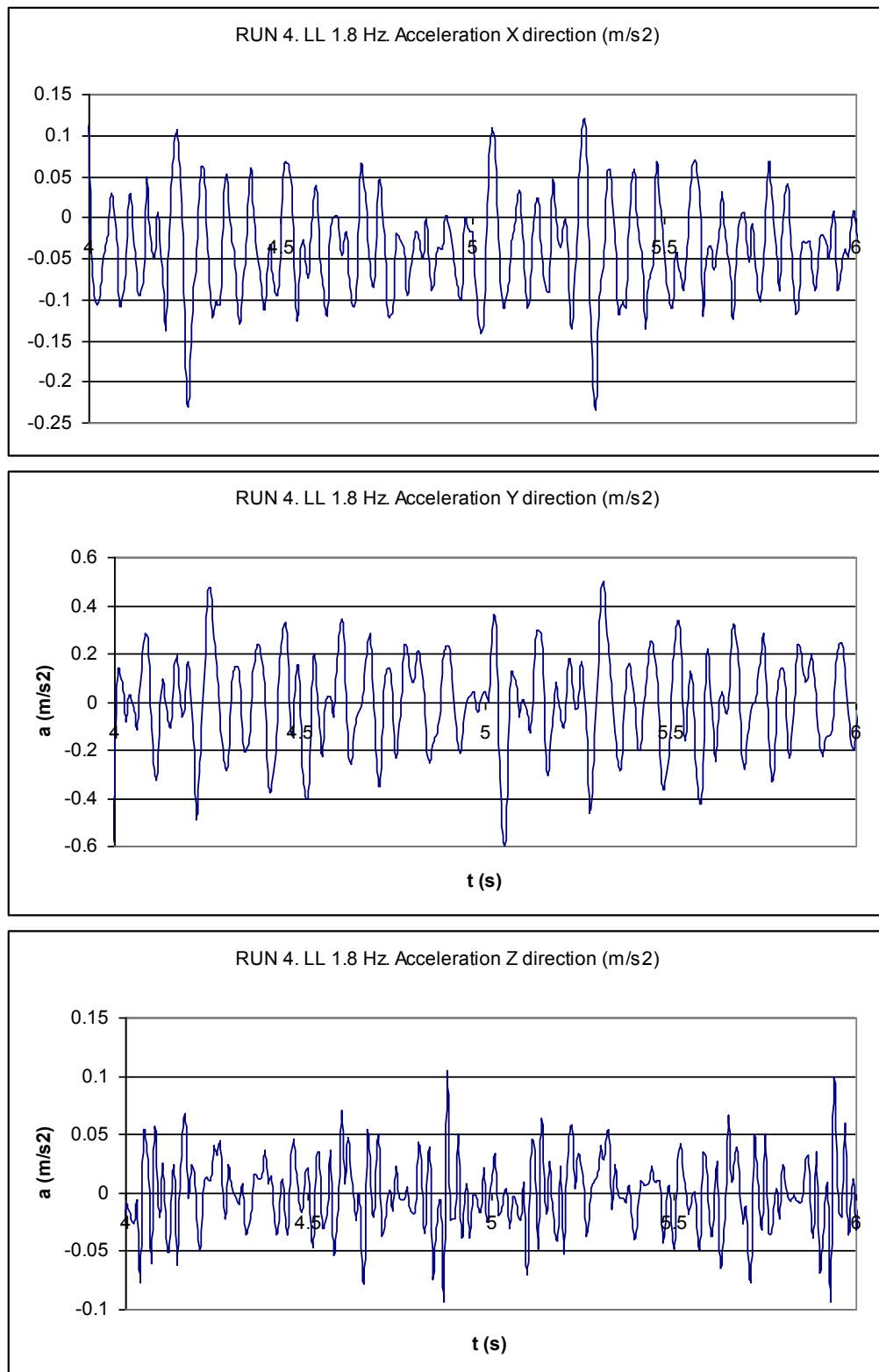


Figura 3-62: Gràfiques d'acceleracions del test 4 a 1.8 Hz de velocitat d'excitació

▪ **Acceleracions del Test 4 en direcció X, Y i Z a 3.7Hz.**

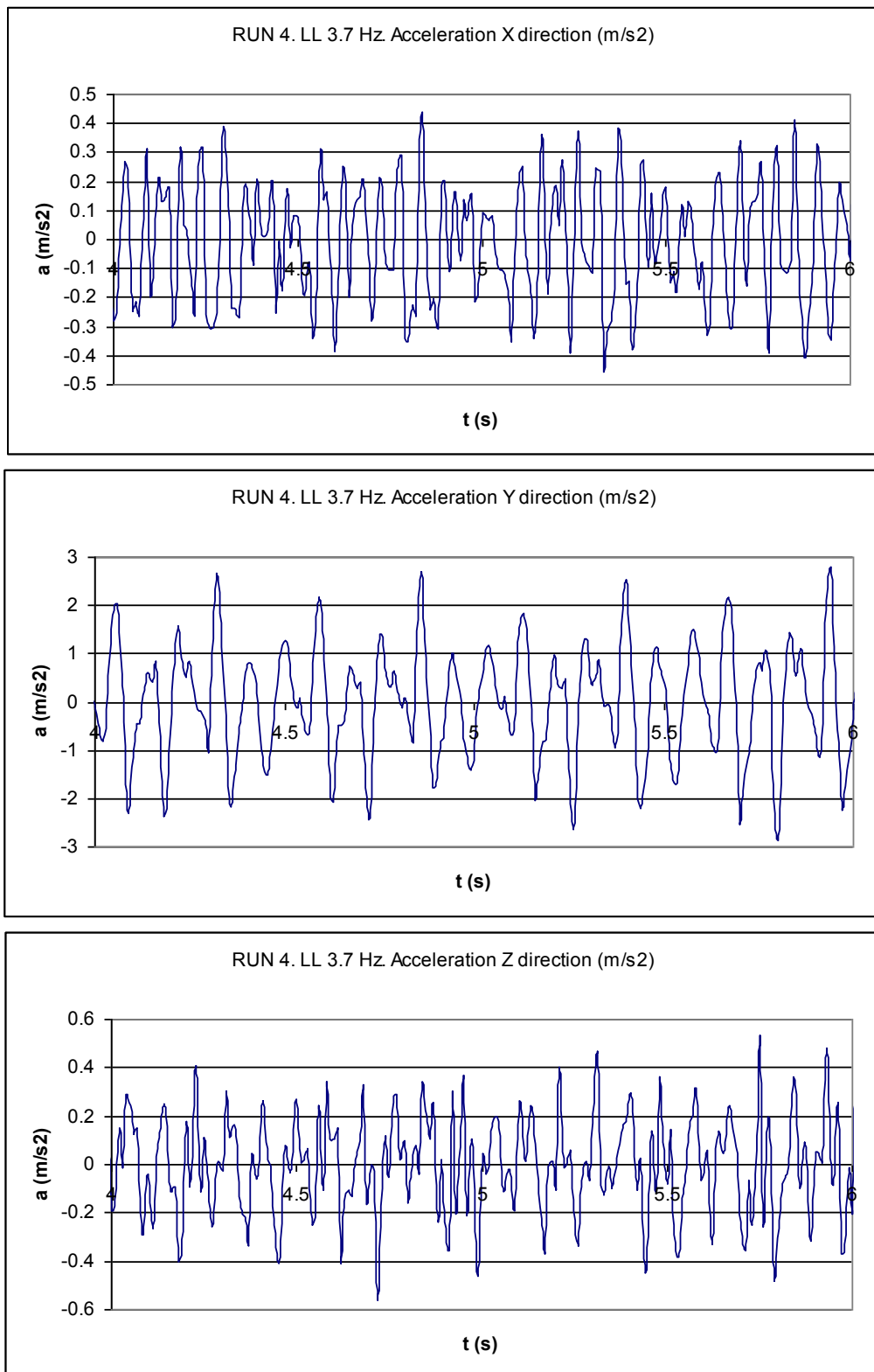


Figura 3-63: Gràfiques d'acceleracions del test 4 a 3.7 Hz de velocitat d'excitació

▪ **Acceleracions del Test 4 en direcció X, Y i Z a 5.6Hz.**

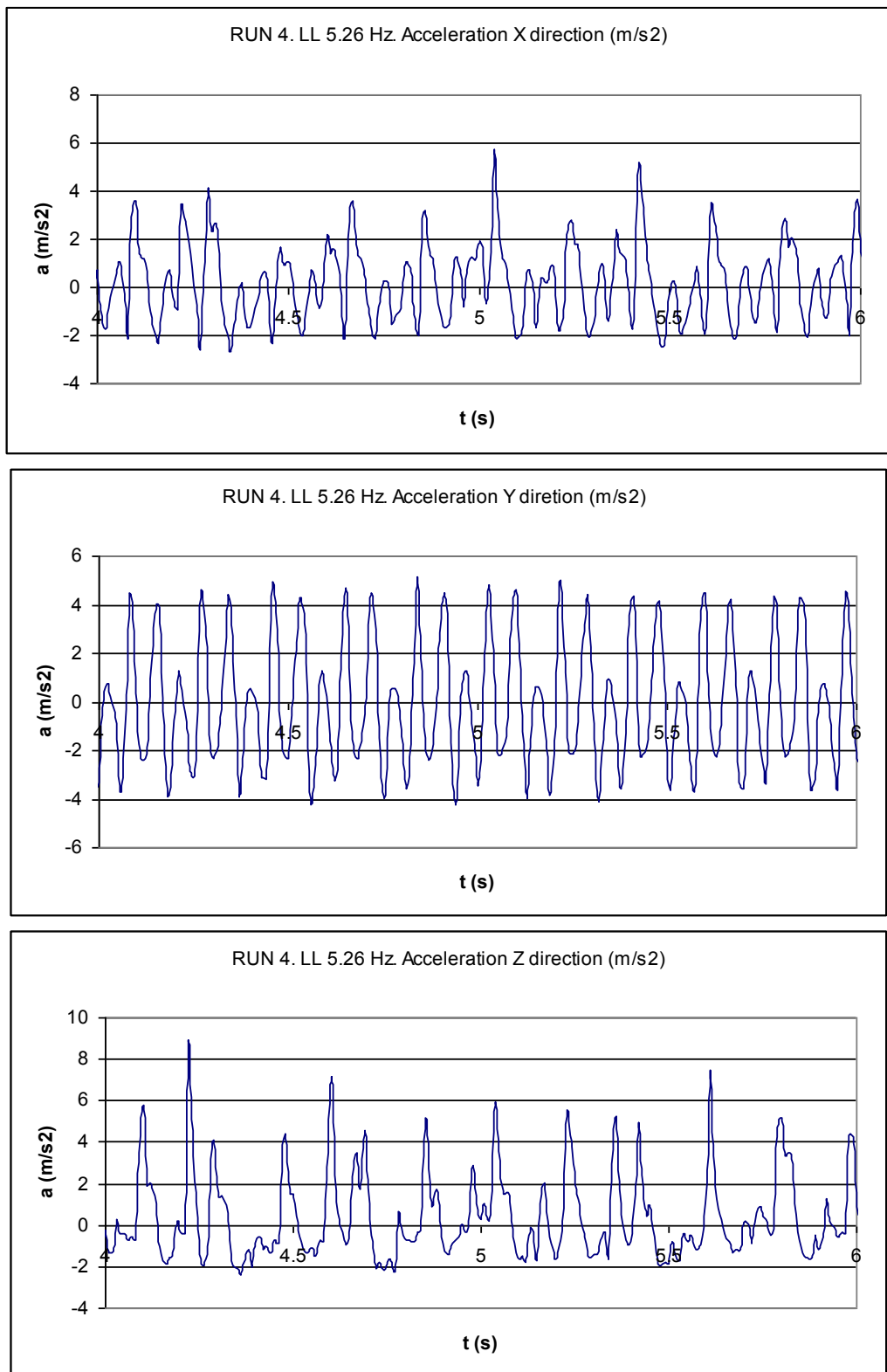


Figura 3-64: Gràfiques d'acceleracions del test 4 a 5.6 Hz de velocitat d'excitació

▪ **Acceleracions del Test 5 en direcció X, Y i Z a 1.8Hz.**

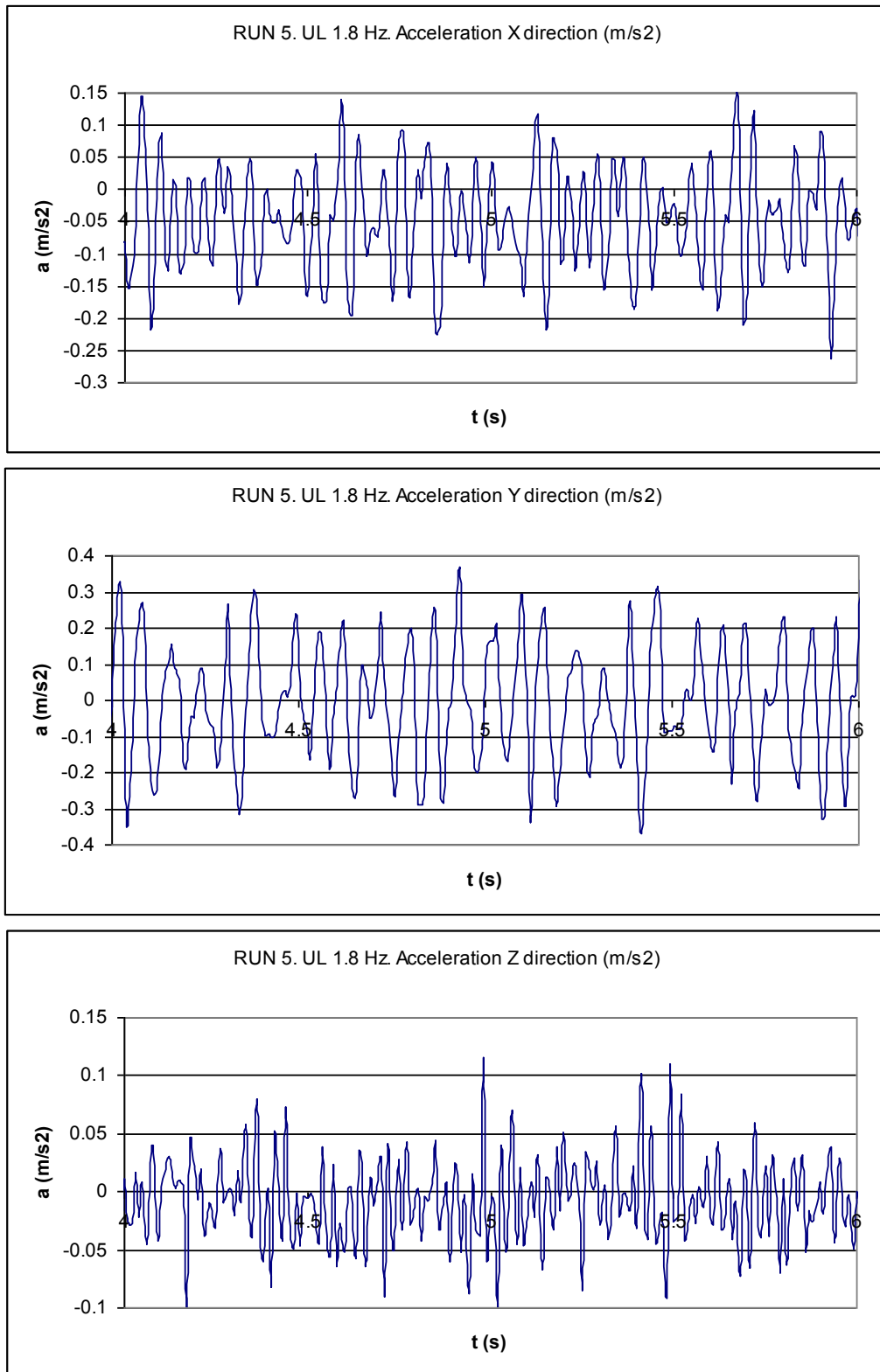


Figura 3-65: Gràfiques d'acceleracions del test 5 a 1.8 Hz de velocitat d'excitació

▪ **Acceleracions del Test 5 en direcció X, Y i Z a 3.7Hz.**

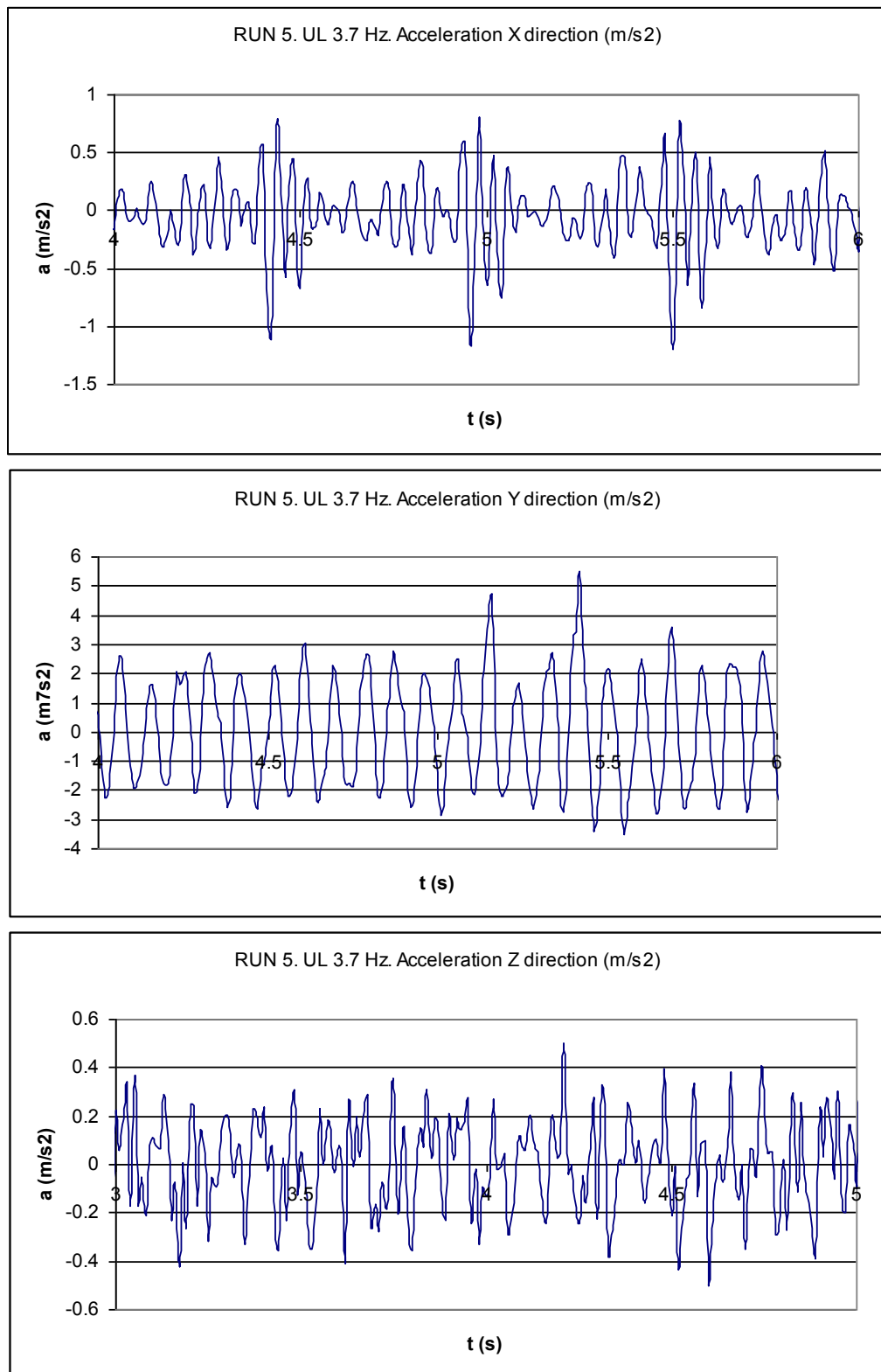


Figura 3-66: Gràfiques d'acceleracions del test 5 a 3.7 Hz de velocitat d'excitació

▪ **Acceleracions del Test 5 en direcció X, Y i Z a 5.6Hz.**

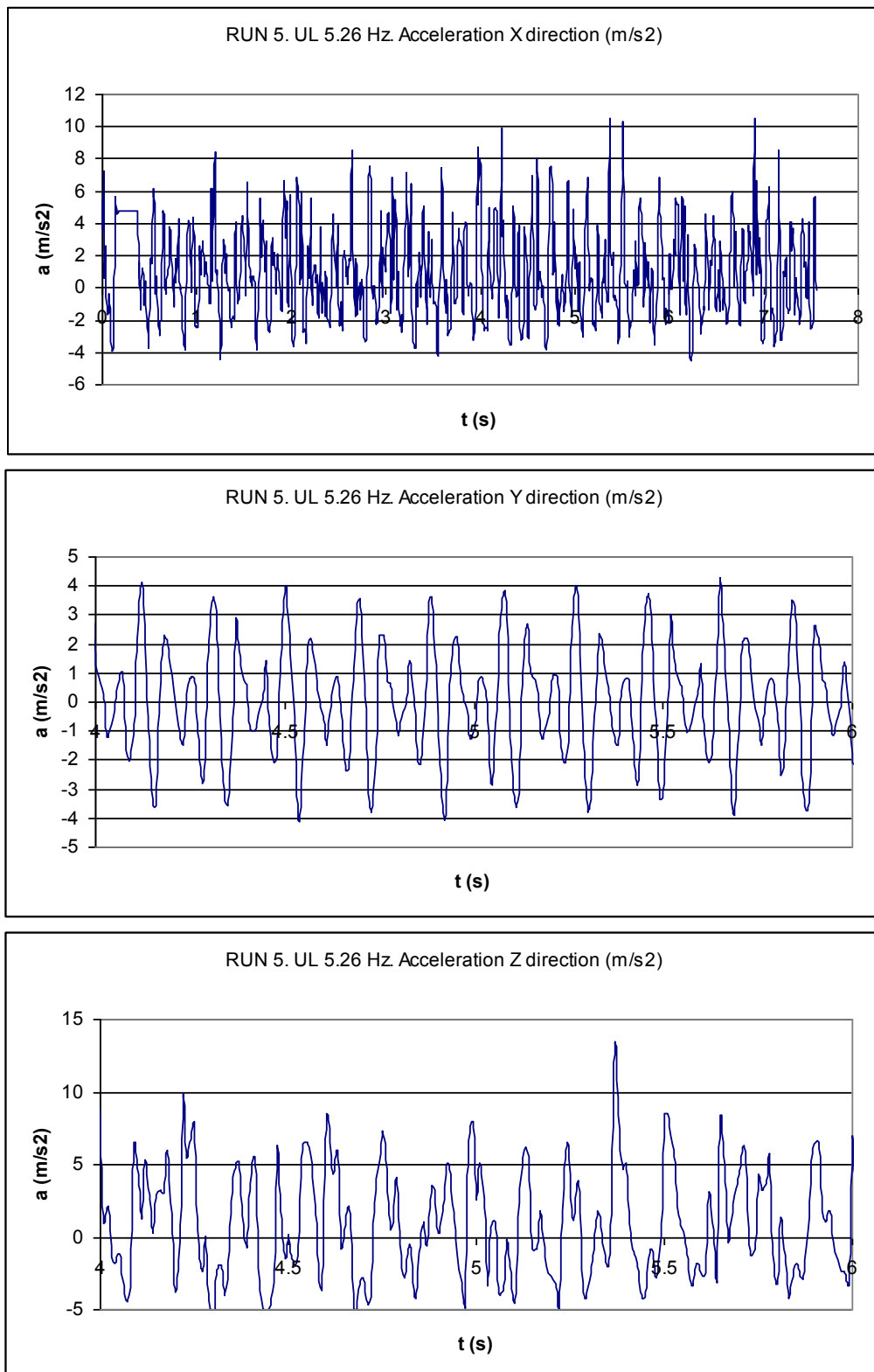


Figura 3-67: Gràfiques d'acceleracions del test 5 a 5.6 Hz de velocitat d'excitació

▪ **Acceleracions del Test 6 en direcció X, Y i Z a 1.8Hz.**

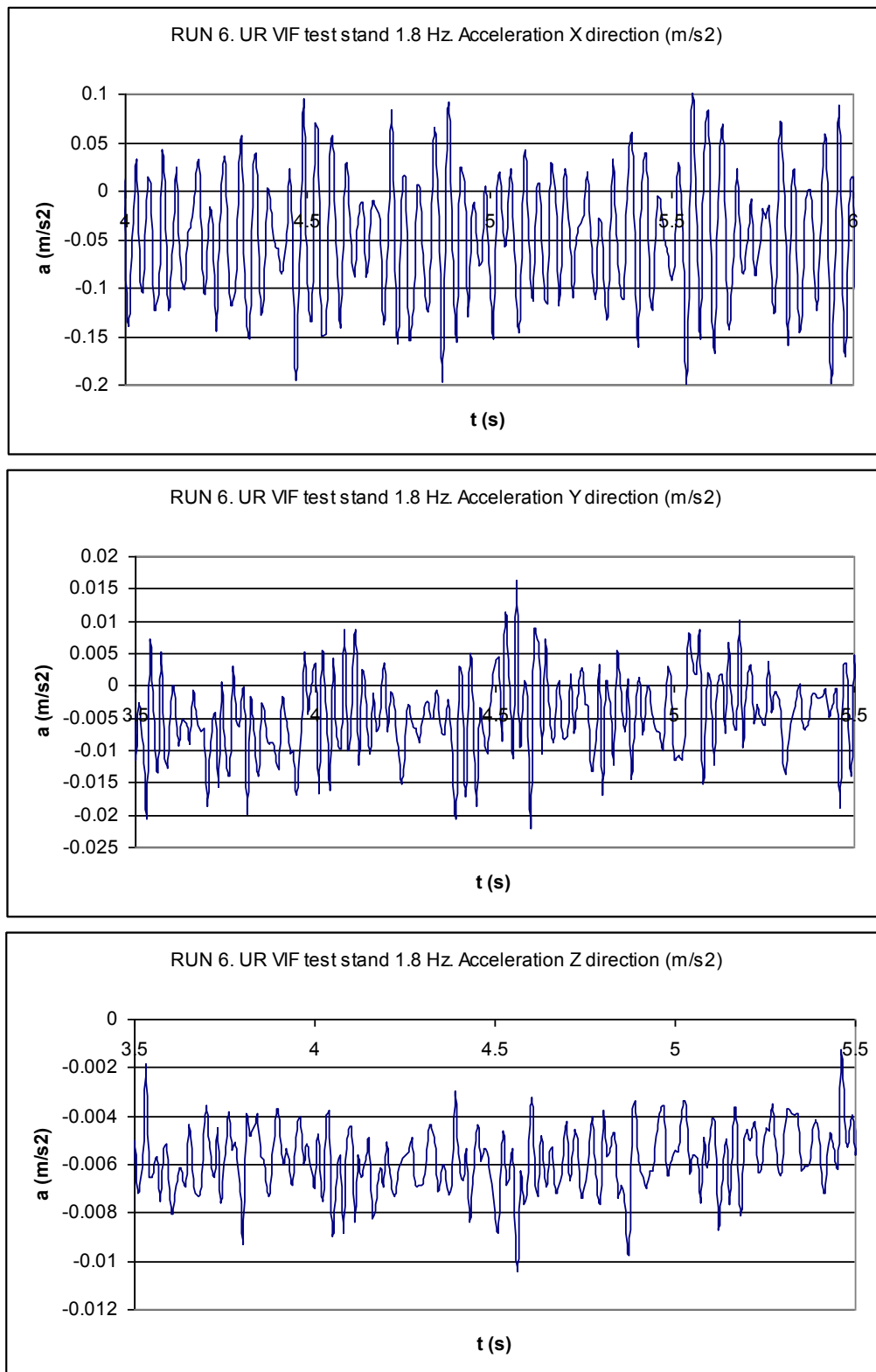


Figura 3-68: Gràfiques d'acceleracions del test 6 a 1.8 Hz de velocitat d'excitació

▪ **Acceleracions del Test 6 en direcció X, Y i Z a 3.7Hz.**

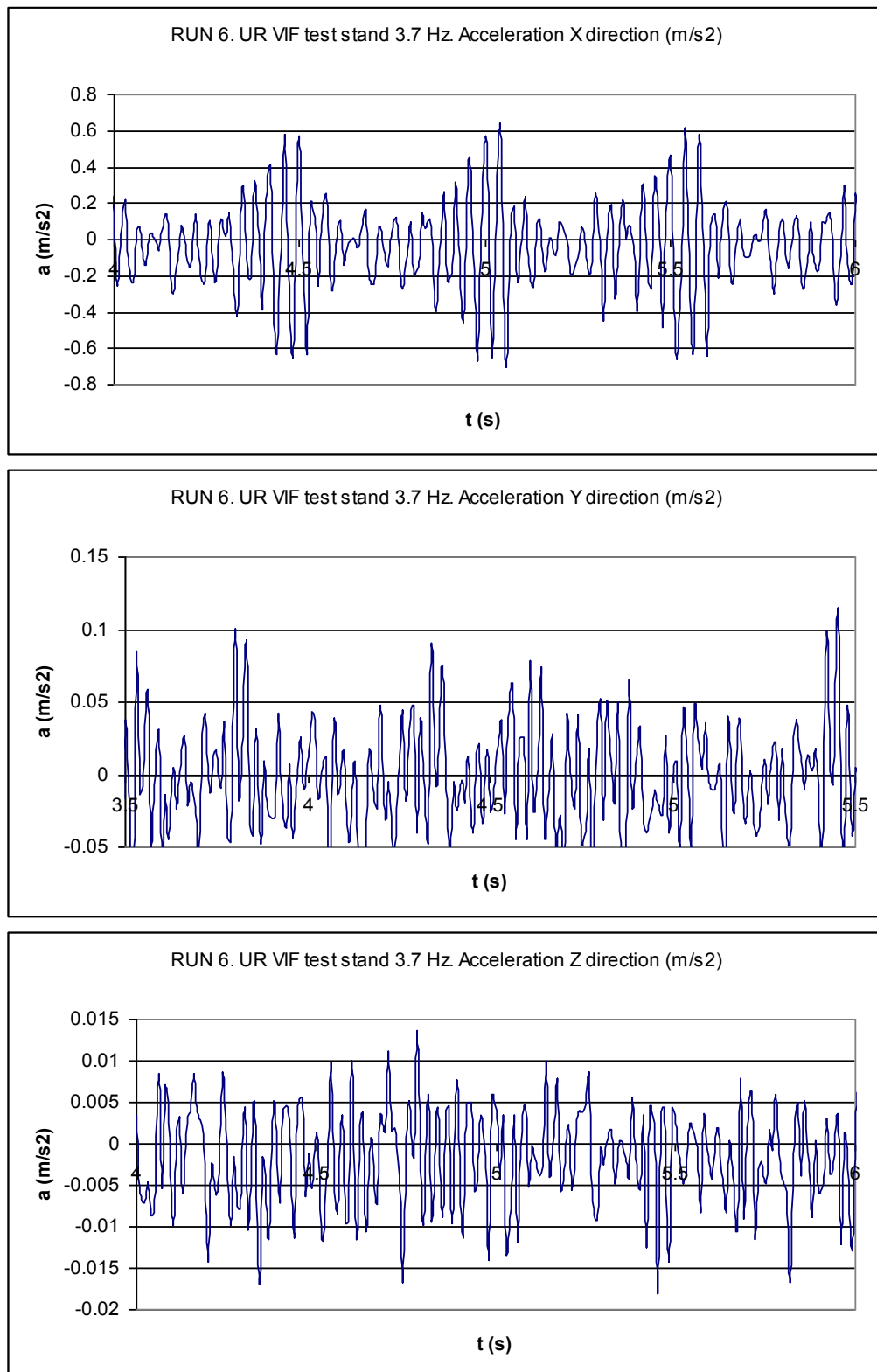


Figura 3-69: Gràfiques d'acceleracions del test 6 a 3.7 Hz de velocitat d'excitació

▪ **Acceleracions del Test 6 en direcció X, Y i Z a 5.6Hz.**

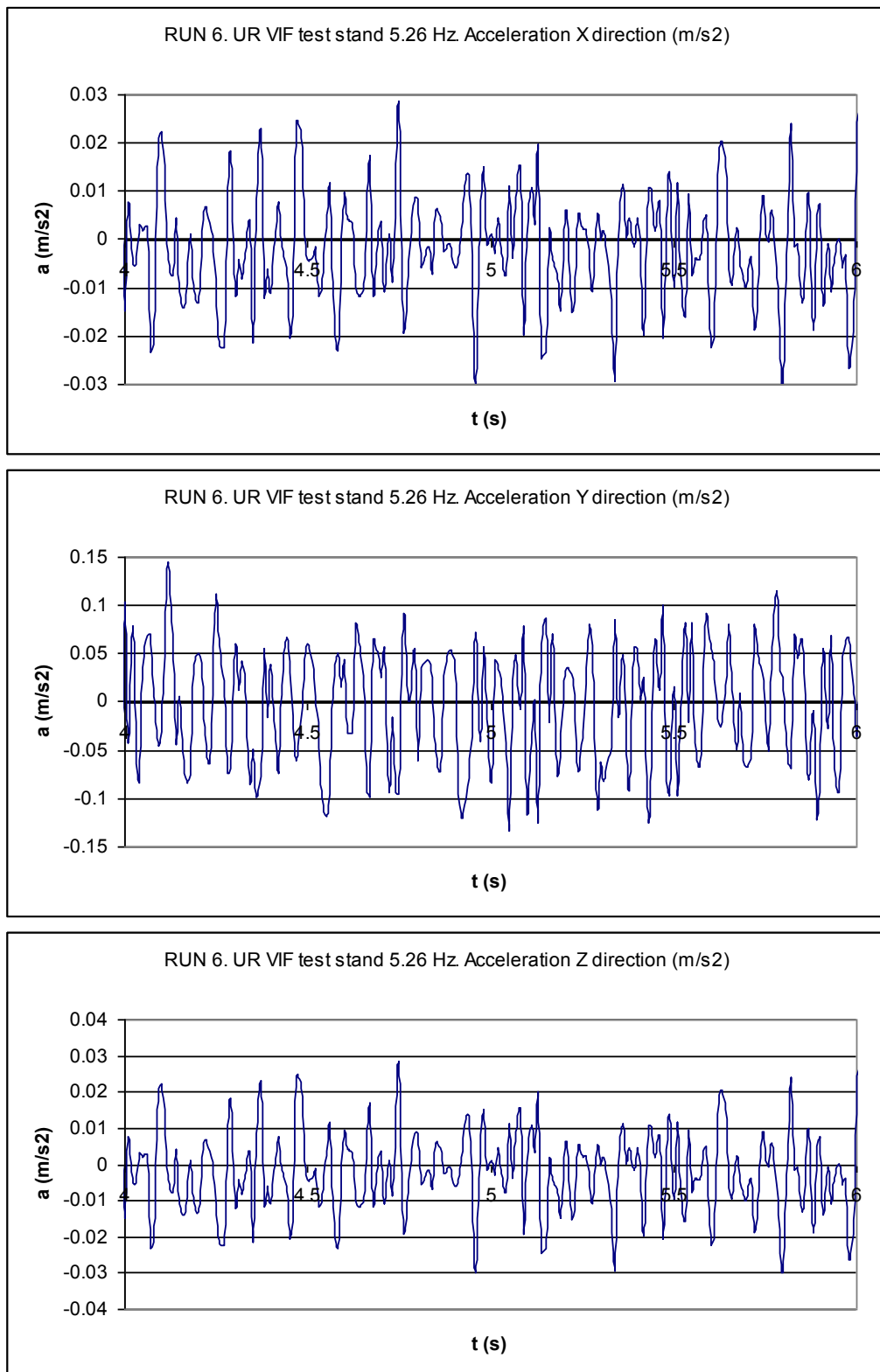


Figura 3-70: Gràfiques d'acceleracions del test 6 a 5.6 Hz de velocitat d'excitació

▪ **Acceleracions del Test 7 en direcció X, Y i Z a 1.8Hz.**

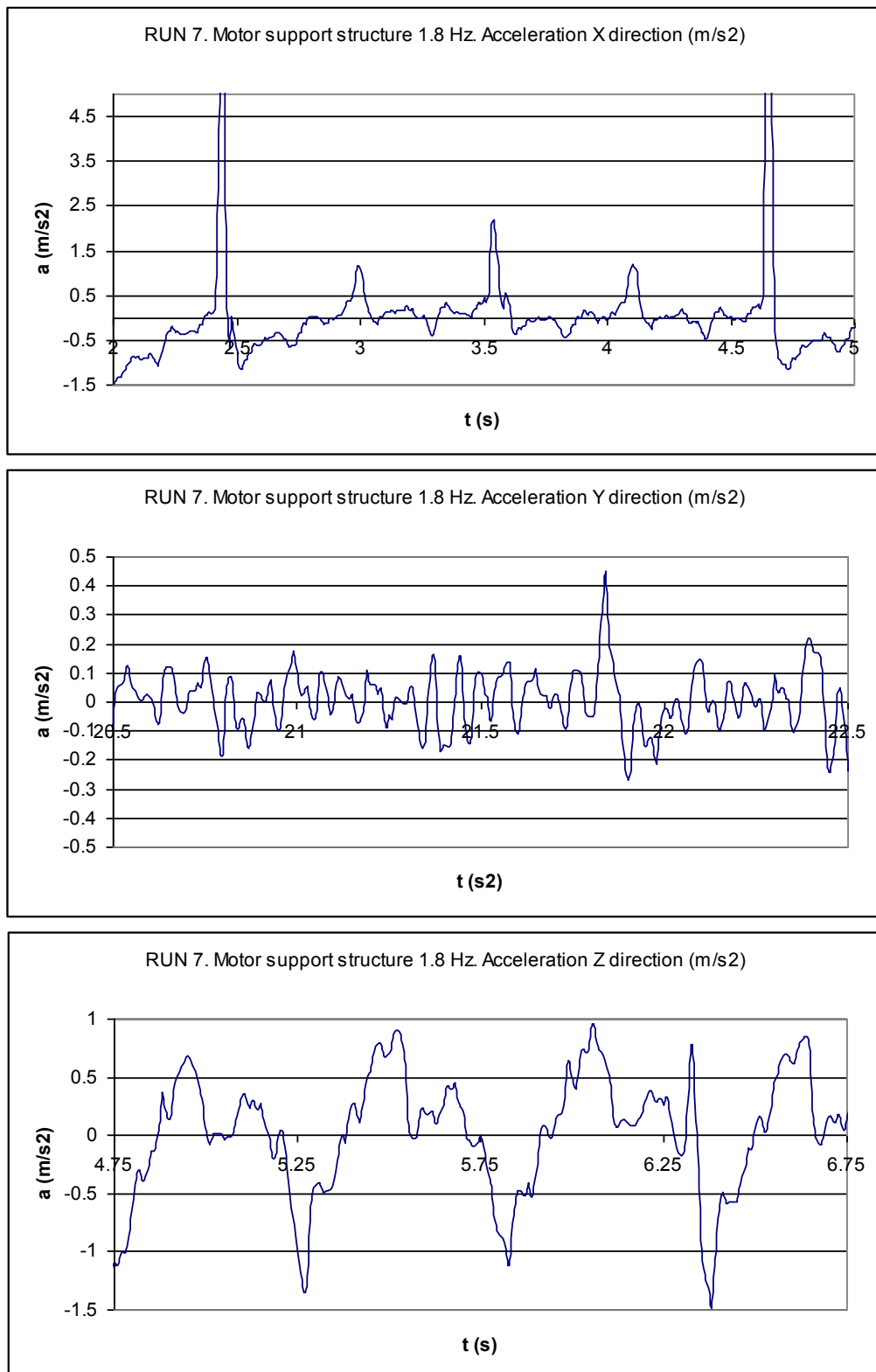


Figura 3-71: Gràfiques d'acceleracions del test 7 a 1.8 Hz de velocitat d'excitació

▪ **Acceleracions del Test 7 en direcció X, Y i Z a 3.7Hz.**

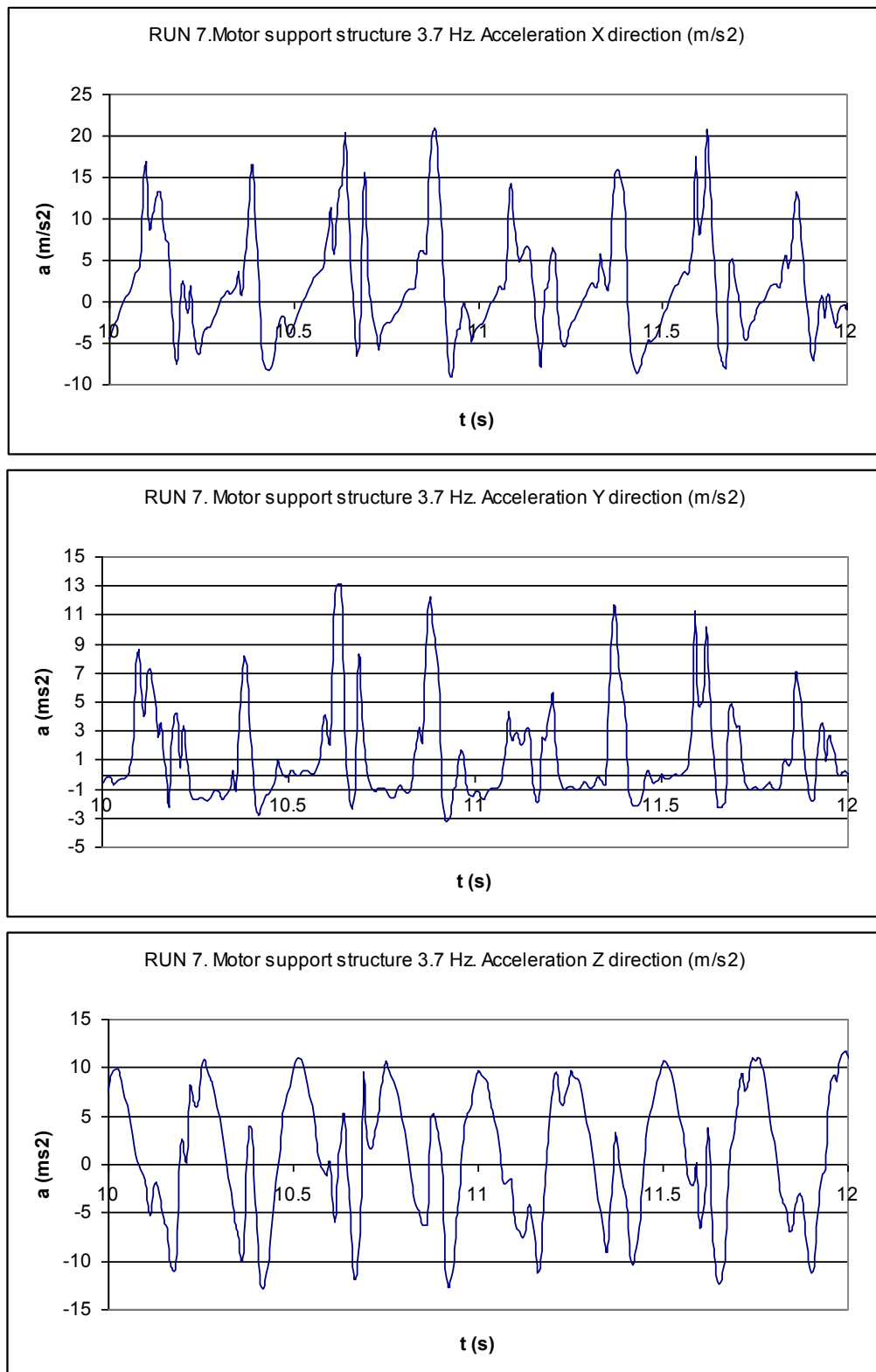


Figura 3-72: Gràfiques d'acceleracions del test 7 a 3.7 Hz de velocitat d'excitació

▪ **Acceleracions del Test 7 en direcció X, Y i Z a 5.6Hz.**

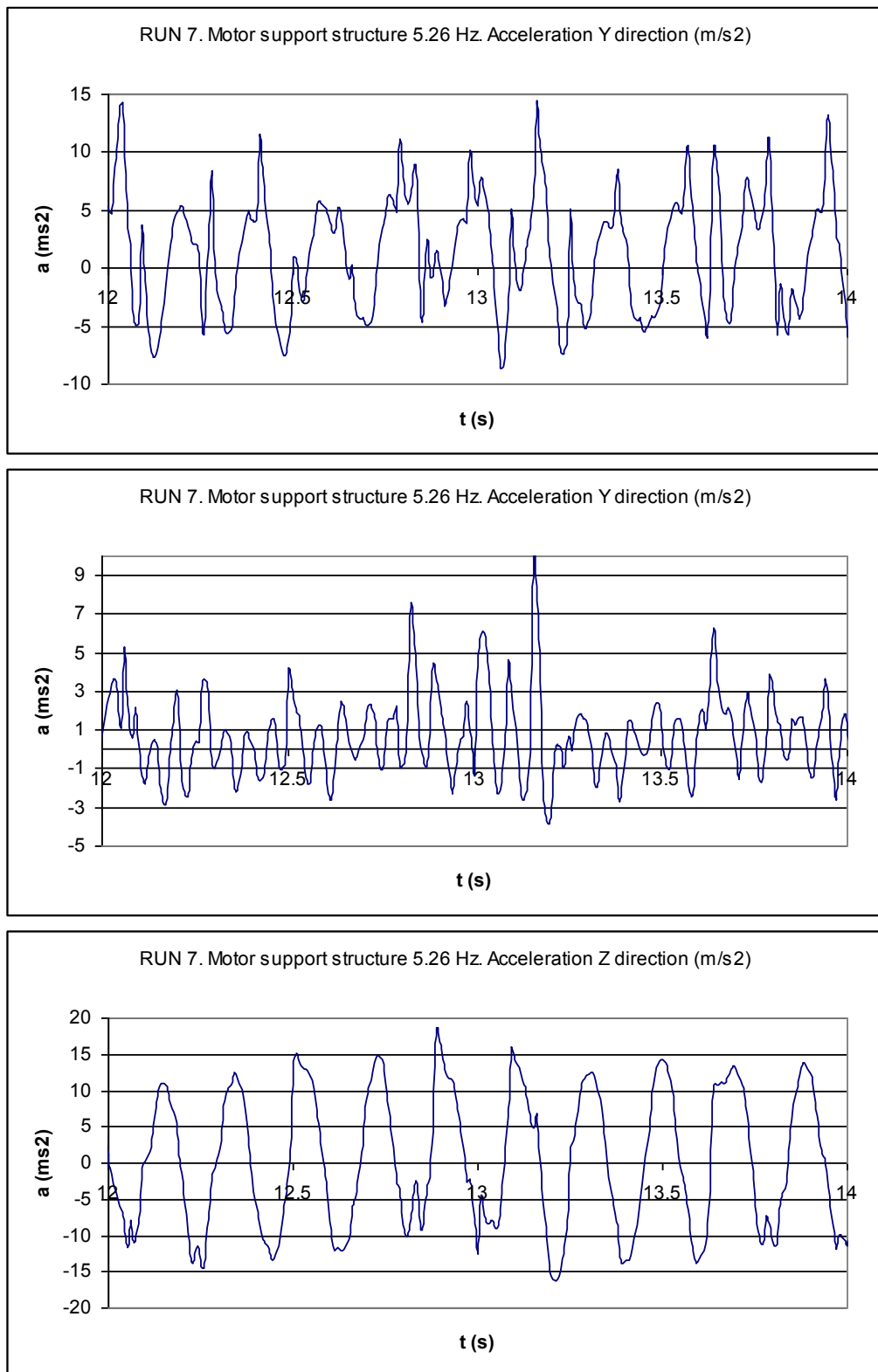


Figura 3-73: Gràfiques d'acceleracions del test 7 a 5.6 Hz de velocitat d'excitació

▪ **Acceleracions del Test 9 en direcció X, Y i Z a 1.8Hz.**

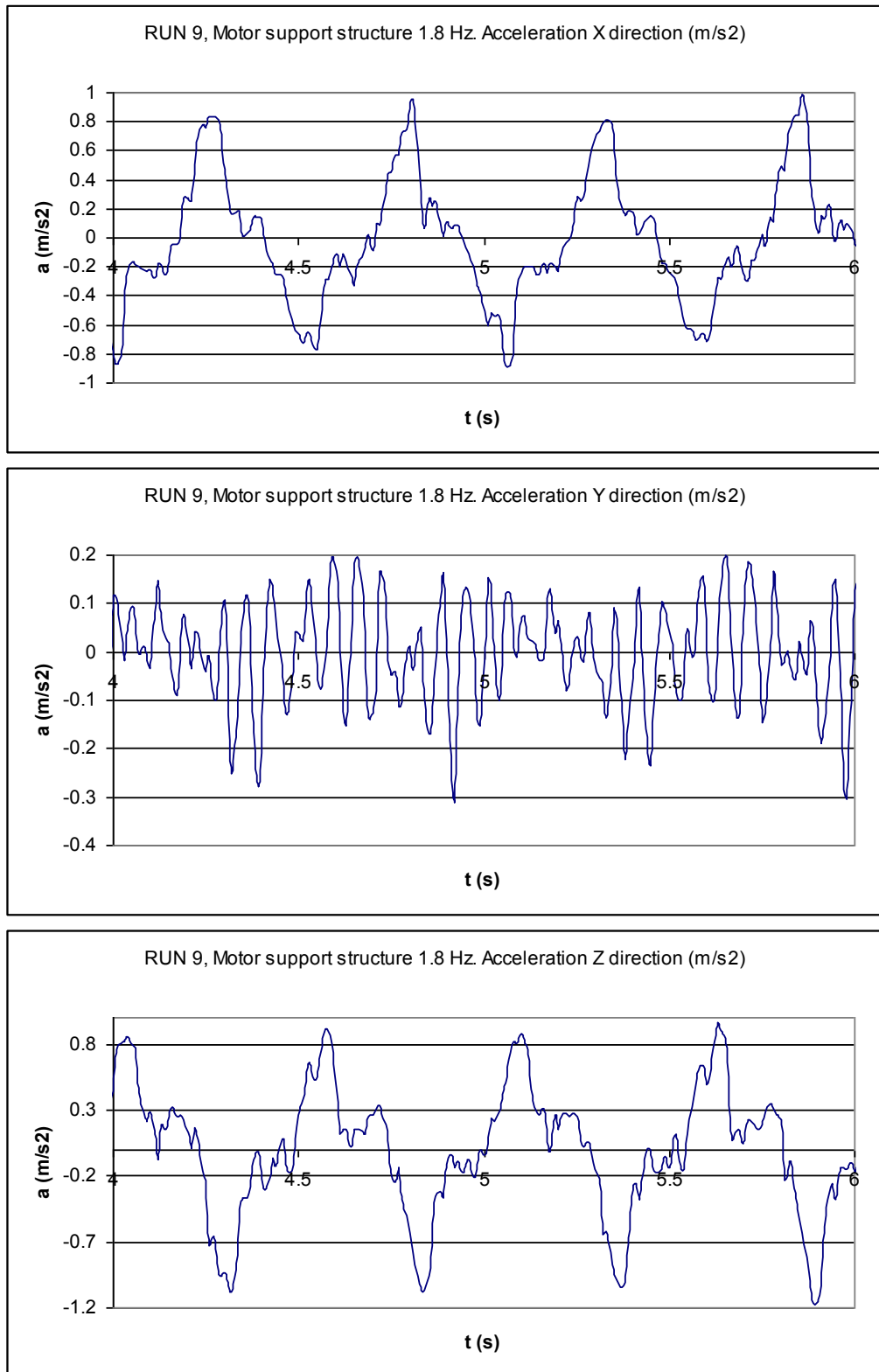


Figura 3-74: Gràfiques d'acceleracions del test 9 a 1.8 Hz de velocitat d'excitació

▪ **Acceleracions del Test 9 en direcció X, Y i Z a 3.7Hz.**

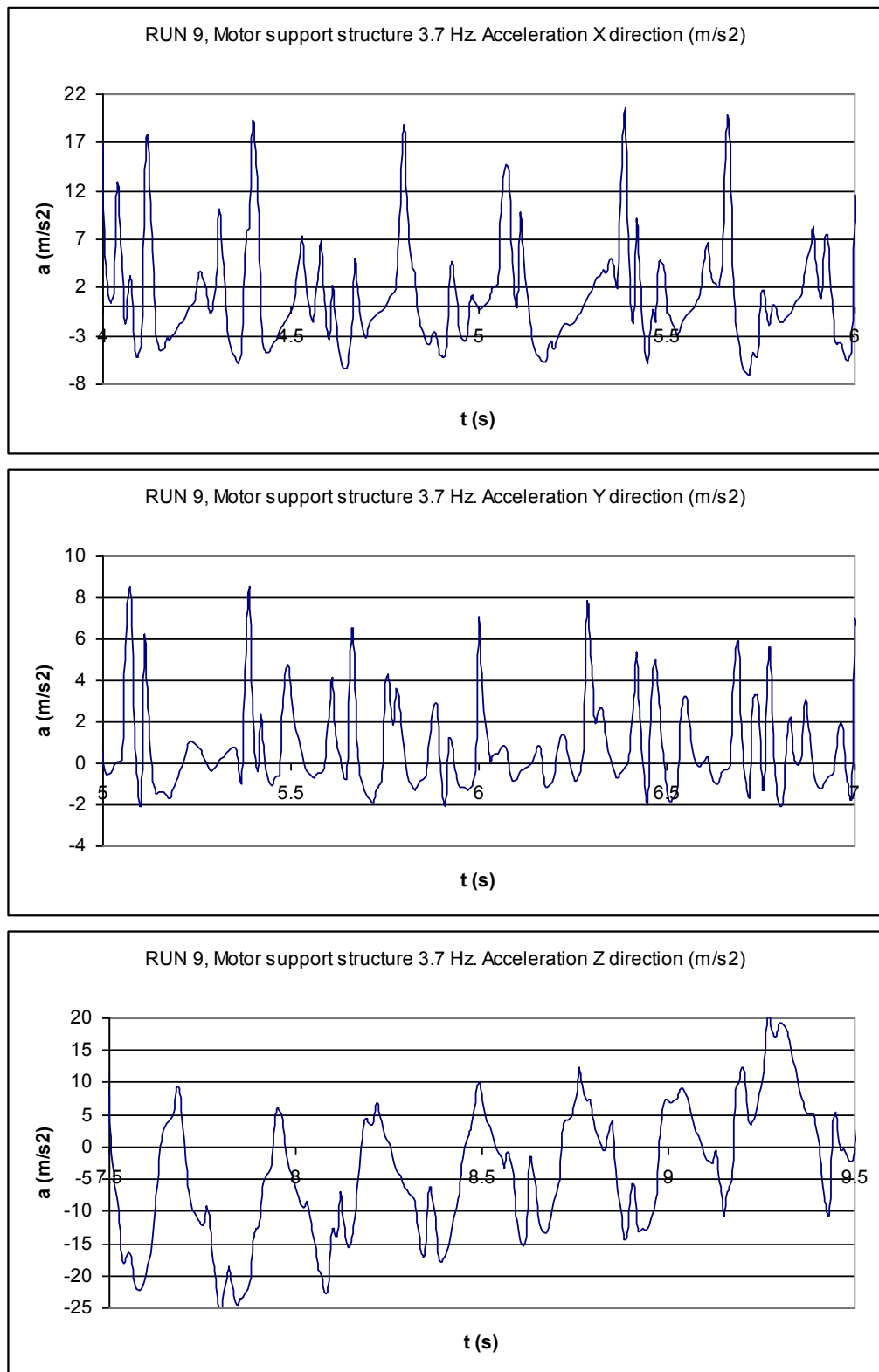


Figura 3-75: Gràfiques d'acceleracions del test 9 a 3.7 Hz de velocitat d'excitació

▪ **Acceleracions del Test 9 en direcció X, Y i Z a 5.6Hz.**

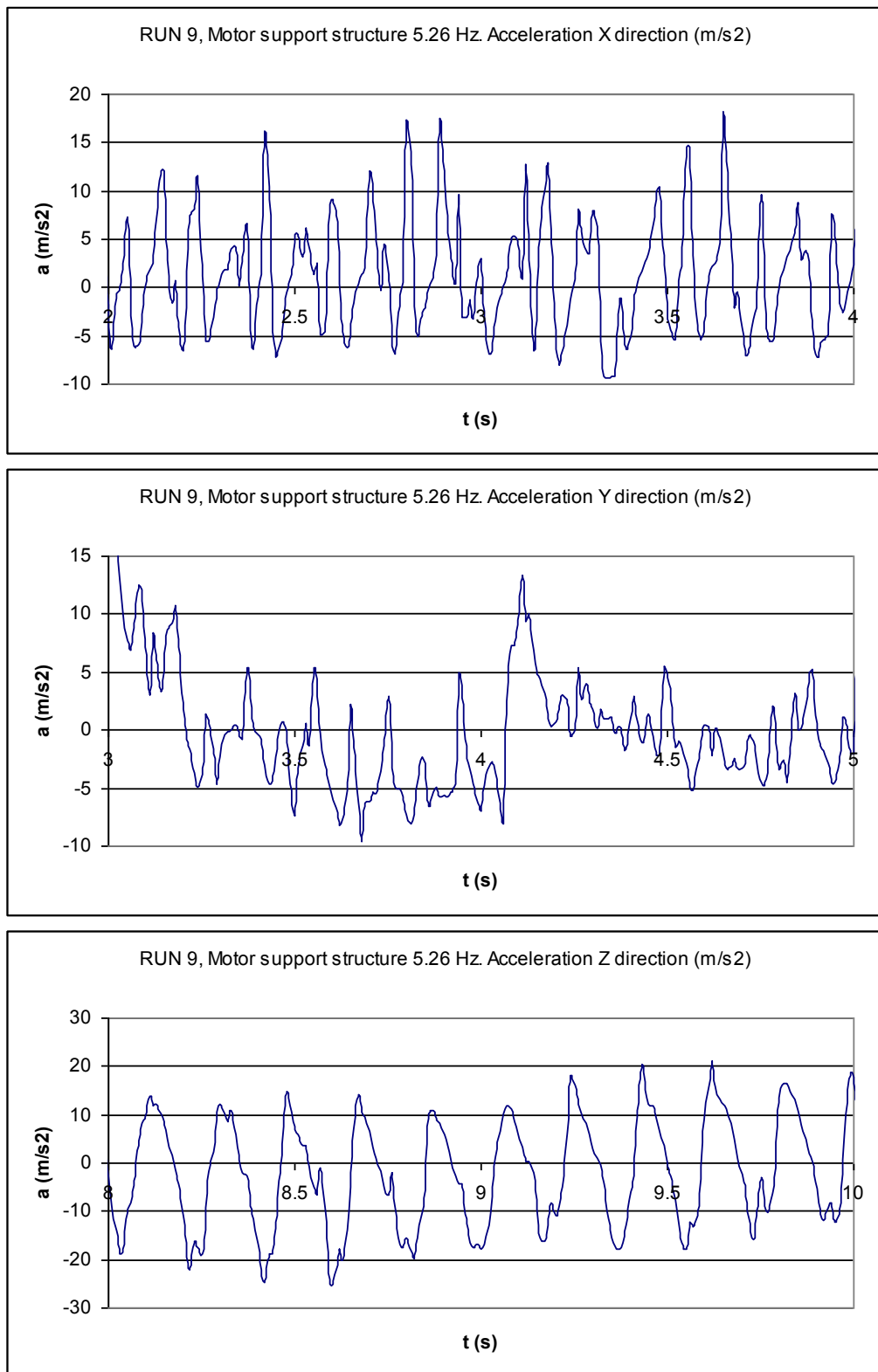


Figura 3-76: Gràfiques d'acceleracions del test 9 a 5.6 Hz de velocitat d'excitació

▪ **Acceleracions del Test 10 en direcció X, Y i Z a 1.8Hz.**

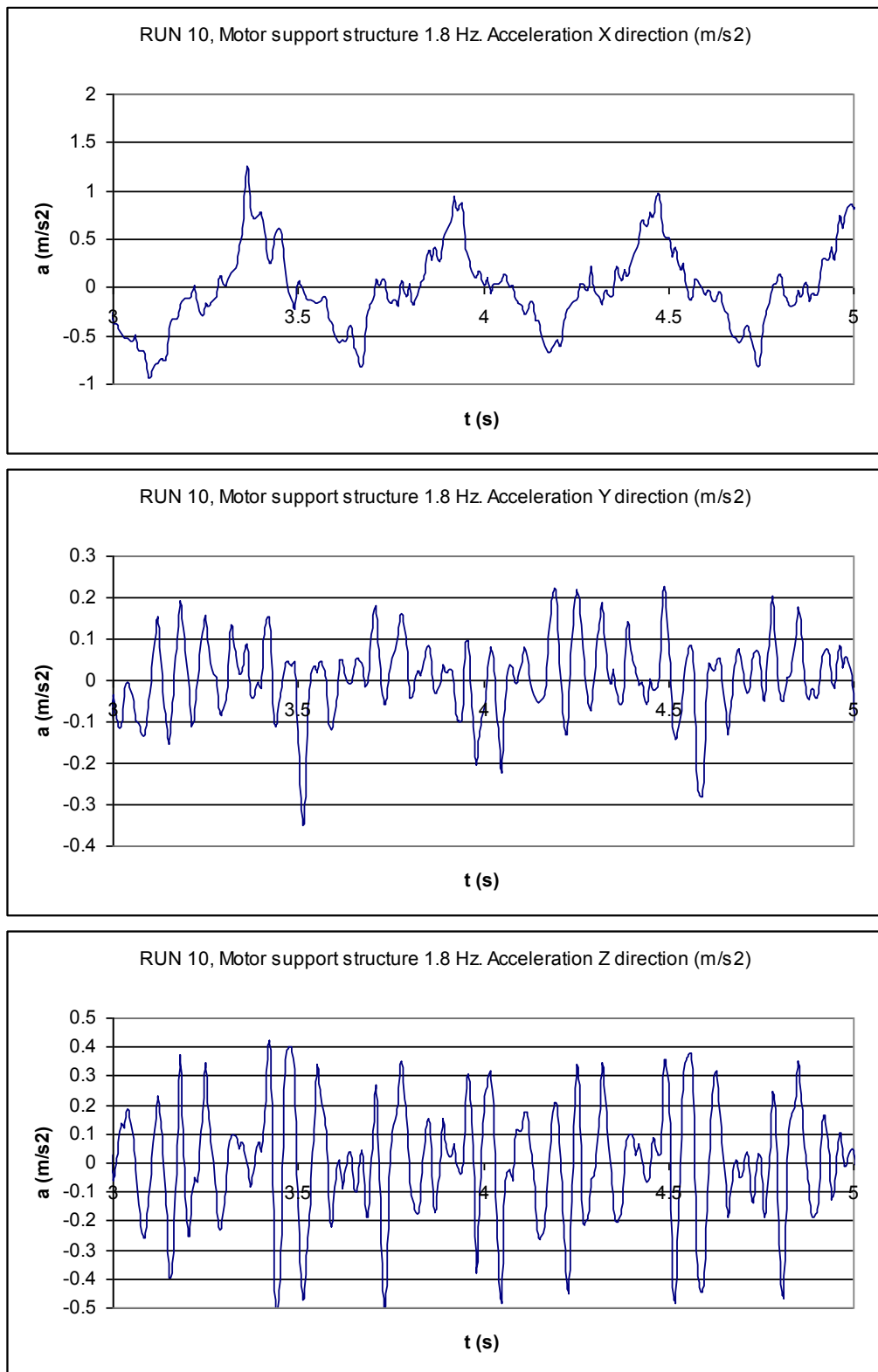


Figura 3-77: Gràfiques d'acceleracions del test 10 a 1.8 Hz de velocitat d'excitació

▪ **Acceleracions del Test 10 en direcció X, Y i Z a 3.7Hz.**

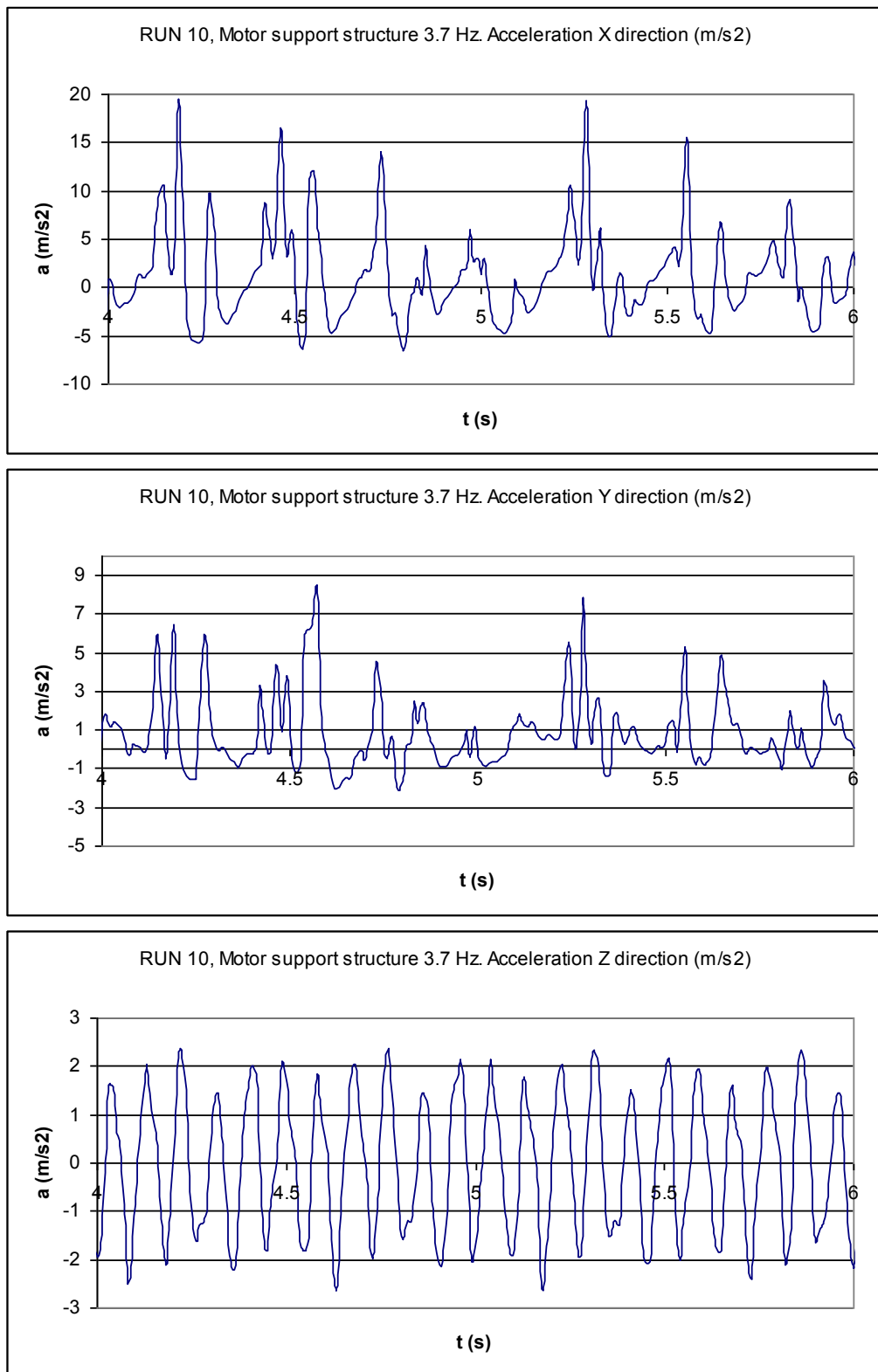


Figura 3-78: Gràfiques d'acceleracions del test 10 a 3.7 Hz de velocitat d'excitació

▪ **Acceleracions del Test 10 en direcció X, Y i Z a 5.6Hz.**

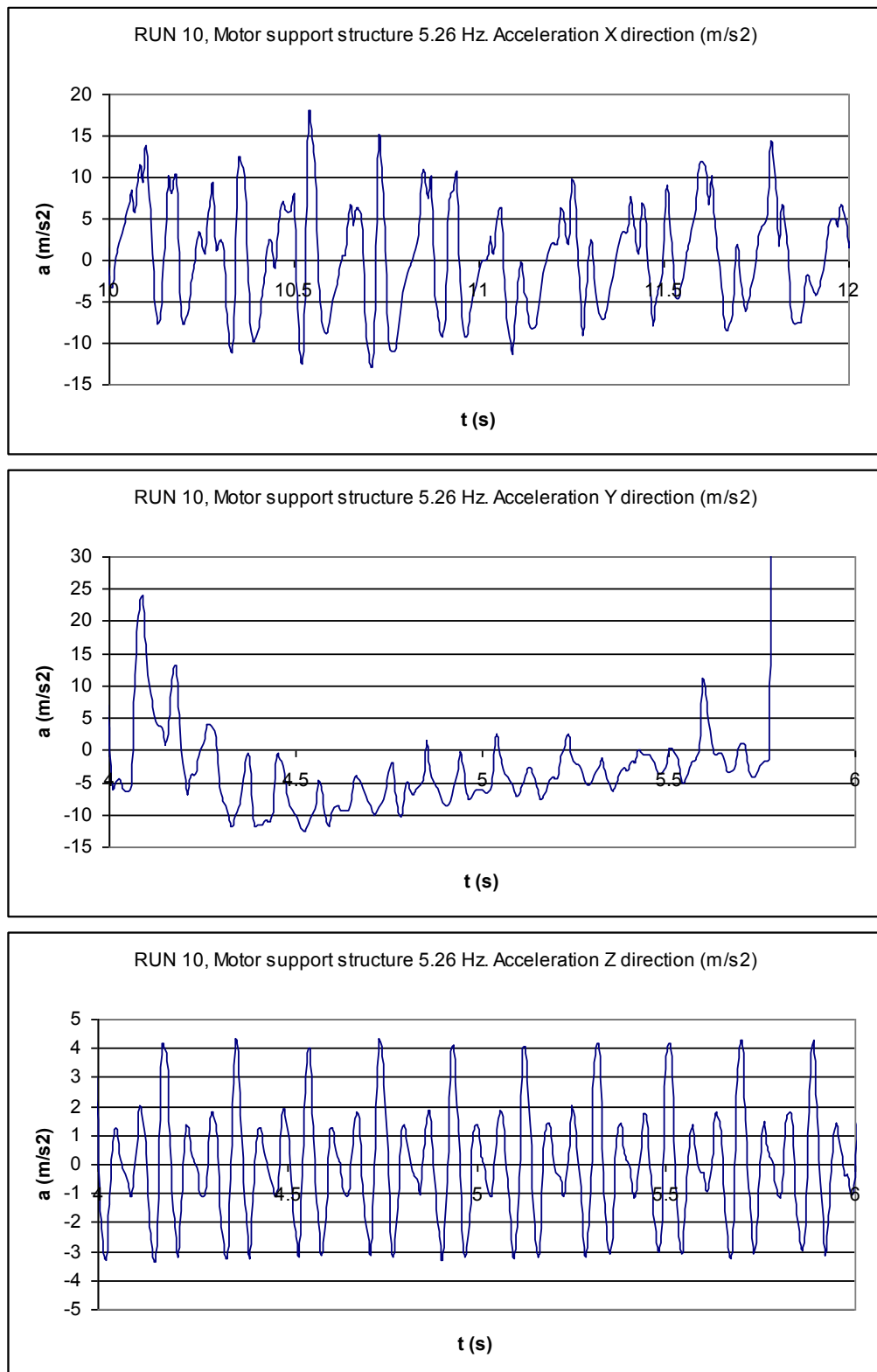


Figura 3-79: Gràfiques d'acceleracions del test 10 a 5.6 Hz de velocitat d'excitació

▪ **Acceleracions del Test 11 en direcció X, Y i Z a 1.8Hz.**

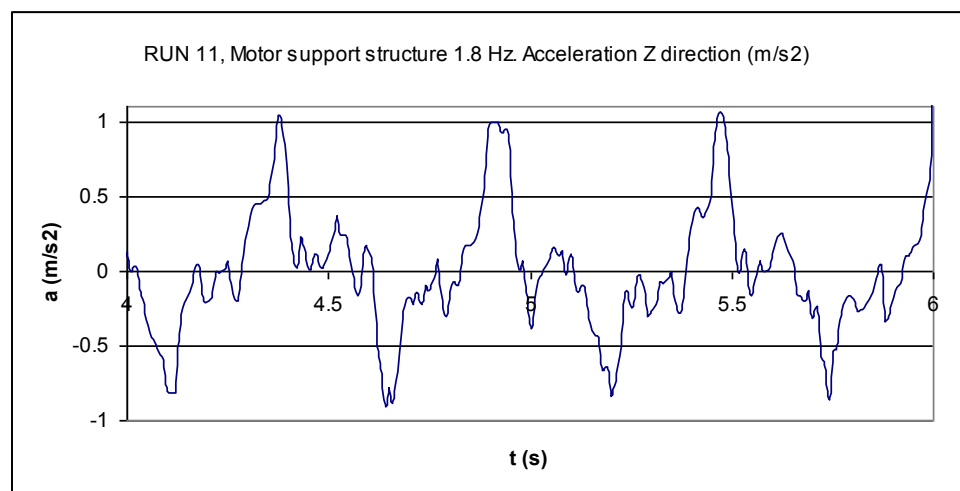
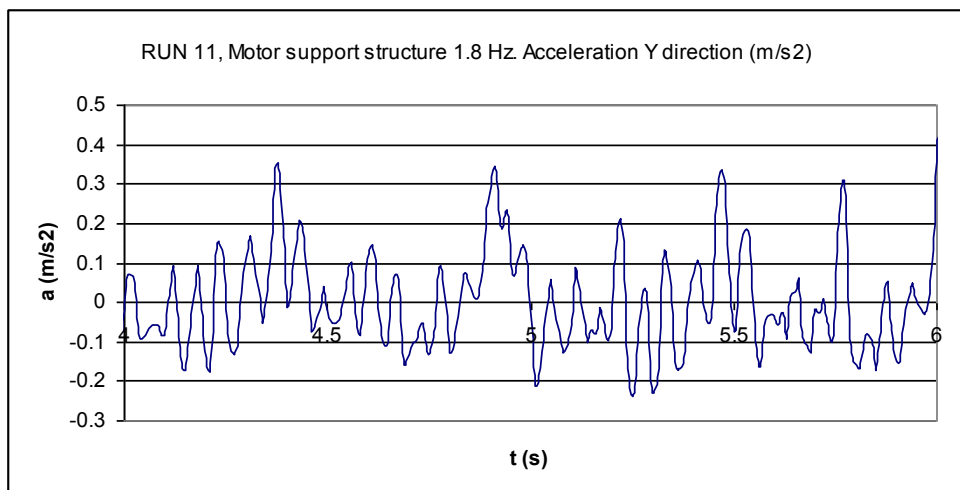
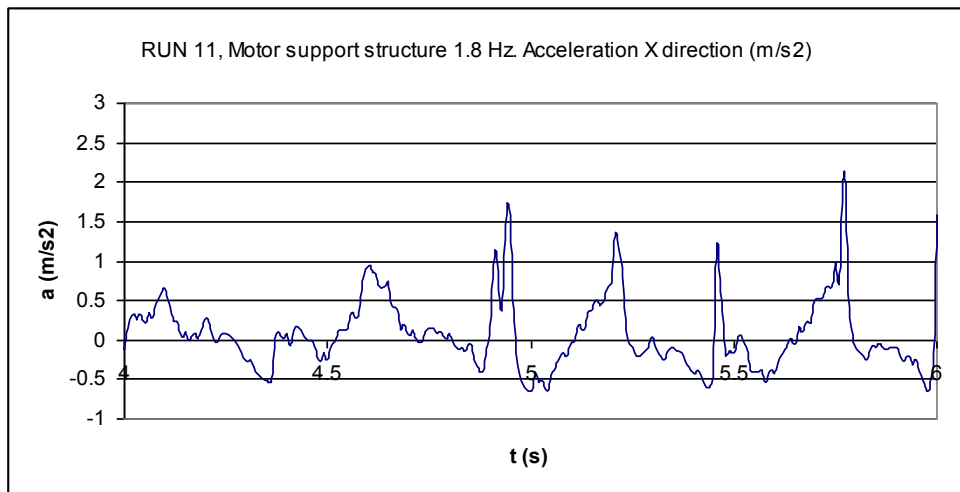


Figura 3-80: Gràfiques d'acceleracions del test 11 a 1.8 Hz de velocitat d'excitació

(Acceleracions del Test 11 en direcció X, Y i Z a 3.7Hz i 5.6Hz no realitzat)

3.12.5.4 Conclusions del Test d'Acceleracions

La següent taula mostra un resum dels valors d'amplitud de les acceleracions obtingudes d'acord a les gràfiques exposades:

Nº	Posició acceler.	Valors d'amplitud d'acceleració (m/s ²)								
		Freqüència d'excitació 1.8Hz			Freqüència d'excitació 3.7Hz			Freqüència d'excitació 5.6Hz		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	Suport motor	1.00	0.33	1.5	21.0	6.0	29.0	30.0	10.0	35.0
2	UR	0.5	0.7	0.2	2.0	6.5	1.3	10.0	6.1	2.0
3	LR	0.25	0.55	0.15	1.0	5.0	1.0	3.5	7.0	3.0
4	LL	0.22	0.8	0.12	0.7	5.0	0.9	6.5	9.0	8.0
5	UL	0.35	0.65	0.15	1.9	7.0	0.8	12.0	8.0	15.0
6	Bancada de test	0.25	0.03	0.006	1.2	0.15	0.025	0.05	0.22	0.06
7	Suport del motor	3.3	0.5	2.5	30.0	15.0	24.0	22.5	11.0	34.0
9	Suport del motor	1.9	0.55	2.0	27.0	10.0	33.0	24.0	22.0	40.0
10	Suport del motor	1.8	0.35	0.9	24.0	9.5	5.0	24.0	10.0	7.5
11	Suport del motor	2.5	0.4	1.7	-	-	-	-	-	-

Taula 3-19: Resum valors d'acceleracions

De la taula anterior se'n poden extreure les següents conclusions:

- Els valors d'acceleració màxima (40m/s²) es produeixen en direcció Z-Z del suport del motor i a la màxima freqüència d'excitació (5.6Hz).
- Els valors d'acceleració mínima (0.006m/s²) es produeixen en direcció Z-Z a la bancada de test i a la mínima freqüència d'excitació (1.8Hz).
- S'observa com els valors d'acceleració són semblants pels quatre eixos de suport. Tot i que, l'eix de suport UL presenta acceleracions superiors a la mitjana (destaca l'acceleració de 15m/s² a 5.6Hz en direcció Z-Z quan la mitjana dels altres tres eixos és 4.33m/s²). S'atribueix aquest fet a una excitació local a aquesta freqüència.
- Respecte a les acceleracions sobre el suport del motor cal destacar la comparativa entre el test número 9 (amortidors connectats amb 2 curtcircuits) i el test número 10 (amortidors connectats amb 4 curtcircuits). Per tant, la forma de connexió dels amortidors afecta decisivament a les acceleracions transmeses.

- Cal destacar també els baixos valors d'acceleració obtinguts sobre la bancada de test. S'observa com els valors d'acceleració que es propaguen fins la bancada a la màxima freqüència d'excitació són 22.7 vegades menors que els valors d'acceleració mitjana dels eixos de suport (0.33m/s^2 d'acceleració mitjana de la bancada de test respecte 7.5m/s^2 d'acceleració mitjana dels eixos de suport).

3.12.6 Resum dels resultats de test

La següent taula mostra un resum dels resultats de test obtinguts indicant si el resultat es considera acceptat per la caracterització del model FEM, o bé és descartat.

Paràmetre de test	Direccions testejades	Criteri (Acceptat/Descartat)	Referència dels resultats obtinguts
Desplaçaments	Desplaçament en direcció X-X	Acceptat	Veure secció 3.12.4
	Desplaçament en direcció Y-Y	Acceptat	Veure secció 3.12.4
	Desplaçament en direcció Z-Z	Acceptat	Veure secció 3.12.4
Fricció	Força de fricció mínima a guia vertical	Acceptat	Veure secció 3.12.2
	Força de fricció mínima a conjunt excitador	Acceptat	Veure secció 3.12.2
Acceleracions	Acceleració en direcció X-X	Acceptat	Veure secció 3.12.5
	Acceleració en direcció Y-Y	Acceptat	Veure secció 3.12.5
	Acceleració en direcció Z-Z	Acceptat	Veure secció 3.12.5
Forces	Esforç tallants en direcció X-X	Descartat	Hi ha efecte del moment sobre el tallant (<i>crosstalk</i>) Veure secció 3.12.3.6
	Esforç tallants en direcció Z-Z:	Descartat	Hi ha efecte del moment sobre el tallant (<i>crosstalk</i>) Veure secció 3.12.3.6
Moments	Moment flector en direcció X-X	Acceptat	Veure secció 3.12.3.3
	Moment flector en direcció Z-Z	Acceptat	Veure secció 3.12.3.3

Taula 3-20: Resum resultats de test

És possible descartar els esforços tallants sense penalitzar el model FEM ja que aquestes forces es poden obtenir un cop caracteritzat el model.

Capítol 4.

APLICACIÓ AL SISTEMA VIF: MODEL FEM I CORRELACIÓ

Aquest capítol consta bàsicament de dues parts clarament diferenciades: a la primer apart, es descriu el model FEM utilitzat, i a la segona part es detalla com s'ha realitzat la validació d'aquest model FEM.

A la part de descripció del model FEM, es descriu acuradament el model utilitzat per simular el comportament del Sistema VIF, indicant les seves característiques principals.

A la part de validació del model FEM, es mostra la correlació i validació del model FEM d'acord amb el comportament del Sistema VIF segons els tests efectuats i descrits al capítol anterior.

D'aquesta manera, al final d'aquest capítol, s'obté un model validat amb idèntic comportament al Sistema VIF real. La introducció de les particulars condicions de contorn de l'espai al model ja validat permetrà, en el capítol posterior, conèixer el comportament que tindria el Sistema VIF sotmès a aquestes particulars condicions.

4.1 Elecció del software d'Elements Finites

El primer pas abans de desenvolupar el model d'Elements Finites (FEM), ha estat escollir un software adequat a l'anàlisi que es vol realitzar. Aquest software ha de tenir les següents prestacions:

- Permetre l'anàlisi de múltiples sòlids (*multi-body tool*) que serien les diferents peces en que està format el Sistema VIF i l'equip MARES.
- Permetre modelat unidimensional (bigues), evitant així la importació de sòlids que requereixin complexos mallats i alt temps de processat. D'aquesta manera s'aconsegueix un model parametrizat que sigui prou àgil per permetre ràpides modificacions.
- Permetre l'estudi de mecanismes formats per sòlids rígids, per tal de poder determinar les forces i moments que es transmeten.
- Permetre l'anàlisi de tensions i deformacions per tal de poder determinar el valor de les tensions que apareixen degut a les forces i moments que arriben al Sistema VIF.
- Permetre anàlisis no lineals per tal de poder analitzar (en cas que l'estudi així ho requereixi) el comportament d'elements particulars sotmesos a deformacions elàstiques grans i el comportament del contacte entre parts dels mecanismes.

Per tant, es fa necessari un software que sigui capaç de combinar l'estudi de múltiples sòlids, l'estudi de mecanismes i l'anàlisi per elements finits.

Un cop avaluat els softwares d'elements finits més habituals a nivell comercial (*Nastran for Windows, Ansys, Algor, Cosmos, Samcef*), finalment, s'ha optat pel software MECANO de *Samcef*, tot i que altres softwares també permetrien realitzar aquest anàlisi. Aquest software correspon a un mòdul d'anàlisi que s'instal·la sobre el programa d'elements finits *Samcef*.

Samcef MECANO permet solucionar els següents problemes físics:

- **Resposta estàtica:** càlcul de desplaçaments, de tensions associades i de forces degut a càrregues estàtiques addicionals.
- **Resposta cinemàtica:** càlcul dels desplaçaments, velocitats i acceleracions en funció del temps.
- **Resposta dinàmica:** determinació del moviment dins d'un sistema estructural o mecànic (incloent la inèrcia) sotmès ja sigui a càrregues en funció del temps, o a peces amb moviment forçat (imposant posició, velocitat o acceleració).

D'acord amb aquestes prestacions, es comprova que aquest software és adequat per la simulació que es vol dur a terme.

4.2 Descripció del model FEM

A continuació es descriu el model FEM desenvolupat corresponent al Sistema VIF. La següent imatge mostra el model FEM utilitzat per fer la simulació amb el programa MECANO de *Samcef*, indicant els elements més destacables, així com la imatge del model CAD.

- **Descripció de les parts principals del model FEM:** a la següent imatge es detallen les parts més importants del model FEM.

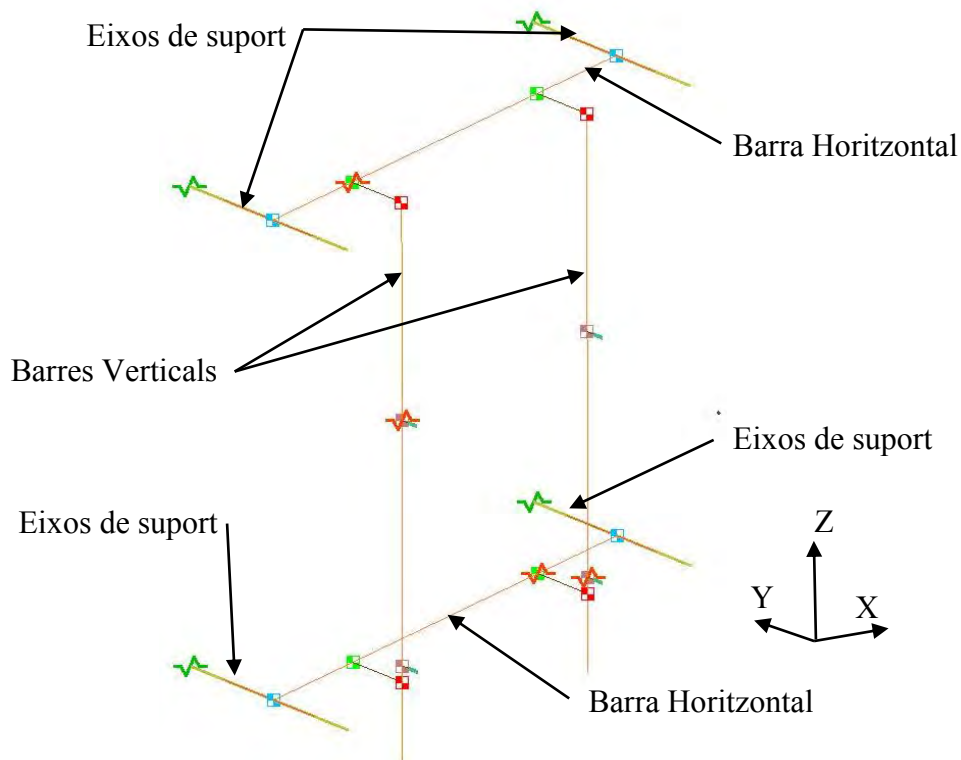


Figura 4-1: Descripció de les parts principals del model FEM

- **Descripció de les connexions principals del model FEM:** a la següent imatge es
- detallen les connexions més importants del model FEM.

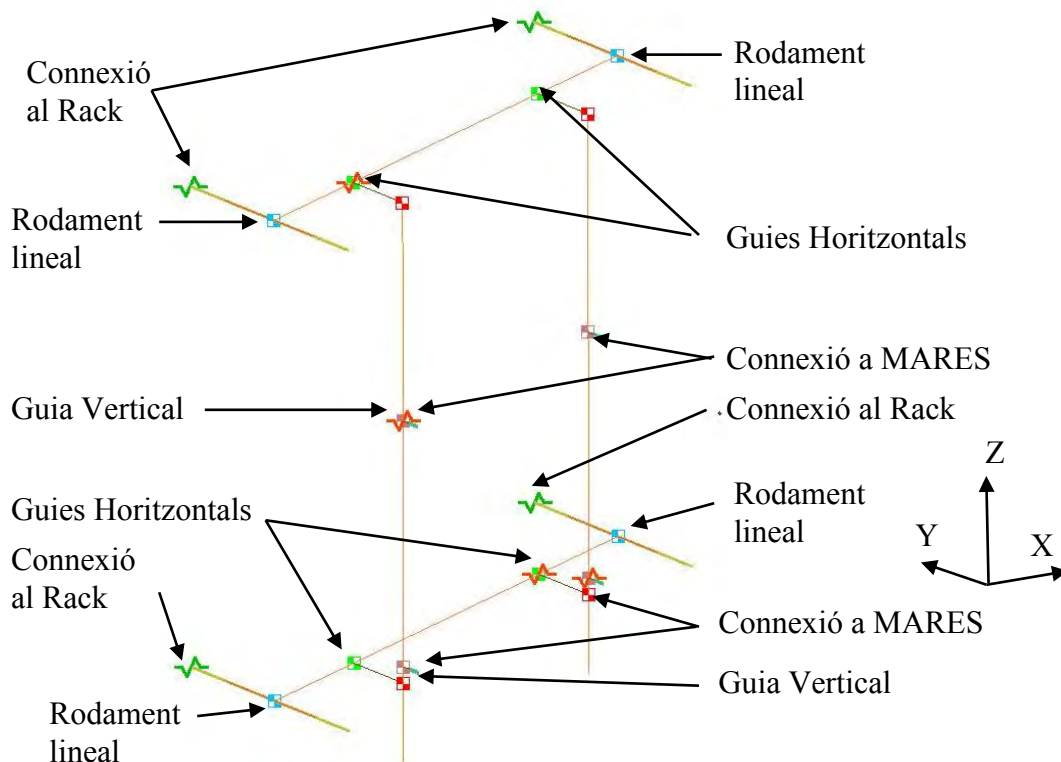


Figura 4-2: Descripció de les connexions principals del model FEM

Del model FEM mostrat a la imatge anterior, cal destacar les següents característiques:

- **Massa del model FEM:** la massa total del model FEM coincideix amb els 121.5kg del sistema real. El valor de densitat dels elements modelats s'ha ajustat per aconseguir la massa del sistema real.
- **Modelat de guies i suports:** s'utilitzen elements massa per simular el pes de les guies i els diferents elements de suport sobre les barres.
- **Connexió de l'equip MARES al Sistema VIF:** l'equip MARES es simula connectat al Sistema VIF pels mateixos punts on estava ficat el conjunt excitador.
- **Modelat de les barres del Sistema VIF:** les barres principals del Sistema VIF s'han modelat usant elements biga que permeten una fàcil parametrització i un comportament adequat al propòsit de l'anàlisi. S'han usat els següents paràmetres mecànics per la modelització:

Elements	Valor
Barres Horitzontals	
Secció	0.003302 m ²
Moment d'inèrcia I _{yy}	6.4236e-7 m ⁴
Moment d'inèrcia I _{zz}	3.9737e-7 m ⁴
Moment d'inèrcia a torsió I _t	5.37e-7 m ⁴
Barres Verticals	
Secció	0.003062 m ²
Moment d'inèrcia I _{xx}	4.3509e-7 m ⁴
Moment d'inèrcia I _{yy}	3.483e-7 m ⁴
Moment d'inèrcia a torsió I _t	4.46e-7 m ⁴
Material	
Mòdul de Young (E)	7.0e10 N/m ²
Coefficient de Poisson	0.3
Densitat	2760 kg/m ³

Taula 4-1: Paràmetres mecànics de les barres del model FEM

- **Posició inicial del Sistema VIF:** s'ha definit la posició del VIF per l'estudi com la posició centrada en les tres direccions dins del marge de moviment.
- **Interfícies del model FEM:** (no aplicable per la correlació del model, però necessari per l'anàlisi posterior per predir el comportament en ingravidesa).
 - *Connexió amb equip MARES:* La connexió amb l'equip MARES (Main Box) es simula per mitjà de quatre elements rígids.
 - *Connexió amb el ISPR Rack:* La connexió amb el Rack que suporta el Sistema VIF es simula per mitjà de quatre elements molla que connecten amb els Eixos de Suport del Sistema VIF.

La següent imatge mostra el Sistema VIF amb l'equip MARES instal·lat i anclat al Rack:

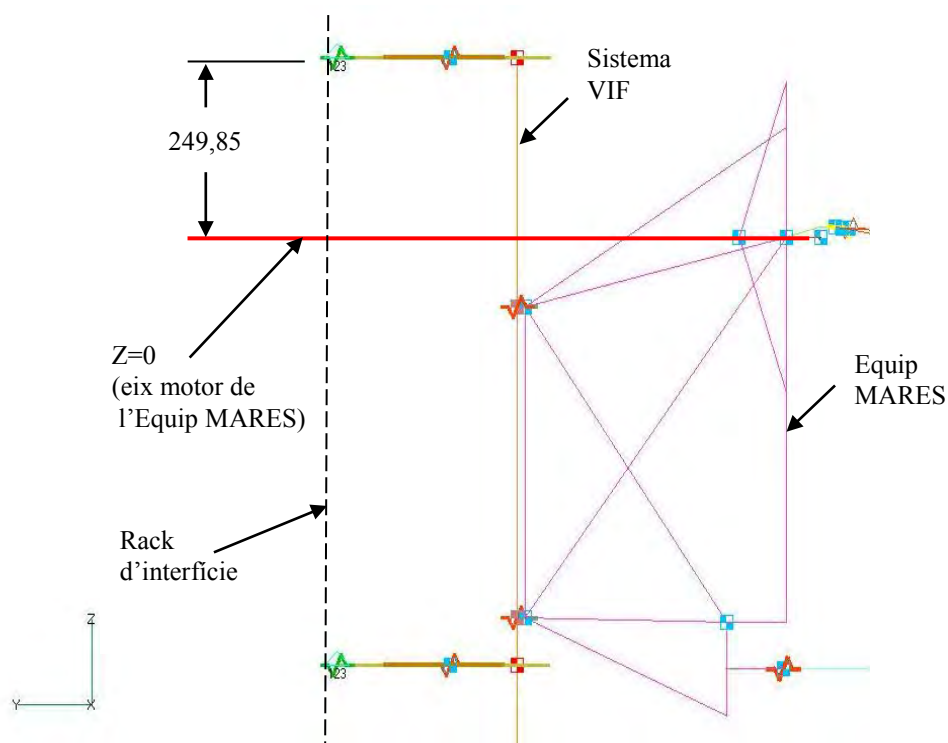


Figura 4-3: Model FEM del Sistema VIF integrat entre el Rack i l'equip MARES(Main Box)

- **Modelat del rodament lineal:** s'utilitzen elements biga amb dos punts de contacte amb la guia per simular el funcionament dels rodaments lineals. Els girs del rodament lineal és permès usant elements rígids amb dos graus de llibertat. Un element massa situat a l'extrem atorga la massa requerida al rodament. A la següent taula s'observen les propietats assignades als elements biga.

Elements	Valor
Guia lineal	
Secció	0.00196 m ²
Moment d'inèrcia I _{xx}	3.068e-7 m ⁴
Moment d'inèrcia I _{zz}	3.068e-7 m ⁴
Moment d'inèrcia a torsió I _t	6.136e-7 m ⁴
Rodament lineal	
Secció	0.00256 m ²
Moment d'inèrcia I _{xx}	1.789e-6 m ⁴
Moment d'inèrcia I _{zz}	1.789e-6 m ⁴
Coefficient de fricció	0.00294

Material	
Mòdul de Young (E)	2.0e11 N/m ²
Coefficient de Poisson	0.3
Densitat	7800 kg/m ³

Taula 4-2: Paràmetres mecànics de la guia i del rodament del model FEM

- **Modelat del molles i amortidors:** la següent taula mostra els valors assignats a les molles i amortidors del Sistema VIF

Situació	Elements	Valor
Barra horitzontal	Molles	200 N/m
	Amortidor	20 N/m/s
Barra vertical	Molles	200 N/m
	Amortidor	20 N/m/s
Connexió a Rack	Rodament Lineal	75 N/m

Taula 4-3: Paràmetres mecànics de molles i amortidors del model FEM

4.3 Procés de correlació

El procés de correlació que es descriu a continuació permet obtenir un model FEM amb un comportament acceptablement semblant al Sistema VIF testejat pel que fa a moments transmesos, acceleracions i desplaçaments.

4.3.1 Paràmetres a correlar en el model FEM

Es pretenen correlar els següents paràmetres del model FEM:

- **Moments:**
 - Per l'eix X-X a 1.8Hz per cada Eix de Suport (UL, UR, LL, LR)
 - Per l'eix Z-Z a 1.8Hz per cada Eix de Suport (UL, UR, LL, LR)
 - Per l'eix X-X a 3.7Hz per cada Eix de Suport (UL, UR, LL, LR)
 - Per l'eix Z-Z a 3.7Hz per cada Eix de Suport (UL, UR, LL, LR)
 - Per l'eix X-X a 5.25Hz per cada Eix de Suport (UL, UR, LL, LR)
 - Per l'eix Z-Z a 5.25Hz per cada Eix de Suport (UL, UR, LL, LR)

- **Acceleracions:**
 - Per l'eix X-X a l'estructura de suport del motor a 1.8Hz
 - Per l'eix X-X a l'estructura de suport del motor a 3.7Hz
 - Per l'eix Y-Y a l'estructura de suport del motor a 1.8Hz
 - Per l'eix Y-Y a l'estructura de suport del motor a 3.7Hz
 - Per l'eix Z-Z a l'estructura de suport del motor a 1.8Hz
 - Per l'eix Z-Z a l'estructura de suport del motor a 3.7Hz

- **Desplaçaments:**
 - Per l'eix X-X a 1.8Hz per cada Eix de Suport (UL, UR, LL, LR)
 - Per l'eix Z-Z a 1.8Hz per cada Eix de Suport (UL, UR, LL, LR)
 - Per l'eix X-X a l'estructura de suport del motor a 1.8Hz
 - Per l'eix Y-Y a l'estructura de suport del motor a 1.8Hz
 - Per l'eix Z-Z a l'estructura de suport del motor a 1.8Hz

4.3.2 Paràmetres que permeten la correlació del model FEM

Per aconseguir ajustar els moments, les acceleracions i els desplaçaments del model FEM amb les dades experimentals, és necessari actuar sobre els següents paràmetres presents en el model FEM ($DR[A9]$ i $DR[A10]$):

Paràmetres a iterar: Tenint en compte que la massa del model FEM ja s'ha ajustat d'acord amb la massa real del Sistema VIF, la resta de paràmetres a ajustar són:

- *Constants elàstiques de molles (k):* constants elàstiques de les molles presents al sistema molla esmorteïdor de les guies verticals. Inicialment definit segons les molles escollides.
- *Constants d'esmortiment en esmorteïdors (b):* constants d'esmortiment presents al sistema molla esmorteïdor de les guies verticals. Inicialment definit segons els esmorteïdors escollits.
- *Coefficients de fricció a les guies (Fr):* coeficients de fricció entre les guies verticals i les barres verticals, i entre les guies horitzontals i les barres horitzontals. Inicialment definit segons els tests efectuats.
- *Rigidesa de les barres:* rigidesa de les barres que configuren el Sistema VIF. Inicialment definit segons el material escollit i el disseny realitzat.

El procés utilitzat per correlar el model FEM ha estat ajustar primerament la rigidesa de les barres a partir d'un procés iteratiu per tal d'obtenir una transmissió de moments d'acord amb el test de moments efectuat. I posteriorment, s'ha actuat sobre les constants de les molles i esmorteïdors, i la fricció a les guies per tal d'ajustar el comportament d'acceleracions i desplaçaments d'acord amb els tests efectuats. Finalment, s'ha procedit a una validació global dels paràmetres amb un ajust fi, actuat de forma iterativa i més precisa per tal d'afinar la resposta del model FEM. En aquest últim procés d'ajust dels paràmetres, s'ha prioritzat la correlació dels moments per sobre de la correlació de les acceleracions i els desplaçaments.

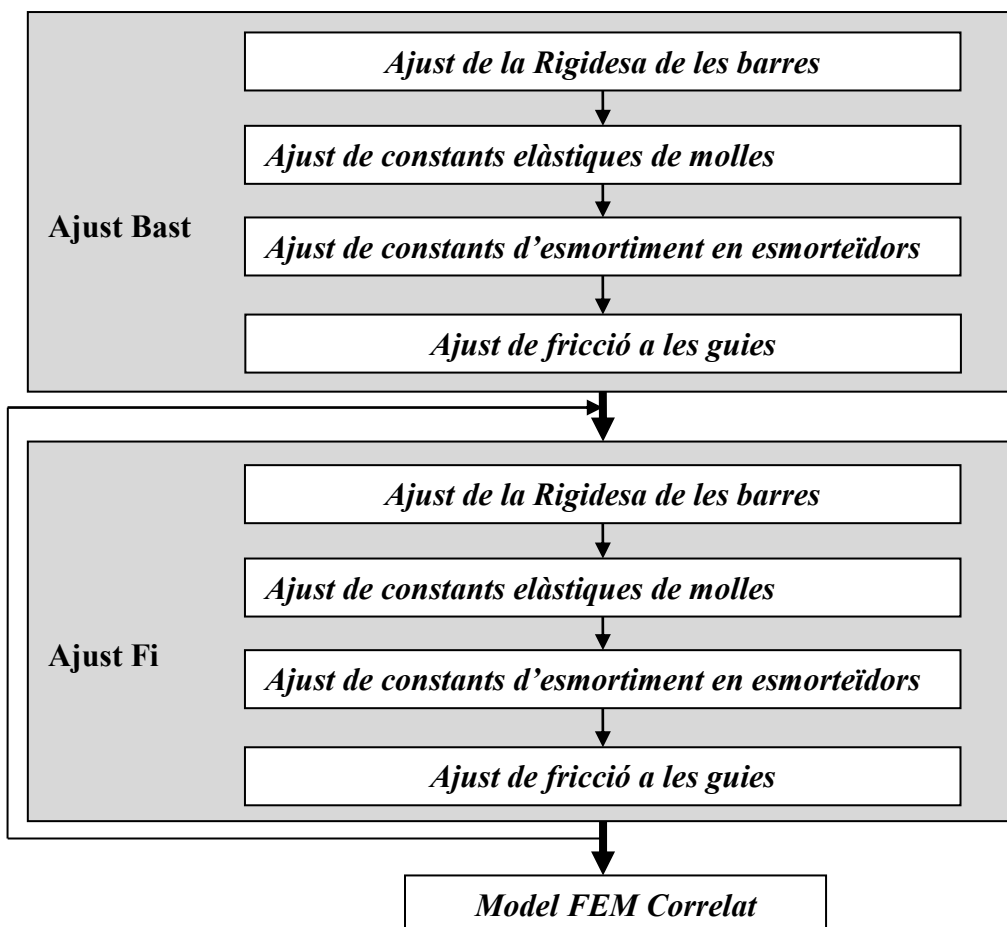


Figura 4-4: Procés d'ajust del model FEM

Un cop efectuat aquest procés d'ajust, s'arriba a una configuració consolidada del model FEM. S'obté així un model FEM acceptablement correlat pel propòsit que es persegueix i d'acord amb el comportament dels tests efectuats per moments, acceleracions i desplaçaments.

4.3.3 Criteri de correlació

S'exposa a continuació el criteri de correlació acordat amb el client que s'utilitza per comprovar la correlació del model FEM. Aquest criteri de correlació relaciona els valors de test obtinguts experimentalment sobre el Sistema VIF (veure Taula 3-20), amb els valors analítics que s'obtenen del model FEM (veure apartat següent). En aquest sentit, es defineix de la manera següent el ràtio de correlació, K :

$$K = \frac{\text{ValorTest}}{\text{ValorFEM}}$$

Idealment, el valor de K hauria de ser proper a 1. Com a marge límit de tolerància s'estableix que la correlació serà acceptable sempre i quan el valor del model FEM difereixi menys d'un 30% respecte el valor test.

Per tant el criteri de correlació és el següent:

- Paràmetres correlats satisfactòriament: aquells tals que $0.7 < K < 1,3$
- Paràmetres no correlats satisfactòriament: aquells tals que $K < 0.7$ ó $K > 1,3$

El criteri seguit per la correlació dels paràmetres consisteix en optimitzar la correlació de moments transmesos per tal de complir amb límit de toleràncies establert, i comprovar si són raonablement acceptables les discrepàncies que puguin aparèixer en la correlació d'acceleracions i desplaçaments.

Cal fer incís en el fet que, tant el criteri de correlació ($0.7 < K < 1,3$), com la prioritització de la correlació dels moments en front d'acceleracions i desplaçaments són criteris exposats, consensuats i aprovats pel client d'acord amb la finalitat, complexitat i propòsit global del projecte. Per tant, l'elecció d'aquests límits d'acceptació no respon en cap cas a una elecció arbitrària de l'autor. De totes maneres, l'utilització d'altres límits d'acceptació més restrictius o més permissius no tindrien cap efecte sobre la metodologia exposada.

4.3.4 Gràfiques de Correlació

A continuació es mostren les gràfiques dels moments, les acceleracions i els desplaçaments que permeten comparar el comportament del model FEM amb els resultats de test del Sistema VIF.

Es possible doncs comparar l'amplitud i la freqüència entre el comportament del model FEM i els resultats del test del Sistema VIF per moments, acceleracions i desplaçaments. S'aprecia un desfàs entre la gràfica del comportament de model FEM (en vermell) i les gràfiques de test (en blau). Aquest desfàs és irrellevant i tant sols correspon a temps diferents a l'hora d'iniciar la captura de les dades a graficar, essent idèntica la freqüència entre les gràfiques de test i les del model FEM.

▪ Moments en l'eix X-X a 1.8Hz per UL, UR, LL, LR

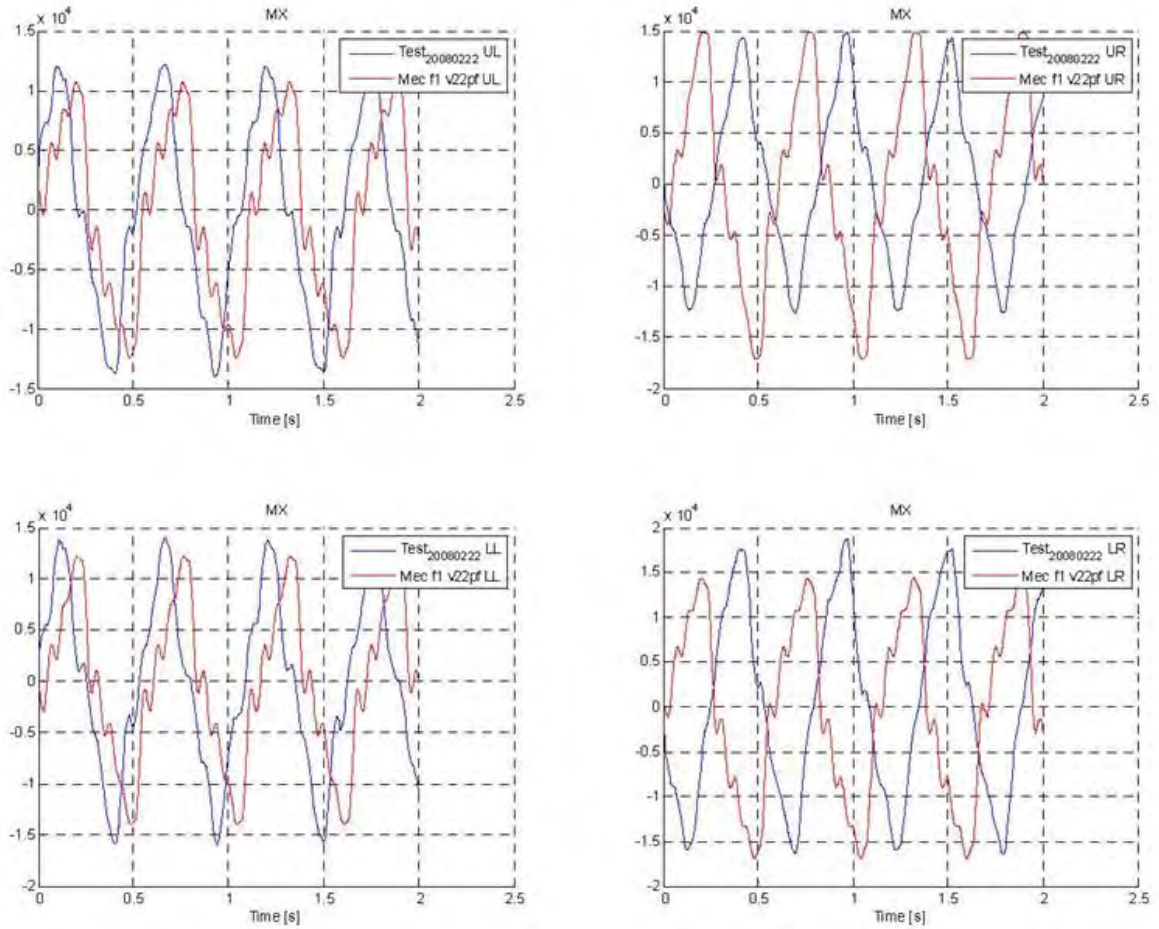
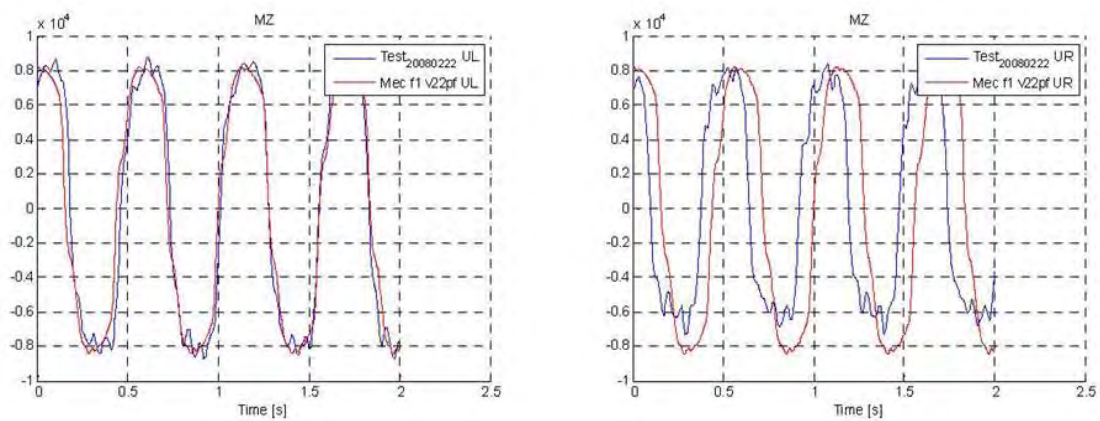


Figura 4-5: Moments en l'eix X-X a 1.8Hz per UL, UR, LL, LR

▪ Moments en l'eix Z-Z a 1.8Hz per UL, UR, LL, LR



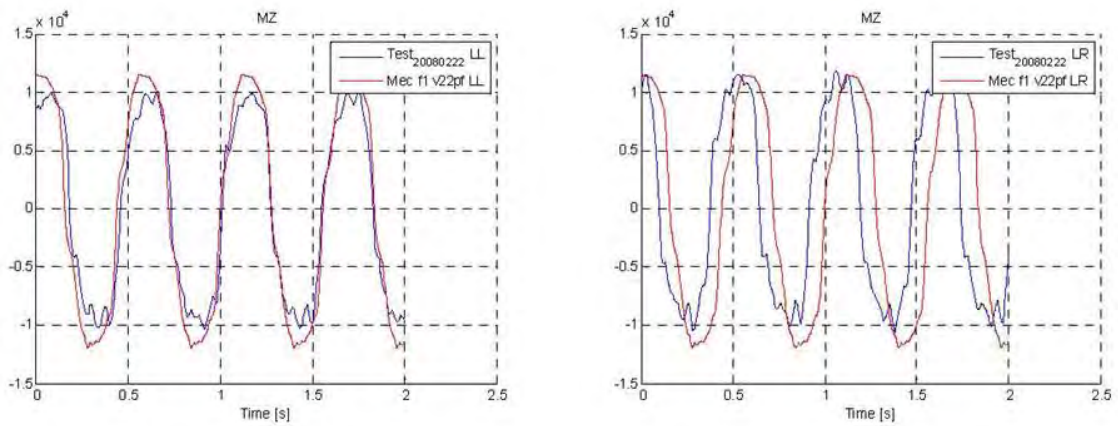


Figura 4-6: Moments en l'eix Z-Z a 1.8Hz per UL, UR, LL, LR

▪ Moments en l'eix X-X a 3.7Hz per UL, UR, LL, LR

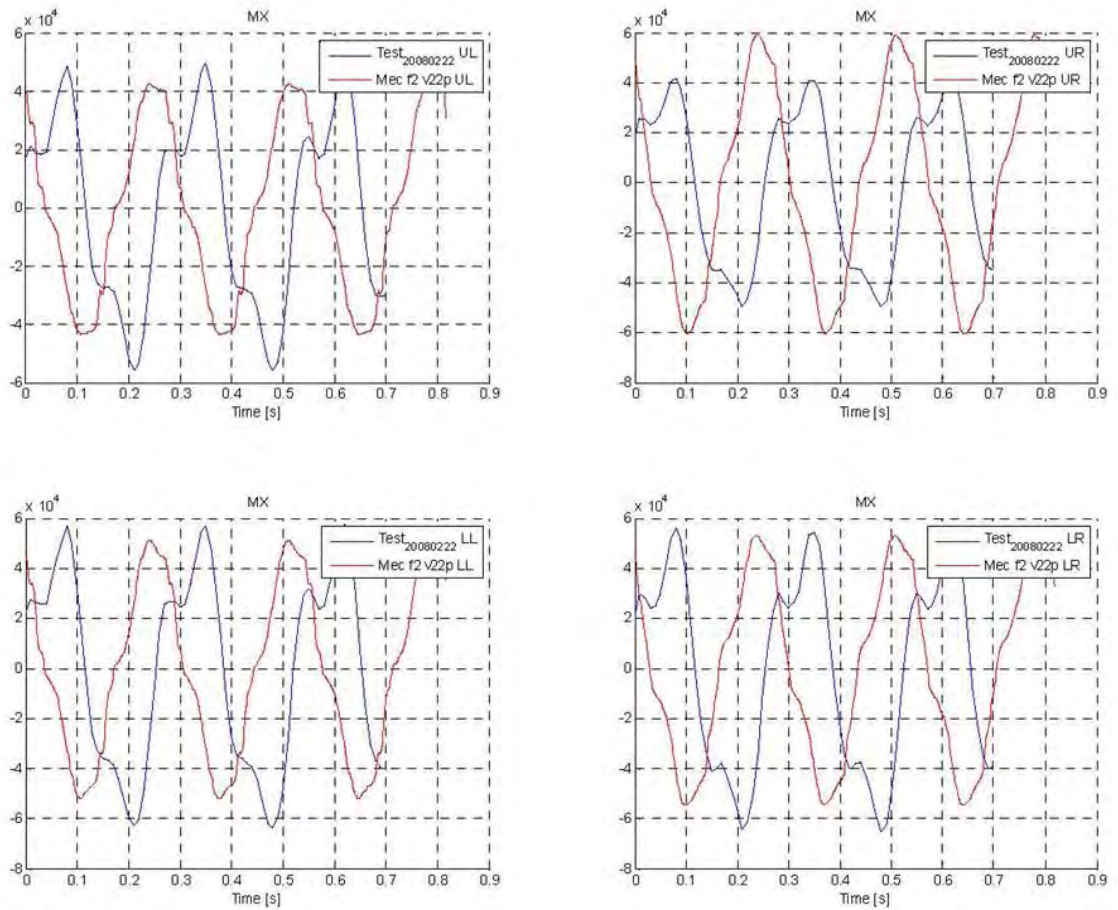


Figura 4-7: Moments en l'eix X-X a 3.7Hz per UL, UR, LL, LR

▪ Moments en l'eix Z-Z a 3.7Hz per UL, UR, LL, LR

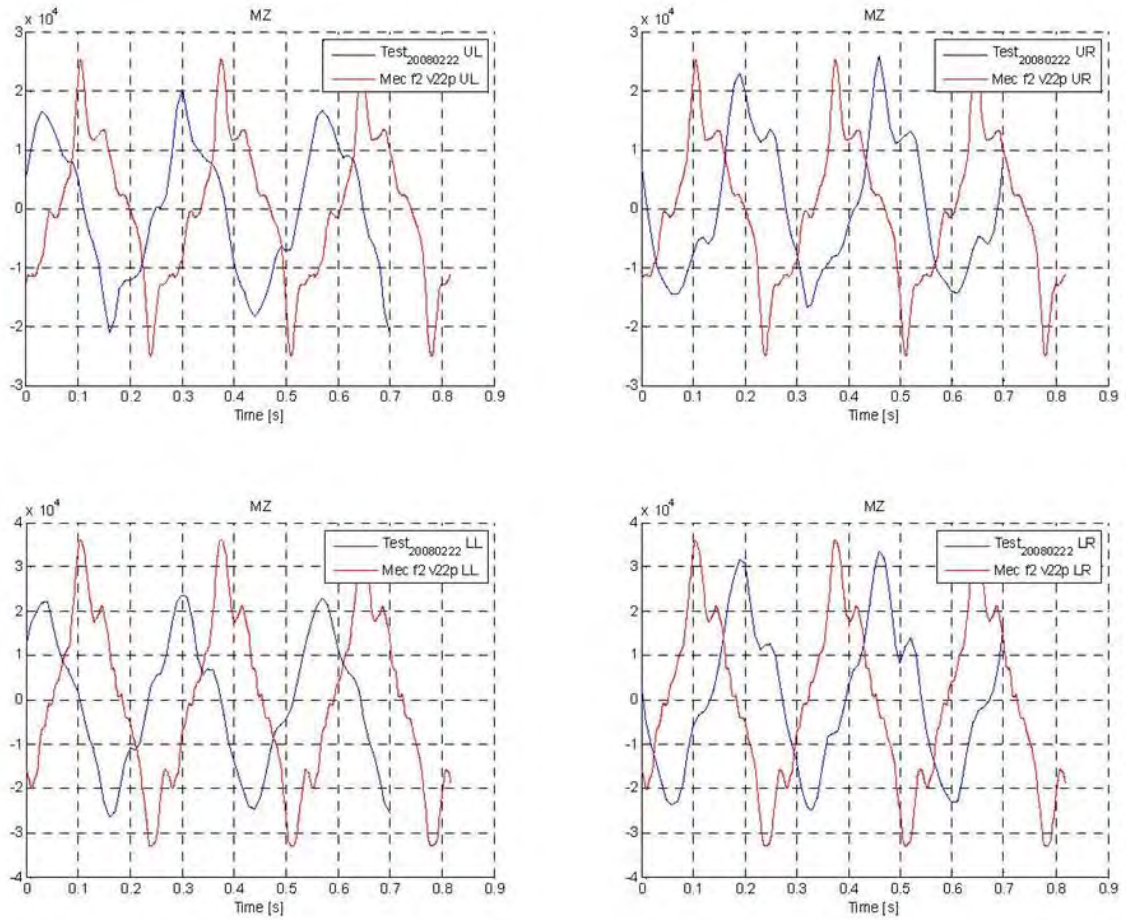
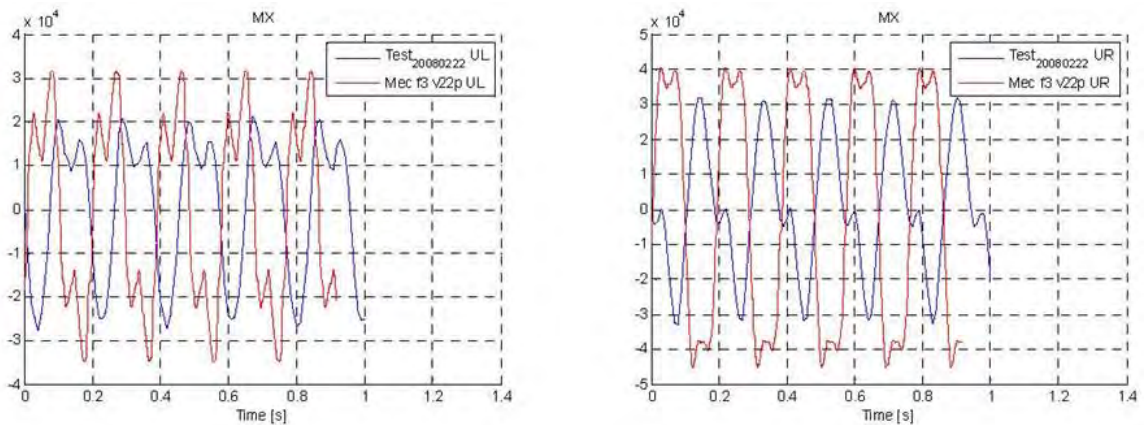


Figura 4-8: Moments en l'eix Z-Z a 3.7Hz per UL, UR, LL, LR

▪ Moments en l'eix X-X a 5.25Hz per UL, UR, LL, LR



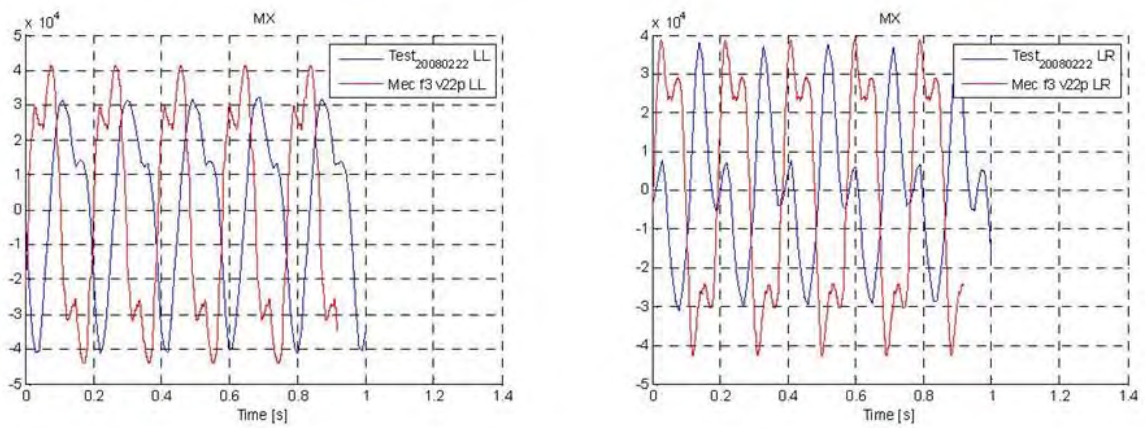


Figura 4-9: Moments en l'eix X-X a 5.25Hz per UL, UR, LL, LR

▪ Moments en l'eix Z-Z a 5.25Hz per UL, UR, LL, LR

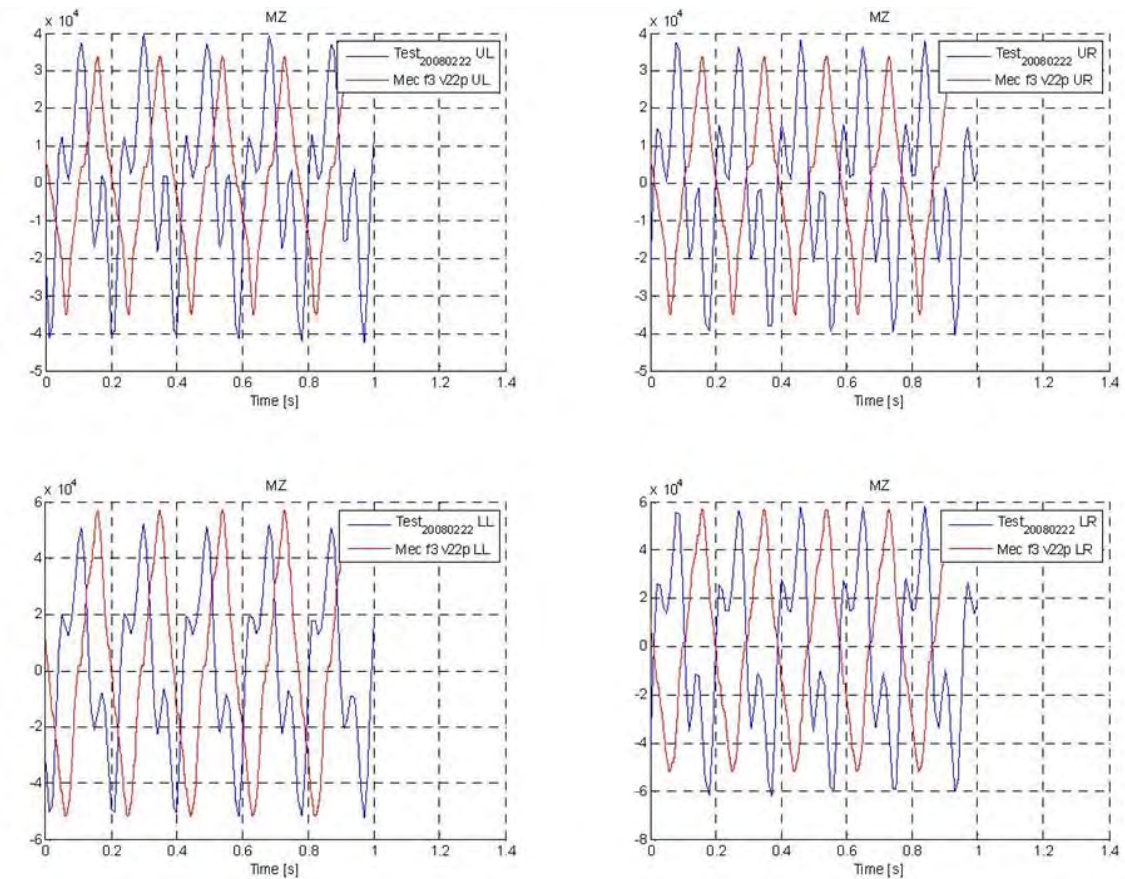


Figura 4-10: Moments en l'eix Z-Z a 5.25Hz per UL, UR, LL, LR

▪ **Acceleració en l'eix X-X a l'estructura de suport del motor a 1.8Hz**

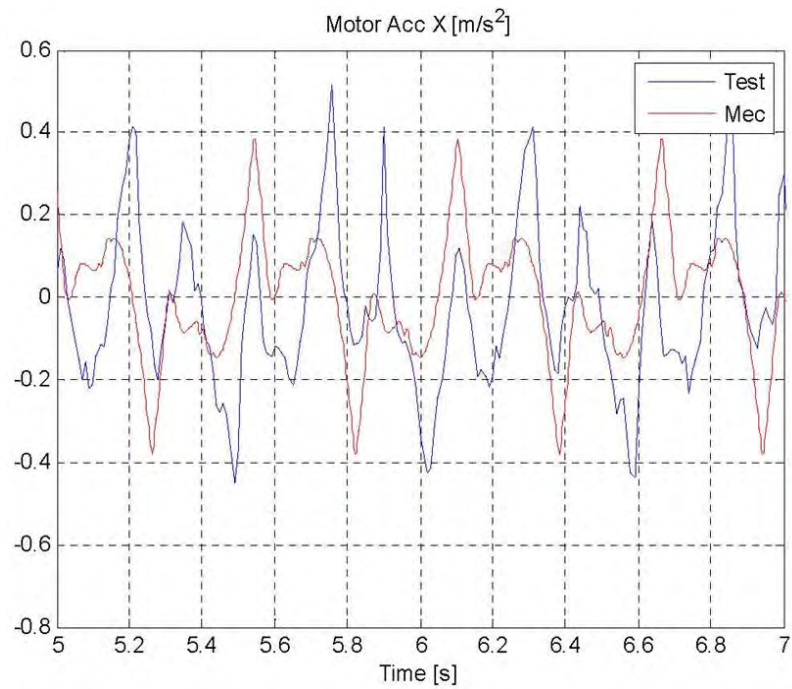


Figura 4-11: Acceleració en l'eix X-X a l'estructura de suport del motor a 1.8Hz

▪ **Acceleració en l'eix X-X a l'estructura de suport del motor a 3.7Hz**

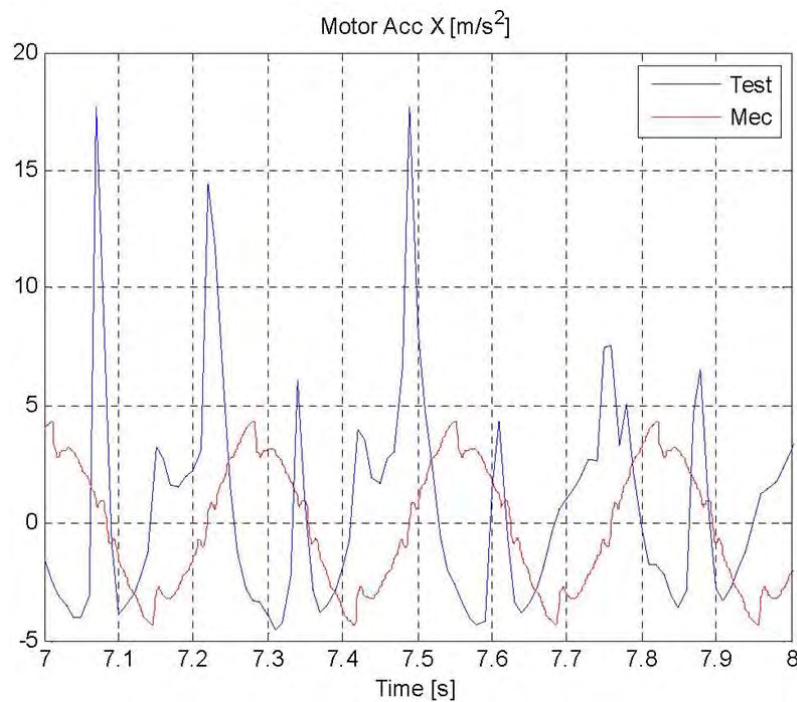


Figura 4-12: Acceleració en l'eix X-X a l'estructura de suport del motor a 3.7Hz

▪ **Acceleració en l'eix Y-Y a l'estructura de suport del motor a 1.8Hz**

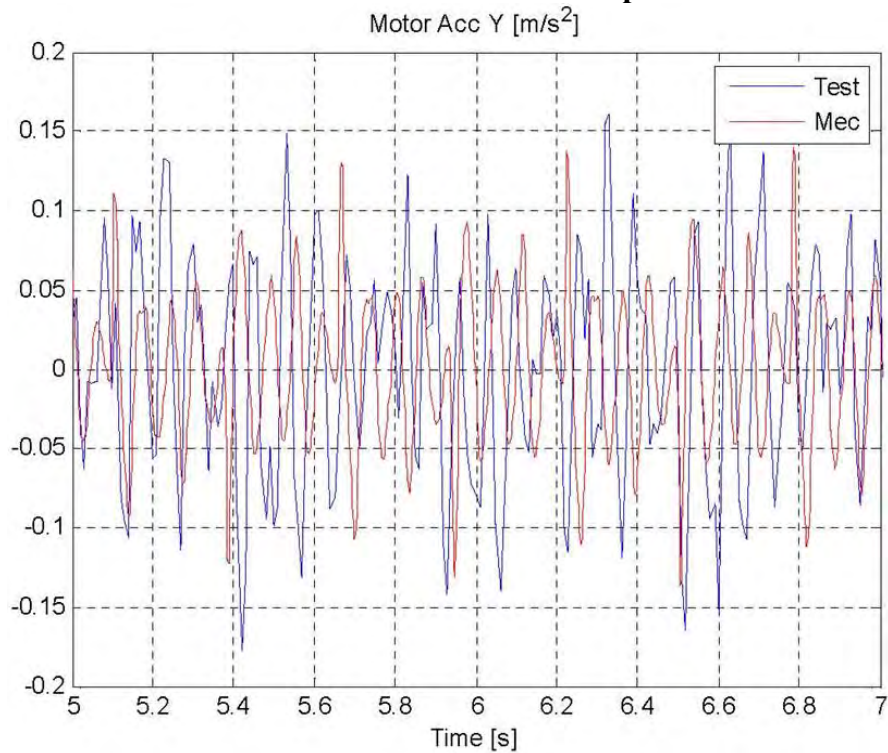


Figura 4-13: Acceleració en l'eix Y-Y a l'estructura de suport del motor a 1.8Hz

▪ **Acceleració en l'eix Y-Y a l'estructura de suport del motor a 3.7Hz**

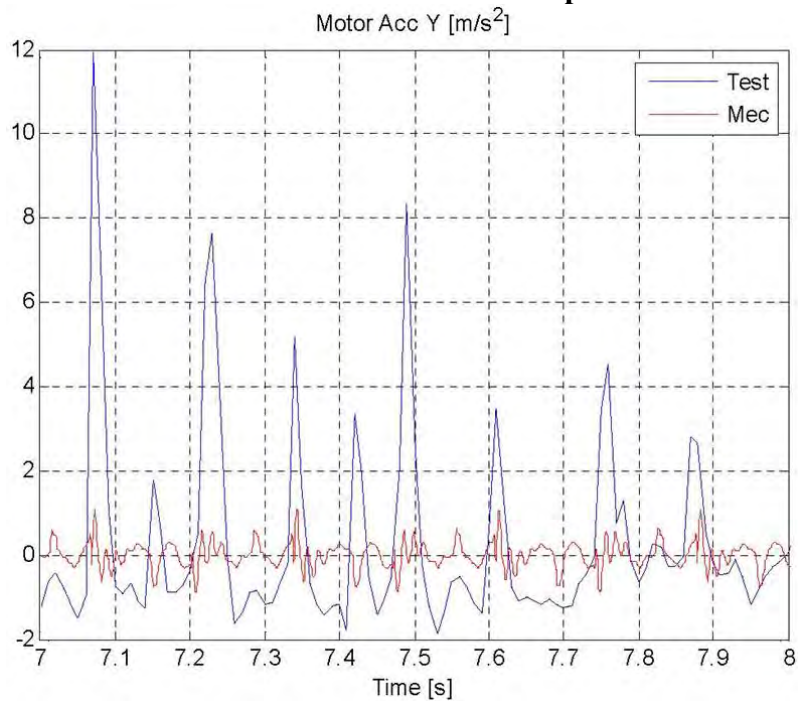


Figura 4-14: Acceleració en l'eix Y-Y a l'estructura de suport del motor a 3.7Hz

- **Acceleració en l'eix Z-Z a l'estructura de suport del motor a 1.8Hz**

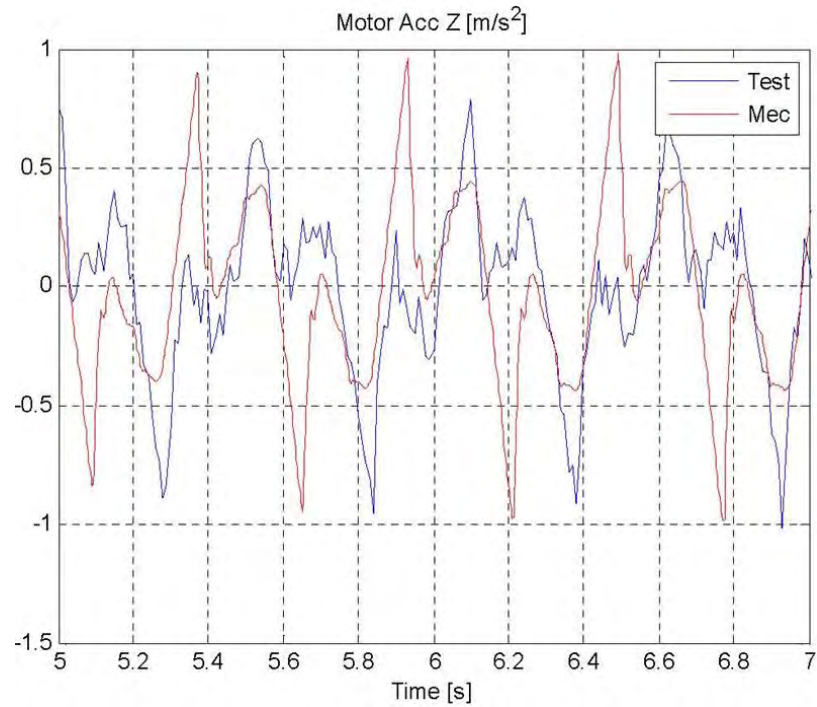


Figura 4-15: Acceleració en l'eix Z-Z a l'estructura de suport del motor a 1.8Hz

- **Acceleració en l'eix Z-Z a l'estructura de suport del motor a 3.7Hz**

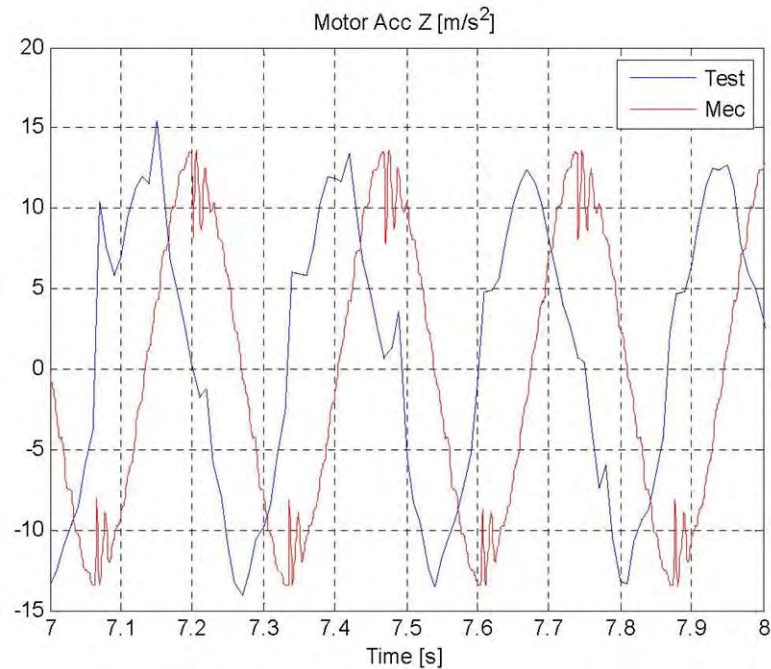


Figura 4-16: Acceleració en l'eix Z-Z a l'estructura de suport del motor a 3.7Hz

▪ Desplaçament en l'eix X-X per 1.8Hz

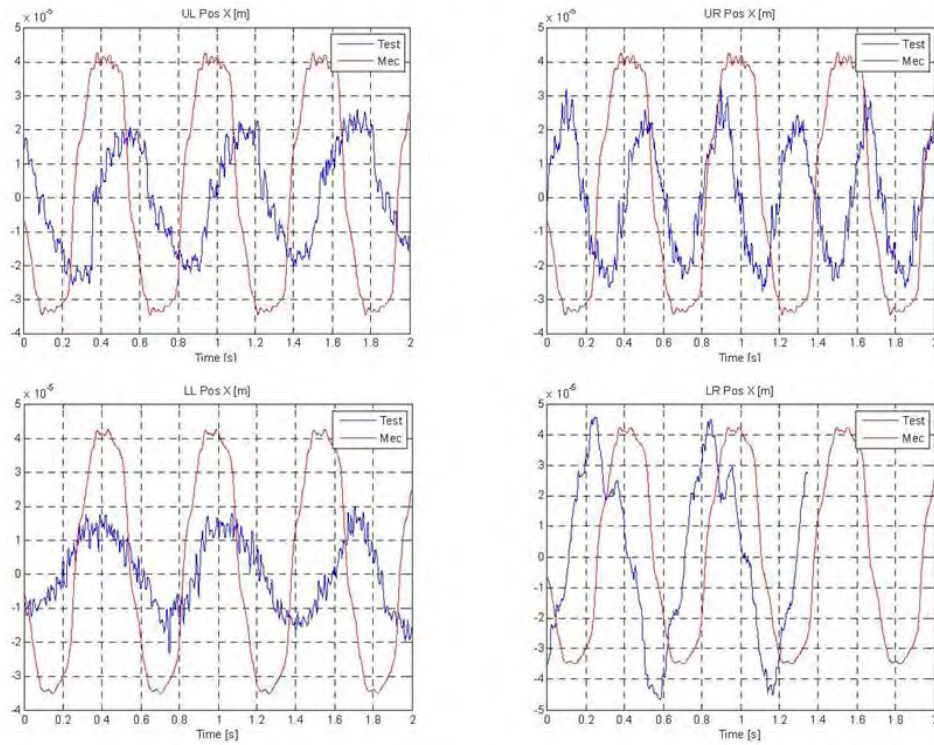


Figura 4-17: Desplaçament en l'eix X-X per 1.8Hz

▪ Desplaçament en l'eix Z-Z per 1.8Hz

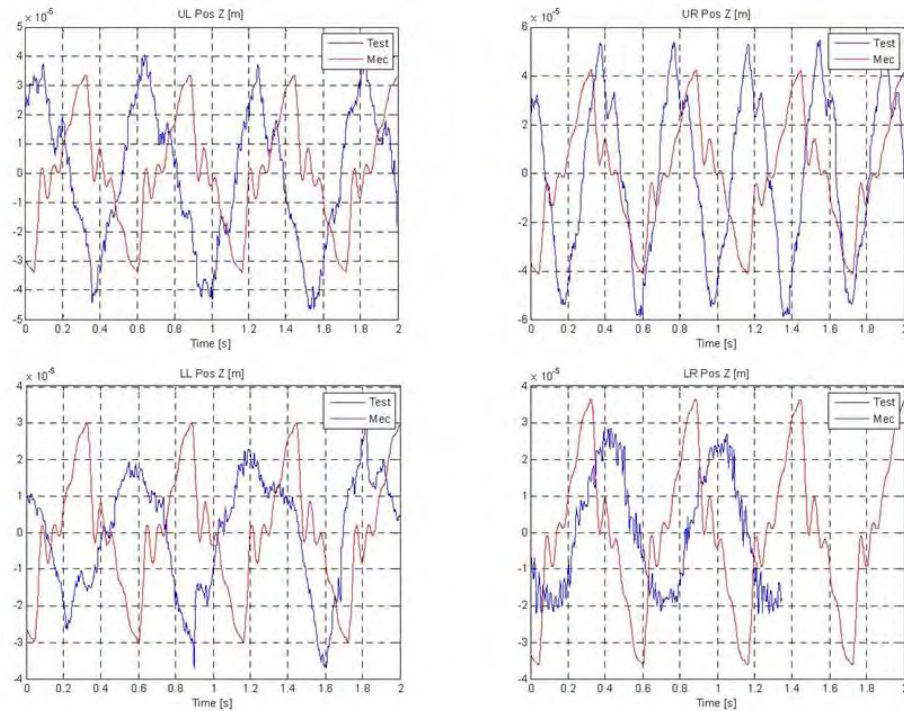


Figura 4-18: Desplaçament en l'eix Z-Z per 1.8Hz

- Desplaçament en l'eix X-X a l'estructura de suport del motor per 1.8Hz

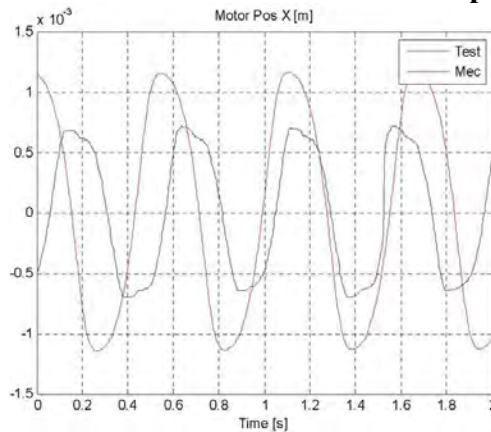


Figura 4-19: Desplaçament en l'eix X-X a l'estructura de suport del motor per 1.8Hz

- Desplaçament en l'eix Y-Y a l'estructura de suport del motor per 1.8Hz

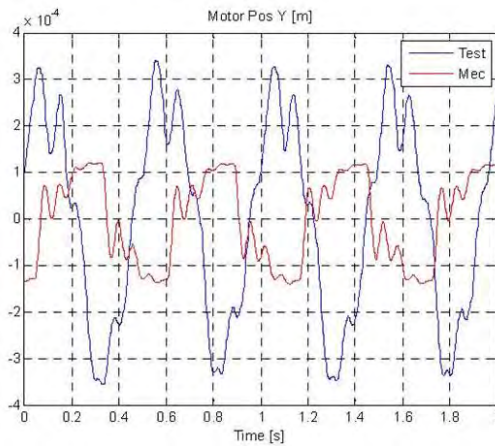


Figura 4-20: Desplaçament en l'eix Y-Y a l'estructura de suport del motor per 1.8Hz

- Desplaçament en l'eix Z-Z a l'estructura de suport del motor per 1.8Hz

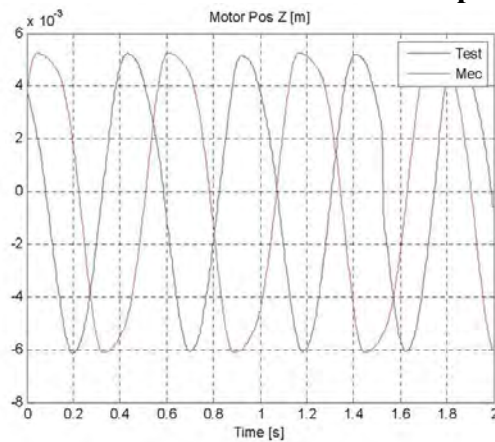


Figura 4-21: Desplaçament en l'eix Z-Z a l'estructura de suport del motor per 1.8Hz

4.3.5 Resultats de Correlació

Un cop obtingudes les gràfiques que relacionen el comportament de test amb el comportament del model FEM i un cop definit el criteri de correlació, ja es pot avaluar el paràmetre de correlació K pel conjunt de moments, acceleracions i desplaçaments analitzats.

A la següent taula es pot veure un resum dels resultats de correlació pels moments amb el valor de correlació corresponent:

Eix de suport	Paràmetre	Valor de correlació (K)		
		1.8Hz	3.7Hz	5.25Hz
UR (Upper Right)	Moment en X-X	1.0 (Figura 4-5)	0.8 (Figura 4-7)	0.8 (Figura 4-9)
	Moment en Z-Z	1.0 (Figura 4-6)	1.0 (Figura 4-8)	1.1 (Figura 4-10)
UL (Upper Left)	Moment en X-X	1.25 (Figura 4-5)	1.25 (Figura 4-7)	0.8 (Figura 4-9)
	Moment en Z-Z	1.2 (Figura 4-6)	0.8 (Figura 4-8)	1.1 (Figura 4-10)
LR (Lower Right)	Moment en X-X	1.25 (Figura 4-5)	0.9 (Figura 4-7)	1.0 (Figura 4-9)
	Moment en Z-Z	1.0 (Figura 4-6)	0.9 (Figura 4-8)	1.2 (Figura 4-10)
LL (Lower Left)	Moment en X-X	1.25 (Figura 4-5)	1.2 (Figura 4-7)	0.9 (Figura 4-9)
	Moment en Z-Z	1.0 (Figura 4-6)	0.8 (Figura 4-8)	1.0 (Figura 4-10)

Taula 4-4: Resultat de correlació de moments

S'observa com tots els valors K_i obtinguts es troben dins del marge de toleràncies compres entre $0.8 < K < 1.25$, i per tant dins del límit de tolerància definit ($0.7 < K < 0.3$). Així doncs, el model FEM és capaç de predir adequadament el moment que es transmet als eixos de suport de l'equip.

A continuació es mostra la correlació d'acceleracions i desplaçaments:

Posició	Paràmetre	Valor de correlació (k)	
		1.8Hz	3.7Hz
Estructura de suport del motor	Acceleració en X-X	>1.3 (Figura 4-11)	>1.3 (Figura 4-12)
	Acceleració en Y-Y	<1.3 (Figura 4-13)	>1.3 (Figura 4-14)
	Acceleració en Z-Z	>0.7 (Figura 4-15)	<1.3 (Figura 4-16)

Taula 4-5: Resultat de correlació d'acceleracions a l'estructura de suport del motor

Posició	Paràmetre	Valor de correlació (k) a 1.8Hz
UR (Upper right)	Desplaçament en X-X	>0.7 (Figura 4-17)
	Desplaçament en Z-Z	>1.3 (Figura 4-18)
UL (Upper left)	Desplaçament en X-X	<0.7 (Figura 4-17)
	Desplaçament en Z-Z	<1.3 (Figura 4-18)
LR (Lower Right)	Desplaçament en X-X	<1.3 (Figura 4-17)
	Desplaçament en Z-Z	>0.7 (Figura 4-18)
LL (Lower Left)	Desplaçament en X-X	<0.7 (Figura 4-17)
	Desplaçament en Z-Z	>0.7 (Figura 4-18)
Estructura de suport del motor	Desplaçament en X-X	<1.3 (Figura 4-19)
	Desplaçament en Y-Y	>1.3 (Figura 4-20)
	Desplaçament en Z-Z	<1.3 (Figura 4-21)

Taula 4-6: Resultat de correlació de desplaçaments

S'observa que el resultat de les correlacions de desplaçaments i acceleracions és acceptable ($0.7 < K < 0.3$) per la majoria dels casos. S'atribueixen les discrepàncies detectades a la correlació a les següents causes:

- Per la correlació de l'acceleració: a l'efecte de soroll aparegut durant l'adquisició de dades en el test d'acceleracions en X-X i en Y-Y a 3.7Hz degut a un defectuós connexionat dels acceleròmetres.
- Les dues discrepàncies de desplaçaments on $K < 0.7$ no són excessivament crítiques ja que impliquen una resposta del model en desplaçaments major que el valor de test (comportament del model més pessimista que el test).

Com a conclusió a les correlacions efectuades, cal dir que s'ha obtingut un model FEM capaç de reproduir adequadament el comportament dinàmic segons els tests realitzats a l'equip. Concretament, s'han obtingut uns resultats molt correlats pels moments en X-X i en Y-Y (tenint en compte que els valors a correlar eren prou dispers), i adequadament correlats per acceleracions i desplaçaments.

L'acceptació dels resultats per part del client, tot i les discrepàncies detectades en acceleracions i desplaçaments, d'acord amb la finalitat i propòsit global del projecte, dona validesa als resultats aportats. En qualsevol cas, una posterior tasca d'afinació dels resultats obtinguts, no tindria influència sobre l'objectiu metodològic del treball.

Capítol 5.

APLICACIÓ AL SISTEMA VIF: SIMULACIÓ DEL COMPORAMENT EN μG

El punt de partida d'aquest capítol és el model FEM del Sistema VIF ja correlat. És a dir, es parteix d'un model FEM on ja s'ha relacionat el seu comportament (veure capítol 3, resultats de test), amb el comportament del model FEM (veure capítol 4, correlació del model FEM), de manera que s'ha obtingut un model FEM amb un comportament raonablement similar al model real. Per aconseguir aquest propòsit, s'ha seguit la metodologia descrita al capítol 2.

Un cop obtingut aquest model FEM correlat, ja és possible efectuar l'anàlisi en les particulars condicions de microgravetat (μG). D'aquest anàlisi es vol obtenir la transmissió de càrregues que efectua el Sistema VIF cap al ISPR Rack degut al funcionament de l'equip MARES sota aquestes condicions de microgravetat. Així mateix, també es vol analitzar els desplaçaments màxims ocasionat per l'equip MARES al Sistema VIF degut a l'acció del subjecte.

La determinació de les càrregues transmeses del Sistema VIF al ISPR Rack ha de permetre avaluar si el Rack és capaç de suportar-les, i també ha de permetre conèixer el nivell de vibració que s'està introduint a l'estació.

Per realitzar aquest anàlisi, primer de tot cal desenvolupar un model FEM complet, on es modelin la resta d'elements que interactuaran amb el Sistema VIF un cop es trobi a l'espai. És a dir, al model FEM del Sistema VIF cal incloure un model FEM de l'equip MARES i un model FEM del ISPR Rack del mòdul *Columbus*.

5.1 Descripció del model FEM complet (equip MARES, Sistema VIF i Rack)

A continuació es descriu el model FEM complet utilitzat per l'anàlisi en condicions de microgravetat. Aquest model FEM complet correspon al model FEM del Sistema VIF ja correlat, on s'ha integrat el model FEM de l'equip Mares (que transmet l'excitació del subjecte realitzant exercici) i el model FEM del ISPR Rack (que suporta al Sistema VIF).

El model FEM complet amb el ISPR Rack, el Sistema VIF i l'equip MARES és doncs el model FEM que ha de permetre predir les càrregues i desplaçaments que patirà el Sistema VIF un cop situant en condicions d'ingràvides. A continuació es mostra una imatge del model FEM complet:

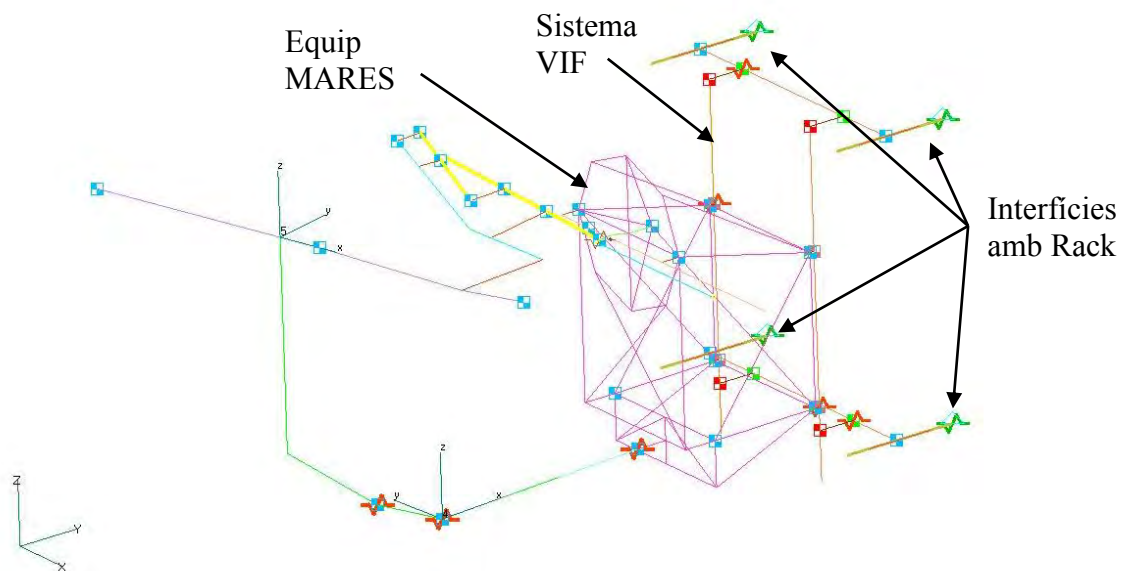


Figura 5-1: Imatge del Model FEM amb Sistema VIF, equip MARES i Rack

Cal indicar que durant el desenvolupament del model FEM del Sistema VIF ja s'ha previst els elements d'interfície necessaris per connectar el Sistema VIF amb el Rack i amb l'equip MARES (veure apartat 4.2). A continuació es descriuen els models FEM d'aquests dos elements.

5.1.1 Model FEM del Rack

El Rack on va fixat el Sistema VIF s'ha modelat usant elements molla per tal de tenir en compte la rigidesa establerta per un ISPR Rack (definida a $DR[N15]$).

Els valors de rigidesa dels quatre punts d'anclatge on van fixat els eixos de suport del Sistema VIF es mostren a la següent taula:

	Rigidesa lineal	Valor (N/m)	Rigidesa angular	Valor (Nm/rad)
Punts d'anclatge superiors dret i esquerra (UR i UL)	X	5.63E+05	X	3.72E+04
	Y	1.30E+06	Y	1.06E+05
	Z	6.70E+06	Z	1.08E+04
Punts d'anclatge inferiors dret i esquerra (LR i LL)	X	8.26E+05	X	3.73E+04
	Y	2.12E+06	Y	7.88E+04
	Z	5.11E+06	Z	1.79E+04

Taula 5-1: Valors de rigidesa del Rack

5.1.2 Model FEM de l'equip MARES

El model FEM de la caixa principal (*Main Box*) de l'equip MARES s'ha efectuat usant elements biga seguint la mateixa filosofia establerta pel model FEM del Sistema VIF. S'han incorporat elements massa per simular les càrregues dels diferents subsistemes (motor i mòduls d'electrònica) que allotja la caixa principal l'equip MARES.

La següent imatge mostra el model FEM de l'equip MARES (*Main Box*) amb la numeració de cadascun dels elements biga principals:

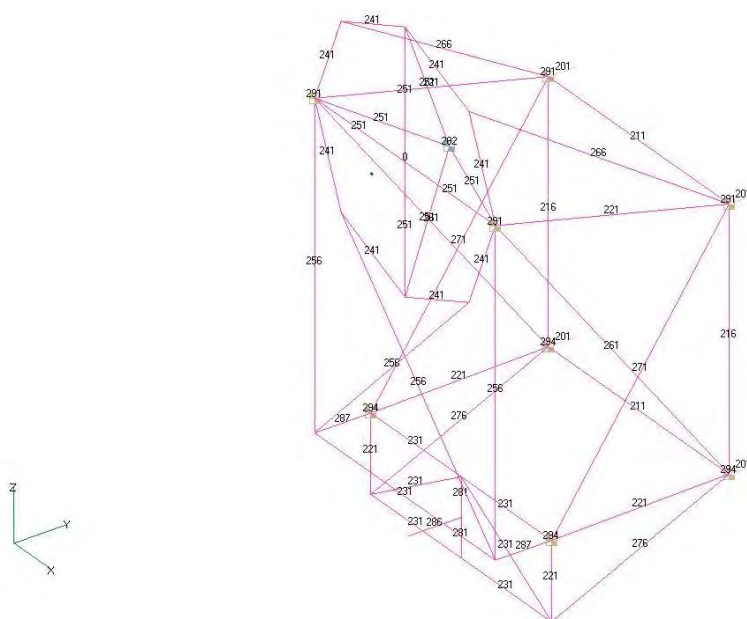


Figura 5-2: Model FEM de l'equip MARES

La següent taula mostra les propietats mecàniques assignades als elements més destacables del model FEM:

Número d'element	Mòdul de Young, E (N/m ²)	Mòdul d'elasticitat transversal, G (N/m ²)	Coefficient de Poisson	Densitat kg/m ³
101	6.00E+10		0.3	15544.2
216	6.00E+10	2.31E+10	0.3	20000
221	6.00E+10	2.31E+10	0.3	2000
241	6.00E+10	2.31E+10	0.3	2800
251	6.00E+10	2.31E+10	0.3	1
256	6.00E+10	2.31E+10	0.3	8000
261	6.00E+10	2.31E+10	0.3	4000
266	6.00E+10	2.31E+10	0.3	1000
271	6.00E+10	2.31E+10	0.3	4000
281	6.00E+10	2.31E+10	0.3	1000
201	2.10E+11		0.3	7800

Taula 5-2: Propietats mecàniques del model FEM de l'equip MARES

Les variacions de densitat imposades als diferents elements del model FEM i que s'aprecien a taula anterior persegueixen la finalitat d'aconseguir la massa requerida per l'equip MARES, així com situar el centre de gravetat a la posició adient.

A continuació es mostren els valors de massa assignats a les masses concentrades del model FEM:

Massa Concentrada	Valor de massa i moment d'inèrcia
Massa Electrónica Superior	17.2 kg (4x 4.3)
Massa Electrónica Inferior	25.6 kg (4x 6.4)
Massa Motor	43 kg
M.d.I Motor: Ixx	0.9 kg·m ²
M.d.I Motor: Iyy	1.8 kg·m ²
M.d.I Motor: Izz	0.9 kg·m ²

Taula 5-3: Valors de masses concentrades incloses a model FEM de l'equip MARES

5.2 Condicions de càrrega sobre l'equip MARES

Un cop desenvolupat el model FEM complet de l'equip MARES, cal definir les pitjors condicions de càrrega que l'equip MARES és capaç de transmetre cap al Sistema VIF. D'aquesta manera es podrà obtenir les majors forces i moments transmesos des del Sistema VIF cap al Rack. Si el Rack és capaç de suportar aquestes pitjors condicions amb un factor de seguretat acceptable, es podrà concloure que també suportarà acceptablement la resta de condicions de càrrega a que estigui sotmès. En aquest sentit, les condicions de càrrega de l'equip MARES depenen d'aquest conjunt de factors:

- *Percentil i massa de la persona que es trobi usant l'equip MARES:* la pitjor condició de càrrega és aquells en que el major percentil es trobi usant l'equip MARES. És a dir, l'home de 95 percentil pot provocar la pitjor condició de càrrega ja que pot aplicar la màxima força durant l'execució de l'exercici (potència muscular del 95 percentil) i se li assumeix la màxima massa (massa del 95 percentil). Es consideren doncs les dades antropomètriques del home 95 percentil (*DR[N13]*) amb la corresponent capacitat de força obtinguda durant de la campanya de test efectuada sobre l'equip MARES (*'population test campaign'*).
- *Configuració de l'exercici a l'equip MARES:* del conjunt de 9 moviments angulars i 2 moviments lineals que és capaç de configurar-se l'equip, es demostra a partir de la campanya de test efectuada (*'population test campaign'*), que els exercicis més crítics des del punt de vista de força realitzada pel subjecte són els següents exercicis:

- Espatlla flexió/extensió (rang de moviment de 190°)
- Maluc flexió/extensió (rang de moviment de 150°)
- Esquena flexió/extensió (rang de moviment de 60°)

Les següents imatges mostren l'equip MARES configurat per cadascun d'aquests exercicis durant la campanya de test efectuada.



Figura 5-3: Equip MARES configurat per flexió extensió d'espatlla



Figura 5-4: Equip MARES configurat per flexió extensió de maluc



Figura 5-5: Equip MARES configurat per flexió extensió d'esquena

Per tal de determinar quin d'aquest tres exercicis és el pitjor des del punt de vista de càrregues transmeses, s'obté a continuació les forces d'inèrcia de cada exercici per un subjecte 95 percentil. Les dades inicials (velocitats, masses, radis) són extreptes de la bibliografia antropomètrica aplicable per equips espacials (DR[N13]).

La següent taula mostra les forces d'inèrcia dels tres exercicis crítics prenent com a hipòtesi que l'eix de rotació es manté immòbil durant l'exercici (en realitat, l'eix pot patir un cert desplaçament degut als graus de llibertat que proporciona el Sistema VIF):

Exercici	Massa mòbil, m (kg)	Moment d'inèrcia, I_0 (Kg·m ²)	Radi del CdG a centre de gir, r (m)	Velocitat angular, w (rad/s)	Força d'inèrcia, mrw^2 (N)
Espatlla f/e	64.38	6.68	0.188	5.5	366.1
Maluc f/e	74.00	7.41	0.229	3	152.5
Esquena f/e	95.35	7.32	0.183	3	157.0

Taula 5-4: Forces d'inèrcia per Espatlla, Maluc i Esquena

D'acord amb aquests resultats, s'observa que el pitjor exercici que ha de suportar l'equip MARES des del punt de vista de forces d'inèrcia és l'exercici de flexió i extensió d'espatlla. Aquest exercici ocasiona les majors forces d'inèrcia (el doble que els altres exercicis).

Per tant, l'anàlisi del Sistema VIF es realitza basant-se en la configuració de l'equip MARES segons l'exercici de flexió i extensió d'esquena amb un subjecte home 95 percentil.

5.3 Nivells d'excitació de l'equip MARES

Es consideren dos nivells d'excitació per l'equip MARES configurat segons la pitjor configuració de càrrega (exercici de flexió i extensió d'esquena amb un subjecte 95 percentil):

- **Excitació òptima:** a 1.4Hz
 - Acceleració màxima de 148rad/s^2 : corresponents a un parell màxim de 989Nm i amb una inèrcia de $6.68\text{kg}\cdot\text{m}^2$
 - Màxima velocitat de 5.5rad/s .
 - Freqüència de 1.4Hz
- **Excitació ràpida:** a 1.7Hz
 - Acceleració màxima de 185.8rad/s^2 : corresponents a un parell màxim de 1243Nm i amb una inèrcia de $6.68\text{kg}\cdot\text{m}^2$
 - Màxima velocitat de 5.5rad/s .
 - Freqüència de 1.7Hz

A continuació es mostren les corbes de velocitat i acceleració per un cicle d'exercici (flexió i extensió) per les freqüències d'estudi:

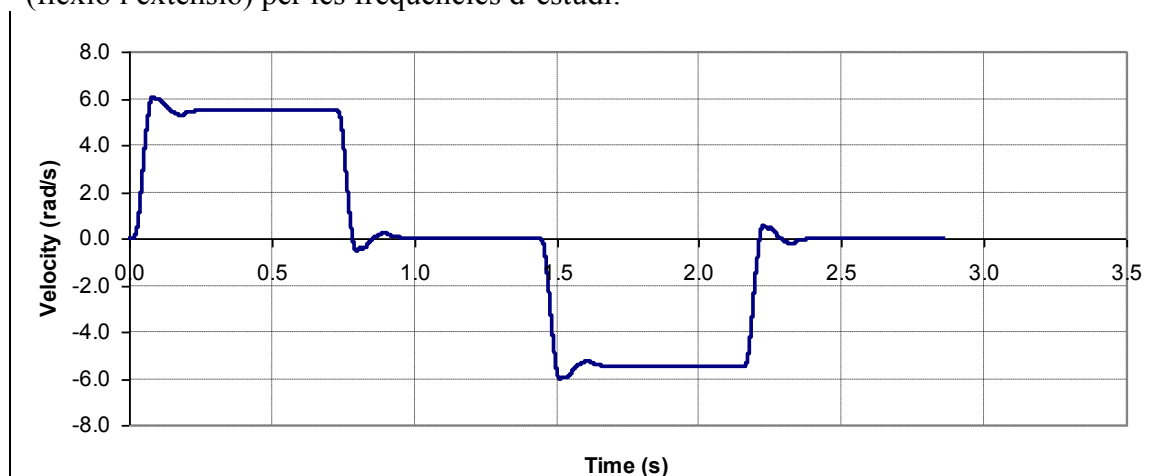


Figura 5-6: Corba de velocitat per un cicle a una freqüència de 1.4Hz

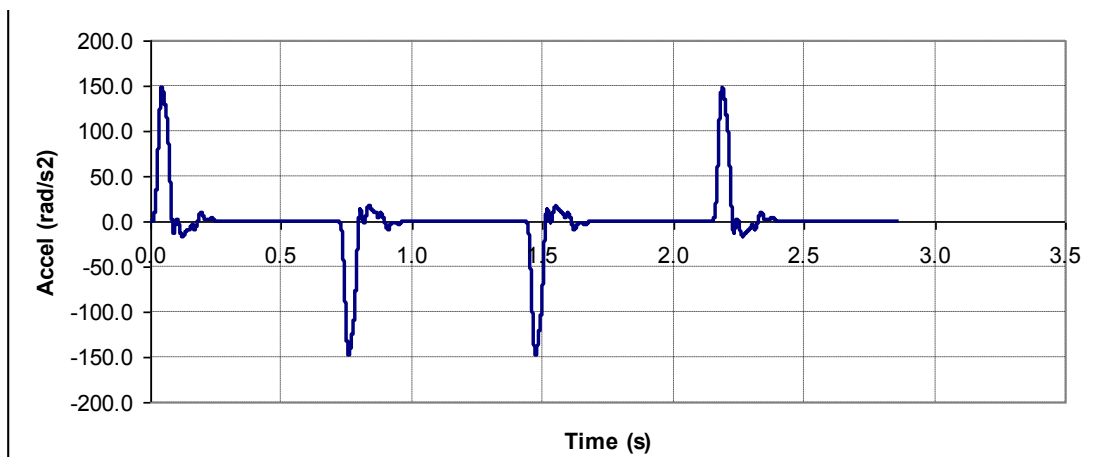


Figura 5-7: Corba d'acceleració per un cicle a una freqüència de 1.4Hz

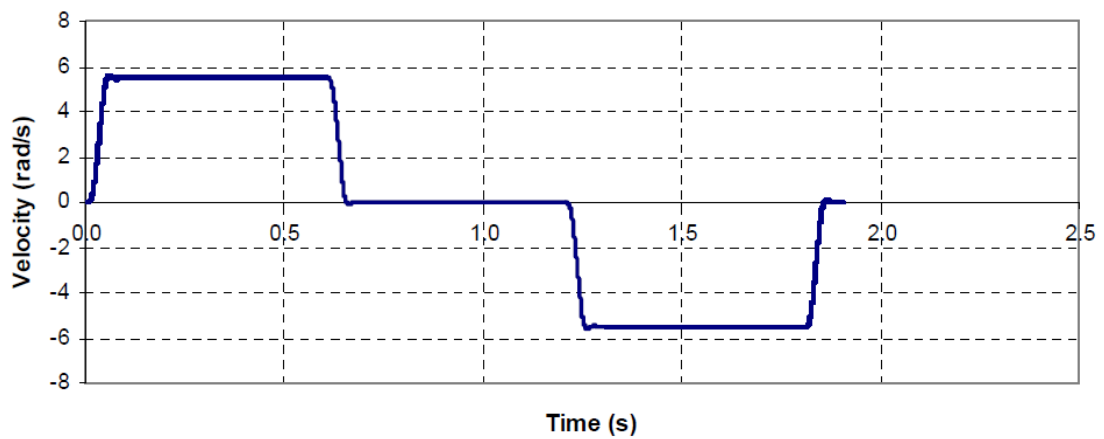


Figura 5-8: Corba de velocitat per un cicle a una freqüència de 1.7Hz

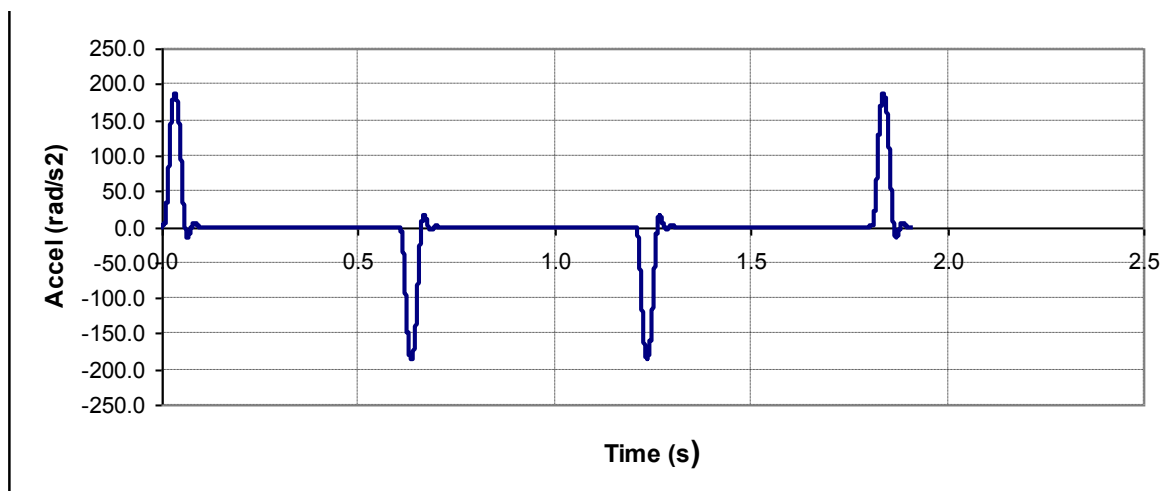


Figura 5-9: Corba d'acceleració per un cicle a una freqüència de 1.4Hz

Aquestes corbes d'excitació s'utilitzen com a dades d'entrada al software *Samcerf MECANO* per la definició de l'excitació sobre l'equip MARES. Les corbes s'apliquen sobre la massa mòbil formada per la massa del rotor del motor, la massa de l'adaptador humà de l'exercici flexió i extensió d'esquena, i la massa de l'extremitat en moviment del subjecte 95 percentil.

L'excitació òptima de 1.4Hz és la recomanada per la realització dels exercicis sobre l'equip MARES. Mentre que l'excitació de 1.7Hz pot ser necessària per permetre arribar l'extremitat exercitada pel subjecte a la màxima velocitat angular. L'estudi de les forces transmeses amb aquesta alta excitació ha de permetre decidir si es pot aplicar aquest excitació a tots els exercicis del l'equip MARES, o be cal limitar-ne l'ús només a uns exercicis concrets.

5.4 Resultats en condicions de microgravetat

Amb el desenvolupament del model complert d'elements finits i les corbes d'excitació definides, ja només restà aplicar les condicions de microgravetat al model d'elements finits per tal de realitzar l'estudi en idèntiques condicions a les que es trobarà el Sistema VIF en el seu lloc de treball, condicions de microgravetat.

Els condicionants bàsics que defineixen el model són els següents:

- **Pel Sistema VIF:**
 - Modelat d'acord al comportament mecànic del sistema
 - Correlació del comportament del model al comportament real
 - Connexionat amb els elements d'interfície (Rack i equip MARES)
 - Posició nominal del Sistema VIF: centrat a la meitat de la carrera per cada direcció.
- **Per l'equip MARES:**
 - Configuració: Flexió/Extensió d'espatlla per l'extremitat dreta
 - Subjecte: Home 95 percentil
 - Excitació de l'equip: excitació òptima (1.4Hz) i a excitació ràpida (1.7Hz)
- **Pel Rack:**
 - La rigidesa del Rack considerada en el model.
- **Pel model FEM complert (VIF+Rack+MARES)**
 - Valor de gravetat nul·la: nivells d'ingravedesa (0g)

Un cop aplicades aquestes condicions al model FEM, ja és possible obtenir el resultat de forces i moments en els eixos de suport del Sistema VIF, així com els desplaçaments que patirà el Sistema VIF.

Aquests resultats cal contrastar-los amb les forces i moments admissibles que pot suportar el Rack, obtenint així els factors de seguretat de forces i moments. I també cal comparar-los amb els desplaçaments admissibles pel Sistema VIF, obtenint el factor de

seguretat de desplaçaments. A continuació es detallen els valors de forces i moments admissibles pel Rack i els valors de desplaçaments admissibles pel Sistema VIF.

5.4.1 Valors admissibles de forces, moments i desplaçaments

5.4.1.1 Forces i Moments admissibles pel Rack

Els valors de forces i moments que arriben als *Seat Tracks* d'un ISPR Rack (veure figura 3-5 pel detall de ISPR Rack), han de complir amb aquestes dues condicions d'acord amb DR[N15]:

A.- Cap dels quatre eixos de suport del Sistema VIF connectats als *Seat Tracks* del ISPR Rack no pot tenir càrregues instantànies aplicades amb magnituds que superin els valors límit següents:

Paràmetre	Valor màxim admissible
Fy (N)	122
Fz (N)	4600
Mx (Nm)	457
My (Nm)	2

Taula 5-5: Valors màxims admissibles de forces i moments (DR[N15])

B.- A cadascú dels eixos de suport del Sistema VIF connectats als *Seat Tracks* del ISPR Rack, la relació entre la força instantània en direcció X-X (F_x) i el moment instantani en direcció Z-Z (M_z) ha d'estar sempre dins de la zona ombrejada permesa indicada a la següent figura (àrea sota la recta):

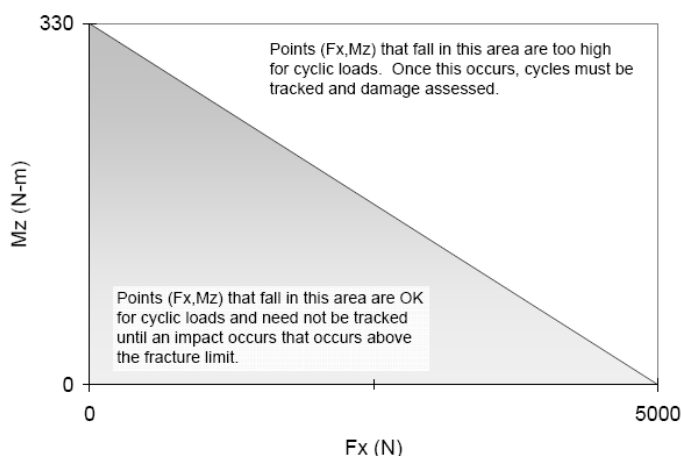


Figura 5-10: Àrea admissible per força F_x i moment M_z (DR[N15])

En el cas que els valors de Fx i Mz portessin a situar-se fora de la zona permesa, això provocaria una condició d'excés de càrrega, fet no admissible pels *Seat Tracks* del Rack.

5.4.1.2 Desplaçaments admissibles pel Sistema VIF

Els desplaçaments admissibles permesos pel Sistema VIF queden reflectits a la següent taula:

Direcció	Desplaçaments admissibles
X-X	±79mm
Y-Y	±25mm
Z-Z	±124.5mm

Taula 5-6: Desplaçaments admissibles pel Sistema VIF

Així doncs, aquests són els màxims desplaçaments que pot realitzar l'equip MARES mentre es troba en situació operacional (subjecte realitzant exercici). La superació d'aquests límits implicaria l'impacte sobre els finals de carrera i per tant una transmissió de forces i moments no admissible al ISPR Rack i conseqüentment també al mòdul de l'estació.

5.4.2 Resultats de càrrega transmesa pel Sistema VIF i factors de seguretat

Un cop definides les càrregues admissibles, ja es poden comparar les càrregues obtingudes i obtenir els factors de seguretat.

Les forces i moments màxims que arriben als eixos de suport del Sistema VIF, connectats als *Seat Tracks* del ISPR Rack, deguts a l'acció del subjecte excitant l'equip MARES funcionant segons els condicionants indicats anteriorment (veure apartat 5.4) i per les dues excitacions definides (veure apartat 5.3), són les següents:

	Valor màxim admissible	Excitació ràpida (1.7Hz)	Factor de seguretat	Excitació Optima (1.4Hz)	Factor de seguretat
Fx (N)	Veure recta	209	N/A	138	N/A
Fy (N)	122	9	13.6	6	20.3
Fz (N)	4600	1351	3.4	917	5.0
Mx (Nm)	457	128	3.6	171	2.7
My (Nm)	2	0	>1	0	>1
Mz (Nm)	Veure recta	113	N/A	82	N/A

Taula 5-7: Factors de seguretat, forces admissibles i forces màximes als eixos de suport per excitació ràpida i òptima

Aquesta taula demostra el compliment del condicionant A (veure apartat 5.4.1.1 per definició d'aquest condicionant) per càrregues que arriben al Rack amb un factor de seguretat mínim de 2.7.

Per analitzar el compliment del condicionant B, s'han obtingut les següents imatges corresponents a la relació F_x i M_z per l'eix de suport LL:

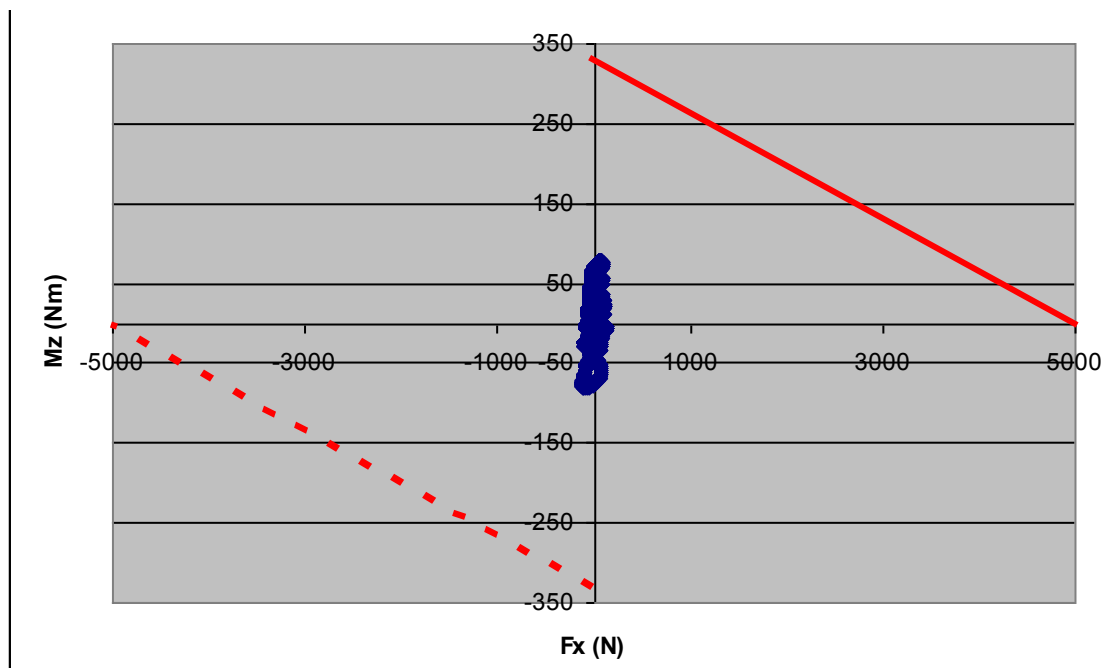


Figura 5-11: Gràfica de la relació F_x/M_z respecte valors límit per excitació de 1.4Hz

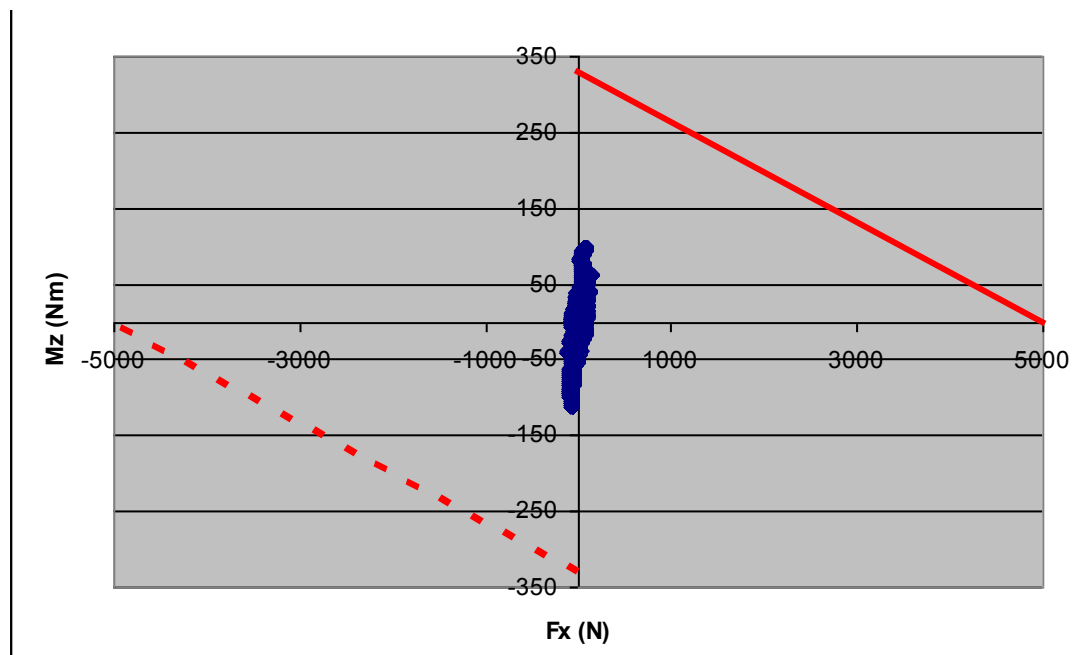


Figura 5-12: Gràfica de la relació F_x/M_z respecte valors límit per excitació de 1.7Hz

Aquestes dues gràfiques s'han obtingut per l'eix de suport LL que ha resultat ser l'eix de suport amb pitjor comportament dels quatre eixos de suport analitzats. Les gràfiques mostren com els valors de F_x i M_z es troben adequadament compresos dins els límits de seguretat admissibles pel Rack per ambdós nivells d'excitació.

Per resumir, es pot dir que el ISPR Rack és capaç de suportar adequadament les forces i moments que li arriben del Sistema VIF provinents de l'excitació que ocasiona un subjecte 95 percentil exercitant amb un exercici de flexió/extensió de l'espatlla dreta (pitjor cas) a l'equip MARES.

5.4.3 Resultats de desplaçament al Sistema VIF i factors de seguretat

El moviment de l'equip MARES, degut a l'exercici que efectua el subjecte, provoca un desplaçament alternatiu del conjunt equip MARES + subjecte. Pel teorema de conservació de la quantitat de moviment, es demostra que el CdG del conjunt es mantindria constant o en moviment rectilini uniforme si sobre el conjunt no hi actuessin forces exteriors. La presència del sistema molla-amortidor, entre els carros de les guies verticals on es fixa l'equip MARES, provoca l'existència de forces exteriors sobre el sistema (fins i tot en el cas de depreciar la fricció). Per tant, el CdG del conjunt MARES + subjecte pateix una acceleració no nul·la deguda a aquestes forces exteriors.

En aquest sentit, el Sistema VIF ha de permetre el desplaçament del conjunt equip MARES + subjecte sense que l'equip MARES arribi a contactar amb els finals de carrera del Sistema VIF ja que aquest fet provocaria la transmissió d'impactes cap al mòdul de l'estació que pertorbarien els nivells de microgravetat.

La següent taula mostra els desplaçaments que admet el Sistema VIF així com els desplaçaments calculats per les condicions indicades a l'apartat 5.4.

Direcció	Desplaçaments admissibles	Desplaçament màxim calculat	Factor de seguretat
X - X	±79mm	52mm	1.5
Y - Y	±25mm	8mm	3.1
Z - Z	±124.5mm	57mm	2.2

Taula 5-8: Desplaçaments admissibles, calculats i factor de seguretat pel Sistema VIF

Es comprova com els desplaçaments obtinguts són admissibles d'acord als desplaçaments permesos pel Sistema VIF amb un factor de seguretat mínim de 1.5.

5.5 Conclusions dels resultats obtinguts

D'acord amb els resultats obtinguts, es poden establir les següents conclusions:

- S'ha analitzat el pitjor cas de càrregues transmeses en que es pot configurar l'equip MARES i s'ha establert que el cas de flexió extensió d'espatlla per un subjecte de 95 percentil és el pitjor escenari de càrrega.
- El Sistema VIF compleix amb els dos condicionants de forces i moments (*RD [N15]*) de càrregues transmeses admissibles pels *Seat Tracks* del ISPR Rack.
- No és necessari cap limitació en el percentil del subjecte o en els nivells d'excitació ja que el ISPR Rack és capaç de suportar les màximes forces i moments transmesos per un subjecte de 95 percentil en el pitjor escenari (flexió extensió d'espatlla).
- El Sistema VIF permet els graus de llibertat i els desplaçaments suficients a l'equip MARES pel seu correcte funcionament amb un factor de seguretat mínim de 1.5.

Capítol 6. CONCLUSIONS

A continuació es recullen les principals conclusions i aportacions que s'han desenvolupat en el present treball de tesi doctoral: *'Desenvolupament d'una Metodologia per la Caracterització en Terra d'Instrumentació Espacial'*. Així mateix, s'inclou en aquest apartat, una descripció de les futures línies de treball que queden obertes arrel de les conclusions exposades i també es descriu l'estat final del projecte.

6.1 Principals conclusions i aportacions

El treball elaborat i descrit en aquest document ha servit per desenvolupar una metodologia efectiva per la caracterització a terra d'instrumentació espacial. Així mateix, s'ha aplicat la metodologia desenvolupada a un cas pràctic concret, el Sistema VIF. Es recull en aquest document la descripció de la metodologia proposada (veure apartat 2.2) i l'aplicació d'aquesta metodologia pel Sistema VIF (veure apartat 2.4).

La metodologia general s'ha desenvolupat d'acord amb l'objectiu de permetre la caracterització a terra d'instrumentació espacial. Aquesta metodologia general sigui posteriorment aplicada sobre el cas concret del Sistema VIF, obtenint així el procés metodològic particularitzat al Sistema VIF. La metodologia particular desenvolupada sobre el Sistema VIF té com a objectiu la predicció a terra del comportament mecànic del Sistema VIF abans de ser llançat a l'espai.

Un cop establerta la metodologia a seguir, s'ha iniciat la fase de test que ha requerit el disseny i fabricació d'un equip de test específic pel Sistema VIF per tal d'obtenir les forces i moments transmesos a través dels eixos de suport, els desplaçaments del Sistema VIF, les acceleracions i els valors de fricció a les guies. Aquesta fase de test, cal destacar, que ha estat l'etapa major càrrega de treball. En aquest sentit, ha calgut treballar amb diferents tipus de sensors (galgues extensomètriques, acceleròmetres, encoders lineals, etc) per tal d'obtenir el comportament del Sistema VIF en condicions de gravetat habituals.

Així s'han obtingut infinitat de dades que han calgut ser processades i treballades per poder ser graficades i interpretades. La fase de test ha permès concloure que es farien servir els valors de test dels desplaçaments, de les friccions a les guies, de les acceleracions i dels moments transmesos per caracteritzar el model d'elements finits.

En aquest sentit, s'ha desestimat l'utilització de les forces tallants degut a que mostraven una perturbació deguda al moment (efecte de *Crosstalk*). No obstant aquest fet, la caracterització del model FEM no s'ha vist penalitzat.

Obtingudes ja totes les dades de test necessària, s'ha procedit a definir un model FEM usant el software *Samcef MECANO*. S'ha realitzat un model unidimensional simulant les bigues, nusos i elements del model real. Posteriorment s'ha caracteritzat el model FEM per tal de que presenti un comportament raonablement similar al que mostrava el Sistema VIF durant els tests. La comparativa del comportament de test del Sistema VIF respecte el model FEM, s'ha graficat i s'ha treballat amb un ràtio d'acceptació de 1.3 entre el valor de test i el valor FEM. Així s'han pogut comparar el comportament dels moments (pels quatre eixos de suport i per les tres velocitats d'excitació), de les acceleracions (en les tres direccions i per dues velocitats d'excitació) i dels desplaçaments (per direccions X-X i Y-Y). S'observa com de les 41 comparatives efectuades, només 7 excedeixen el ràtio d'acceptació de 1.3 (3 acceleracions, 4 desplaçament i cap moment). Per tant, això permet establir que el model es troba adequadament correlat.

Un cop correlat el model FEM del Sistema VIF, resta situar sobre el model els elements d'interfície que actuaran sobre el Sistema VIF quan aquest es trobi instal·lat a la ISS. Aquests elements d'interfície són el ISPR Rack i l'equip MARES. Primer, s'ha analitzat quin dels 11 moviments en que és capaç de configurar-se l'equip MARES seria el pitjor cas de cara a la transmissió de forces, moments i desplaçaments pel Sistema VIF. S'ha conclòs que el pitjor cas és l'exercici de flexió i extensió d'espatlla (majors forces d'inèrcia). Així s'ha desenvolupat el model FEM global amb el Sistema VIF i l'equip MARES configurat en flexió i extensió d'espatlla, i tot suportat per un ISPR Rack. Sobre aquest model FEM global, s'ha imposat un valor nul de força de gravetat i s'ha analitzat el comportament del Sistema VIF per dos nivells d'excitació diferents (1.4Hz i 1.7Hz).

Els resultats obtinguts sobre aquest model FEM global demostren que el Sistema VIF és capaç de suportar les forces i moments, i de transmetre adequadament aquestes càrregues al ISPR Rack amb un factor de seguretat mínim de 2.7. Així mateix, els desplaçaments màxims que patirà el Sistema VIF es troben dins dels marges admissibles segons un factor de seguretat mínim de 1.5.

D'acord amb aquests resultats es pot concloure que el Sistema VIF permet el compliment de les especificacions de forces i moments requerides pel Rack on va fixat pels dos nivells d'excitació avaluat. També es demostra que no és necessari cap limitació en el percentil del subjecte o en el tipus d'exercici a efectuar ja que el Rack és capaç de suportar les màximes càrregues transmeses per un subjecte de 95 percentil en el pitjor

escenari (flexió extensió d'espatlla). Així mateix el Sistema VIF permet els graus de llibertat i els desplaçaments suficients a l'equip MARES pel seu correcte funcionament.

Resumint, cal esmentar que el present treball ha permès el desenvolupament d'una metodologia de validació d'un equip espacial. La metodologia s'ha basant en un model FEM caracteritzat a partir d'una sèrie de tests, i utilitzat posteriorment per predir el comportament que tindrà l'equip en condicions de microgravetat. D'aquesta manera, s'ha aconseguit assegurar el compliment d'un seguit de requeriments bàsics de l'equip, així com l'aplicació de la metodologia per un cas real.

6.2 Futures línies de treball

A partir dels resultats obtinguts durant el desenvolupament del present treball i de les conclusions exposades, es proposen les següents línies futures de treball:

- **Aplicació de la metodologia general sobre un sistema o equip espacial diferent a un sistema mecànic:** en el present treball, la metodologia general s'ha aplicat sobre un sistema espacial mecànic, plantejant així un cas concret de naturalesa mecànica. Una futura línia de treball seria plantejar aquesta metodologia general sobre un sistema espacial de diferent naturalesa, ja sigui elèctric, electrònic, hidràulic, acústic, etc.
- **Desenvolupament d'un sistema de test reconfigurable per diferents equips a testear de naturalesa mecànica:** es podria desenvolupar un sistema de test que disposi bàsicament d'un seguit de punts d'anclatge on fixar els equips a testear, i que disposi també d'un element excitador que permeti excitar l'equip a diferents freqüències d'excitació. La reconfigurabilitat del sistema permetria que aquest sistema de test fos aprofitable per la realització de tests a diferents equips sense necessitat de dissenys particulars per cada cas.
- **Estudi per la unificació dels sensors utilitzats durant els tests usant sistemes de mesura òptics:** els sensors més usats durant els tests han sigut galgues extensomètriques per mesurar deformacions en els eixos de suport, encoders lineals per tal de mesurar posicions i velocitats, i acceleròmetres per tal d'obtenir acceleracions. Una futura línia de treball seria estudiar si es podrien unificar tots aquests sensors amb un únic sensor òptic format per làser i reflector. Els actuals sistemes de mesura *Làser Tracker* permeten altes precisions de l'ordre de dècimes de micra, així com lectures en continu dels reflectors situats sobre qualsevol equip. Això permetria que un únic sistema sensor pugues ser usat per determinar la deformació de l'equip i també per la mesura de posició, velocitat i acceleració. L'utilització d'un únic sistema de sensor facilitaria el treball d'adquisició i de post-processat de dades i simplificaria enormement la seva implementació.

6.3 Estat final del projecte

Un cop finalitzat el projecte, els Sistema VIF junt amb l'equip MARES ha sigut entregat al client (ESA/NASA), i el passat 5 d'abril de 2010 a les 6:05 del matí va ser llançat des de Cap Kennedy (USA) a bord del *Space Shuttle Discovery* dins de la missió STS-131.

Un cop en òrbita, el Sistema VIF ha estat pre-instal·lat en el ISPR Rack (veure següent figura) dins del mòdul *Columbus* de la ISS, i s'ha realitzat exitosament la pre-integració de l'equip MARES (*DR[W15]*). Actualment, el conjunt es troba a l'espera de la integració final per tal de poder ser utilitzat pels astronautes de la ISS.

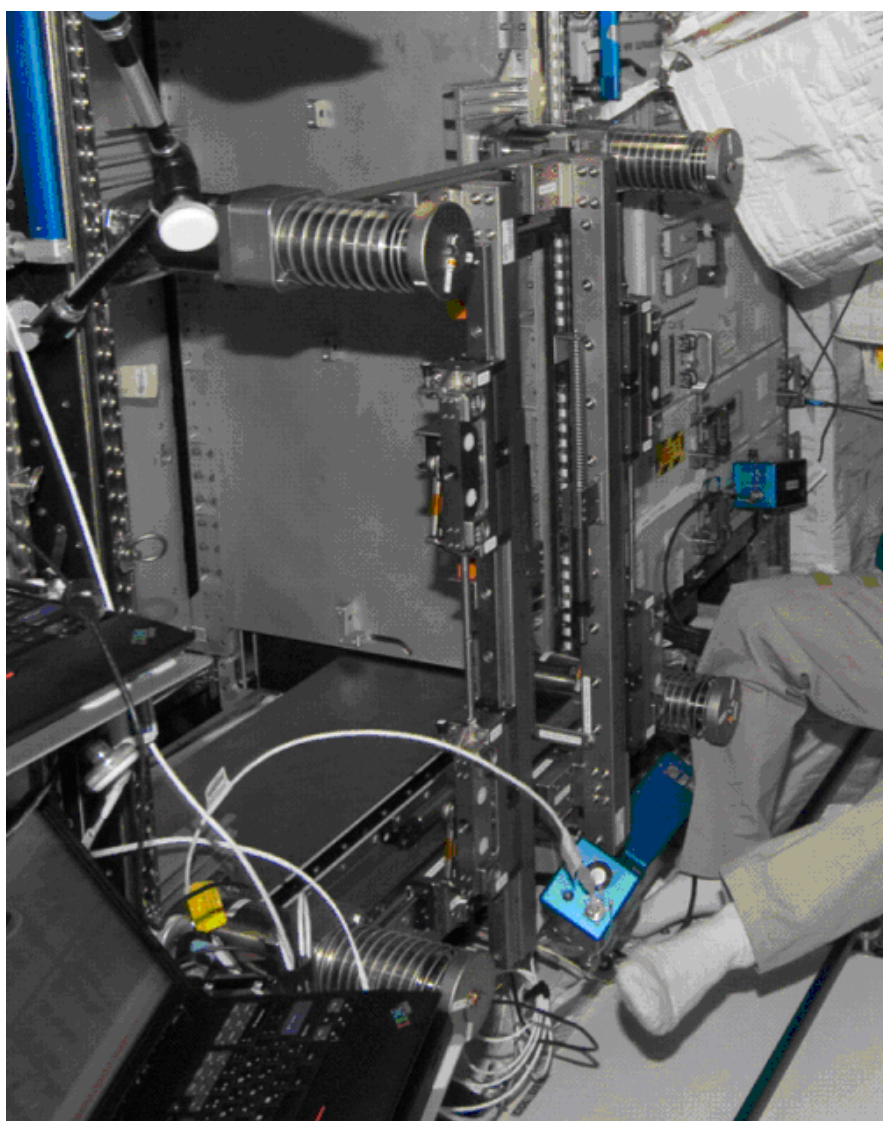


Figura 6-1: Sistema VIF instal·lat al ISPR Rack del mòdul Columbus de la ISS



Figura 6-2: Equip MARES suportat per l'astronauta dins del mòdul Columbus de la ISS

6.4 Publicacions relacionades amb l'equip MARES

A continuació es detallen dues publicacions on s'ha participat com a coautor i que avaluen aspectes relacionat amb l'equip MARES tot i no estar relacionades directament amb el Sistema VIF.

Elvira, J., Catalan, A., Borràs, X., Tomàs, A., Pastor, M., González, JM., Turmo, A., Badius, X., Evaluation of Anthropometric Requirements for the design of an Ergometer Restraint System, *31st International Conference on Environmental Systems: Human Factors*, 2001, Orlando, USA, Paper N°: 2001-01-2186, DOI: 10.4271/2001-01-2186.

Núñez, F., Romer, A., Clua, J., Mas, J., Tomàs, A., Catalan, A., Castellsaguer, J., Body Position Reproducibility and Joint Alignment Stability Criticality on Muscular Strength Research Device, *Journal of Gravitational Physiology*, 2005, vol. 12, p. 141-142.

Capitol 7. REFERENCIES BIBLIOGRÀFIQUES

- **Llibres**

- [L1] Fortescue, P., Stark, J., *Spacecraft Systems Engineering*. 4^a ed. New York: Wiley, 1995. ISBN 978-1119971016
- [L2] Newman, D., *Interactive aerospace engineering and design*, Boston: McGraw-Hill, 2002. ISBN 978-0072351248
- [L3] Griffin, M. D. [et.al.], *Space vehicle design*, 2^{on} ed. Reston:VA American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004. ISBN 978-1563475399
- [L4] Cruise, A.M. [et.al.], *Principles of space instrument design*, New York: Cambridge University Press, 1998. ISBN 978-0521451642
- [L5] Wie, B., *Space vehicle dynamics and control*, Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics cop, 1998. ISBN 978-1563472619
- [L6] Casado, J., *Historia y Tecnología de la Exploración Espacial*, Madrid: Cockpit Studio, 2002. ISBN 84-95777-08-8
- [L7] García Barreto, J.A., *Astronomía Básica*, México, D.F: Editorial Fondo de Cultura Económica, 2000. ISBN 978-9681660925
- [L8] Ahmad, A., *Optomechanical Engineering*, Danvers: CRC-Press, 1997. ISBN 978-0849301339
- [L9] Gere, J., *Timoshenko Resistencia de Materiales*, 5^a ed. Madrid: Paraninfo, 2004. ISBN 978-8497320658
- [L10] Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L., *El Método de los Elementos Finitos*, vol 1, 3^a ed. Berkshire: McGraw Hill, 1993. ISBN: 84-481-0177-4
- [L11] Braess, D., *Finite Elements: Theory, Fast Solvers, and Applications in Solid Mechanics*, 3^a ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. ISBN: 978-0521705189.
- [L12] Rodríguez-Avial, M., *Fundamentos de Resistencia de Materiales*, 1^a ed. Madrid: Librería UNED, 2004. ISBN: 84-362-3296-8.

- **Articles**

- [A1] Hastings, J. K., Juds, M. A., Brauer, J. R., Accuracy and Economy of Finite Element Magnetic Analysis, *33rd Annual National Relay Conference*, Oklahoma State University, 1985

- [A2] Debeia, S. [et.al.], Design, Qualification and Acceptance of the Front Door Mechanisms for the Osiris Experiment of Rosetta Mission, *Optomechanical Design and Engineering 2002: Proceedings of Spie*. Society of Photo Optical, 2002, vol. 4771, p. 198-213
- [A3] Garzón, F. [et.al.], EMIR: the GTC NIR multi-object imager-spectrograph, *Proceedings of SPIE meeting on Astronomical Telescopes and Instrumentation: Groundbased Instrumentation for Astronomy*, eds. Alan F. Moorwood and Masanori Iye, 2004, vol. 5492
- [A4] Oxnevad, K. A., Concurrent Design Approach for Designing Space Telescopes and Instruments, *Proceedings of SPIE*, SPIE, 1998, vol. 3356
- [A5] Lemke, D. [et.al.], Cryogenic filter- and spectrometer wheels for the Mid Infrared Instrument (MIRI) of the James Webb Space Telescope (JWST), *Astronomical Telescopes and Instrumentation*, 2006, vol 6273, p 1-8
- [A6] Meyer, A.W., Erickson, E.F., Performance Summaries For SOFIA Science Instruments, *Bulletin of the American Astronomical Society: 200th AAS Meeting*, 2002, AAS, vol. 34, p 747
- [A7] Diaz-Aguado, M. F., Greenbaum, J., Fowler, W. T., Lightsey, E. G., Small Satellite Thermal Design, Test and Analysis, *Proceedings of SPIE*, SPIE 2006, vol. 6221, 622109
- [A8] Greenhouse, M. A., [et.al.], The James Webb Space Telescope Integrated Science Instrument Module, *Proceedings of SPIE*, SPIE, 2010, vol 7793, 77930B
- [A9] Friswell, M.I., Mottershead J.E., Model Updating in Structural Dynamics: A Survey. *Journal of Sound and Vibration*, ELSEVIER, 1993, vol 167(2), p347-375
- [A10] Hemez, F.M., Doebling, S.W., Test-Analysis Correlation and Finite Element Model Updating for Nonlinear, Transient Dynamics, *Proceedings of the International Modal Analysis Conference*, SEM, 1999, vol 2, p 1501-1510
- [A11] Dunn, S.A., Issues Concerning the Updating of the Finite Element Models from Experimental Data. *NASA Technical Memorandum 109116*. Langley Research Center, 1994, 9437253D
- [A12] Datta, B.N., Finite Element Model Updating, Eigenstructure Assignment and Eigenvalue Embedding Techniques for Vibrating Systems, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2002, vol 16(1), p 83-96.

- [A13] Ahmadian, H., Mottershead, J.E., Friswell, M.I., Regularisation Methods for Finite Element Model Updating, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 1998, vol 12(1), p 47-64.
- [A14] Ibrahim, R.A., Pettit, C.L. Uncertainties and Dynamic Problems of Bolted Joints and Other Fasteners, *Journal of sound and Vibration*, 2005, vol 279, p 857-936.
- [A15] Palmonella, M., Friswell, M.I., Mottershead, J.E., Lees, A.W., Finite Element Models of Spot Welds in Structural Dynamics: Review and Updating, *Computers and Structures*, 2005, vol 83, p 648-661.

▪ **Normes**

- [N1] NASA. *Payload Flight Equipment Requirements and Guidelines for Safety-Critical Structures*, SSP 52005 Rev. C. Houston: NASA, 2002
- [N2] ESA. *Material Selection for Controlling Stress Corrosion Cracking*, PSS-01-736, Issue 1. Noordwijk: ESA, 1981
- [N3] US Department of Defense. *Anodic Coatings for Aluminum and Aluminum Alloys*, MIL-A-8625 Rev. F. Washington: US Department of Defense, 2003
- [N4] US Department of Defense. *Chemical Conversion Coatings on Aluminum and Aluminum Alloys*, MIL-C-5541, Rev. F. Washington: US Department of Defense, 2006
- [N5] US Department of Defense. *Coatings, Electroless Nickel Requirements For*, MIL-C-26074 Rev. E. Washington: US Department of Defense, 1990
- [N6] ASME. *2004 BPVC Section V-Nondestructive Examination*, MIL-I-6870 ASME V (art. 5 and art. 6). New York: ASME, 2004
- [N7] ASTM. *Standard Test Method for Total Mass Loss and Collected Volatile Condensable Materials from Outgassing in a Vacuum Environment*, ASTM E-595-77/84. Conshohocken: ASTM, 1999
- [N8] ECCS. *The application of the black coating Aeroglaze Z306*, ECSS-Q-70-25A. Noordwijk: ECCS, 1999
- [N9] NASA. *Program Requirements Document for the HRF*, LS-71042-14-2. Houston: NASA, 2000
- [N10] NASA. *Pressurized Payload IRD*, SSP 57000 rev. H. Houston: NASA, 2007

- [N11] ISO. *Accuracy (Trueness and Precision) of Measurement Methods and Results*, ISO 15725. Ginebra: ISO, 2011
- [N12] ISO. *International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology*, ISO VIM (DGUIDE 99999). Ginebra: ISO, 2004
- [N13] NASA. *ISS Flight Crew Intergation Standard*, SSP 50005 rev E. Houston: NASA, 2006
- [N14] NASA. *MARES Hardware Requirements*, LS-71053-1 rev 3.3. Houston: NASA, 2002
- [N15] NASA. *IDD for the HRF MARES Rack*, LS-71090-5 rev 5. Houston: NASA, 2008
- [N16] NASA. *Payload Test Requirements*, NASA-STD-7002 rev 1. Houston: NASA, 1996

▪ **Pàgines Web**

- [W1] Geo-Orbit Quick-Look. <http://www.geo-orbit.org/>, [amb accés el 30/9/2011]
- [W2] Figura de temperatura i pressió a les diferents capes de l'atmosfera terrestre. <http://cache.eb.com/eb/image?id=73579&rendTypeId=35> [amb accés el 30/9/2011]
- [W3] Tomé, José G. *Una mica més a prop de les estrelles*. La Palma, Illes Canàries <http://www.astro-digital.com/3/cat-lanzadera.html> [amb accés el 30/9/2011]
- [W4] Hubble Space Telescope. <http://www.stsci.edu/hst/> [amb accés el 30/9/2011]
- [W5] HST Instruments. http://www.stsci.edu/hst/HST_overview/instruments [amb accés el 30/9/2011]
- [W6] How HST Works. <http://science.howstuffworks.com/hubble2.htm> [amb accés el 30/9/2011]
- [W7] SOPHIE Instrument Overview imatge. http://www.obs-hp.fr/www/guide/sophie/Poster_SOPHIE_Eng.jpg [amb accés el 30/9/2011]
- [W8] Flight Missions Information. http://nssdc.gsfc.nasa.gov/astro/flight_projects.html [amb accés el 30/9/2011]
- [W9] NASA Space Shuttle. http://www.nasa.gov/mission_pages/shuttle/main/index.html [amb accés el 30/9/2011]

- [W10] Outgassing Data for Selecting Spacecraft Materials. <http://outgassing.nasa.gov/> [amb accés el 30/9/2011]
- [W11] NASA Materials and Processes Technical Information System (MAPTIS) <http://maptis.nasa.gov/index.asp> [amb accés el 30/9/2011]
- [W12] NASA's Great Observatories. http://www.nasa.gov/audience/forstudents/postsecondary/features/F_NASA_Great_Observatories_PS.html [amb accés el 30/9/2011]
- [W13] Assessment of Selected LTPP Material Data Tables and Development of Representative Test Tables and Development of Representative Test Tables. <http://www.tfhr.gov/pavement/ltp/reports/02001/02001.htm> [amb accés el 30/9/2011]
- [W14] Strain Gauge. <http://www.circuitstoday.com/strain-gauge> [amb accés el 30/9/2011]
- [W15] MARES Equipment. http://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/MARES.html [amb accés el 30/9/2011]