

UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



CONTRIBUCIÓN AL DESARROLLO DE PROTOCOLOS DE SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE
DE CARGAS PALETIZADAS EN PLATAFORMAS DE VIBRACIÓN MULTIAXIAL, CONSIDERANDO
LA INCLUSIÓN DE LOS MODOS ROTACIONALES (Pitch & Roll)

TESIS DOCTORAL

D. Francisco Javier Zabaleta Meri



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

TESIS DOCTORAL

CONTRIBUCIÓN AL DESARROLLO DE
PROTOCOLOS DE SIMULACIÓN DEL
TRANSPORTE DE CARGAS PALETIZADAS
EN PLATAFORMAS DE VIBRACIÓN
MULTIAXIAL, CONSIDERANDO LA
INCLUSIÓN DE LOS MODOS
ROTACIONALES (Pitch & Roll)

PRESENTADA POR:

D. Francisco Javier Zabaleta Meri

DIRIGIDA POR:

Dra. Mercedes Hortal Ramos

Dr. Vicente Agustín Cloquell Ballester

DEPARTAMENTO DE PROYECTOS DE INGENIERÍA
VALENCIA, SEPTIEMBRE 2015

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

Departamento de Proyectos de Ingeniería



**CONTRIBUCIÓN AL DESARROLLO DE PROTOCOLOS DE
SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE DE CARGAS
PALETIZADAS EN PLATAFORMAS DE VIBRACIÓN
MULTIAXIAL, CONSIDERANDO LA INCLUSIÓN DE LOS
MODOS ROTACIONALES (Pitch & Roll)**

TESIS DOCTORAL

PRESENTADA POR:

D. Francisco Javier Zabaleta Meri

DIRIGIDA POR:

Dra. Mercedes Hortal Ramos

Dr. Vicente Agustín Cloquell Ballester

VALENCIA, SEPTIEMBRE 2015



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Dra. Mercedes Hortal Ramos, Responsable del área de sostenibilidad en el Instituto Tecnológico del Embalaje, Transporte y Logística (ITENE) y

Dr. Vicente Agustín Cloquell Ballester, Profesor Titular del Departamento de Proyectos de Ingeniería de la Universitat Politècnica de València.

Certifican que:

La memoria titulada “**Contribución al desarrollo de protocolos de simulación del transporte de cargas paletizadas en plataformas de vibración multiaxial, considerando la inclusión de los modos rotacionales (pitch & roll)**” que presenta D. **Francisco Javier Zabaleta Meri** para optar al grado de Doctor por la Universidad Politècnica de Valencia, ha sido realizada en el **Instituto Tecnológico del Embalaje, Transporte y Logística (ITENE)** bajo su dirección y que reúne las condiciones para ser defendida por su autor.

Valencia, 22 de Diciembre de 2015

Fdo. Dra. M. Hortal Ramos
Directora de la Tesis

Fdo. Dr. V.A. Cloquell Ballester
Director de la Tesis

A mi padre Ignacio Zabaleta de Ganuza

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por el IVACE, Generalitat Valenciana y fondos FEDER en su línea nominativa para el desarrollo del plan de actividades de I+D+i de carácter no económico, con número de expediente Expediente N° IMAMCM/2015/1.

La presente tesis representa la culminación de varios años de trabajo del autor dirigidos al estudio de los riesgos en la distribución de mercancías y cómo los envases y embalajes pueden minimizarlos. Durante estos años, el autor ha llevado a cabo diversos trabajos de investigación en este área de conocimiento, tanto de forma individual, como en colaboración con otros grupos nacionales e internacionales, empresas, así como también junto con los integrantes de la Línea de Simulación del Transporte del Instituto Tecnológico del Embalaje, Transporte y Logística (ITENE).

Expresar mi gratitud especialmente a la Dra. D^a. Mercedes Hortal, colaboradora y codirectora de esta tesis y Responsable del Área de Sostenibilidad de Envases y Embalajes de ITENE. Y al Dr. D. Vicente Cloquell, amigo y codirector por parte de la Universidad Politécnica de Valencia, del Departamento de Proyectos de Ingeniería. Para mí es un orgullo no solo a nivel profesional sino también a nivel personal el haber contado, una vez más, con ellos. Muchas gracias por vuestro apoyo.

Merecen una mención destacada por su trabajo y dedicación a los integrantes del equipo técnico de simulación del transporte de ITENE; Juan Alcaraz, Enrique de La Cruz, Juan José Sorlí, Juan de Dios, Miguel Ángel Alférez y Pablo Burches. Ellos demuestran día a día su implicación y compromiso con el instituto y con sus líneas de investigación. Quiero destacar especialmente su involucración e interés personal en el desarrollo de esta tesis, sin cuya ayuda no habría visto la luz. Agradecerles sinceramente su gran espíritu de equipo y su apoyo.

Expresar mi agradecimiento en especial al Dr. Vincent Rouillard y Dr. Mikael Sek, profesores de la Victoria University de Australia y grandes

expertos reconocidos en este ámbito a nivel mundial, por despertar en mí el interés en este área de conocimiento, lo que permitió impulsar esta línea de investigación en ITENE.

A todos los que no he nombrado, pero con los que he tenido la suerte de colaborar o tener contacto, agradeceros vuestras siempre útiles aportaciones al conocimiento que he tratado de trasladar lo mejor posible en esta tesis.

Y si bien por último, pero no por ello de menos importancia, agradecer el apoyo profesional y personal desde mis inicios en el instituto, de la Dra. D^a Carmen Sánchez Reig, Subdirectora de ITENE, quien con su constancia y empeño ha colaborado para que esta tesis sea posible.

RESUMEN

La presente tesis tiene como objetivo principal aportar nuevos conocimientos y datos concretos sobre la relevancia de la vibración angular como riesgo durante el transporte de mercancías. Asimismo se desarrolla un protocolo de ensayo que permite la simulación en laboratorio de los riesgos en el transporte considerando los modos rotacionales (vibración angular), lo que puede permitir una mejor optimización de la cantidad de envases utilizados por un lado y por otro, la reducción de los costes asociados a la potencial pérdida o defecto en las mercancías derivadas de los múltiples riesgos a los que se ven sometidas en los circuitos de distribución.

Así, se consideró como punto de partida una revisión de los principales modos de transporte utilizados para el transporte de las mercancías y su relevancia en los próximos años. De este análisis se destacan las ventajas del transporte intermodal para la distribución de mercancías con respecto al transporte convencional. Esto supone una transformación en la unitización de las cargas para el transporte más estándar y basada en contenedores para semitrailers y trailers completos. Además, el transporte por carretera sigue siendo el modo de transporte predominante, si bien en los transportes a largas distancias predomina claramente el transporte marítimo frente al transporte aéreo, que se utiliza principalmente para cargas de alto valor.

Estudiados los principales trabajos existentes y riesgos en los distintos modos de transporte se concluye que, a pesar de la relevancia del transporte marítimo en el transporte internacional de mercancías, los estudios sobre los posibles efectos sobre la carga transportada son muy escasos. En el caso del transporte terrestre es donde más datos se aportan por distintos autores, pero es necesario conseguir más datos de inventario disponibles para la mayor tipología de carreteras y ubicaciones geográficas posibles. Esto permite una mejor adaptación a la realidad de los protocolos de ensayo que se basan en valores promedio, reduciendo los sobreembalajes y minimizando cantidad de material, costes e impactos ambientales.

Se profundiza en la aceleración y por tanto, las vibraciones, que acontecen en seis direcciones; tres lineales y tres angulares (rotacionales), considerándose las lineales como las más importantes hasta el momento y por tanto, los protocolos actuales de simulación se construyen considerando únicamente estas tres direcciones. En el presente trabajo se lleva a cabo la monitorización completa de un circuito de transporte terrestre e intermodal que permite identificar y cuantificar las vibraciones angulares (pitch, roll y yaw) y que en función de su intensidad podrían tener, por tanto, una gran influencia y provocar daños en las mercancías durante el transporte si no se consideran en el diseño de los embalajes. Esto cobra especial relevancia en modos de transporte como el terrestre y el marítimo en concreto, si bien están presentes en cualquier modo de transporte.

Tras el estudio en detalle de los actuales referentes y protocolos utilizados para la simulación del transporte, así como el equipamiento disponible, se diseña un protocolo de ensayos teórico que incorpora la vibración angular. Se trata este de un primer paso para disponer de un protocolo reconocido a nivel internacional que considere de forma integral los principales riesgos que acontecen sobre la mercancía transportada en su transporte y distribución.

Con todo, los resultados obtenidos permiten identificar claramente futuras líneas de investigación que aporten nuevos avances en el conocimiento de los riesgos para las mercancías durante la distribución, la simulación y ensayos de los mismos así como de las tecnologías necesarias para llevar a cabo dicha simulación.

Aquest treball té com a objectiu fonamental aportar nous coneixements i dades concretes sobre la rellevància de la vibració angular com a risc durant el transport de mercaderies. Amb aquest objectiu es dissenya un protocol d'assaig que permet la simulació en el laboratori dels riscos en el transport considerant les diferents maneres de vibració rotacionals (vibració angular); aconseguint una millor optimització de la quantitat d'envasos transportats i reduint el cost vinculat a les destrosses i defectes de producte produïts per els riscos de cycle de distribució.

Com a punt de partida es va considerar una revisió dels més destacats modes de transport dirigits al transport de mercaderies i la rellevància de cada mode en els propers anys. D'aquest anàlisi és destaquen avantatges del transport intermodal davant del transport convencional per a la distribució de mercaderies. El transport intermodal requereix de una estandardització de les cargues basada en l'ús de contenidors per a semi tràilers i tràilers complets. A més, el transport per carretera segueix sent el mode de transport prevalent, mentre en els transports de llarga distancia predomina el transport marítim davant del transport aeri, dirigit a cargues amb un valor més alt.

Analitzats els treballs existents més destacats i els riscos en els diferents modes de transport es conclou que malgrat la rellevància del transport marítim en el transport internacional de mercaderies, els estudis centrats en els possibles efectes sobre la càrrega transportada son escassos. En canvi, en el mode de transport terrestre és on més dades de diferents autors es poden trobar, encara que és necessari aconseguir més dades de inventari referents a la major tipologia de carreteres i ubicacions geogràfiques possible. La creació de un inventari més complet permet una millor adaptació a la realitat dels protocols d'assaig que es basen en termes mitjos (mitjana aritmètica), disminuint el excés d'embalatge i minimitzant la quantitat de material, els costos i l'impacte ambiental.

En aquesta tesi s'aprofundeix en l'estudi de l'acceleració i per tant, les vibracions, que esdevenen en sis direccions; tres lineals i tres angulars (rotacionals), considerant les vibracions lineals com les més destacades i

estudiades fins ara, de manera que els actuals protocols de simulació s'elaboren considerant únicament les tres direccions lineals. En canvi, el present treball duu a terme la monitorització completa d'un cicle de distribució terrestre e intermodal que permet identificar i quantificar les vibracions angulars (pitch, roll i yaw); ja que en funció de la intensitat podrien tenir una gran influència i provocar danys en la mercaderia durant el transport si no estan considerades durant el disseny dels embalatges. Aquest fet obté especial rellevància en modes de transport com el terrestre i el marítim, encara que estan present en qualsevol mode de transport.

Després del estudi en detall dels actuals referents i protocols utilitzats per a la simulació del transport, així com el equipament disponible, és dissenya un protocol d'assaig teòric que incorpora la vibració angular. Es tracta d'un primer pas per a disposar d'un protocol reconegut a nivell internacional que consideri de manera integral els principals riscos que han de suportar les mercaderies durant un cicle de distribució.

En conseqüència, els resultats obtinguts permeten identificar clarament futures línies de investigació que aporten nous avanços en el coneixement dels riscos per a les mercaderies durant la distribució, la simulació i els assajos dels mateixos; així com de les tecnologies necessàries per dur a terme aquesta simulació.

SUMMARY

This thesis aims to provide new knowledge and data regarding the relevance of angular vibration as a risk in freight transport. Also, a new test protocol is developed to allow in-lab freight transport risk simulation taking into account rotational modes (angular vibration). This could allow in one hand a better package optimization, and on the other hand a cost reduction in relation to the potential damages that the transported goods suffer in distribution circles.

To achieve this, the considered starting point was a revision of the main transportation modes used in freight movement and their projected relevance in next years. This analysis highlights the advantages of intermodal goods transport against conventional transport, which compromises a transformation toward standard unit loads in transport and based on full semi-trailers and trailers. Also, road transport will continue being the most relevant, although ship transport for long-distance transport will be preferred over air transport, which is mainly used for high value goods.

The analysis of existing works related to research in transport risks shows that even though ship transport is highly relevant in international good movements, studies related to the potential effect of this transport mode in goods are scarce. Also, in road transport there is a number of data already gathered by different authors, but more information related to the road typologies and geographical locations is needed. This will allow for a better adaptation of real-life effects in test protocols, which are based on mean values, and therefore a consequent reduction of packaging could be achieved alongside with minimization of material, costs and environmental impacts.

This thesis will focus on acceleration, and therefore vibration, that occurs during transport in six different directions, three lineal and three angular (rotational). Linear acceleration is considered at the moment in the industry as the most relevant one, and consequently tests protocols for freight simulation are designed using just lineal acceleration. The proposed work will cover full monitoring of terrestrial and intermodal transport, identifying

and quantifying angular vibration (pitch, roll and yaw). This angular vibrations could have an important influence depending on their intensity, and produce important good damages in transport if not considered in the packaging design. This is especially relevant in road and ship transport, although it is true for any kind of transport mode.

After analysing in detail the main references and test protocols used for transport simulation and the existing equipment, a new test protocol is designed which includes angular vibration. This is a first step towards development of an international recognised protocol which considers as a whole the main risks suffered by goods during transport and distribution.

Finally, the achieved results allow to clearly identify future research lines for advancing the state of the art in relation to risk assessment of goods distribution, simulation of transport conditions, and development of new test protocols and related technologies.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	I
RESUMEN.....	III
RESUM.....	V
SUMMARY.....	VII
ÍNDICE.....	IX
ACRÓNIMOS.....	XIII
LISTADO DE FIGURAS.....	XV
LISTADO DE TABLAS.....	XVII
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA.....	1
1.2. CUESTIÓN A INVESTIGAR.....	4
1.3. JUSTIFICACIÓN. IMPACTO DE LA INVESTIGACIÓN.....	5
2. OBJETIVOS.....	9
3. HIPÓTESIS.....	11
4. MARCO DE REFERENCIA.....	15
4.1. EL EMBALAJE Y SU RELEVANCIA EN EL TRANSPORTE DE MERCANCÍAS.....	15
4.2. OPTIMIZACIÓN DE LOS ENVASES Y EMBALAJES.....	18
4.3. MODOS DE TRANSPORTE.....	22
4.3.1. Diferencias en el transporte de mercancías y de pasajeros.....	22
4.3.2. Tipos de transporte de mercancías.....	23
4.3.3. Transporte intermodal para la distribución de mercancías.....	28
4.4. RIESGOS EN LA DISTRIBUCIÓN DE MERCANCÍAS.....	31
4.4.1. Grados de libertad de los movimientos durante el transporte.....	31
4.4.2. Tipos de riesgos en la distribución.....	34
4.4.3. Vibraciones en los distintos modos de transporte.....	36
4.4.4. La vibración angular.....	39
4.5. MONITORIZACIÓN Y REGISTRO DE VIBRACIONES EN LA DISTRIBUCIÓN DE MERCANCÍAS.....	39
4.5.1. Dispositivos y equipos para el registro de vibraciones.....	39
4.5.2. Análisis de equipos actuales para el registro de las vibraciones y en concreto, de los modos rotacionales.....	43
4.5.3. Descripción del equipo específico desarrollado para el registro de las vibraciones y en concreto, de los modos rotacionales.....	44

4.5.4. Disposición y ubicación de los equipos para la monitorización.....	48
4.6. TÉCNICAS DE SIMULACIÓN EN LABORATORIO DE LAS VIBRACIONES EN LOS PROCESOS DE TRANSPORTE	52
4.6.1. Procedimiento para la simulación en laboratorio de riesgos en el transporte.....	52
4.6.2. Revisión de técnicas de ensayo y métodos utilizados.....	54
4.6.3. Simulación en los equipos de laboratorio de las vibraciones en el transporte.....	59
4.7. MARCO NORMATIVO PARA LA SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE.....	69
4.7.1. Sistemas normativos existentes.....	69
4.7.2. Procedimientos normalizados para la evaluación de la vibración en el transporte de mercancías.....	72
4.8. NUEVO MARCO LEGISLATIVO EN TRANSPORTE DE MERCANCÍAS Y SEGURIDAD	74
5. MATERIALES Y MÉTODOS.....	77
5.1. TECNOLOGÍA UTILIZADA	77
5.1.1. Modos de transporte utilizados	77
5.1.2. Instrumental para la captura, almacenamiento y monitorización de la vibración en el transporte.....	77
5.1.3. Herramientas de procesado de datos.....	78
5.2. DISEÑO DE EXPERIMENTOS.....	79
5.2.1. Selección y detalle de las rutas de transporte realizadas.....	79
5.2.2. Disposición y parámetros de programación del instrumental de recogida y tratamiento de datos.....	82
5.3. PROTOCOLO DE EVALUACIÓN DE ENVASES Y EMBALAJES PARA LA DISTRIBUCIÓN DE LAS MERCANCÍAS	93
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	97
6.1. RESULTADOS DE LOS TRAYECTOS DE TRANSPORTE POR CARRETERA.....	97
6.1.1. Resultados de la vibración angular en el trayecto circular por carretera.....	97
6.1.2. Resultados de la vibración angular en el trayecto circular por carretera comparado con el trayecto en carretera del transporte intermodal.....	100
6.1.3. Resultados de la vibración angular en distintos puntos de la superficie del contenedor en transporte por carretera.....	102
6.1.4. Resultados de la vibración angular para distintos anchos de banda espectrales en transporte por carretera	105
6.2. RESULTADOS DEL TRANSPORTE FERROVIARIO.....	107
6.2.1. Resultados de la vibración angular en el trayecto en tren Madrid-Sevilla.....	107

6.2.2. Resultados de la vibración angular para distintos anchos de banda espectrales en transporte ferroviario	110
6.3. RESULTADOS DEL TRANSPORTE MARÍTIMO	112
6.3.1. Resultados de la vibración angular en el trayecto en barco Sevilla-Tenerife-Valencia.....	112
6.3.2. Resultados de la vibración angular para distintos anchos de banda espectrales en transporte marítimo	115
6.4. RESULTADOS DEL TRANSPORTE INTERMODAL.....	117
6.5. RESULTADOS DEL PROTOCOLO DE EVALUACIÓN INCORPORANDO MODOS ROTACIONALES	119
6.5.1. Detalle del protocolo de evaluación con modos rotacionales	119
6.5.2. Diferencias del protocolo de evaluación desarrollado con respecto otros protocolos.....	132
7. CONCLUSIONES.....	135
7.1. VERIFICACIÓN DE LAS HIPÓTESIS	135
7.2. VALIDEZ DE LAS TECNOLOGÍAS Y PROTOCOLOS UTILIZADOS.....	140
8. DESARROLLOS FUTUROS.....	141
9. BIBLIOGRAFÍA	145

ACRÓNIMOS

ADR *Agreement on Dangerous Goods by Road*
ASTM *American Society for Testing and Materials*
ATM *Air Traffic Management*
BS *British Standard*
CEN *European Committee for Standardization*
CEOE *Confederación Española de Organizaciones Empresariales*
COM *Comunicación de la Comisión Europea*
DFT *Discrete Fourier Transform*
DOF *Degree Of Freedom*
EU *European Union.*
EUMOS *European Safe Logistic Association*
ERTMS *European Rail Traffic Management System*
FEU *Forty-foot Equivalent Units*
FFT *Fast Fourier Transform*
G, g *Aceleración de la gravedad*
GPS *Geographical Positioning System*
GEI *Gases de Efecto Invernadero*
HR *Humedad Relativa*
I/O *Input/Output*
IATA *International Air Transport Association*
IMDG *International Maritime Dangerous Goods*
IMO *International Maritime Organization*
ISTA *International Safe Transit Association*
ISO *International Standards Organisation*
IST *Instrumented Sensor Technology*
ITS *Intelligent Transportation System*

Acrónimos

LRTT *Long-range identification and tracking of ships*

MB *Megabyte*

N/D *No Disponible*

PSD *Power Spectral Density*

RIS *Radiology Information System*

RMS *Root-Mean-Square*

RVC *Random Vibration Controller*

SESAM *Single European Sky ATM Research*

T *Temperatura*

TEU *Twenty-foot Equivalent Units*

UE *Unión Europea*

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Presencia del envase y embalaje en los distintos sectores económicos	6
Figura 2. Envases primario, secundario y terciario	16
Figura 3. Consideraciones económicas en la optimización de un embalaje	19
Figura 4. Tres vectores para el diseño de un embalaje óptimo.....	21
Figura 5. Concepto de sistema de embalaje óptimo según el método de los seis pasos	22
Figura 6. Vehículo para transporte terrestre	24
Figura 7. Vehículo para transporte ferroviario	24
Figura 8. Vehículos para transporte marítimo 1) Transporte marítimo 2) Transporte fluvial.....	25
Figura 9. Vehículo para transporte aéreo.....	26
Figura 10. Distribución modal del transporte de Mercancías 1) Interior 2) Exterior ...	27
Figura 11. Evolución de la distribución modal del transporte de mercancías en España	28
Figura 12. Tipos de paletas más utilizadas.....	29
Figura 13. Grados de libertad en el transporte	31
Figura 14. Los grados de libertad del movimiento de un camión.....	32
Figura 15. Los seis grados de libertad del movimiento de un tren	33
Figura 16. Los seis grados de libertad del movimiento de un barco	33
Figura 17. Esquema simplificado de un dispositivo de adquisición de datos	40
Figura 18. Saver adaptado para la monitorización de riesgos incluyendo las vibraciones angulares	44
Figura 19. Anclaje del dispositivo de monitorización 1) En la estructura del vehículo 2) En la unidad de carga a monitorizar.....	48
Figura 20. Fases para la simulación en laboratorio de los riesgos del transporte	52
Figura 21. Perfiles de vibración sinusoidal y aleatoria.....	54
Figura 22. Detalle de la integración en una onda de tres ondas sinusoidales.....	55
Figura 23. Detalle de la integración en una onda de tres ondas sinusoidales.....	56
Figura 24. Comparación de valores genéricos de PSD con respecto a valores reales	58
Figura 25. Equipos de laboratorio para la simulación de los riesgos en el transporte....	60
Figura 26. Distorsión de la vibración debido al procesado de la PSD	61
Figura 27. Esquema de la simulación de vibraciones en equipos de laboratorio	62
Figura 28. Equipos para ensayos de vibración 1) electromagnético 2) hidráulico	63
Figura 29. Ejemplos gráficos de ensayos 1) de pulsos 2) vibración aleatoria 3) vibración a frecuencia y desplazamiento fijo y 4) barrido de frecuencia	65
Figura 30. Equipo para la simulación de vibraciones y pitch & roll	67
Figura 31. Ruta de los trayectos por carretera (Trayectos 1,2,3 y 4)	80
Figura 32. Carga del contenedor	80
Figura 33. Ruta y trayectos del transporte intermodal	81
Figura 34. Plano de la monitorización de la furgoneta	82
Figura 35. Detalle de ubicación del dispositivo de monitorización en la furgoneta	83

Figura 36. Plano de la monitorización del contenedor	84
Figura 37. Instalación de los registradores de vibraciones en el contenedor	84
Figura 38. Instalación de los registradores de vibraciones en el contenedor	85
Figura 39. Instalación de los registradores de vibraciones en el contenedor	88
Figura 40. Esquema del procedimiento para el tratamiento de datos utilizado	91
Figura 41. Datos procesados en una monitorización de 24 horas	92
Figura 42. PSD comparativa de la vibración “pitch” en los trayectos circulares	97
Figura 43. PSD comparativa de la vibración “roll” en los trayectos circulares	98
Figura 44. PSD comparativa de la vibración “yaw” en los trayectos circulares	99
Figura 45. PSD comparativa de la vibración “pitch” de los trayectos por carretera circuito circular y trayecto Valencia-Madrid	101
Figura 46. PSD comparativa de la vibración “roll” de los trayectos por carretera circuito circular y trayecto Valencia-Madrid	101
Figura 47. Comparación de las PSD de la vibración “yaw” de los trayectos por carretera circuito circular y trayecto Valencia-Madrid	102
Figura 48. Comparación de las PSD de la vibración “pitch”, “roll” y “yaw” en distintas posiciones de la plataforma de carga del contenedor en el trayecto Valencia- Madrid.....	104
Figura 49. Comparación de las PSD de las vibraciones “pitch”, “roll” y “yaw” durante el transporte por carretera Valencia-Madrid	105
Figura 50. Comparación de las PSD de la vibración “pitch” y “roll” con dos anchos de banda (0,3-25Hz y 0,3-10Hz) durante el transporte por carretera.....	106
Figura 51. PSD de la vibración “pitch” del transporte ferroviario	107
Figura 52. PSD de la vibración “roll” del transporte ferroviario para rango de frecuencia (0,3-25Hz).....	108
Figura 53. PSD de la vibración “yaw” del transporte ferroviario	109
Figura 54. Comparación de las PSD de las vibraciones “pitch”, “roll” y “yaw” durante el transporte ferroviario	110
Figura 55. Comparación de las PSD de la vibración “pitch” y “roll” con dos anchos de banda (0,3-25Hz y 0,3-10Hz) durante el transporte ferroviario.....	111
Figura 56. Respuesta espectral de las olas	112
Figura 57. PSD de la vibración “pitch” del transporte marítimo.....	113
Figura 58. PSD de la vibración “roll” del transporte marítimo	113
Figura 59. PSD de la vibración “yaw” del transporte marítimo.....	114
Figura 60. Comparación de las PSD de las vibraciones “pitch”, “roll” y “yaw” durante el transporte marítimo.....	115
Figura 61. Comparación de las PSD de la vibración “pitch” y “roll” con dos anchos de banda (0,3-25Hz y 0,3-10Hz) durante el transporte marítimo	116
Figura 62. Comparativa de las PSD de las vibraciones “pitch” intermodal	117
Figura 63. Comparativa de las PSD de las vibraciones “roll” intermodal	118
Figura 64. Comparativa de las PSD de las vibraciones “yaw” intermodal	119

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Medidas aplicadas a los embalajes y su potencial de reducción (Adaptado de Mariésse, 2013).....	19
Tabla 2. Propiedades de los principales medios de transporte (Adaptado de Ecoembes, 2015).....	26
Tabla 3. Tipos de contenedores y sus características (Adaptado de Affari, 2015)	30
Tabla 4. Datos de campo de vibraciones en distintos modos de transporte.....	38
Tabla 5. Identificación y análisis de dispositivos de registro y monitorización del transporte	42
Tabla 6. Análisis de los dispositivos que potencialmente pueden registrar vibraciones angulares.....	47
Tabla 7. Riesgos y detalle de los estudios de monitorización del ciclo de distribución para transporte por carretera	50
Tabla 8. Riesgos y detalle de los estudios de monitorización del ciclo de distribución para transporte ferroviario, marítimo e intermodal	51
Tabla 9. Normas y los riesgos evaluados en los envases en la distribución de mercancías	70
Tabla 10. Normas para la evaluación de las vibraciones en el transporte.....	73
Tabla 11. Reglamentación en el transporte de mercancía peligrosa para distintos modos de transporte.....	74
Tabla 12. Dispositivos utilizados para registro en la monitorización	83
Tabla 13. Parámetros de programación de los dispositivos utilizados para la monitorización de la ruta de testeo	83
Tabla 14. Dispositivos utilizados para registro en la monitorización.....	84
Tabla 15. Datos de la configuración para los trayectos 2,3,4,5 y 6	86
Tabla 16. Datos de la configuración para los trayectos 7 y 8.....	87
Tabla 17. Estructura de contenidos de las normas internacionales reconocidas para la evaluación de riesgos en el transporte.....	92
Tabla 17. Estructura de contenidos de las normas internacionales reconocidas para la evaluación de riesgos en el transporte.....	93
Tabla 18. Detalle de las normas de referencia para la vibración del transporte.....	94
Tabla 19. Condiciones atmosféricas propuestas en la norma EN ISO 2233:2002	128
Tabla 20. Plantilla para la recepción y aceptación del embalaje a ensayar	131
Tabla 21. Plantilla para la realización del ensayo y registros	132

1. INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

1.1. DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

En la actualidad, el dinamismo económico, las comunicaciones, así como los cambios en el consumo, han propiciado un gran auge de las operaciones comerciales a nivel internacional. Este auge ha sido propiciado y facilitado, sin duda, por la evolución de los medios de transporte. De hecho, el sector del transporte y la logística es clave en el comercio. Por un lado, permite la distribución de los productos fabricados hasta el cliente o consumidor final y, por otro, el aprovisionamiento de las materias primas necesarias para la fabricación.

A su vez, el transporte de mercancías o materias primas necesita, en la mayoría de las ocasiones, de envases y embalajes que las contengan, protejan y permitan su adecuada manipulación en cualquier punto de la cadena de suministro o también conocida como cadena de distribución. Las mercancías y sus embalajes durante este proceso deben ser capaces de soportar, sin sufrir daño alguno, numerosos riesgos como compresiones, vibraciones, humedad, electricidad estática, calor, frío, cambios de presión, impactos caídas e inestabilidad (García-Romeu, 2008). Estos riesgos pueden ser mayores cuando intervienen además en la cadena distintos agentes y/o modos de transporte, como es el caso del transporte intermodal, que cada vez cobra más protagonismo.

En la selección y diseño de un envase y embalaje, además de la protección de los productos, es de suma importancia la consideración de otros factores como el económico y el ambiental. En lo relativo al económico es especialmente relevante, además del coste del envase y embalaje por sí mismo, el coste por pérdidas durante el transporte, lo que supone no sólo pérdida de envases y embalajes, sino también de producto, además de comprometer otros factores como imagen y compromiso hacia el cliente. En lo relativo al ambiental, cada vez es mayor la demanda de productos y servicios que incorporan criterios ambientales desde el diseño y la consideración de la eficiencia de los recursos desde una perspectiva global. Sin embargo, hay que tener en cuenta que cuando el envase y embalaje ha sido utilizado pasa a ser un residuo que se ha de gestionar. Además, en la Directiva de envases y

residuos de envases 94/62/CE modificada por la Directiva 2004/12/CE, se definen requisitos para la reducción de la cantidad y/o volumen de envase y embalaje que finalmente se convierte en residuo. Esto requiere que el material de envase se ajuste a la carga, protegiéndola durante el transporte de forma adecuada (BS EN15433-1, 2007).

Es, por tanto, de sumo interés para mejorar y optimizar los envases y embalajes, conocer los riesgos en la cadena de distribución. Esto facilitaría una mejora del diseño de los mismos optimizando su uso y reduciendo los costes que supondrían pérdidas por un mal embalaje o por un mayor coste derivado de un sobreembalaje.

Con el objetivo de conocer los riesgos, es necesario el control y la monitorización de los sistemas envase-producto para poder llevar a cabo ensayos de laboratorio de forma previa a su distribución real. Si bien estos ensayos se realizan desde los años sesenta, en las últimas dos décadas, los sistemas de ensayo para la distribución han sufrido un gran avance, pasando de simulaciones genéricas a simulaciones más concretas y adaptadas (Joneson, 2014), y a normalizarse a través de protocolos de referencia como las series ISTA, ASTM, ISO, EN, entre otras. Esto se debe a que es muy complejo y costoso realizar pruebas en un proceso real para comprobar el comportamiento del sistema envase-producto a la hora de optimizar un envase y embalaje. Por estos motivos, se destaca la importancia de la simulación en laboratorio de los procesos de transporte, incrementándose su uso como una herramienta para la optimización del envase y embalaje, tal y como se pone de manifiesto por la Asociación Internacional de Seguridad en el Tráfico (ISTA-International Safety Trade Association). Como regla general, la simulación de la distribución debería representar, lo más fielmente posible, los riesgos reales que las mercancías, es decir, el sistema envase-producto-embalaje, encontraría en su ciclo de distribución.

Por otro lado, por parte de la Unión Europea se están llevando a cabo desarrollos legislativos y normativos que permitan mejorar el nivel de seguridad del transporte por carretera. El objetivo es reducir a la mitad el número de víctimas mortales en las carreteras de la Unión Europea para 2020 (COM, 2010). Para ello, en 2014 se publicó la Directiva 2014/47/CE, donde se definen los principios aplicables para evaluar y garantizar la seguridad y sujeción de la carga en el transporte por carretera de mercancías.

Hasta la fecha, los procesos de simulación, así como el diseño de los equipos de laboratorio, se han centrado en reproducir los riesgos mecánicos dinámicos propios del transporte: vibraciones, choques y aceleraciones. La mayoría de los trabajos hasta la fecha se centran en el registro y simulación de las vibraciones en el eje vertical, es decir, un grado de libertad, debido a la gran cantidad de energía que estas vibraciones pueden representar, y sólo un número limitado analizan los efectos de las vibraciones axiales en otros ejes (longitudinal y transversal) o de vibraciones rotacionales (pitch, roll, yaw). Sin embargo, en algunos trabajos (Bernard et al., 2011; Yuanding et al., 2014) se confirma que los efectos producidos por vibraciones con otros grados de libertad, pueden llegar a ser significativos y no se están considerando en los procedimientos de simulación de laboratorio utilizados.

Asimismo, los actuales protocolos y métodos de simulación del transporte, están basados en estudios de investigación realizados fuera de Europa, por lo que no simulan exactamente los riesgos de transporte reales que tienen que soportar los productos por ejemplo a nivel nacional – europeo (García-Romeu, 2008; Chonhenchob et al., 2010). Los perfiles de simulación actuales, están basados en datos de campo, extraídos de estudios americanos principalmente que, al aplicarlos en Europa, sobredimensionan los sistemas de embalaje a diseñar, dado su grado de severidad, impidiendo su optimización.

Es, por tanto, necesario trabajar en nuevos sistemas que faciliten y permitan una monitorización de los riesgos más relevantes durante el transporte contemplando todos los grados de libertad identificados como relevantes en un entorno intermodal. Así, cualquier análisis debe incluir tanto los riesgos del transporte terrestre como los del transporte marítimo (Börocz y Vastag, 2015). Por un lado estos sistemas de monitorización deben permitir el registro y control de los seis grados de libertad de las aceleraciones y vibraciones en el transporte por ejemplo la vibración angular. Por otro lado, se ha de trasladar estos registros a un equipo que permita simular dicho movimiento de las cargas en el laboratorio. Con todo, es de especial interés que se incluyan todos los riesgos relevantes, como los modos rotacionales de vibración, en los protocolos de evaluación de embalaje actuales, garantizando así una simulación más cercana al comportamiento real de las mercancías durante su transporte.

1.2. CUESTIÓN A INVESTIGAR

Atendiendo a la problemática presentada, en esta tesis se pretende ahondar y aportar nuevo conocimiento específico dentro del campo de la ingeniería del embalaje, mejorando las técnicas actuales de monitorización, aportando nuevos datos relativos a rutas de transporte intermodal de mercancías, así como la demostración de la necesidad de la inclusión de la vibración angular (movimiento multi-axial) en los procedimientos de ensayo habituales en la validación de los envases y embalajes para distribución de mercancías, y cómo incorporarla en dichos protocolos.

Para ello, se ha realizado un análisis en profundidad de estudios y trabajos publicados hasta el momento relativos a la monitorización y sensorización de los procesos de transporte, así como los principales parámetros que permiten representar estos fenómenos en el laboratorio, los procedimientos y recomendaciones sobre ubicación y número de dispositivos.

Además del análisis de los trabajos existentes, se ha llevado a cabo un trabajo experimental para aportar nuevos datos relativos a la monitorización y registro de la vibración angular (entre otros parámetros) del transporte de mercancía en carretera y siguiendo una ruta intermodal (carretera-ferroviaria-marítima) seleccionando una ruta representativa para cada una de ellas.

Asimismo, se han analizado los datos experimentales y estudios relacionados, lo que permite demostrar la necesidad de incluir como parámetro en los actuales protocolos de evaluación en laboratorio la velocidad angular (modo rotacional de vibración).

Finalmente, se han estudiado los procedimientos y protocolos estandarizados más reconocidos a nivel internacional para la simulación en laboratorio de los riesgos en la distribución de mercancías. Este análisis ha dado como resultado una propuesta de mejora de los actuales procedimientos para incorporar la vibración angular como elemento imprescindible en la evaluación de los embalajes y garantizar la seguridad de las mercancías en el transporte.

1.3. JUSTIFICACIÓN. IMPACTO DE LA INVESTIGACIÓN

De la revisión que se ha realizado en la tesis sobre metodologías de monitorización y registro de vibraciones en el transporte, así como de los equipos y procedimientos de ensayo en laboratorio utilizadas para su simulación se concluye que, si bien se conocen los modos rotacionales y se pone de manifiesto su relevancia, los protocolos de ensayo actuales no los consideran. Además, hasta el momento, son escasos los estudios que aportan datos concretos para transporte intermodal y más específicamente para transporte marítimo y tren. Asimismo, en relación a las vibraciones angulares son, si cabe, más escasos los estudios que aportan datos o información específica de estas vibraciones. Con todo, se hace necesario aportar datos que permitan llevar a cabo simulaciones en laboratorio de mercancías embaladas de la forma más fiel posible reproduciendo la realidad para cualquier tipo de transporte, además de adaptar los actuales procedimientos para incorporar los modos rotacionales. Es necesario que estos métodos permitan a los usuarios ser capaces de simular todos los riesgos que puedan afectar a la seguridad de las mercancías transportadas, con independencia del tipo de transporte de que se trate. De este modo, la contribución de este trabajo facilitará a los técnicos de embalaje una optimización de los mismos más fiable.

La magnitud del presente trabajo repercute en prácticamente todos los sectores puesto que el envase y embalaje es necesario para la distribución de cualquier mercancía. Las ventas del sector de los envases y embalajes sólo en España, fueron superiores a los 14.616,30 millones de euros (Alimarket, 2014), siendo las estimaciones a nivel global de 888.000 millones de euros en el año 2018 (Smithers Pira, 2013). La relevancia del envase y embalaje en los distintos sectores se demuestra en la Figura 1.

Por otro lado, una reducción del sobreembalaje mediante la optimización del mismo conduce a ahorros económicos, ambientales y sociales considerables (Lamb et al., 2012). De hecho, los impactos ambientales negativos en relación con el conocido sobreembalaje de los productos no debe subestimarse, puesto que los costes ocultos asociados al sobreembalaje (como son incremento del volumen transportado, deterioro de infraestructuras como carreteras, entre otros) son 20 veces superiores a los costes del envase por sí mismo, lo que supone anualmente más de 130 billones de euros sólo en Europa (Ostergaard, 1991).

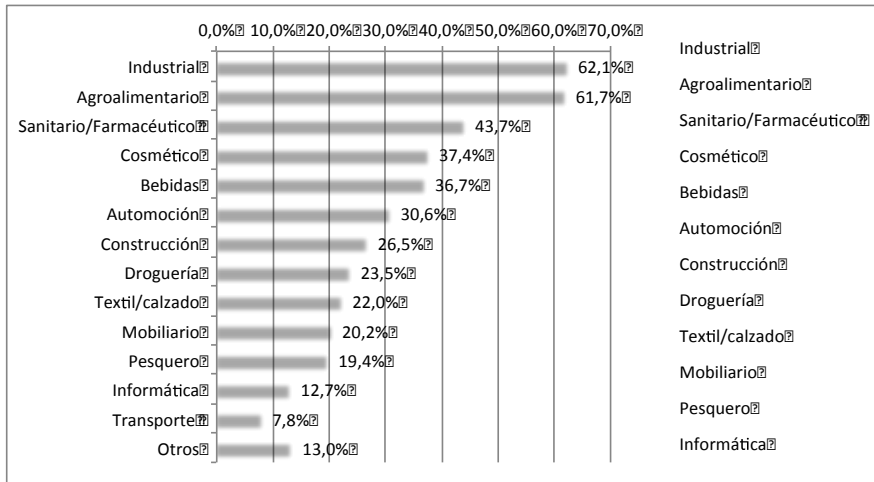


Figura 1. Presencia del envase y embalaje en los distintos sectores económicos (Adaptado de TNS, 2006)

Asimismo, el resultado de la investigación realizada está alineado con uno de los grandes retos Europeos actuales y que es mejorar y garantizar la seguridad del transporte. En concreto, se aportan datos de interés sobre los riesgos potenciales y el nivel de los mismos durante los principales tipos de transporte actuales (carretera, marítimo y ferroviario). Este conocimiento permite por un lado garantizar la seguridad puesto que los envases y embalajes podrán tener un diseño más óptimo al considerarse de forma completa todos los riesgos en la distribución y por otro lado, ser más eficientes en términos de costes.

Considerando la experiencia del autor y el centro al que pertenece en la optimización de embalajes de transporte, se realiza una estimación de las implicaciones económicas que la aplicación de las vibraciones angulares puede suponer. Las vibraciones angulares se incorporan como riesgos a considerar en los procesos de simulación y testeo de los embalajes, de manera previa a su puesta en circulación. Esta consideración, tal y como se ha comentado, permitirá una mejor optimización de las cantidades de materiales de embalaje utilizados. Uno de los materiales de embalaje sobre los que se tienen datos experimentales de trabajos para empresas es el film plástico que se utiliza para la sujeción y compactación de las cargas sobre un palé. Se ha observado que la consideración de las vibraciones angulares permite reducir hasta un 15% la cantidad de film utilizado por unidad de carga. El coste medio de film plástico por unidad

de carga es de 0,52€/palé, por lo que el ahorro logrado es de 0,078€/palé. Este dato puede no ser relevante por unidad de carga, pero sí lo es cuando se cuantifica por el total de unidades de carga puestas en mercado por una empresa de relevancia. Para dicha estimación se ha considerado como referente, por su representatividad, el caso de una empresa que pone en mercado productos de gran consumo (alimentación, hogar e higiene). Una gran empresa de este sector suele, de media, disponer de hasta 8 líneas de embalaje, con una producción de hasta 100 palés por hora. Si se supone una jornada laboral de 12 horas durante 5 días a la semana, se pondrán en mercado 48.000 palés semanalmente. Si se considera 50 el número de semanas productivo como referente, con estos datos, la empresa pone en mercado hasta 2.400.000 palés por año. Aplicando el ahorro de costes por unidad de carga mencionado anteriormente se obtienen unos ahorros anuales de hasta 187.200€/año, cantidad más que significativa y de interés para una empresa.

Recordar que esta cifra sería adicional a los ahorros derivados de la aplicación de los actuales métodos de simulación basados en efectos derivados de vibraciones verticales e impactos horizontales.

A través de lo expuesto se comprueba la relevancia económica y técnica del presente trabajo sobre los procedimientos de ensayo y de trabajo de las empresas fabricantes y usuarias de envase y embalaje, tanto nacionales como internacionales.

2. OBJETIVOS

2. OBJETIVOS

El objetivo principal que se plantea con la presente tesis doctoral, a través de las investigaciones realizadas, es aportar nuevos conocimientos y datos concretos sobre la relevancia de la vibración angular como riesgo durante el transporte de mercancías, así como un protocolo de ensayo para la optimización de envases y embalajes que incorpore los modos rotacionales.

Para alcanzar el objetivo principal propuesto se deben alcanzar otros objetivos particulares en la investigación que son:

1. Revisar y conocer en detalle los riesgos relacionados con el transporte y, en especial vibraciones, que acontecen durante la distribución de las mercancías, y específicamente en lo relativo a los modos rotacionales (vibraciones angulares).
2. Analizar las principales tecnologías de monitorización de las rutas de transporte que permiten recopilar y conocer dichos riesgos.
3. Aportar datos de las vibraciones angulares en un trayecto representativo para el transporte por carretera.
4. Medir y conocer los riesgos por vibraciones; verticales y angulares, aceleraciones y choques en una ruta de distribución que incluya los principales modos de transporte: carretera, ferroviario y marítimo.
5. Estudiar el traslado y la interpretación de los datos monitorizados a equipos de laboratorio que permitan simular la realidad en el transporte, incluyendo la velocidad angular.
6. Desarrollar un perfil de ensayo más próximo a la realidad de los riesgos en la distribución (vibración, balanceo y cabeceo, entre otros).
7. Conocer en detalle los actuales protocolos de ensayo en laboratorio definidos por los estándares ASTM, ISTA, ISO y EUMOS para la optimización de los envases y embalajes y, por tanto, la seguridad de las mercancías en la distribución.

8. Proponer un nuevo protocolo de ensayos que incorpore en su simulación modos de vibración rotacional: balanceo y cabeceo, además de los ya incorporados en los protocolos actuales.

3. HIPÓTESIS

3. HIPÓTESIS

Para el desarrollo de la propuesta se ha trabajado con dos tipos de hipótesis. Por un lado, las denominadas hipótesis principales (HP). Éstas son las que se consideran como cuestiones clave para la aplicación y desarrollo de la propuesta metodológica pretendida. Y por otro lado, las consideradas como hipótesis de trabajo (HT). Estas hipótesis de trabajo permiten incluir cuestiones específicas para los objetivos a alcanzar derivándose de las hipótesis principales y facilitando su comprensión. A su vez, el estudio realizado sobre estas hipótesis de trabajo puede identificar futuros avances de los mismos, permitiendo nuevas investigaciones que profundicen y mejoren lo alcanzado en esta tesis.

A continuación se detallan las hipótesis principales y de trabajo consideradas.

HP1. Los riesgos en la distribución y, en especial, el nivel de vibraciones y su tipo, dependen del tipo de transporte que se utilice.

Los tipos de vehículos utilizados para el transporte así como las superficies de transporte generan distintas vibraciones y por tanto, efectos diferentes sobre las mercancías transportadas. Por tanto, es necesaria, de forma previa a la simulación del transporte, conocer cuál es el modo utilizado para poder adaptar el ensayo a realizar.

HT1.1. Las respuestas espectrales son diferentes según el modo de transporte, estando sometidos a vibraciones con diferente magnitud y espectro.

La cantidad de energía depende del medio de transporte, por ejemplo en el transporte por carretera tienen mayor intensidad las vibraciones que en transporte marítimo. Asimismo, los transportes presentan diferente perfil espectral (distribución de las vibraciones según su frecuencia) según el modo de transporte utilizado. Por ejemplo, el transporte marítimo tiene casi toda la energía en frecuencias mucho más bajas que otros tipos de transporte.

HP2. Los métodos de monitorización de vibraciones verticales en el transporte son aplicables a la monitorización de los modos rotacionales.

El procedimiento de recogida de datos y la colocación de los sensores en el transporte deben ser similares a las comunmente utilizadas para el registro de vibraciones verticales.

HT2.1. La caracterización de una ruta con un tipo de vehículo determinado es extrapolable a otra ruta similar con un vehículo similar.

Los perfiles de vibración producidos por un mismo tipo de carretera y un vehículo similar son muy parecidos. Esto permite que datos de un tipo de carretera para un determinado tipo de vehículo puedan ser utilizados en situaciones de circunstancias (tipo de transporte y superficie) similares.

HT2.2. El número de repeticiones de los circuitos de transporte para la monitorización de los riesgos es aceptable que sea de dos, siempre que los registros obtenidos sean similares.

Estadísticamente la reproducibilidad de un fenómeno se ha de basar como mínimo en tres repeticiones para poder extraer conclusiones adecuadas. En el caso de la monitorización del transporte, pese a que los registros se cuenta con cientos de miles de datos tratados estadísticamente y no hay dudas con respecto a la dispersión de los mismos, realizar un contraste de dos rutas sería suficiente para descartar efectos debidos a circunstancias específicas de un trayecto individual (accidentes, atascos ...). Además esto permite reducir los costes y el tiempo necesarios para poder realizar una monitorización representativa de un trayecto determinado.

HT2.3. El contenedor o la plataforma de transporte se puede considerar un sólido rígido, al menos a efectos de los modos rotacionales; pitch, roll y yaw.

La primera aproximación en la simulación del transporte para vibraciones verticales es que la plataforma de carga del vehículo se comporta de forma rígida y que por tanto, no hay variaciones a lo largo de su estructura. Se considera por tanto que para el caso de las vibraciones angulares esto es idéntico.

HP3. Para el registro de vibraciones angulares se ha de utilizar instrumental específico.

Actualmente los sistemas de monitorización de las vibraciones en el transporte utilizan sensores de aceleración con orientación cartesiana (triaxial) además de sistemas de alimentación y almacenamiento. En el caso de querer registrar vibraciones distintas de las verticales se ha de incorporar o diseñar un nuevo sistema de registro que incluya un sensor específico que detecte dichos movimientos y por tanto permita su identificación y cuantificación.

HP4. En todos los medios de transporte se producen movimientos de pitch y roll.

Además de las vibraciones verticales, resulta evidente que en cualquier vehículo se producen movimientos de balanceo y cabeceo derivados principalmente de cómo es la superficie de transporte. No obstante son escasos los estudios que los identifiquen y cuantifiquen de forma clara y en magnitud.

HT4.1. Todos los modos de transporte presentan vibraciones angulares de diferente magnitud dependiendo del tipo de transporte que se trate.

Así como las vibraciones verticales varían en intensidad según el tipo de transporte, esto sucede también para las vibraciones angulares. Dependiendo del modo utilizado, la superficie sobre la cual se realiza el desplazamiento (carretera, vías y mar), entre otras causas, provocará la mayor o menor existencia de movimientos rotacionales.

HP5. Las vibraciones de los modos rotacionales son reproducibles total o parcialmente en laboratorio.

Existen controladores para equipos de simulación capaces de reproducir los estímulos que se registran en el transporte tanto de vibraciones verticales como angulares.

HT5.1. Los fenómenos registrados son reproducibles en los equipos de laboratorio actuales para simulación del transporte con algunas adaptaciones y/o modificaciones.

Los laboratorios de simulación del transporte actual están enfocados a las vibraciones verticales o transversales. Por tanto sólo utilizan un

único tipo de actuador o como mucho dos grados de libertad. Sin embargo las vibraciones angulares pueden reproducirse si se cuenta con equipos que dispongan de cómo mínimo de seis grados de libertad (tres verticales y los tres rotacionales) como por ejemplo los hexápodos.

HT5.2. El método de simulación aleatorio empleado para vibraciones verticales se puede aplicar a los movimientos angulares.

La única variación en la aplicación del método estaría en la naturaleza de los datos a comunicar al actuador así como en los equipos utilizados y su interpretación, no existiendo variaciones relevantes en cuanto al método de simulación de los dos tipos de vibraciones.

HT5.3. No es necesario reproducir en laboratorio todo el espectro de vibraciones y reducirlo al rango de mayor energía, reproduciendo únicamente lo que resulta significativo para la simulación del transporte, lo que puede ser extrapolable también a vibraciones angulares.

Un espectro de vibraciones abarca datos de cero a infinito, siendo imposible su cálculo y su reproducción. Por tanto, se han de identificar rangos de valores realmente significativos para su simulación. Estos rangos de valores han de considerar a su vez los valores relevantes para la vibración angular además de la vertical.

HP6. Es posible el diseño de un nuevo protocolo de ensayos que incorpore los modos de vibración rotacional: balanceo y cabeceo, utilizando como referencia los protocolos de ensayo actuales.

Los actuales protocolos recogidos en distintos estandar a nivel internacional son ampliamente conocidos por los expertos y técnicos del campo de la simulación del transporte. Tiene sentido por tanto, además de poner de manifiesto la necesidad de la consideración de la vibración angular como parámetro relevante, que éste se integre de forma sencilla en un protocolo basado en lo reconocido hasta el momento. Se hace necesario contrastar esta hipótesis para verificar que esto es posible y que por tanto podrá ser posteriormente aplicado por parte de las empresas, los laboratorios y centros de ensayo.

4. MARCO DE REFERENCIA

4. MARCO DE REFERENCIA

En el presente capítulo, se ofrece una panorámica sobre el envase y embalaje y la importancia de su optimización para un transporte eficaz de mercancías. Asimismo se revisan los principales modos de transporte y la intermodalidad como elemento clave en los actuales procesos de distribución. Posteriormente se identifican los principales riesgos que pueden acontecer durante el circuito de distribución y los posibles efectos de los mismos sobre las mercancías transportadas, y específicamente para el caso de la vibración angular. Asimismo se revisan los instrumentos y equipos de laboratorio que permiten la simulación del transporte de las mercancías embaladas de forma previa a la distribución real. Por último, se lleva a cabo un estudio de los distintos desarrollos normativos que definen los protocolos para el análisis y la validación de los envases y embalajes. Con todo, se dispondrá de una panorámica general del estado de la cuestión en relación a la consideración de los modos de vibración rotacionales (vibración angular) como riesgo relevante en el transporte de mercancías y su incorporación a los protocolos normalizados de ensayos para la validación de la seguridad de las mercancías en el transporte.

4.1. EL EMBALAJE Y SU RELEVANCIA EN EL TRANSPORTE DE MERCANCÍAS

El movimiento y distribución mundial de mercancías ha beneficiado enormemente al desarrollo de mercados, así como a las empresas y a los consumidores, puesto que pueden disponer de un amplio portfolio de productos optando por distintas posibilidades en sus compras. De hecho, desde la Unión Europea (UE), se considera que disponer de un mercado interno de mercancías adecuado es un elemento clave para la prosperidad actual y futura en una economía globalizada (European Union, 2010).

En este contexto, el envase y embalaje juega un papel crucial para garantizar que las mercancías llegan a los usuarios en perfectas condiciones de uso. Sin embargo, esto puede verse desde distintas perspectivas. El envase y embalaje no es un producto en sí mismo, sino que es un medio para distribuir mercancías a un cliente en buenas

condiciones y se diseña para asegurar que el producto se distribuye de forma adecuada durante la cadena de suministro sin que se produzcan daños. En segundo lugar, sin embargo, el envase y embalaje se convierte en residuo una vez vacío, al final de su vida útil. A pesar de los importantes desarrollos legislativos, la cantidad de residuos de envase sigue creciendo. Gran parte de este crecimiento puede deberse a los cambios demográficos y estilos de vida, que no son, por tanto, atribuibles directamente a la cadena del envase y embalaje (IEEP, 2004). Este efecto se intenta contrarrestar con numerosas iniciativas y actividades por parte de las empresas y otras entidades orientadas a la promoción e implantación de diseños de envase más ligeros, así como mayor variedad de tamaños, formas y materiales para reducir de este modo la cantidad de residuos generada.

Además de la función de protección comentada, son muchas las funciones que se esperan del envase y embalaje. Estas funciones se recogen en la definición de envase de la Directiva 94/62/CE de envases y residuos de envases modificada por la Directiva 2004/12/CE. “Envase: todo producto fabricado con cualquier material de cualquier naturaleza que se utilice para contener, proteger, manipular, distribuir y presentar mercancías, desde materias primas hasta artículos acabados, y desde el fabricante hasta el usuario o el consumidor. Se considerarán también envases todos los artículos desechables utilizados con este mismo fin”. Además se ha de diferenciar entre (Figura 2) el envase primario o envase de venta (comúnmente denominado envase), el envase colectivo o envase secundario o embalaje y el envase de transporte o envase terciario.

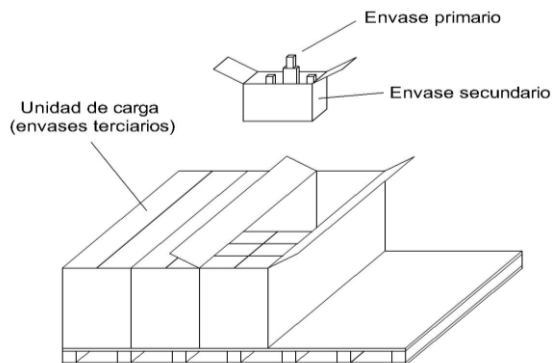


Figura 2. Envases primario, secundario y terciario

El *envase primario o envase de venta* es aquel que está diseñado para contener el producto y presentarlo al consumidor o usuario final, ya recubra total o parcialmente al producto, pero de tal forma que no puede modificarse el contenido sin abrir o modificar dicho envase. El *envase colectivo o envase secundario* es el diseñado para constituir en el punto de venta una unidad de venta, una agrupación de un número determinado de unidades de venta, tanto si va a ser vendido al usuario o consumidor final, como si se utiliza para el reaprovisionamiento, pudiendo ser separado del producto sin afectar a las características del mismo. El *envase de transporte o envase terciario* es todo envase diseñado para facilitar la manipulación y el transporte de varias unidades de venta o de varios envases colectivos, con objeto de evitar su manipulación física y los daños inherentes en el transporte (Real Decreto 782/98).

Sin embargo, y a pesar de toda la terminología relativa a la definición, los términos envase y embalaje se suelen unificar en el término “envase” o con el término anglosajón “packaging”, utilizándose normalmente el término “embalaje” para los envases colectivos o secundarios y los de transporte o terciarios y el término anglosajón “transport packaging”.

Como se ha comentado, en los actuales mercados globales, los envases y embalajes son, además de elemento protector, un elemento diferenciador del producto con respecto a los de la competencia, que puede resaltar sus cualidades actuando como “vendedor silencioso” (Hortal, 2009). Además, contenidas en su propia definición, se establecen como funciones clave del envase las siguientes (Europen, 2015):

- *Protección:* es relativa a la prevención de roturas (protección mecánica), reducción del desperdicio (barrera a la humedad, gases, luz, aromas), prevención de la contaminación, falsificación o el hurto, así como del incremento la vida útil.
- *Promoción:* se incluyen la descripción e información del producto, lista de ingredientes, características del producto y beneficios, mensajes promocionales y de la marca.
- *Información:* identificación del producto contenido, preparación del producto y su uso, datos nutricionales y de almacenamiento y conservación, recomendaciones de seguridad, información de contacto, instrucciones de apertura y la gestión del residuo.

- *Agrupación*: relacionada con el agrupamiento necesario y adaptado a las cantidades unitarias para la venta al consumidor así como las unidades necesarias para el suministro al distribuidor.
- *Manipulación*: incluye las funciones necesarias para la correcta manipulación del producto y su transporte desde el productor al distribuidor/comercializador y también su presentación en el punto de venta.
- *Reducción del residuo*: permite el procesado centralizado y reutilización de subproductos, facilita el almacenamiento y la división en distintas fracciones, incrementa la vida útil y reduce la energía necesaria para el transporte.

4.2. OPTIMIZACIÓN DE LOS ENVASES Y EMBALAJES

El principal objetivo del “envase de transporte” o embalaje es proteger a los productos contra niveles excesivos de impactos y vibraciones que puedan ocurrir durante el transporte y la distribución. Un embalaje insuficiente puede suponer daños en el producto transportado, mientras que un uso excesivo de embalaje incrementa el peso y el volumen, aumentando así los costes de distribución (Lepine et al., 2015). Por este motivo, a la hora de diseñar un embalaje se han de contemplar, además de aspectos de protección de los productos frente a riesgos que acontecen en la distribución, los costes que puedan derivarse de los materiales y cantidad utilizados (Azzi et al., 2012). Además, se han de diseñar para permitir un adecuado almacenamiento y apilamiento de la mercancía para optimizar los espacios, tanto en el almacén como en el transporte (Singh et al., 2014), siendo muy apropiada una estrategia de diseño orientada a la optimización del volumen (Wever, 2011).

Sin embargo, en el diseño se ha de encontrar un equilibrio entre el uso adecuado de cantidad de material de embalaje, costes del material y pérdidas/daños de producto y por tanto, uso excesivo de recursos naturales e impactos ambientales. Este balance se ilustra en la Figura 3. Así, un objetivo único de reducción, provocará un efecto contrario al considerar las pérdidas de embalaje y de producto en el caso que éste no supere los riesgos del circuito de distribución, lo que repercutirá en que se deban poner productos y embalajes adicionales en mercado, sustituyendo a los defectuosos para satisfacer al consumidor final.

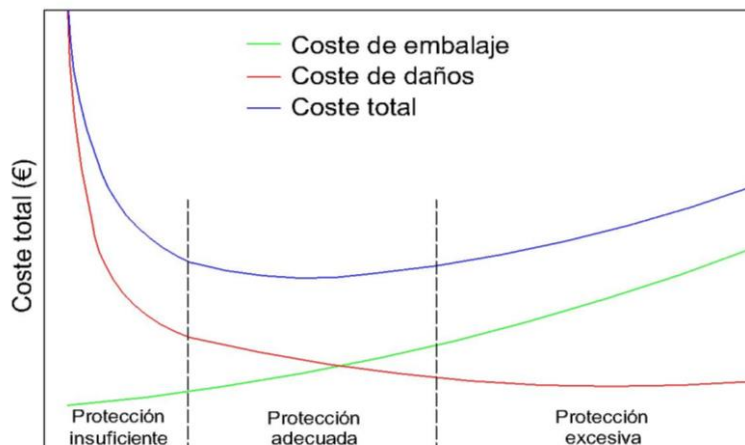


Figura 3. Consideraciones económicas en la optimización de un embalaje (Adaptado de Sek 2001 y Hortal y Alcaraz, 2015)

En la Tabla 1 se muestran distintas medidas aplicadas a los embalajes, su efecto y la frecuencia de implantación.

Tabla 1. Medidas aplicadas a los embalajes y su potencial de reducción (Adaptado de Mariësse, 2013)

Categoría	Medida	Reducción potencial (%)*
Eficiencia de material	Eliminar envases excesivos	58
	Optimizar materias primas	--
	Reducir espacios vacíos/ relleno/ uso de materiales	44
	Envasar a granel (grandes volúmenes).	29
	Aligerar/reducir el espesor	24
	Elegir un material ligero	59
	Utilizar embalaje flexible/laminados	85
	Concentrar el producto	--
Eficiencia energética (reutilización y reciclaje)	Aplicar envases reutilizables	--
	Diseñar para garantizar durabilidad	--
	Elegir envase rellenable	73
	Usar un único material	--
	Elegir envases que se puedan separar	37
	Utilizar reciclado en el material	57
	Buscar alternativas biodegradables	--
	Fomentar el uso de recursos renovables	65
Extensión vida útil	Mejorar la vida útil del producto	--

* Considerando 50 casos realizados

Destacar que las medidas más ampliamente aplicadas en la mayoría de los distintos tipos de materiales de envase son las orientadas a la reducción de cantidad de material ó aligeramiento.

Hoy en día el método más ampliamente utilizado por los técnicos de embalaje a la hora de abordar un nuevo diseño o rediseño es el conocido como “Método de los seis pasos para el desarrollo de embalaje de protección” (Root, 1997). Este método consta, como el nombre indica, de seis pasos y que son:

Paso 1. Definición del entorno de distribución. En esta etapa se han de conocer los riesgos potenciales que pueden acontecer en cada ciclo de distribución. Se incluyen en esta etapa las mediciones necesarias así como la monitorización de las rutas de transporte con el fin de conocer aspectos tales como caídas accidentales durante la manipulación, vibraciones del vehículo, impactos, temperaturas extremas, niveles de humedad, cargas de compresión, entre otros. Estos datos permiten definir los requisitos de protección tanto del producto como del envase.

Paso 2. Análisis de la fragilidad del producto. Los riesgos de la distribución identificados en el paso anterior son inevitables. En esta etapa se trata de conocer con mayor profundidad la durabilidad y resistencia del producto por sí mismo. Así se han de conocer los rangos de daño ante choques (donde influyen tanto el nivel de aceleración como los cambios de velocidad), así como las vibraciones, las frecuencias de vibración que pueden provocar daños en el producto.

Paso 3. Estudio de las posibles mejoras en el producto. En esta etapa se trata de implantar posibles mejoras en el embalaje considerando los dos pasos anteriores para evitar daños en el producto. Mejoras en la durabilidad del producto permitirá reducir los requisitos al embalaje de protección.

Paso 4. Revisión del comportamiento del material de protección y amortiguamiento. Se trata de seleccionar los materiales de envase y embalaje más adecuados para el producto en función de los daños que el producto por sí mismo no podrá superar en su distribución. En esta etapa los técnicos se apoyan en las denominadas curvas de amortiguamiento específicas para cada material ante choques y vibraciones. Estos valores son válidos para los materiales de amortiguamiento, y no necesariamente ha de ser el mismo que para todo el sistema de embalaje, lo que hace necesario un ajuste final.

Paso 5. Diseño del embalaje. La información de las etapas anteriores permite al diseñador del embalaje conocer cómo proteger adecuadamente el producto y diseñar el envase superando los riesgos durante el transporte. En esta etapa se combina toda la información hasta el momento.

Paso 6. Ensayo y evaluación del sistema de embalaje-producto. Una vez diseñado, el sistema completo embalaje-producto se ha de validar, para lo cual se someterá a una serie de ensayos que simularán los riesgos durante su distribución.

Por lo tanto, la optimización y diseño del embalaje se ha de realizar teniendo en cuenta la fragilidad del producto contenido, los riesgos de la distribución y las características de los materiales de envase y embalaje (Figura 4).

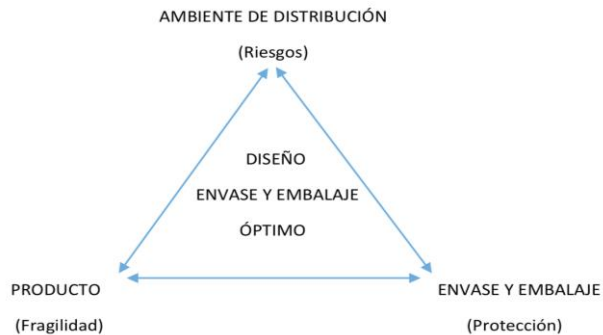


Figura 4. Tres vectores para el diseño de un embalaje óptimo

En la Figura 5 se ilustra el concepto de sistema de envase y embalaje óptimo según el método de los seis pasos.

Como conclusión, el diseño de envase no ha de realizarse como una tarea aislada, sino como parte de una gran cadena para llevar el producto a su usuario final con éxito. Así, el envase deberá encajar en un sistema integral de producción-ensado-almacenamiento-logística-marketing y contribuir a que cada uno de ellos se lleve a cabo de forma eficiente (Hanlon et al., 1998).

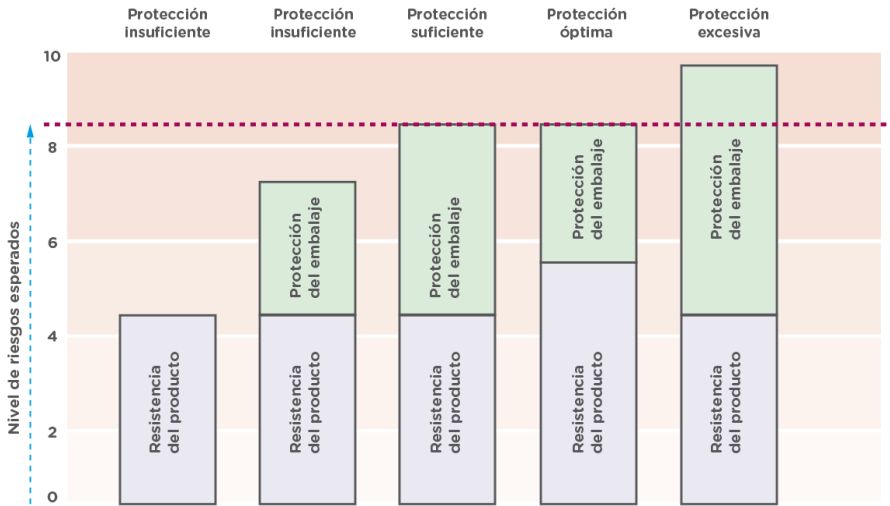


Figura 5. Concepto de sistema de embalaje óptimo según el método de los seis pasos (Adaptado de Sek, 2011)

4.3. MODOS DE TRANSPORTE

4.3.1. Diferencias en el transporte de mercancías y de pasajeros

Todos los modos de transporte (carretera, marítimo, ferrocarril, aéreo) se utilizan indistintamente para transportar pasajeros y mercancías. No obstante, cada uno de ellos se realiza habitualmente por separado, lo que supone una completa divergencia en los flujos, modos y terminales utilizados. Realizar de forma integrada el transporte de pasajeros y mercancías presenta las siguientes desventajas (Rodrigue et al., 2013):

- Ubicación de la demanda. Las localizaciones de la demanda rara vez coinciden la de pasajeros con los flujos de mercancías, tanto en su origen como en los destinos.
- Frecuencia de demanda. Mientras que en el caso de los pasajeros se demandan frecuencias de servicio más elevadas, en el caso de las mercancías este factor no es tan crítico.
- Tiempo de servicio. La demanda de los servicios para pasajeros tiene picos específicos durante el día, mientras que en el caso de las mercancías es más estable. En mercancías, algunos

transportes requieren transporte en períodos nocturnos para garantizar el aprovisionamiento a primera hora de la mañana.

- Balance de tráfico. Considerando como base de medida un día, los flujos de pasajeros suelen estar en equilibrio, con independencia de la distancia. En el caso de las mercancías, la demanda de los mercados puede provocar “vacíos” de demanda que requiere de reposicionamiento de las mercancías.
- Fiabilidad. Aunque para el caso de las mercancías se están incrementando las demandas de un servicio cada vez más fiable en cuanto a plazos de entrega, en el caso del transporte de viajeros los retrasos son inaceptables.
- Prioridad del transporte. En rutas compartidas prevalecen como prioritarios el transporte de pasajeros frente a las mercancías.
- Velocidades de operación. En el caso de los pasajeros las velocidades de servicio suelen ser mayores que en las mercancías.
- Seguridad. Los requisitos de seguridad para el caso de transportes de pasajeros son completamente distintos que para el caso de transporte de mercancías.

4.3.2. Tipos de transporte de mercancías

Los principales tipos (modos o medios) de transporte más comunes por tipo de medio utilizado son :

- Transporte terrestre: carretera y ferroviario.
- Transporte acuático: fluvial y marítimo.
- Transporte aéreo.

A continuación se describen brevemente las características de cada uno de ellos.

Transporte por carretera

Su origen son los antiguos caminos de herradura, transformados desde finales del siglo XIX y durante todo el siglo XX en carreteras. Además se han ido construyendo nuevas vías que han ido facilitando el transporte y jerarquizando la red, así encontramos redes viarias compuestas por autopistas, autovías, vías rápidas, carreteras de diferentes anchos y caminos asfaltados. Los vehículos utilizados son rígidos, articulados y trenes de carretera, en la Figura 6 se muestra un ejemplo.



Figura 6. Vehículo para transporte terrestre

Transporte ferroviario

Su desarrollo se concentró en el siglo XIX, siendo soporte de la primera revolución industrial. La mayor parte de la red ferroviaria procede de esos momentos. Los vehículos (Figura 7), se pueden agrupar en distintas modalidades: vagones poche (transporte de semirremolques no acompañados), tecnología bimodal de transporte combinado (semirremolques de carretera que pueden constituir trenes y no precisan de vagon ni de grúas en las terminales), vagones de plataformas rebajadas (carretera rodante; circulan los vehículos durante la carga y desacarga) y vagones de plataforma giratoria.



Figura 7. Vehículo para transporte ferroviario

Transporte fluvial

Es el transporte acuático que se realiza por ríos y canales. Si bien no todos los ríos son navegables, dependiendo la navegación del caudal, profundidad, relieve del cauce, el clima, usos prioritarios, entre otros. En Europa es un transporte muy utilizado, donde se han llegado a unir varios ríos mediante canales para facilitar este transporte, por ejemplo en el Danubio y el Rin.

Transporte marítimo

Este transporte es el que tiene lugar en los océanos y los mares. El gran desarrollo y especialización del sector ha permitido una evolución hacia medios de transporte para mercancías muy específicos, por ejemplo, portacontenedores, frigoríficos, etc. En el transporte marítimo se utilizan distintos tipos de buques (Figura 8): Traditional Cargo Liner (utilizados en líneas regulares, con depósitos a granel, bodegas refrigeradas), portacontenedores, buques ro-ro (transporte de cargas rodadas-vehículos), buque multipropósito (combinan los tipos anteriores de buque), otros (transporte a granel de sólidos y/o líquidos).

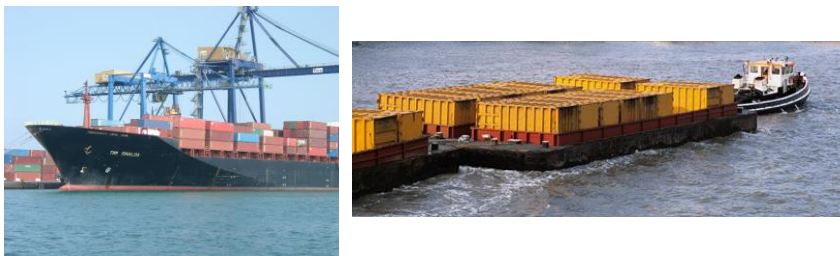


Figura 8. Vehículos para transporte marítimo 1) Transporte marítimo 2) Transporte fluvial

Las unidades utilizadas en transporte marítimo son TEU (Twenty-foot Equivalent Units), capacidad de carga de un contenedor normalizado de 20 pies (6,1 m) y 2) y FEU (Forty-foot Equivalent Units), capacidad de carga de un contenedor normalizado de 40 pies (12,2 m).

Transporte aéreo

El transporte aéreo (Figura 9) se ha desarrollado a lo largo del siglo XX, con especial incidencia a partir de la segunda mitad del siglo, cuando los avances técnicos aplicados a la aviación (motor a reacción, sistemas de vuelo...) han producido aviones más rápidos, seguros y de mayor capacidad. En un principio su uso era casi exclusivamente para el transporte de viajeros, y de mercancías poco voluminosas. Con el paso del tiempo van adquiriendo mayor importancia otro tipo de mercancías que necesitan una rápida distribución. Los tipos de aviones en función de su uso comercial son: aeronaves mixtas (piso superior transporta pasajeros y piso inferior mercancías), aeronaves cargueras (sólo transporta mercancías), aeronaves combi (más proporción dedicada al transporte de mercancías que pasajeros) y aeronaves convertibles (su

configuración permite cambiar de modo rápido el uso para pasajeros o mercancías). En el caso de las cargas aéreas, las unidades de carga se basan en la unidad ULD (Unit Load Device), utilizándose un contenedor metálico o también paletas específicas, adaptados al fuselaje del avión.



Figura 9. Vehículo para transporte aéreo

La Tabla 2 resume las características de los principales modos de transporte.

Tabla 2. Propiedades de los principales medios de transporte (Adaptado de Ecoembes, 2015)

Parámetro	Carretera	Ferrocarril	Marítimo	Fluvial	Aéreo
Capacidad y de volumen de mercancía	Limitada	Grandes cantidades	Grandes cantidades	Grandes cantidades	Limitada
Tiempos de entrega*	Corto (mismo día)	Medio (1-2 días mínimo)	Largo (mínimo 1 semana)	Corto (mismo día mínimo)	Corto (mismo día)
Flexibilidad horaria	Alta	Baja	Baja	Media	Media
Siniestralidad	Media	Baja	Baja	Baja	Baja
Restricciones a la carga	Ninguna	Pocas	Pocas	Pocas	Muchas
Infraestructuras necesarias	Muelle de carga	Terminal de carga/descarga	Terminal de carga/descarga	Terminal de carga/descarga	Terminal de carga/Descarga
Nivel de inversión en infraestructuras	Alto	Muy alto	Medio	Medio	Alto
Costes embalajes	Bajos	Medio-altos	Altos	Altos	Medios
Tipo de servicio	Puerta a puerta	Desde/a terminal de carga	Desde/a terminal de carga	Desde/a terminal de carga	Desde/a terminal de carga

* Este parámetro es altamente dependiente de la distancia a recorrer y velocidad del transporte.

El transporte marítimo presenta enormes ventajas para las empresas (Patuel, 2015), como ahorro de costes, flexibilidad por la diversidad en el tipo de buques y el envío de grandes cargas.

En 2012, la distribución del tráfico de mercancías en España, tanto interior como internacional fué el mostrado en la Figura 10.

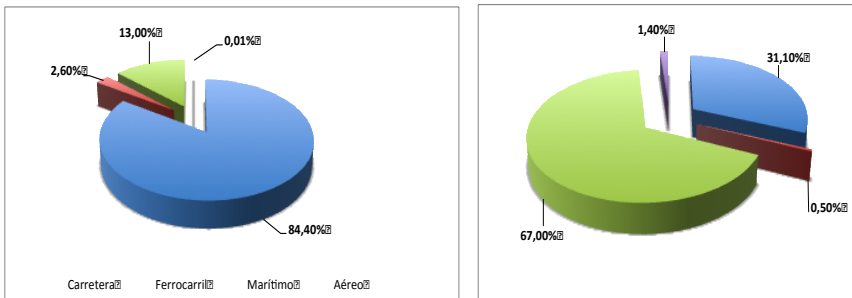


Figura 10. Distribución modal del transporte de Mercancías. Derecha: interior. Izquierda: exterior (Adaptado de Ministerio de Fomento, 2014)

Considerando estos datos, el 84% del transporte de mercancías se realiza por carretera, convirtiéndose en el principal medio para el transporte (CEOE, 2013; UNO, 2012). Esto se debe a la necesidad de capilaridad en la distribución y las bajas distancias recorridas en el interior del país (Ministerio de Fomento, 2014). En concreto, el 85% de las toneladas transportadas se realizan a una distancia inferior a los 150 km).

Por otro lado, según las mismas fuentes, resulta especialmente interesante analizar las tendencias y la evolución de los distintos tipos de transporte. En la Figura 11 se observa que el transporte marítimo presenta una tendencia claramente positiva, así como el transporte ferroviario, mientras que el transporte aéreo está en claro retroceso. En el caso del transporte por carretera, si bien en los últimos años, consecuencia de la crisis económica ha sufrido un ligero descenso, se mantiene en niveles constantes. En Europa, los resultados de la distribución del transporte de mercancías intracomunitario, revelan que el 44% de las mercancías se transportan por carretera, a favor de transporte ferroviario, que alcanza un 10% y el marítimo en 40% (European Union, 2012). Actualmente, el transporte marítimo sigue siendo uno de los pilares del tráfico global, representando el 80% del volumen del comercio mundial y siendo su tendencia claramente ascendente (Patuel, 2015).

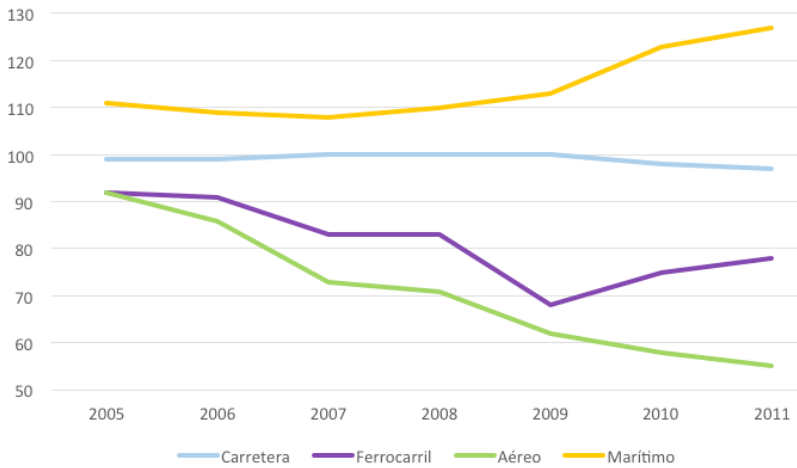


Figura 11. Evolución de la distribución modal del transporte de mercancías en España
(Adaptado de Ministerio de Fomento, 2014)

4.3.3. Transporte intermodal para la distribución de mercancías

El transporte intermodal de mercancías consiste en la integración de dos o más medios de transporte en una misma cadena de transporte. Este tipo de transporte está centrando especialmente la atención en Europa puesto que se considera un modo de incrementar la seguridad del tráfico así como reducir la congestión en las carreteras y la contaminación ambiental al mismo tiempo (European Communities, 2002). Asimismo, se prevé que el transporte intermodal crezca un 120% hasta 2025 y se considera como un parámetro clave en la política de transporte (BMVBS, 2012).

Cada empresa selecciona el sistema de transporte más adecuado a sus productos y mercados, y por tanto, el modo o los modos que intervienen. Los grandes beneficios de la intermodalidad frente a los transportes de modo único es que permite satisfacer, con un mejor coste, los requerimientos de calidad, rapidez y fiabilidad de entrega, entre otros aspectos exigidos en las transacciones comerciales. Asimismo, en la intermodalidad se aprovechan las fortalezas de los distintos modos (p.e. grandes capacidades de los buques y ferrocarril, flexibilidad de la carretera), logrando un transporte integral de menor impacto ambiental y coste asociado.

El elemento esencial en el desarrollo del sistema intermodal es la unidad de carga (Montero, 2002). Estas unidades de carga también se conocen como unidades de transporte y son los elementos utilizados para la constitución de cargas unitarias (Portos de Galicia, 2007). En este sentido, las técnicas intermodales están basadas en: contenedor, caja móvil y semirremolque o trailer. Además, otro elemento que ha permitido la unidad de carga es el palet. El desarrollo de estos conceptos ha contribuido enormemente al éxito de la intermodalidad por la estandarización en la modularidad de las mercancías, facilitando el intercambio (trasbordo) entre modos, el apilamiento, así como la mecanización de las operaciones.

Existe una amplia gama de contenedores, dependiendo del tipo de mercancías y volúmenes a transportar. La Tabla 3 recoge los distintos tipos de contenedores.

En el caso de las paletas, su clasificación puede realizarse según el material que se utilice: madera, plástico, cartón, conglomerado y metálicas. Según un estudio de la Modern Material handling realizado a más de 650 empresas en el año 2011, en el 90% de las ocasiones, las paletas utilizadas son de madera (Trebilcock, 2012). También pueden clasificarse en función de la estructura que presentan, tal y como se muestra en la Figura 12.

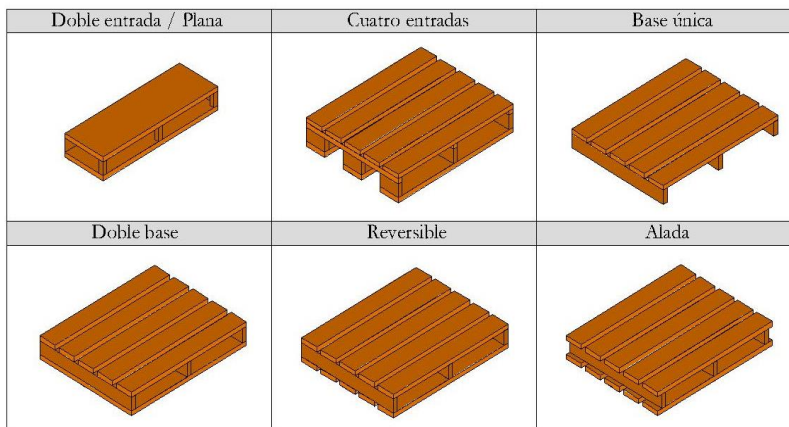


Figura 12. Tipos de paletas más utilizadas

Tabla 3. Tipos de contenedores y sus características (Adaptado de Affari, 2015)

Tipo	Dimensiones	Características principales/ productos
Contenedores comunes o dryvan	20 Pies Standard 20' x 8' x 8.6"	Cualquier carga seca normal. Ejemplos: bolsas, pallets, cajas, tambores ...
	40 Pies Standard 40' x 8' x 8.6"	Cualquier carga seca normal. Ejemplos: bolsas, pallets, cajas, tambores, etc.
	40 Pies High Cube 40' x 8' x 9.6"	Especial para cargas voluminosas. Ejemplo: tabaco, carbón.
Contenedores refrigerados integrales o reefer	20 Pies 20' x 8' x 8.6"	Equipo propio de generación de frío. Transporte de carga que requiere temperaturas constantes sobre bajo cero. Ejemplo: carne, pescado, frutas ...
	40 Pies 40' x 8' x 8.6" unidades	Equipo propio de generación de frío. Transporte de carga que requiere temperaturas constantes sobre bajo cero. Ejemplo: carne, pescado, frutas ...
	40 Pies High Cube 40' x 8' x 9.6"	Cargas voluminosas que requieran temperaturas constantes bajo cero. Ejemplo: carne, pescado, frutas ...
Insulados phortole o conair	20 Pies Reefer Conair 20' x 8' x 8"	Sin equipo generador de frío. Carga que requiere temperaturas constantes. Ejemplo: manzanas, frutas, etc.
	40 Pies Standard 20' x 8' x 8.6"	Sin equipo generador de frío. Carga que requiere temperaturas constantes. Ejemplo: manzanas, frutas, etc.etc.
	Equipo auxiliar tipo Clip On Contenedores tipo Conair 20' y 40'	Con este equipo auxiliar se puede mantener el frío durante el transporte de puerta a puerta.
Otro tipo	Open top 20 Pies 20' x 8' x 8'6"	Techo removible de lona, cargas pesadas o dimensiones extras. Permite carga y descarga superior. Ejemplos: maquinaria pesada, planchas de mármol ...
	Open top 40 Pies 40' x 8' x 8'6"	Techo removible de lona, cargas pesadas o dimensiones extras. Permite carga y descarga superior. Ejemplos: maquinaria pesada, planchas de mármol ...
	Flatrack tipo fijo no plegable 20 y 40' Pies Flatrack 20' /40' x 8' x 8'6"	Con terminales fijos o rebatibles, sin laterales. Diseñados para el transporte de carga de grandes dimensiones. Ejemplo: maquinaria
	Contenedor Granelero de 20'	Con tomas superiores y descarga por precipitación. Revestidos especialmente, permiten el transporte de granos. Ejemplo: malta, semillas ...
	Contenedor Tanque de 20' y 40'	Múltiples aplicaciones y diseños de estos contenedores. Los hay revestidos para el transporte de productos químicos corrosivos, o para la carga de aceites y vinos. Hay disponibilidad de equipos con calefacción para otras cargas especiales.
	Contenedor Plataforma de 20' y 40'	Diseñados para el transporte de carga de grandes dimensiones o extra peso. Ejemplo: maquinaria rodante...

4.4. RIESGOS EN LA DISTRIBUCIÓN DE MERCANCÍAS

El sistema de envase-producto debe ser diseñado para soportar los distintos riesgos que puedan acontecer durante el circuito de distribución y que puedan provocar daños en el producto que contienen. Si bien los riesgos en la distribución son muchos y variados es necesario su identificación y cuantificación para poder llevar a cabo un correcto diseño de envase que garantice la protección y seguridad de las mercancías transportadas.

4.4.1. Grados de libertad de los movimientos durante el transporte

De forma previa a la definición y cuantificación de riesgos, es de sumo interés conocer cuáles son los movimientos durante el transporte y en qué direcciones se producen puesto que éstos determinarán el origen de los riesgos que se produzcan.

Los grados de libertad de cualquier movimiento son seis, tres de los cuales se producen axialmente en los ejes X, Y, Z, y otros tres son movimientos rotatorios (modos rotacionales) con respecto a cada uno de ellos. La Figura 13 ilustra estos grados de libertad.

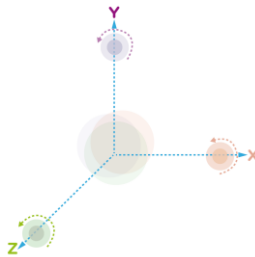


Figura 13. Grados de libertad en el transporte

X: movimiento longitudinal

Y: movimiento transversal

Z: movimiento vertical

Y además, los conocidos como modos rotacionales;

Roll (Balanceo-vaivén): rotación alrededor del eje longitudinal X

Pitch (Cabeceo): rotación alrededor del eje transversal Y

Yaw (Viraje-bandazo): rotación alrededor del eje vertical Z

Dependiendo del tipo de transporte (debido a su movimiento), los riesgos se producirán con mayor o menor intensidad en los distintos grados de libertad indicados.

En el caso del transporte por carretera, las fuerzas típicas que pueden tener lugar se muestran en la Figura 14 debido a las frenadas, aceleraciones y virajes durante el recorrido.

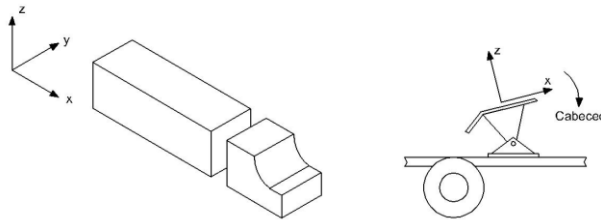


Figura 14. Los grados de libertad del movimiento de un camión

La simulación de los riesgos que acontecen durante el transporte sólo pueden realizarse si se comprenden las condiciones ambientales que un producto puede sufrir durante un viaje en particular. Esto requiere, en el caso del transporte por carretera, conocimiento de la dinámica del vehículo, las características del pavimento, los horarios y el recorrido, lo que supone conocer por tanto las velocidades del vehículo durante el trayecto así como la duración del viaje sobre cada tipo de pavimento (Ainalis et al., 2014).

En el caso del transporte ferroviario si bien es similar a lo indicado para el transporte por carretera, las irregularidades de los raíles producen las vibraciones indeseadas (Sezer y Atalay, 2011). Muchos de los impactos y las vibraciones en el transporte ferroviario se generan por las irregularidades ocasionales de las vías, así como por la compleja y dinámica interacción entre los propios vagones. A menudo se generan por este motivo vibraciones en los vagones que, debido a su naturaleza, son de distintas características que aquellas que se transmiten a través del propio sistema de suspensión del vagón (Rouillard y Richmond, 2006; Rouillard y Sek, 2005). Además, estas vibraciones (Figura 15) se propagan más allá del propio vehículo y las infraestructuras adyacentes (Kouroussis et al., 2014).

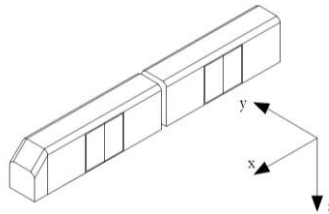


Figura 15. Los seis grados de libertad del movimiento de un tren (Adaptado de Cheng y Tomikuzsa, 1995)

En el caso del transporte marítimo son pocos los estudios realizados que proporcionen datos específicos de las vibraciones que tienen lugar en este tipo de transporte. Sin embargo, Singh (Singh et al., 1993) ya identificó claramente los distintos tipos de vibraciones que tienen lugar, caracterizándose por ser seis, tres de las cuales son puramente traslacionales (movimiento lineal) y tres de ellas puramente rotacionales (CIGNA, 1989). En la Figura 16 se ilustran e identifican estos movimientos.

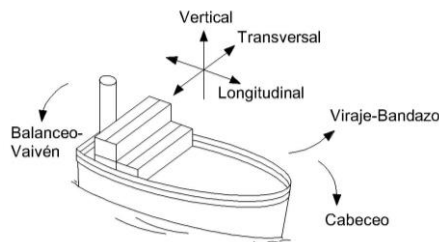


Figura 16. Los seis grados de libertad del movimiento de un barco (Adaptado de Singh et al., 1993)

Además de las vibraciones, es de especial relevancia en el transporte marítimo considerar otros riesgos como la temperatura y humedad, puesto que pueden influir notablemente en la resistencia de los embalajes y por tanto, en la seguridad final de la mercancía transportada. En el caso de la temperatura, se ha observado (Singh et al., 2012) que los valores más altos se alcanzan en tierra (no en el mar), cuando espera en el tránsito, siendo el gradiente de temperatura entre el aire externo e interno de 27,5°C y 50°C.

A pesar de la relevancia cada vez mayor de este tipo de transporte, tal y como se ha indicado anteriormente, la disponibilidad de estudios científicos que permitan conocer con mayor profundidad los riesgos durante el mismo para las mercancías son aún escasos.

4.4.2. Tipos de riesgos en la distribución

Los daños a los productos durante el proceso de transporte son especialmente relevantes por las pérdidas que pueden provocar dependiendo de la naturaleza y valor de los productos. Así, en el caso de frutas y verduras los daños suelen ser abrasiones y golpes, por ejemplo en el caso de alimentos como manzanas (Van Zeebroeck et al., 2007), peras (Zhang et al., 2010), mandarinas (Jarimopas et al., 2005), entre otros. En el caso de productos electrónicos y mecánicos, los daños pueden ser pérdidas de las calibraciones, aparición de grietas en los plásticos, fatigas en los metales (Caldicott, 1991; Singh et al., 1995). Asimismo, los daños afectan también a la pérdida de propiedades del embalaje, como en el caso de materiales de amortiguamiento, que pueden perder su firmeza (Lamb et al., 2012), o en el caso del cartón su estructura debido a la fatiga (García-Romeu et al., 2007).

Los riesgos más habituales en la distribución de productos son los debidos a (ISTA, 2015): shocks (caídas e impactos), cargas de apilamiento, condiciones atmosféricas y vibraciones.

A continuación se describe brevemente cada uno de ellos.

- *Shocks: Caídas e impactos*

Se tratan de alteraciones mecánicas que se caracterizan por una elevación y/o descenso de la aceleración en un periodo corto de tiempo. Suele deberse a un fenómeno transitorio repentino, con intensidad variable. Las caídas (shock vertical) suelen producirse durante la manipulación y trasiego de las mercancías, si bien también se producen impactos (shock horizontal o shock vertical) de forma puntual durante la distribución y/o circuitos de manutención (p.e. acoplamiento de vagones, frenazos, rugosidad del pavimento...).

- *Cargas de apilamiento*

Se produce durante el almacenamiento de la unidad de carga y también en el apilamiento de las mismas durante el transporte. Puede deberse a deformaciones del embalaje por la fatiga de los materiales de embalaje que aparecen al cabo del tiempo, a un sobrepilamiento de la carga o una disposición inadecuada de los distintos embalajes en la unidad de carga.

- *Condiciones atmosféricas*

Son los riesgos que se derivan de la influencia de las condiciones ambientales sobre la resistencia de los embalajes. Estas condiciones pueden deberse a la Temperatura, Humedad Relativa y Presión.

- *Vibraciones*

La vibración se produce cuando los productos tienen un movimiento oscilatorio con respecto a una posición de equilibrio. Cualquier vehículo que transita por una superficie está sometido a vibraciones debidas tanto al estado del terreno como a su propio motor de impulsión. La severidad y la amplitud de las vibraciones dependerá de múltiples factores como por ejemplo, la rugosidad de la superficie donde tiene lugar el transporte, del vehículo (masa, suspensión, neumáticos) y la velocidad y la carga. Por tanto, puesto que intervienen tantos factores que afectarán a la respuesta del vehículo, puede haber una gran variación en la intensidad de las vibraciones que se producen durante un recorrido, e incluso entre mismos recorridos para un mismo medio de transporte (Griffiths et al., 2012).

Resulta muy complejo conocer en qué proporción pueden afectar determinados riesgos frente a otros. Esto se debe a que los efectos de los distintos riesgos sobre los potenciales daños a las mercancías transportadas dependerán de múltiples factores, entre ellos, el tipo de material de embalaje utilizado. Así, en el caso de film de plástico será más probable que se provoque un daño como consecuencia de una vibración (existirá un determinado esfuerzo sobre el material) que como consecuencia de una carga de compresión (apilamiento), siendo la intensidad del daño proporcional a la intensidad del esfuerzo. Sin embargo, en el caso de envases de cartón ondulado habría que considerar todos los posibles riesgos, puesto que la compresión del apilamiento, como los movimientos oscilatorios (vibraciones) podrían fatigar el material y colapsar, provocando daños en el producto.

4.4.3. Vibraciones en los distintos modos de transporte

Hasta la fecha, diversos estudios han medido y cuantificado la severidad de los riesgos climáticos y físicos de varios modos de transporte en distintos puntos geográficos. La intensidad de la vibración normalmente es inferior a la intensidad de otros riesgos, como por ejemplo, la intensidad de los impactos. Sin embargo, a diferencia de ellos, la vibración en el transporte acontece durante un mayor periodo de tiempo. Por este motivo, la vibración en el transporte podría tener mayor importancia como origen de los mayores riesgos o daños a los productos transportados (Brandenburg y Lee, 1985).

Vibración en el transporte por carretera

Las vibraciones en el transporte por carretera tienen distintas componentes; vertical, lateral y longitudinal (Singh et al., 1992). En su mayoría sólo se presta atención a la vibración vertical, puesto que se indica que las vibraciones procedentes de las laterales y longitudinales son insignificantes si se comparan con las verticales. Los movimientos que provocan estas vibraciones son complejas (Lu et al., 2010) y pueden deberse a múltiples factores: aceleraciones por frenadas y arranques, viento lateral, superficie de la carretera y diferencias entre la parte central y lateral de la carretera (Singh et al., 2007; Rissi et al., 2008), ubicación de la carga (Hinsch et al., 1993), tipo de carga (Jarimopas et al., 2005; García-Romeu et al., 2008), suspensión del camión (Singh et al., 1995; Singh et al., 2006), presión de los neumáticos, tipo de carretera (en ciudad, comarcal o nacional), velocidad del vehículo (Lu et al., 2010; Jarimopas et al., 2005; García-Romeu et al., 2008), entre otros.

Vibración en el transporte ferroviario

La vibración del ferrocarril y el ruido proceden de las fuerzas generadas en el punto de contacto entre las ruedas del tren y el raíl (Connolly et al., 2014). Sin embargo, en el caso del transporte por ferrocarril, la investigación se ha centrado mayoritariamente en conocer los efectos de las vibraciones generadas por el paso de los vagones por las vías y su efecto sobre el suelo, las infraestructuras y los pasajeros. Las fuerzas que se generan proceden del peso del vehículo y las irregularidades/descontinuidades de las ruedas y la superficie del raíl y por las interacciones de los vagones, así como por el tipo de suspensión (Kouroussis et al., 2014; Rouillard y Richmond, 2007) propagándose

desde la vía. Según varios autores (Iwnicki, 2006; ISO 2631-1, 2010), en el transporte ferroviario se generan vibraciones complejas del rango de frecuencia entre 1-20 Hz, que pueden ser dañinas para las personas y su actividad, además de que la intensidad de estas vibraciones aumenta con la velocidad (Lee y Goverdovskiy, 2012).

Vibración en el transporte marítimo

En el caso del transporte marítimo las vibraciones y el movimiento de un barco depende de las olas (superficie sobre la que se traslada) y las condiciones atmosféricas (Singh et al., 1993). A diferencia de otros modos de transporte, los movimientos rotacionales pitch, roll y yaw cobran especial relevancia, mientras que las vibraciones en el plano vertical son de menor importancia (Singh et al., 2012).

En la Tabla 4 se identifican los principales estudios realizados que aportan datos de campo relativos a las vibraciones durante el transporte, clasificándolos por modos y área geográfica donde se han llevado a cabo. Asimismo se destaca que, además de las vibraciones en el transporte es importante la consideración de las vibraciones durante las operaciones de manipulación de las mercancías entre modos de transporte, especialmente aquellas para el transporte aéreo (Singh et al., 2015).

Tabla 4. Datos de campo de vibraciones en distintos modos de transporte

Área Geográfica	Modo de transporte			Referencia
	Carretera	Tren	Barco	
Australia		X		Rouillard y Richmond, 2007
Australia	X			Rouillard, 2003; Rouillard y Lamb, 2008; Rouillard y Lamb, 2009; Rouillard, 2014; Ainalis et al., 2014;
Brasil	X			Rissi G.O. et al., 2008
China	X			Yuan et al., 2006; Root et al., 2012
España-Portugal	X			García-Romeu et al., 2008; Bernard et al., 2011; Bernard et al., 2012; Rouillard, 2014;
Europa-Sudáfrica	X		X	Borocz et al., 2015
India	X	X		Singh et al., 2007; Chonhenchob. et al., 2012
India-USA	X	X	X	Singh et al., 2012b
Irán	X			Soleimani y Ahmadi, 2014a; Soleimani y Ahmadi 2014b
Honduras-USA Panamá-USA Honduras- Alemania			X	Singh et al., 1993; Singh et al., 2012a;
Méjico	X			Guzmán-Siller C. et al., 2011
Tailandia	X	X		Chonhenchob et al., 2006; Chonhenchob et al., 2010; Jarimopas et al., 2005
Turquía		X		Sezer y Atalay, 2011
Japón	X			Saito, 2006; Lu F. et al., 2010
USA	X			Singh et al., 1993; Singh et al., 2006; Chonhenchob V. et al., 2012
USA	X	X		Singh et al., 1995
USA	X			Pierce et al., 1992
Nueva Zelanda	X	X	X	Cenek et al., 2012

4.4.4. La vibración angular

Las actuales normativas, y trabajos de investigación se centran básicamente en la vibración vertical, basándose en que, de los tres ejes ortogonales, es la de mayor energía así como en la disponibilidad de equipamiento (Bernad et al., 2010; Singh y Marcondes, 1992). No obstante, tal y como se ha indicado en el apartado anterior, son varios los autores que apuntan a que en algunos casos, el movimiento conocido como “pitch & roll” (cabeceo y balanceo) bajo ciertas condiciones, aún siendo menos severo que la vibración vertical puede llegar a provocar daños tan importantes como en el caso de vibraciones verticales y por tanto se han de considerar en las simulaciones de laboratorio (Joneson, 2014; Long et al., 2014; Bernad et al., 2011). En el caso del transporte marítimo, los modos rotacionales cobran especial relevancia, puesto que, tal y como se ha indicado anteriormente, los modos rotaciones derivados del propio movimiento son clave en los riesgos que pueden acontecer durante el mismo. En este caso, si bien este tipo de riesgos se han identificado y analizado (Singh et al., 1993; Nayfeh et al., 1973), son aún escasos los estudios y datos aportados para poder conocerlos en profundidad y por tanto, poder tener valores promedio representativos.

4.5. MONITORIZACIÓN Y REGISTRO DE VIBRACIONES EN LA DISTRIBUCIÓN DE MERCANCÍAS

Como paso inicial para la optimización de un embalaje o en la evaluación de su seguridad se deben conocer de forma rigurosa los riesgos que puedan acontecer en el circuito de distribución así como su cuantificación. Esta cuantificación puede realizarse de dos modos: 1) teórica; considerando valores basados en las normas actuales y en experiencias de otros autores y 2) real; mediante la monitorización y registro de los movimientos y datos reales del circuito de distribución.

4.5.1. Dispositivos y equipos para el registro de vibraciones

Existen numerosos dispositivos que se utilizan para la medición y registro de las vibraciones en el transporte de cargas (Kipp, 1998). Los más sencillos son aquellos que únicamente detectan un evento puntual, por ejemplo si se ha detectado una aceleración superior al umbral. Suelen ser dispositivos de bajo coste que se activan mediante sistemas basados en propiedades físicas, químicas, mecánicas, magnéticas o similares, y

muestran información mediante un cambio de color. Sin embargo, hoy en día la mediación de vibraciones se realiza principalmente mediante dispositivos electrónicos capaces de almacenar aceleraciones y/o velocidades internamente para un posterior análisis. Un dispositivo de adquisición de datos para transporte cuenta con diferentes elementos para medir el fenómeno específico deseado, además de los de cualquier instrumento electrónico (interruptor, alimentación, leds indicadores) como muestra la Figura 17.

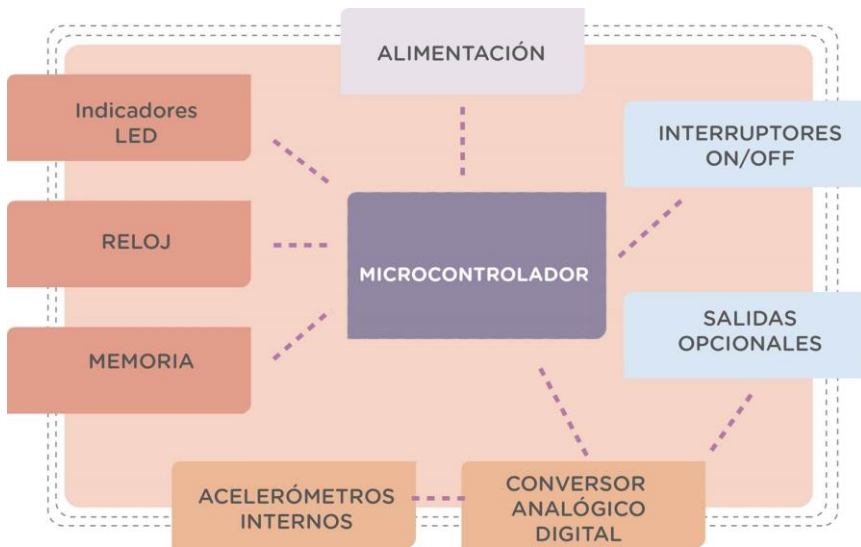


Figura 17. Esquema simplificado de un dispositivo de adquisición de datos

(i) **acelerómetro**, para la medición de aceleraciones, son los dispositivos que recogen las aceleraciones del transporte en unidades de voltaje. Pueden ser internos o externos, si el dispositivo tiene salidas donde conectar acelerómetros adicionales; (ii) **memoria**, para un almacenamiento rápido y permanente de los datos recogidos; (iii) **alimentación**, baterías recargables/reemplazables, para un funcionamiento del sistema durante largo tiempo y facilidad de instalación; (iv) **encapsulado mecánico** resistente, de forma que pueda recibir golpes o impactos sin sufrir daños; (v) **sensores adicionales** de temperatura u otros, para la adquisición también de otro tipo de datos (como temperatura o humedad relativa) que puedan afectar a la carga durante el recorrido; (vi) **microcontrolador**, para controlar la adquisición y procesado de la información; vii) **conversor**

analógico/digital, que es el elemento que permite traducir la señal de voltaje recogida por el acelerómetro en una señal digital para que pueda ser procesada por el microcontrolador; viii) **salidas** opcionales, que permiten mejorar las funcionalidades del propio dispositivo o incrementar los sensores (acelerómetros o de otro tipo) y por tanto los tipos de mediciones realizadas; ix) reloj, define la frecuencia de funcionamiento que utiliza el microcontrolador como referencia.








Una característica de la adquisición de datos para la monitorización de vibraciones es que los dispositivos no suelen almacenar datos de forma continua. Para medir con suficiente resolución las vibraciones sufridas durante el transporte de una carga, que puede durar varias semanas, se necesita una frecuencia de muestreo muy alta que de mantenerse en continuo llenaría rápidamente la memoria del dispositivo y agotaría su batería. Es por ello que los dataloggers y dispositivos electrónicos para la medición de vibraciones en el transporte de mercancías permiten varios tipos de configuración:

- Adquisición de datos intermitente durante intervalos de tiempo preseleccionados (p.e. 2 segundos cada 60 minutos). Esto se utiliza para obtener valores usuales de funcionamiento. Así también permite modificar la frecuencia de muestreo (número de muestras por segundos).
- Adquisición de datos a partir de un evento trigger. En este caso el sistema hace una medición continua de la aceleración, descartando los datos medidos si no cumplen los requisitos del evento trigger. Cuando se cumplen estos requisitos, entonces el sistema comienza la adquisición del evento manteniendo en memoria esos valores previos medidos inicialmente.

Estos sistemas también permiten seleccionar que hacer una vez se ha llenado la memoria de datos. Se puede seleccionar si se mantienen los datos iniciales, los datos finales, o se mantienen los datos con mayores valores de aceleración medidos. Algunos de los modelos de dataloggers más extendidos que siguen estas características son la familia SAVER 9x30 de Lansmont, y el Motion Master de IST.

En la Tabla 5 se incluyen los principales dispositivos utilizados para el registro de los movimientos y riesgos de las mercancías durante su transporte.

Tabla 5. Identificación y análisis de dispositivos de registro y monitorización del transporte

Dispositivo	Proveedor	Batería	Sensores internos				Sensores / Canales externos		Memoria	Interfaz	Citado por	
			Acelerómetro interno 3 canales / ejes	Temperatura	Humedad	Presión atmosférica	GPS	Canales externos				
 Saver D15	Lansmont	2x9V	Rango entre 5g y 50g	SI	SI	NO	NO	SI	NO	128 MB Flash	USB, Botón de inicio / parada, Indicadores Led	(Joneson, 2015)
 Saver 9x30	Lansmont	2x9V	Rango entre 5g y 200g	SI	SI	SI	SI	SI	6 canales	128MB Flash	USB, Botón de inicio / parada, Indicadores Led	(Joneson, 2015) (Bernard et al. 2012) (García-Romeu et al., 2008)
 Saver 3M30	Lansmont	Ion litio	100g fondo escala	NO	NO	NO	NO	NO	no	20 eventos	USB, Botón de inicio /parada, Indicadores Led	(Joneson, 2015)
 Saver 3M30 Plus	Lansmont	Ion litio	Rango entre 5g y 200g	SI	SI	SI	SI	NO	no	100 eventos	USB, Botón de inicio /parada, Indicadores Led	(Joneson, 2015)
 Motion Master	Instrumented Sensor Technology	2x9V	3 canales aceleración rango 5 a 200g 3 canales roll, pitch, yaw	SI	SI	NO	NO	NO	Temperatura y humedad	8MB SRAM	USB, RS232	--
 EDR-3D	Instrumented Sensor Technology	9V	5 a 500g	SI	SI	NO	NO	NO	3 canales + Temperatura y humedad	4.8MB SRAM	RS232	--
 DL-710-UHS	Dataq	Externa	NO	NO	NO	NO	NO	NO	16 canales entrada y 8 I/O	16MB a 2GB con tarjeta SD	USB, tarjeta de almacenamiento, Botón de inicio/detener, LED, Ethernet, wifi	--

4.5.2. Análisis de equipos actuales para el registro de las vibraciones y en concreto, de los modos rotacionales

Para la medición de aceleraciones lineales (eje x, y y z) y angulares (modos rotacionales: pitch, roll and yaw) durante el proceso de transporte se necesita un equipamiento electrónico con una serie de requisitos. Los principales requisitos del sistema son:

- Medición de aceleraciones lineales de forma directa. Para ello se necesita introducir un acelerómetro lineal triaxial, con un sistema de adaptación de señal y captura de datos.
- Medición de aceleraciones angulares de forma directa. Para ello se necesita utilizar un acelerómetro angular triaxial, con un sistema de adaptación de señal y captura de datos.
- Elevada cantidad de memoria para la adquisición de gran cantidad de datos (mínimo 2GB). La memoria tiene que ser no-volátil para que la información no se pierda al quedarse el dispositivo sin batería.
- Fuente de alimentación portátil de larga duración. Idealmente esta fuente de alimentación debe ser capaz de almacenar una cantidad de energía relevante y de reducido tamaño.
- Medición de temperatura. Este valor puede ser relevante en el caso de transporte de cargas sensibles a la temperaturas, o en caso de que el embalaje se vea dañado por agua (hielo derretido) y otras causas.
- Medición de humedad. Este valor puede afectar a la carga y también a la respuesta mecánica del envase/carga. Asimismo la combinación de humedad relativa y temperatura es interesante conocerla al poder provocar condensación de agua en la carga.

Existen principalmente dos empresas que comercialicen este tipo de dispositivos de medición (también conocidos como savers): Lansmont e IST. Además, también pueden utilizarse sistemas de medición genéricos.

Lansmont

La gama “Saver” de Lanmont incluye 5 modelos: Saver D15, Saver 3x90, Saver 9x30, Saver 3M30 y Saver 3M30 Plus. De todos ellos únicamente

el Saver 9x30 podría ser adecuado en la aplicación de esta tesis, pues además de medir temperatura, humedad y aceleración lineal, permite la inclusión de 6 canales externos donde se pueden conectar otros sensores.

IST

Únicamente nos podría funcionar en nuestra aplicación el dispositivo Motion Master. Este dispositivo incluye acelerómetros lineales y angulares, y también temperatura y humedad. La principal limitación es una memoria de únicamente 8MB, que limita su uso a trayectos cortos.

Dataloggers externos (no compactos)

El modelo de DATAQ DI-710-UHS, puede ser adecuado, aunque es incómodo de utilizar. Hay que añadirle todos los sensores (acelerómetro lineal, acelerómetro angular, temperatura, humedad) y además la fuente de alimentación. Es un dispositivo a priori menos robusto que las soluciones compactas.

4.5.3. Descripción del equipo específico desarrollado para el registro de las vibraciones y en concreto, de los modos rotacionales

En este trabajo ha sido necesario realizar algunos ajustes y adaptaciones de los equipos actuales para poder registrar los modos rotacionales. En concreto, el saver utilizado (Figura 18) consta de:



Figura 18. Saver adaptado para la monitorización de riesgos incluyendo las vibraciones angulares

- Un sensor capacitivo.
- Un sensor piezoeléctrico.
- Un giróscopo

- Una tarjeta microSD para el almacenamiento de la información.
- Una interfaz gráfica para configurar y procesar los datos.

A continuación se describe cada uno de sus componentes.

Sensor capacitivo

Un sensor capacitivo se basa en una masa que es desplazada cuando ocurre una aceleración y provoca una variación en la capacidad entre las dos placas. Las características del sensor de este datalogger son:

- Rango: ± 2 g.
- Sensibilidad: 1 V/g.
- Offset a 0 g de 2.5 V.
- Temperatura de trabajo: $[0-70]^{\circ}\text{C}$.
- Ancho de banda: $[0-50]\text{Hz}$.

Sensor piezoeléctrico

Este tipo de sensores se basan en un efecto piezoeléctrico. Esto es, una fuerza mecánica causa una deformación en el material, en la estructura de su cristal y por tanto en sus propiedades eléctricas. Debido a este efecto no pueden mantener una salida estable para una fuerza mantenida, sin embargo, son muy convenientes para eventos con un contenido espectral elevado. El sensor utilizado cumple las siguientes características:

- Rango: ± 250 g.
- Sensibilidad: 20 mV/g.
- Temperatura de trabajo: $[-55-120]^{\circ}\text{C}$.
- Ancho de banda: $[1-10000]\text{Hz}$.

Giróscopo

Se incluye un giróscopo para poder registrar las velocidades angulares en los tres ejes (X, Y, Z). Se basan en un efecto giroscópico que proporciona el valor eléctrico proporcional a la velocidad angular.

El giróscopo utilizado tiene las siguientes propiedades:

- Rango: ± 150 °/s.
- Sensibilidad: 12.5 mV/°/s.
- Offset a 0 °/s de 2.5 V.
- Temperatura de trabajo: [0-70]°C.
- Ancho de banda: [0-50]Hz.

Tarjeta microSD





La elección de guardar los datos en un micro SD se debe principalmente a dos razones, por espacio de almacenamiento y por rapidez para el usuario. Una tarjeta micro SD permite guardar un gran volumen de datos (32 GB, 64 GB) en un espacio muy reducido. Gracias a esta gran capacidad de almacenamiento se dota al dispositivo de una gran autonomía, permitiendo registrar continuamente durante largos periodos de tiempo. Por otro lado, como se está continuamente guardando los datos en la SD, nada más terminar el registro durante el tiempo establecido se podría extraer la tarjeta y disponer de los datos evitando la espera de la descarga de datos en el PC.

Interfaz gráfica de usuario

El dispositivo viene acompañado de una interfaz gráfica para Windows, que permite al usuario final tanto configurar el dispositivo como analizar los datos una vez hayan sido recogidos. Así, el usuario podrá elegir la frecuencia de muestreo que se quiere, el número de canales externos que se quieren utilizar, y el tiempo durante el cual se recogerán datos. Por otro lado, se analizarán los datos para mostrarlos por pantalla y calcular el PSD (Power Spectral Density).

En la Tabla 6 se incluyen los principales parámetros considerados con respecto los dispositivos actuales y la solución adoptada en esta investigación.

Tabla 6. Análisis de los dispositivos que potencialmente pueden registrar vibraciones angulares

Saver 9x30	Motion Master	DI-710-UHS	Solución adoptada
			
Descripción general			
Datalogger que incluye 3 acelerómetros (X,Y,Z) internamente, y permite la conexión de 6 acelerómetros externos. Incluye GPS	Datalogger que incluye internamente 3 ejes de aceleración lineal (X,Y,Z) y tres ejes de aceleración angular (X, Y,Z). No permite incluir GPS y poca memoria	Sistemas de adquisición de carácter general con 16 canales analógicos	Datalogger 9x30 de Lansmont al que se le ha añadido un giróscopo
Puntos fuertes			
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Medición aceleración lineal (acelerómetro lineal) ▪ 6 canales de aceleración extras. ▪ Permite incluir GPS externo ▪ Medición T y HR ▪ Baterías de larga duración ▪ Software de procesado de aceleración muy potente 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Medición aceleración lineal (acelerómetro lineal) ▪ Medición aceleración angular (incluye acelerómetro angular) ▪ Medición T y HR 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Muy versátil. Permite adquirir 16 canales de entrada analógicos y 8 I/O ▪ Memoria exterior de hasta 2 GB ▪ 600\$ 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Saver 9x30 y giróscopo ▪ Medición aceleración lineal (acelerómetro lineal) ▪ Permite incluir GPS externo ▪ Medición T y HR ▪ Software de procesado de aceleración potente ▪ Medición de aceleración angular
Puntos débiles			
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Acelerómetros angulares no incluidos ▪ Fabricación en USA. Complicaciones aduaneras en ciertos países 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ No permite incluir GPS ▪ Memoria escasa (8MB) ▪ Fabricación en USA. Complicaciones aduaneras en ciertos países 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sistema poco robusto; cableado de los sensores, dificultades montaje y alimentación, ... ▪ Fuente de alimentación exterior ▪ Fabricación en USA. Complicaciones aduaneras en ciertos países 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ No disponible en mercado ▪ Fabricación de los componentes en USA. Complicaciones aduaneras en ciertos países

4.5.4. Disposición y ubicación de los equipos para la monitorización

Para llevar a cabo una buena monitorización del transporte, se ha de considerar también dónde y cómo ubicar los dispositivos en el medio de transporte para que recojan los datos más representativos del movimiento y, por tanto, se pueden registrar y conocer los potenciales riesgos.

Si bien los dispositivos de monitorización pueden situarse directamente sobre el vehículo o sobre la unidad de carga a monitorizar (Figura 19), es ampliamente aceptado (Chonhenchob et al., 2010; García-Romeu et al., 2008; Rissi et al., 2008; Singh et al., 2006; Singh et al., 2008) que los registradores de datos se sitúen directamente en la estructura del vehículo.



Figura 19. Anclaje del dispositivo de monitorización 1) En la estructura del vehículo 2) En la unidad de carga a monitorizar

Esto se debe a que la vibración del equipo de ensayo actúa sobre las muestras de ensayo, así como la base del camión actúa sobre las mercancías transportadas. Además, cualquier objeto situado entre la estructura y el registrador puede actuar como un filtro. Sin embargo, fijar los equipos registradores a la propia estructura del transporte puede también ocasionar daños por golpes o incluso robos de los mismos, además del coste en tiempo y económico que supone el anclaje y fijación. Asimismo, al no poderse esconder estos dispositivos del conductor, puede influir en su modo de conducción, lo que podría tergiversar los resultados finales de la monitorización. Si los registradores de los datos se ocultan en la carga paletizada, esto puede simplificar los

riesgos comentados (Alcaraz et al., 2015). No obstante, esta operación hay que definirla correctamente en cada caso y considerando también el modo de transporte que se utilice para recoger los riesgos de la manera más fiel posible.

Por otro lado, un aspecto clave es el emplazamiento y ubicación de los dispositivos en el elemento a monitorizar. Esto es; dónde ubicar y cuántos dispositivos utilizar para un correcta monitorización. En este sentido, parece ampliamente reconocido que en el transporte por carretera las mayores vibraciones se producen en la parte trasera, debido a su cercanía con las suspensiones.

En la Tabla 7 se analizan los estudios disponibles de monitorización en el transporte que incorporan datos de interés para conocer con mayor detalle el instrumental utilizado así como los tipos de riesgos y modos de transporte estudiados.

Tabla 7. Riesgos y detalle de los estudios de monitorización del ciclo de distribución para transporte por carretera

Dispositivos	Nº	Ubicación	Riesgos analizados	Ref.
Lansmont SAVER™ 9X30	1	Trasera	Vibraciones de 6 grados libertad en 3 tráiler: caja rígida, remolque con paredes laterales y remolque de superficie plana	Bernad et al., 2012
Acelerómetros	6	Óptimas para cinemática adecuada		
Lansmont SAVER™ 3X90	1	Superficie del palet de madera	Impactos y vibraciones en 3 direcciones axiales; T y HR	Borocz et al., 2015
Lansmont SAVER™ 3X90	1	Trasera en placa metálica rígida	Vibraciones en dirección vertical, lateral y longitudinal	Chonhen et al., 2012.
Acelerómetros (Bruel&Kjaer)	4	ND	Vibraciones de viaje de 1000 Km por 2 camiones de 6 y 4 ruedas con contenedores llenos con 25 Kg de fruta	Jarimopas et al., 2005
Preamplificadores (Bruel&Kjaer)	ND			
Tarjeta analógica/digital (Bruel&Kjaer)	1			
VMI SAVER™ 3X90	1*	Izquierda trasera	Vibraciones durante dos viajes diferentes	Guzman-Siller et al., 2011
VMI SAVER™ GPS	1	Derecha trasera		
Acelerómetros piezoeléctricos	3	Suelo y pared frontal y lateral (305 mm suelo)	Vibraciones en la dirección vertical, lateral y longitudinal	Singh et al., 1992
Acondicionador de señal	3	ND		
Registrador de datos FM	1	ND		
Acelerómetros piezoeléctricos triaxiales	12	En una esfera similar a manzana	Vibraciones en la dirección vertical	Soleimani y Ahmadi, 2014
Procesador de señal (ECON, AVANT Lite)	1	ND		
Acelerómetros	6	Base de la caja del camión.	Vibraciones analizadas en 6 grados de libertad	Bernad et al., 2011
Analizador multicanal	1	Caja de madera apoyada una cara a la caja del camión		

ND: No disponibles

NOTA 1: La columna "Número de dispositivos" está referida respecto a un vehículo, excepto en los estudios realizados en el laboratorio.

Tabla 8. Riesgos y detalle de los estudios de monitorización del ciclo de distribución para transporte ferroviario, marítimo e intermodal

Dispositivos	Nº	Ubicación	Riesgos analizados	Ref.
TREN				
Lansmont SAVER™	2	ND	ND	Rouillard y Richmond, 2007.
AÉREO				
EDR-3C (IST,OKEMOS)	ND	Dentro de paquetes de prueba del avión.	Vibraciones en los 6 grados de libertad. Temperatura, humedad y presión dentro del paquete durante el viaje.	Paul Singh, et al., 2006.
MARÍTIMO				
Registadores de datos (acelerómetros triaxiales)	ND	Parte superior de la parte delantera, media y posterior del buque	Vibraciones en los 6 grados de libertad. Temperatura, humedad y velocidad del viento dentro del paquete.	Paul Singh, et al., 1993
Registadores ambientales	ND	Junto a los registradores de datos.		
TERRESTRE Y FERROVIARIO				
Lansmont SAVER™ 3X90	1	Camiones: parte trasera de suelo de la caja. Trenes: sección media del suelo de las bodegas.	Impactos, vibraciones, temperatura y condiciones de humedad.	Chonhenchob, et al., 2010.
TERRESTRE, FERROVIARIO Y MARÍTIMO				
Lansmont SAVER™ 3X90	2	Parte delantera y trasera central del suelo.	Impactos y vibraciones las tres direcciones (vertical, longitudinal, lateral).	Paul Singh, et al., 2012.
Registador ambiental ESCORT	1	Cerca del techo del contenedor.	Temperatura dentro del contenedor.	
Registadores ambientales (ESCORT)	2	Punto medio, a mitad altura de las paredes laterales de la bodega.		

ND: No disponibles

NOTA 1: La columna "Número de dispositivos" es está referida respecto a un vehículo, excepto en los estudios realizados en el laboratorio.

4.6. TÉCNICAS DE SIMULACIÓN EN LABORATORIO DE LAS VIBRACIONES EN LOS PROCESOS DE TRANSPORTE

4.6.1. Procedimiento para la simulación en laboratorio de riesgos en el transporte

La precisión de la simulación es crítica en la optimización del envase (Lepine et al., 2015), siendo el control y conocimiento preciso de los riesgos en el entorno de la distribución, esencial para la optimización adecuada de los embalajes de protección (García-Romeu, 2008). Por otro lado, hay que considerar que los ensayos aplicados al embalaje para simular las condiciones reales de distribución llevan en realidad a una estimación, al menos cualitativa, de la cantidad de margen que se dispone para mejorar el embalaje (Kipp, 2015), puesto que se trata de procedimientos que no limitan el máximo aplicable en niveles de comportamiento y protección. Lo interesante sería conseguir un procedimiento que fuera capaz de asegurar que los ensayos se superan con las cantidades mínimas para evitar el sobre embalaje y por tanto, residuo al final. Son numerosos los autores (Griffiths et al., 2015; Kipp, 2005; Bernard et al., 2011) que apuestan, en los casos que así sea posible, por realizar simulaciones en el laboratorio lo más centradas posible en la imitación de las condiciones reales que el sistema embalaje-producto pueda sufrir durante la distribución real. Además se ha de identificar claramente cuáles son los posibles márgenes de reducción de volumen y material de embalaje sin que los riesgos de la distribución afecten al producto. De este modo, se aseguraría un diseño óptimo del embalaje que garantizaría la protección adecuada de la mercancía. Con todo, en la Figura 20 se incluye una descripción de las principales fases seguir para poder simular en el laboratorio los datos relativos a los riesgos reales durante la distribución.



Figura 20. Fases para la simulación en laboratorio de los riesgos del transporte

Estas fases son:

Fase 1. Medición y monitorización del proceso real de transporte

Esta fase consiste en la selección del equipo de monitorización adecuado según la ruta que transporte, los riesgos potenciales que se quieran registrar, la duración del trayecto, entre otros. Los distintos dispositivos y sus características se describieron en detalle en el capítulo 4.3. Asimismo se incluyen en este paso todas las decisiones relacionadas con la cantidad de dispositivos a utilizar y su ubicación e instalación. Se ha de garantizar que los datos son suficientes y representativos.

Fase 2. Análisis de las señales recogidas

Tras el proceso de transporte de que se trate, los datos que el dispositivo ha ido recogiendo son volcados a un sistema operativo, donde previamente se instala una función software que permite traducir los datos obtenidos en una función fácilmente interpretada por el usuario y experto. Esta función (habitualmente en forma PSD- Power Spectrum Density, traducida por Densidad Espectral de Potencia), será analizada para detectar los cambios de señal derivados de los distintos riesgos en función del tiempo y la intensidad de los mismos. En este paso se identifican de forma clara los riesgos acontecidos, su intensidad y duración.

Fase 3. Simulación en equipo de laboratorio

Conocidos los riesgos, de forma previa a su simulación se deben traducir a lenguaje del controlador del equipo de laboratorio, el cual traducirá el lenguaje software en impulsos mecánicos que darán lugar a los movimientos de la mesa de vibración o del equipo de que se trate, reproduciendo lo recogido en la ruta real de transporte. Sobre el equipo se incluirá la mercancía cuyo embalaje quiere comprobarse su idoneidad para registrar y analizar cualquier cambio, deformación, o daño que se pueda producir sobre el propio embalaje o el producto contenido.

Fase 4. Interpretación de resultados de la simulación

Con los datos sobre los posibles riesgos, daños o intensidad de los mismos se podrán tomar decisiones con respecto a la tipología de embalaje a utilizar, cantidad de material, disposición del producto, entre otros. Así se conseguirá que el sistema embalaje-producto esté totalmente optimizado.

4.6.2. Revisión de técnicas de ensayo y métodos utilizados

Una definición de ensayos para embalaje es la aportada por Smithers Pira (Smithers Pira, 2015) donde se indica que el ensayo para embalaje, conocido también como ensayos para la distribución (distribution testing), ensayos previos a la carga (pre-shipment testing) y ensayo de tránsito (transit testing) es la simulación de eventos/riesgos físicos y climáticos reales que acontecen en la cadena de distribución real, bajo condiciones controladas en un laboratorio de ensayo de embalaje. A la hora de decidir cuál es el ensayo más idóneo a realizar, se deberán considerar diversos factores como: coste, tiempo, valor de las mercancías, fragilidad del producto, impactos ambientales, complejidad de la cadena de distribución, requisitos de mercado (time-to-market, satisfacción del cliente, competencia), entre otros. Una buena selección de protocolo de ensayos debería recoger un balance óptimo de todos estos factores para cada situación particular (Kipp, 2002). Además, un buen método de simulación del transporte debería reproducir los tres modos presentes en la vibración de un vehículo: la aleatoria no estacionaria, la de transición y los componentes armónicos (Lepine et al., 2015). Si bien en la actualidad no existe ningún método que integre de forma adecuada los tres.

Las vibraciones, a efectos de la simulación en el transporte, se caracterizan por su amplitud/aceleración (medida en G), frecuencia (medida en Hz) y tipo (sinusoidal o aleatoria/random). En el caso del transporte, la vibración real que se produce es del tipo aleatoria. En la Figura 21 se muestran ambos tipos de perfiles de vibración sinusoidal y aleatoria).



Figura 21. Perfiles de vibración sinusoidal y aleatoria

Estas vibraciones están supeditadas por tanto, a una escala temporal. Sin embargo, para la modelización de las vibraciones no es preciso que éstas sean dependientes de dicha escala temporal, puesto que lo que se busca

es conocer las vibraciones que se producen en su totalidad, con independencia del momento en el que tienen lugar. Un medio para eludir esa dependencia con el tiempo es referenciar las vibraciones aleatorias con respecto su frecuencia en lugar de con la escala temporal. De este modo se podrán conocer los distintos fenómenos vibratorios y sus intensidades con respecto al número de veces que dichos acontecimientos tienen lugar (frecuencia). En concreto, la vibración aleatoria puede ser descrita utilizando su PSD. El PSD es la representación de la media de la intensidad de una vibración aleatoria, expresada en función de la frecuencia (Kipp, 1998). La Figura 22 ilustra las diferencias entre las vibraciones representadas en una escala temporal y las mismas en escala frecuencial (PSD).

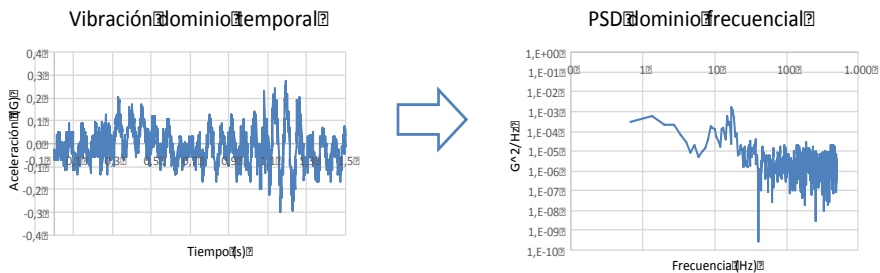


Figura 22. Detalle de la integración en una onda de tres ondas sinusoidales (Adaptado de Kipp, 1998)

El traslado del plano de tiempo al plano de frecuencia se realiza aplicando la teoría de Fourier, esto es, calculando la transformada de Fourier. Esta teoría indica que cualquier onda, con independencia de lo compleja que sea, puede ser analizada como una combinación de ondas sinusoidales. Calcular la transformada de Fourier conforme a su definición matemática, que corresponde a la integral desde infinito a menos infinito (1), no es posible cuando los registros que se realizan son finitos (limitados en el tiempo). En su lugar se emplea la FFT, que es la abreviatura usual (del inglés Fast Fourier Transform) de un algoritmo eficiente que permite calcular la transformada discreta de Fourier (DFT – Discrete Fourier Transform) y su inversa. El termino discreto marca la diferencia entre ambos métodos de cálculo. En función del tamaño de la muestra registrada, permite la transformación del dominio temporal o espacial al dominio espectral con mayor o menor resolución. La onda puede ser descompuesta por tanto en las distintas componentes

sinusoidales (análisis) o varias ondas sinusoidales pueden ser integradas para crear una onda compleja (síntesis). Este es el denominado Principio de Superposición. Así, en la Figura 23 se indica cómo se lleva a cabo esta integración.

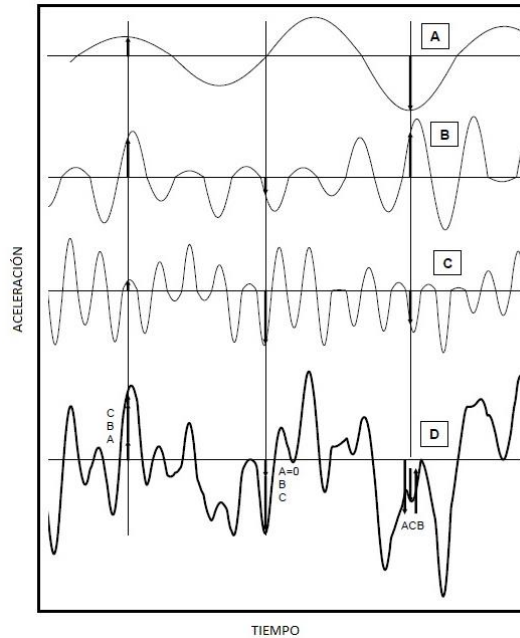


Figura 23. Detalle de la integración en una onda de tres ondas sinusoidales (Adaptado de Kipp, 1998)

La frecuencia de cada onda es constante (el tiempo de cada ciclo es siempre el mismo), pero las amplitudes varían (aleatoriamente). Para integrar el resultado, las ondas se suman punto por punto para un tiempo determinado en el eje horizontal. En cada punto temporal, se suman las amplitudes de las distintas ondas para dar la amplitud resultante en d. La suma es algebraica. Así, considerando una descomposición de cada una de las ondas aleatorias para una única frecuencia, el resultado será que para cada frecuencia tendremos una onda y por tanto, la suma de las ondas para un determinado momento en el tiempo nos dará la amplitud (media de las intensidades/amplitudes) para una determinada frecuencia y por tanto la PSD final. La media de las intensidades/amplitudes se realiza con una media denominada “root-mean-square”(rms).

Además es conveniente conocer otros términos en esta área como la Kurtosis. La curtosis es una medida sobre la amplitud de los picos de las aceleraciones, que en el caso de las vibraciones aleatorias pueden variar como se ha visto anteriormente. Una curtosis baja significará por tanto que los valores de la aceleración tendrán un rango bajo de valores de los picos, mientras que una curtosis alta significará que los rangos de valores de los picos serán altos. Cuando el valor de la curtosis es de 3, se dice que las vibraciones son de tipo Gausiano, donde los picos máximos de la aceleración será de tres veces la media de los valores promedio.

En general, las vibraciones aleatorias en laboratorio que se reproducen son de tipo Gausiano por las limitaciones de los equipos. Las limitaciones para usar una vibración no Gausiana (Kipp, 2008) son que los softwares estandar no calculan la curtosis. Los controladores de los equipos de vibración de los embalajes no tienen en su mayoría un control de la curtosis, por lo que altos picos requieren mayores requisitos de vibración de los equipos y que la simulación de eventos aislados con grandes amplitudes no se pueda ejecutar adecuadamente.

Actualmente, y a pesar de las carencias que presenta, el método Gausiano de las densidades espectrales de potencia (PSD) sigue siendo el método más utilizado para simular las vibraciones del transporte terrestre; (Lepine et al., 2015; García-Romeu, 2008).

En relación a las carencias del actual método, indicar que hay dos tipos de simulación; las que utilizan valores medios de PSD y las que utilizan valores de PSD variables en base a la probabilidad de la función de densidad (PDF- Probability Density Fraction) extraída de mediciones de campo (Figura 24). La segunda proporciona una mejor representación del ambiente de distribución, mientras que la primera es una aproximación (Rouillard y Sek, 2012). Esto se debe a que la primera;

- Considera fluctuaciones constantes y no refleja las fluctuaciones aleatorias que se dan normalmente en el proceso de transporte (Charles, 1993; Rouillard, 2006)
- Reduce los tiempos de compresión acortando tiempos de ensayo. Esto no es apropiado en el caso de sistemas susceptibles de efectos derivados de vibraciones sostenidas en el tiempo por ejemplo, los efectos de fatiga (Shires, 2011)

- Las funciones PSD no son representativas necesariamente de vehículos reales. La manipulación y simplificación de los espectros medidos en puntos más simplistas del espectro eliminan el carácter dinámico real del transporte (Kipp, 2008).

Existe una tendencia generalizada en la consideración del espectro relativo a un “vehículo genérico” que no representa las características dinámicas de un vehículo particular y se producen vibraciones que pueden ser incluso mayores que las del vehículo real.

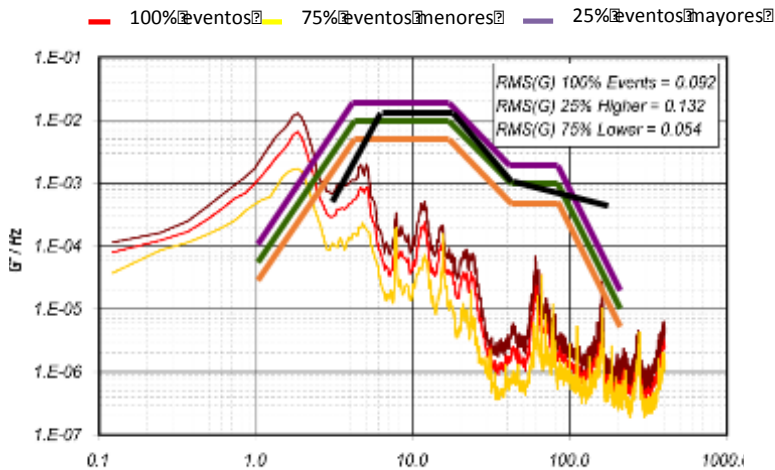


Figura 24. Comparación de valores genéricos de PSD con respecto a valores reales (Adaptado de García-Romeu, 2008; Rouillard y Sek, 2012; Ainalis, 2014)

Idealmente, los registros reales de las secuencias de datos de un ambiente de distribución deberían combinarse de tal manera que se obtenga un registro artificial de vibración que represente de forma fiel el proceso de transporte. Este entonces podría ser replicado en una mesa de vibración para simular el ambiente específico de que se trate (Rouillard y Sek, 2012). Sin embargo, la única manera más práctica y efectiva de combinar los datos aleatorios es calcular una o más representaciones estadísticas del proceso.

En la actualidad, existen tres procedimientos de análisis de PSD (Power Spectral Density), reconocidos a nivel internacional, por todos los investigadores y laboratorios de vibraciones y que se asocian a los tres autores siguientes:

1. *Michael Sek*

Para simular las vibraciones producidas en el transporte, este método utiliza un gráfico espectral de potencia que describe el contenido en frecuencia y energía del vehículo-trayecto, y la distribución del nivel RMS representada en otro gráfico de probabilidad del nivel de energía RMS. Durante toda la simulación el nivel RMS varía según el gráfico de probabilidad anterior.

2. *Paul Singh*

Para simular las vibraciones producidas en el transporte, este método utiliza únicamente un gráfico espectral de potencia que describe el contenido en frecuencia y energía del vehículo-trayecto. El nivel de RMS es constante, a lo largo de toda la simulación y equivalente a la media del gráfico de probabilidad del nivel de energía del método de Michael Sek. Ese nivel constante de RMS se escoge del 20% de los eventos más significativos, la media de los 100% de los eventos o el 80% de los eventos menos significativos.

3. *Power Spectra-Lansmont*

Para simular las vibraciones producidas en el transporte, este método utiliza únicamente un gráfico espectral de potencia que describe el contenido en frecuencia y energía del vehículo-trayecto. El nivel de RMS es constante, a lo largo de toda la simulación y equivalente a la media del gráfico de probabilidad del nivel de energía del método de Michael Sek. Ese nivel constante de RMS se escoge del 99% de la energía acumulada en cada frecuencia del espectro, el 95%, el 90% de los eventos más significativos, la media de los 100% o el 80%.

4.6.3. Simulación en los equipos de laboratorio de las vibraciones en el transporte

Una de las técnicas actuales para la evaluación de la validez de un embalaje para un ciclo de distribución consiste en someter el producto junto con su embalaje a una serie de ensayos, que incluyen prácticamente todos los riesgos que puedan acontecer durante el ciclo de distribución y que simulan los estímulos que el sistema producto-embalaje soporta durante el transporte: choques, fatiga, caídas, temperaturas, humedad y vibraciones. En la Figura 25 se incluye una muestra de los equipos utilizados a tal fin.



Figura 25. Equipos de laboratorio para la simulación de los riesgos en el transporte

4.6.3.1 Simulación de las vibraciones con ensayos de vibración

En el caso del ensayo de vibración, hasta ahora se clasifican este tipo de ensayos en dos:

- ensayos a frecuencia fija; donde el producto se somete durante un tiempo determinado a una oscilación periódica constante, habitualmente una frecuencia de resonancia del embalaje y/o del producto.
- ensayos de vibración aleatoria; donde el producto sufre las vibraciones de un sistema controlado por ordenador que se ciñe a una densidad espectral de potencia (PSD), similar a la realidad.

Al medir y observar como trabajan los sistemas aleatorios, se puede concluir que se ciñen a una distribución gaussiana. Al comparar lo que reproducen los equipos con lo que genera la realidad se puede observar que la respuesta gaussiana elimina algunos pulsos de mayor intensidad, que son propios de la cadena de distribución. La consecuencia es que al sistema estudiado se le deja de someter a unos valores pico que afectan a la fragilidad del producto. Esto se ilustra en la Figura 26.

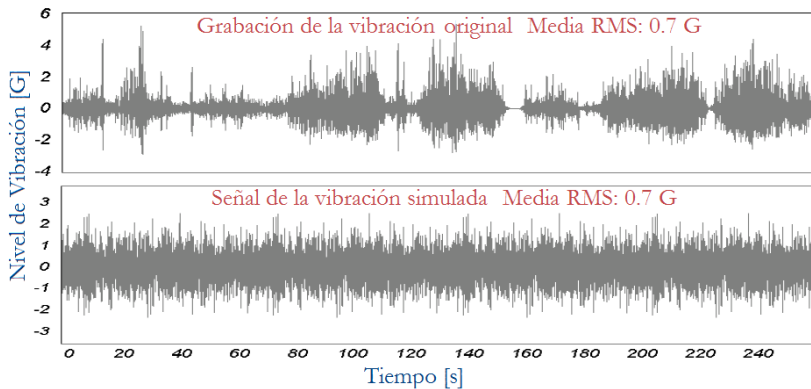


Figura 26. Distorsión de la vibración debido al procesado de la PSD (Adaptado de Sek, 2001)

Conocidas las funciones PSD, se aborda la siguiente fase y es que a través de un controlador (y su correspondiente software de control), el equipo simulará los movimientos que dicho controlador le transmita. El método utiliza un controlador de la vibración aleatoria (RVC-Random Vibration Controller).

Este controlador es un dispositivo que está diseñado para sintetizar las señales aleatorias y para controlar el movimiento de los actuadores o las mesas de vibración en base a las señales aleatorias sintetizadas. Para la simulación de las vibraciones la función PSD deseada se programa en el RVC, el cual como resultado sintetiza las vibraciones distribuidas de forma normal al estar continuamente aplicando la Transformadora Inversa de Fourier de la PSD acoplada a cada una de las fases aleatorias uniformemente distribuidas. El movimiento (aceleración) de la mesa de vibración está continuamente monitorizado por el RVC mediante un acelerómetro y la señal de excitación sintetizada continuamente ajustada para mantener el nivel deseado de vibración y el espectro de frecuencia (Rouillard y Sek, 2003). Todo ello se refleja en la Figura 27.

Existen diversos equipos capaces de simular los distintos riesgos en el transporte. No obstante, este capítulo se centra en los equipos de laboratorio que simulan las vibraciones del transporte fundamentalmente y por tanto, los riesgos que se derivan de las mismas para la seguridad y protección de las mercancías.

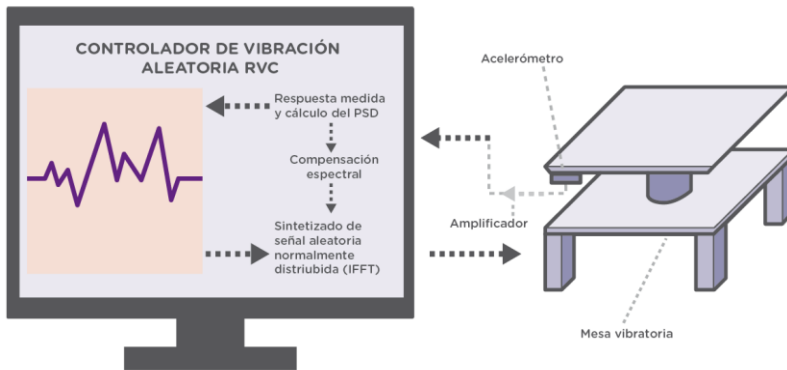


Figura 27. Esquema de la simulación de vibraciones en equipos de laboratorio (Adaptado de Rouillard y Sek, 2003; García-Romeu, 2008)

4.6.3.2 Equipos de ensayo para la simulación de las vibraciones

Los equipos de vibración han experimentado una gran evolución, pudiéndose clasificar en función de la tecnología que utilizan: tecnología electromagnética y tecnología hidráulica o en función del desplazamiento que simulan:

- Equipo de vibración vertical,
- Equipo de vibración multiaxial y
- Equipo de vibración vertical con dispositivo “Pitch & Roll”.

Evolución de las tecnologías de vibración

Inicialmente se trataban de equipos con desplazamiento fijo, y solo se podía modificar la velocidad del ciclo. Los montajes experimentales se preparaban para un desplazamiento constante, se fijaba la frecuencia de vibración y se realizaban los ensayos por un tiempo definido. Tenían el inconveniente que la frecuencia de vibración definía la intensidad de los pulsos, por lo que a mayor frecuencia mayor intensidad y viceversa. Algunos de estos equipos realizan el movimiento de forma circular, por tratarse de un movimiento más fácil de reproducir mediante motores convencionales. La mayoría de ellas mediante sistemas de control en lazo abierto. El ajuste de la velocidad de giro se realizaba típicamente mediante potenciómetros.

Dado que el desplazamiento circular que realiza es siempre el mismo, al modificar la frecuencia se cambia la velocidad de desplazamiento y la

aceleración. Son equipos que actualmente se siguen empleando por su reducido coste, y porque algunas normas de ensayo siguen admitiéndolas como método de simulación. Son prácticas para pruebas de elementos de producciones muy reducidas o de bajo coste. Durante mucho tiempo han sido referencia en el mundo del embalaje, pero tienen dos inconvenientes importantes, el primero es que no se conoce la respuesta de lo que se ensaya frente a estímulos en sus frecuencias de resonancia, y la segunda es que la energía que no puede entregar en otras frecuencias la entrega en una única, lo que en muchas ocasiones acaba haciendo que el elemento ensayado necesite estar sobredimensionado sin necesidad, solo para superar el ensayo.

Posteriormente se evolucionó a equipos de desplazamiento variable en un única dimensión. Estos equipos pueden realizar movimientos variando las velocidades y los desplazamientos. Permiten realizar ensayos tanto a frecuencia fija como a frecuencia variable, si se emplea el controlador adecuado. La mayoría de ellas tienen sistemas de control en lazo cerrado sobre el dispositivo que controla estrictamente el equipo y además sistemas electrónicos de control que se encargan de la realización de los ensayos que le comunican al equipo los desplazamientos a cada instante que tiene que realizar el equipo. Para este tipo de equipos principalmente se emplean dos tecnologías, electromagnética e hidráulica (Figura 28). En lo relativo al sistema motor utilizado en estos equipos de ensayo cuentan con una parte de la tecnología que se encarga de que el sistema motor alcance una posición objetivo determinado. Típicamente, las tecnologías hidráulicas están controladas mediante controles de lazo de posición. En la actualidad, se empiezan a emplear actuadores lineales eléctricos, los cuales también suelen emplear este tipo de cierre de lazo como modo de control.



Figura 28. Equipos para ensayos de vibración 1) electromagnético 2) hidráulico

Los equipos electromagnéticos emplean otra forma de desplazamiento. Se asemeja al funcionamiento de los altavoces de audio tradicionales. Se emplea un gran imán y un solenoide con la potencia necesaria para desplazar la masa del soporte y del espécimen a ensayar. Para poner en marcha el conjunto se alimenta eléctricamente el sistema para generar un campo electromagnético. Modificando la corriente suministrada se consigue modificar el flujo inducido y se genera una fuerza electro motriz que produce el desplazamiento deseado. Este sistema cuenta con la ventaja de poder adaptar prácticamente toda la tecnología de los sistemas de audio.

Los sistemas de control de los equipos de ensayo, según el tipo de señal generada, es lo que permitirá al equipo realizar diferentes tipos de ensayo. Si se le introduce una señal senoide de amplitud constante, el equipo realizará desplazamientos constantes a lo largo de su carrera, si se le introduce un solo pulso, el equipo realizará un shock, si se le introduce una señal variable, el equipo estará realizando desplazamientos diferentes sobre la marcha.

A priori parece una relación causa-efecto directa y fácil de implementar, pero si esos desplazamientos se quieren realizar de forma controlada, enseguida se pone en evidencia que esta relación no es directa.

Si se quiere realizar un desplazamiento constante, entre dos puntos A y B, en principio bastaría con ver el valor de entrada que hace que el sistema se quede estático en A, posteriormente repetirlo para B. Una vez sabemos los valores que definen la posición de A y B, variando la señal entre ambos, por ejemplo con un señal sinusoidal de extremales los valores eléctricos de A y B, de forma intuitiva debería ser suficiente para que el equipo se desplace entre los puntos. Esto se cumple si entre desplazamientos se deja un tiempo de relajación o si la frecuencia de desplazamiento es suficientemente baja, pero si aumentamos la frecuencia la señal dada produce un desplazamiento cada vez más corto conforme se aumenta la frecuencia. En el caso de desplazamientos constantes se el ajuste es sencillo, se modifica la señal hasta que se realiza la carrera deseada, y si se producen cambios en el material ensayado, o en la dinámica del equipo esto se tiene que repetir.

Este método no es útil cuando se quiere controlar desplazamientos generados de forma aleatoria y con una respuesta frecuencial clara. La solución pasa por realizar en primer lugar una caracterización de la

función de transferencia del sistema generador de señal, posición del equipo, con lo que se consigue una función que modifica la respuesta del sistema generador de señal adaptándola a la respuesta dinámica del equipo.

Los sistemas de control de funciones que se emplean en los equipos de simulación del transporte más actuales se basan en la técnica mencionada. Antes de realizar el ensayo obtiene la función de transferencia del sistema y la aplican al generar las señales para el control. Como en algunos de los sistemas motrices, como por ejemplo los hidráulicos, la función de transferencia se puede ver modificada durante la ejecución del ensayo, por ejemplo por la temperatura, los sistemas de control monitorean y actualizan la función de transferencia durante el ensayo. Esta tecnología de control mediante la obtención de la función de transferencia permite realizar ensayos de diferentes tipos empleando un único dispositivo de control. Se pueden realizar ensayos senoidales a frecuencia fija, a desplazamiento fijo, barridos frecuenciales, ensayar pulsos, ensayar diferentes señales, como ruidos blancos para unas intensidades definidas y también ensayos de señal aleatoria. Un ejemplo de los resultados de ensayo se incluye en la Figura 29.

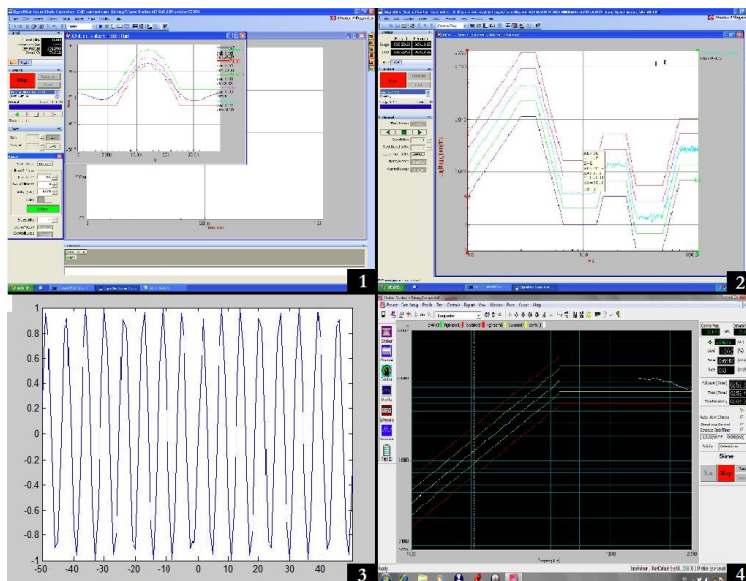


Figura 29. Ejemplos gráficos de ensayos 1) de pulsos 2) vibración aleatoria 3) vibración a frecuencia y desplazamiento fijo y 4) barrido de frecuencia

Con este tipo de controladores la limitación está en el sistema motriz, y no en el control. Estos controles además permiten limitar los controles para evitar daños en el equipo, limitando carreras, intensidades en la señal, y parametrizando el equipo en base a sus límites por carrera, fuerza o velocidad de respuesta, entre otros. Dado que el empleo de un sistema de control adecuado permite la realización de todas las configuraciones de test posibles, las limitaciones dependen más del sistema motriz, a continuación se exponen una serie de características que se deben de tener en cuenta a la hora de emplearlas. *Comparativa entre ambos sistemas*

La tecnología electromagnética permite realizar ensayos en rangos de frecuencias muy amplios, que dependiendo del equipo pueden superar las decenas de miles de hercio.

El inconveniente típico de los equipos electromagnéticas es que cuentan con una carrera más reducida y menor fuerza, si tienen un rango frecuencial amplio, o una carrera muy amplia y un rango frecuencial del orden de la decena de hercio, si lo que emplea son actuadores lineales eléctricos.

La tecnología hidráulica, permite carreras mayores y desplazamientos de mayor fuerza, lo que se puede traducir en realizar el mismo ensayo con mayor carga que una electromagnética, o realizar mayores aceleraciones para la misma masa que una electromagnética. Lo inconvenientes frente a la tecnología electromagnética es que tiene un menor rango de frecuencia, típicamente alrededor de 500Hz (en la electromagnética se puede llegar desde 50Hz de carreras largas hasta los 20.000 Hz de carreras cortas), requieren de mayor instalación, y mantenimiento.

Volviendo sobre la característica de su desplazamiento, además de los equipos más antiguos de movimiento rotativo, los equipos típicos de simulación de transporte se ciñen a dos tipos de movimiento vertical y horizontal, y son desplazamientos que se realizan en equipos independientes, no se realiza de forma simultánea.

La última tendencia en el sector de simulación del transporte para envase y embalaje consiste en simular de forma simultánea más componentes de vibración. Los fenómenos de cabeceo y balanceo son primordiales para reproducir las condiciones del transporte y especialmente en el marítimo,

y mejorar la simulación de sistemas de transporte terrestre. El software de control se ha de diseñar para permitir la correcta simulación de estos movimientos, y que además permita la aplicación de sistemas tanto a frecuencias fijas como aleatorias.

Hay equipos que simulan la componente vertical de la vibración y además añaden las componentes de pitch y de roll (Figura 30), realizando una simulación más cercana a la realidad (Xing et al., 2014; Bernard et al., 2011).

En sectores como aeronáutica o automoción es más habitual encontrar equipos de ensayo que realicen ensayos de vibración con más ejes, donde se emplean hexápodos, tanto eléctricos como hidráulicos.

La complejidad mecánica estructural y de control de los equipos multiaxiales frente a las de un único componente es importante, y el nivel de realismo frente a las de un solo eje se observa a simple vista.



Figura 30. Equipo para la simulación de vibraciones y pitch & roll

Es evidente que uno de los inconvenientes de este tipo de equipos es el precio (Batt, 2010; Bernard et al., 2011; Rouillard, 2013; Griffiths, 2011), puesto que cuentan con más mecanismos y estructura frente al equivalente unidireccional. En algunas equipos unidireccionales proponen que para ensayar en varios ejes, se cambie de equipos o se cambie la dirección del producto ensayado. En el caso de los cambios de equipo supone contar con equipos de orientación vertical y además de eje perpendicular al vertical. Esto supone tener más de un equipo y más tiempo de ensayo. La otra posibilidad es tumbar la carga, para realizar el ensayo en diferentes orientaciones. Esto solo se puede aplicar en algunos pocos casos, como ensayos de componentes electrónicos, pero en la

mayoría no tiene sentido. Por ejemplo para envases con líquidos, donde las botellas típicamente se transportan con el tapón en su parte superior, y sería susceptibles de someter las botellas a un sobreesfuerzo que no es realista. A todo lo expuesto hay que sumarle un inconveniente más al realizar los ensayos para cada eje por separado no se ve el efecto de superposición de las fuerzas, que incrementa el valor instantáneo pico neto que sucede al superponerlas.

Dentro de los equipos de ensayo multi axiales hay dos tendencias, la más antigua es la de aplicar hexápodos, al igual que en sectores como aeroespacial o automoción. Son sistemas que permiten desplazamientos en los tres ejes cartesianos, sumados a los tres ejes de inclinación, incluso permiten realizar un cierto movimiento desplazándose en un volumen delimitado por la composición de las carreras de los actuadores. Dado que para realizar dichos desplazamientos requiere de la composición de los seis actuadores y de las ligaduras entre ellos, su control de lazo de posición es altamente complejo y requiere de sistemas de control de altas prestaciones. Típicamente emplean sistemas de control de lazo de posición de alta velocidad de computación. Estos sistemas de control de altas prestaciones unido a la cantidad de dispositivos móviles acaban encareciendo el dispositivo de ensayo.

Una alternativa más reciente consiste en un dispositivo que se superpone a los equipos de ensayo verticales, y permite añadirle los movimientos de pitch y de roll. Dado que el sistema está superpuesto, no requiere un control de lazo de posición que tenga en cuenta las interferencias de los movimientos, para el control del desplazamiento, lo que resulta más económico que los controles de los hexápodos y además requiere menos sistemas motrices.

Un aspecto que requiere ser mencionado es que estos dispositivos también necesitan un sistema que genere las funciones de posición como en el caso de equipos uniaxiales. Los hexápodos necesitan una mayor definición de las variables de control, y típicamente son controles que suelen proporcionar el mismo fabricante del hexápodo. Los sistemas que incluyen Pitch y Roll, pueden emplear cualquier sistema de control de equipos de vibración uniaxial, para cada canal, puesto que no se interfieren entre ellos.

4.7. MARCO NORMATIVO PARA LA SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE

Existe una clara necesidad de realización de pruebas de laboratorio bajo condiciones controladas, así como disponer de protocolos comunes y universales de ensayo. El objetivo es disponer de métodos controlables, medibles y repetibles para evaluar el comportamiento de los embalajes. Con ello los costes de envase pueden ser ajustados a los requisitos realmente demandados para la protección del producto contenido y reducir o eliminar posibles barreras comerciales (Fiedler, 1995).

4.7.1. Sistemas normativos existentes

En concreto, hay varias organizaciones que han desarrollado normativas estandarizadas para procedimientos de ensayo aplicables a los envases y embalajes para la distribución de mercancías. Estas organizaciones son:

- ASTM; American Society for Testing and Materials
- ISTA; International Safe Transit Association
- ISO; International Standards Organisation
- CEN; European Committee for Standardization/ EN; European Normalisation
- EUMOS; European Safe Logistic Association
- BS; British Standard

Han desarrollado métodos de ensayo para evaluar el comportamiento del envase ante diversos elementos que pueden incluir condiciones atmosféricas y climáticas, vuelcos, golpes e impactos, vibraciones del transporte, manipulación manual o con carretilla, bajas presiones y compresión.

A continuación en la Tabla 9 se identifican, para cada norma, los riesgos evaluados.

Tabla 9. Normas y los riesgos evaluados en los envases en la distribución de mercancías

Norma	Riesgos evaluados
UNE-EN ISO 8318: 2003	Vibración sinusoidal vertical
UNE-EN 14149: 2004	Choque por caída rotacional
UNE-EN 15552: 2009	Esquemas de los ensayos de ejecución para cadenas comunes de distribución.
UNE-EN 22248: 1994	Choque vertical por caída libre
UNE-EN 22876: 1994	Volteo
UNE-EN ISO 2234: 2003	Apilamiento
UNE-EN ISO 2244: 2003	Impacto horizontal
UNE-EN ISO 12048: 2001	Medir resistencia de compresión
UNE-EN ISO 13355: 2003	Vibración vertical aleatoria
ASTM D 642-00 (2005)	Medir resistencia a compresión
ASTM D 999-01	Impactos verticales, impactos rotacionales, resonancia
ASTM D 4003-98 (2003)	Impacto horizontal
ASTM D 4169-09	Rendimiento
ASTM D 4728-06	Vibración aleatoria vertical y horizontal
ASTM D 5265-03	Puente de impacto
ASTM D 5276-98 (2004)	Caída libre
ASTM D 6055-96 (2002)	Manipulación mecánica
ISTA 6 – SAMSClub 2010	Preacondicionamiento y acondicionamiento atmosférico de temperatura y humedad, compresión vertical y horizontal, vibración vertical, impacto horizontal, impacto concentrado, vibración aleatoria vertical.
ISTA 1A 2001	Vibración con desplazamiento fijo vertical o rotativo , impacto de caída, impacto inclinado, impacto horizontal.
ISTA 1B 2001	Vibración con desplazamiento fijo vertical o rotativo , impacto de caída, impacto inclinado, impacto horizontal, impacto por caída rotacional.
ISTA 1C 2001	Compresión, vibración con desplazamiento fijo vertical o rotativo, vibración aleatoria vertical y horizontal , impacto de caída, impacto inclinado, impacto horizontal.
ISTA 1D 2001	Compresión, vibración con desplazamiento fijo vertical o rotativo, vibración aleatoria vertical y horizontal , impacto de caída, impacto inclinado, impacto horizontal, impacto caída rotacional.
ISTA 1E 2005	Vibración con desplazamiento fijo vertical, vibración aleatoria vertical y horizontal , impacto inclinado, impacto horizontal, impacto por caída rotacional.

Norma	Riesgos evaluados
ISTA 1G 2001	Vibración aleatoria vertical y horizontal , impacto por caída, impacto inclinado, impacto horizontal
ISTA 1H 2001	Vibración aleatoria vertical y horizontal , impacto por caída, impacto inclinado, impacto horizontal, impacto por caída rotacional.
ISTA 2A 2011	Preacondicionamiento y acondicionamiento atmosférico de temperatura y humedad, compresión, vibración desplazamiento fijo vertical o rotativo, vibración aleatoria vertical y horizontal , impacto caída, impacto inclinado e impacto horizontal.
ISTA 2B 2011	Preacondicionamiento y acondicionamiento atmosférico de temperatura y humedad, compresión, vibración desplazamiento fijo vertical o rotativo, vibración aleatoria vertical y horizontal , impacto caída, impacto inclinado e impacto horizontal, impacto de caída rotacional.
ISTA 2C 2011	Preacondicionamiento y acondicionamiento atmosférico de temperatura y humedad, vibración aleatoria vertical y horizontal bajo carga dinámica , impacto caída, impacto inclinado e impacto horizontal.
ISTA 3A 2008	Preacondicionamiento y acondicionamiento atmosférico de temperatura y humedad, impacto de caída, vibración aleatoria vertical y horizontal bajo carga dinámica , impacto caída rotacional, impacto de puente, impacto concentrado
ISTA 3E 2009	Preacondicionamiento y acondicionamiento atmosférico de temperatura y humedad, impacto inclinado y horizontal, impacto caída rotacional, compresión vibración aleatoria vertical y horizontal bajo carga dinámica , impacto caída rotacional.
ISTA 3F 2008	Preacondicionamiento y acondicionamiento atmosférico de temperatura y humedad, impacto de caída, compresión, vibración aleatoria vertical y horizontal .
ISTA 3H 2011	Preacondicionamiento y acondicionamiento atmosférico de temperatura y humedad, impacto horizontal, impacto de caída rotacional, vibración aleatoria vertical y horizontal , compresión.
EN 15433-1: 2007	Requerimientos generales de la medición y actuación de las cargas mecánicas dinámicas.

Norma	Riesgos evaluados
EN 15433-2: 2007	Adquisición de datos y requisitos generales para los equipos de medición de la medición y actuación de las cargas mecánicas dinámicas.
EN 15433-3: 2007	Comprobación de validez de datos y los datos de la edición para la evaluación de la medición y actuación de las cargas mecánicas dinámicas.
EN 15433-4: 2007	Evaluación de datos de la medición y actuación de las cargas mecánicas dinámicas.
EN 15433-5: 2007	Derivación de especificaciones de prueba de la medición y actuación de las cargas mecánicas dinámicas.
EN 15433-6: 2007	Sistemas de registro automático para medir al azar que ocurren choques durante el monitoreo de los medios de transporte de las cargas mecánicas dinámicas.
EUMOS 40511_2013	Postes montados.
EUMOS 40509_2012	Rigidez de la unidad de carga
EUMOS 40513_2014	Fuerzas sobre el eje

Indicar que en el Libro Blanco del Transporte (European Union, 2014), se identifican tres métodos posibles para evaluar los sistemas de fijación de embalajes, y que son los incluidos en las normas:

- EN 12195-1: Load restraining on road vehicles – Safety – Part 1: Calculation of securing forces.
- EUMOS 40509: Test method for load unit rigidity (horizontal accelerations of 0-2g).
- EN 12642: Fijación de la carga en vehículos de carretera. Estructura de la carrocería de los vehículos comerciales. Requisitos mínimos.

De las cuales, la que directamente aplica al sistema de embalaje-producto sería la norma EUMOS 40509.

4.7.2. Procedimientos normalizados para la evaluación de la vibración en el transporte de mercancías

De las normas analizadas, las únicas que evalúan las vibraciones son las incluidas en la Tabla 10, destacando en negrita las vibraciones rotativas.

Tabla 10. Normas para la evaluación de las vibraciones en el transporte

Norma	Vibración evaluada
UNE-EN ISO 8318: 2003	Vibración sinusoidal vertical
UNE-EN ISO 13355: 2003	Vibración vertical aleatoria
ASTM D 4728-06	Vibración aleatoria vertical y horizontal
ISTA 6 – SAMSCLUB 2010	Vibración aleatoria vertical.
ISTA 1A 2001	Vibración con desplazamiento fijo vertical o rotativo
ISTA 1B 2001	Vibración con desplazamiento fijo vertical o rotativo
ISTA 1C 2001	Vibración con desplazamiento fijo vertical o rotativo, vibración aleatoria vertical y horizontal
ISTA 1D 2001	Vibración con desplazamiento fijo vertical o rotativo, vibración aleatoria vertical y horizontal
ISTA 1E 2005	Vibración con desplazamiento fijo vertical, vibración aleatoria vertical y horizontal
ISTA 1G 2001	Vibración aleatoria vertical y horizontal
ISTA 1H 2001	Vibración aleatoria vertical y horizontal
ISTA 2A 2011	Vibración desplazamiento fijo vertical o rotativo, vibración aleatoria vertical y horizontal
ISTA 2B 2011	Vibración desplazamiento fijo vertical o rotativo, vibración aleatoria vertical y horizontal
ISTA 2C 2011	Vibración aleatoria vertical y horizontal bajo carga dinámica
ISTA 3A 2008	Vibración aleatoria vertical y horizontal bajo carga dinámica
ISTA 3E 2009	Compresión vibración aleatoria vertical y horizontal bajo carga dinámica
ISTA 3F 2008	Vibración aleatoria vertical y horizontal.
ISTA 3H 2011	Vibración aleatoria vertical y horizontal

Las técnicas que se siguen utilizando en estos días para simulación en laboratorio de vibraciones de vehículos en carretera, se fundamentan en la selección de una función PSD de vibración. Las normas ASTM, ISTA e ISO representan la función PSD general de camiones basadas en medias de registros de vibración, medidos a lo largo de un determinado número de clases de suspensión, carga, velocidad y superficie de la carretera. Las especificaciones de las normas ASTM D4728-01 y D4169-01, y en particular el espectro general para camiones con el nivel de seguridad II, es el procedimiento de ensayos más utilizado para la validación y desarrollo de embalajes (Kipp, 2000; García-Romeu, 2008).

4.8. NUEVO MARCO LEGISLATIVO EN TRANSPORTE DE MERCANCÍAS Y SEGURIDAD

En relación a la seguridad de las mercancías durante su transporte, si bien para las mercancías peligrosas existen acuerdos y reglamentación a nivel internacional respecto de su transporte (Tabla 11) en lo relativo a mercancías no peligrosas aún es un tema incipiente.

Tabla 11. Reglamentación en el transporte de mercancía peligrosa para distintos modos de transporte

Modo de transporte	Acrónimo	Reglamentación aplicable
Carretera	ADR	Acuerdo Europeo Relativo al Transporte Internacional de Mercancías Peligrosas por Carretera (Ministerio de Fomento, ADR 2011)
Marítimo	IMDG	Código Marítimo Internacional de Mercancías Peligrosas (IMO, 2006)
Ferrocarril	RID	Reglamento Relativo al Transporte Internacional por Ferrocarril de Mercancías Peligrosas (RID, 2011)
Aéreo	IATA	Reglamentación sobre Mercancías Peligrosas de la Asociación del Transporte Aéreo Internacional (IATA-DGR, 2015)

Indicar en relación a la seguridad y transporte de mercancías no peligrosas, que en la Directiva 2014/47/UE publicada en 2014 y cuyo objetivo es mejorar la seguridad vial y el medio ambiente, estableciendo requisitos mínimos para un régimen de inspecciones técnicas en carretera de vehículos comerciales que circulen en el territorio de los Estados miembros, se incluía, adicionalmente a otros aspectos, la inspección sobre la seguridad de la carga. Para ello se indica que el vehículo se podrá someter a inspección de la sujeción de su carga, según lo dispuesto en el Anexo III. En este anexo se incluye explícitamente la norma EUMOS 40509 para lo relativo al empaquetado para el transporte. Esta es por tanto, hasta el momento, la única reglamentación oficial existente en lo relativo a la garantía de protección de las mercancías no peligrosas que se conoce hasta la fecha.

No obstante, de forma global en relación al transporte, existen numerosas iniciativas europeas e internacionales orientadas por un lado a garantizar la seguridad del proceso de transporte (seguridad de las

personas y de las mercancías) así como reducir al máximo los impactos ambientales derivados (COM, 2011; COM, 2010). En concreto, en el Libro Blanco del transporte (COM, 2011) se definen diez objetivos, agrupados en tres áreas, para disponer de un sistema de transporte competitivo y sostenible, para lograr el objetivo del 60% de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI):

- 1. Desarrollo y uso de nuevos combustibles y sistemas de propulsión sostenibles.**
 - Reducción del 50% de automóviles de propulsión convencional para transporte urbano en 2030; eliminación progresiva a partir de 2050.
 - Cuota del 40% de combustibles hipocarbónicos en 2050.
- 2. Optimizar el rendimiento de las cadenas logísticas multimodales.**
 - Transferir el 30% del transporte de mercancías por carretera a otros modos como el ferrocarril o el fluvial en 2030 y más del 50% en 2050 apoyándose en corredores eficientes y ecológicos.
 - Completar red europea de ferrocarriles de alta velocidad en 2050.
 - Disponer en 2030 de una red básica de RTE-T que cubra toda la UE, multimodal y plenamente operativa para 2050.
 - En 2050 tener todos los aeropuertos conectados de la red básica a la red ferroviaria y los puertos de mar suficientemente conectados con el sistema ferroviario de transporte de mercancías y con el sistema de navegación interior.
- 3. Aumentar la eficiencia del transporte con el uso de sistemas de información e incentivos de mercado.**
 - Implantar infraestructuras de gestión de tráfico aéreo modernizadas SESAR en 2020. Implantar sistemas equivalentes de gestión del transporte para el transporte terrestre, marítimo y fluvial ERTMS, ITS, SSN, LRIT, RIS. Implantar sistema de navegación europeo por satélite (Galileo).

- Establecer un marco para un sistema europeo de información, gestión y pago de los transportes multimodales para 2020.
- Aproximarse al objetivo “cero muertes” en transporte por carretera en 2050.
- Avanzar en la aplicación de los principios “usuario-pagador” y “quien contamina paga”.

Lo más reciente vinculado con el embalaje de las mercancías, es la publicación en el año 2014 de las buenas prácticas para la seguridad de la carga en el transporte por carretera (European Union, 2014), donde se incluye un capítulo específico. Sin embargo, únicamente se incorporan algunas descripciones de distintos tipos de embalaje, y unos requerimientos y descripción muy básica de los riesgos esperados, así como algunos métodos de evaluación. A este respecto se indicaba la posibilidad de evaluarlo, al menos, con alguna norma de las tres siguientes: EN 12195-1, EUMOS 40509 ó EN 12642.

A la vista de lo expuesto se concluye que hasta la fecha, si bien la consideración de la seguridad de la mercancía se ha empezado a incorporar en las distintas iniciativas legislativas europeas, se trata éste de un tema clave cuya incorporación con más detalle así como nuevos desarrollos es clara. Hasta la fecha, los requisitos exigibles a los envases y embalajes para la seguridad de las mercancías se realiza de modo genérico (European Union, 2014) y no se especifican los requisitos de los embalajes, ni tampoco de forma completa los riesgos que puedan acontecer, ni procedimientos completos para verificar la seguridad del conjunto de la unidad de carga.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5. MATERIALES Y MÉTODOS

Los objetivos e hipótesis de la presente tesis doctoral, detallados en los apartados anteriores, han sido desarrollados en diferentes trabajos experimentales. En este capítulo se detallan los materiales, métodos y procedimientos utilizados para cada una de las investigaciones que integra esta tesis doctoral.

5.1. TECNOLOGÍA UTILIZADA

En los experimentos realizados durante la investigación, se han utilizado distintos materiales y tecnologías que se describen a continuación.

5.1.1. Modos de transporte utilizados

Para llevar a cabo la monitorización de los niveles de vibración, y específicamente la vibración angular en el transporte por carretera e intermodal se utilizaron los vehículos siguientes:

- Furgoneta IVECO Daily carga máxima 3500 kg con suspensión neumática.
- Camión semi-trailer con cabeza tractora (Mercedes) de doble eje con suspensiones neumáticas, de 30.000 kg capacidad y contenedor de 40 pies. Este vehículo se utilizó para el transporte circular por carretera así como para el transporte intermodal trayecto carretera.
- Tren de mercancías portacontenedores TECO de Media Distancia (TMD), trayecto Madrid-Sevilla.
- Barco trayecto Sevilla-Tenerife; Buque OPDR.
- Barco trayecto Tenerife-Valencia; Buque VERÓNICA B.

5.1.2. Instrumental para la captura, almacenamiento y monitorización de la vibración en el transporte

El equipamiento utilizado para el registro de las vibraciones en los distintos tipos de rutas fue:

- Tres registradores de vibraciones de Lansmont Corporation;

- dos Saver 3x90 que tienen acelerómetros axiales para medir vibraciones para movimientos verticales, laterales y longitudinales.
- dos Saver 9x30 que tienen acelerómetros axiales para medir vibraciones para movimientos verticales, laterales y longitudinales.
- Tres giróscopos de la empresa Memsense capaces de medir aceleración lineal y velocidad angular en los tres ejes.
- Registrador de vibraciones adaptado con memoria FLASH adicional de 32GB.
- Ordenador portátil Dell LATITUDE E6330 intel i5-3320M CPU 2.6 GHz con 8GB de RAM y 64 bits.
- Fuente de alimentación de los giróscopos: Batería RITAR RA12-200.

5.1.3. Herramientas de procesamiento de datos

MATLAB® es una herramienta de software matemático desarrollado por Mathworks, con un lenguaje de programación propio, el lenguaje M. Gracias a este lenguaje, a las funciones que provee MATLAB® y a sus diferentes herramientas se consigue llegar a una solución más rápida que con otros lenguajes de programación tradicionales (C, C++, Java) o mediante el uso de hojas de cálculo.

Más específicamente MATLAB® permite:

- la manipulación de matrices,
- la representación de datos y funciones,
- la implementación de algoritmos,
- la creación de interfaces, entre otras funciones.

En esta tesis se ha optado por este software como base para realizar el tratamiento de datos ya que las prestaciones que ofrece son las idóneas para el trabajo que se pretende realizar. MATLAB® permite ampliar sus capacidades con las cajas de herramientas (toolboxes), lo cual lo convierte en un software muy versátil capaz de abarcar muchos ámbitos

diferentes, tales como: Procesado de señal, comunicaciones, procesado de video e imagen, sistemas de control, sistemas de medida y test, finanzas, biología, etc... Específicamente para el desarrollo de la presente tesis se ha hecho uso de la “Signal Processing toolbox”. Gracias a ella se pueden estimar espectros de potencia, analizar y comparar señales en el dominio del tiempo, de la frecuencia. Otra característica que permite MATLAB® es la creación de algoritmos, ya que esto permite crear un único código que se utiliza para analizar todos los datos procedentes de los dispositivos.

5.2. DISEÑO DE EXPERIMENTOS

5.2.1. Selección y detalle de las rutas de transporte realizadas

Para llevar a cabo la adecuada monitorización de las principales vibraciones, y específicamente de la velocidad angular, se llevaron a cabo 8 trayectos, con distintos objetivos:

- Ruta de testeo: se realizó un trayecto de 217Km sin carga, con el objetivo de comprobar el funcionamiento de los dispositivos adaptados para el registro de la velocidad angular. Esta ruta consistió en el trayecto de muestreo (Figura 31):

Trayecto de muestreo-Trayecto 1

- Salida: Paterna (Valencia)
- Llegada: Paterna (Valencia)
- Distancia recorrida:
- Furgoneta IVECO Daily
- Carga máxima: 3.500 Kg
- Carga monitorización: 0 Kg

Para el resto de trayectos se utilizó un contenedor de 40 pies estandar para trayectos de carretera, ferrocarril y marítimo. El peso máximo de un contenedor de estas características es de 26.780 Kg, siendo su peso en vacío de 3.700 Kg. Para la simulación más ajustada a lo real se consideró una carga aproximada del 65% del total del contenedor. Este porcentaje considera que no todos los productos son de la misma densidad y peso, además de distintos volúmenes. Así, esta carga fué de sacos de arena, utilizándose 18 paletas de madera EUR EPAL 1000x1200 mm con una

carga media de 975 Kg y un peso estimado de 22 Kg/paleta. Esto supone una carga total de 17.946 Kg (Figura 32).

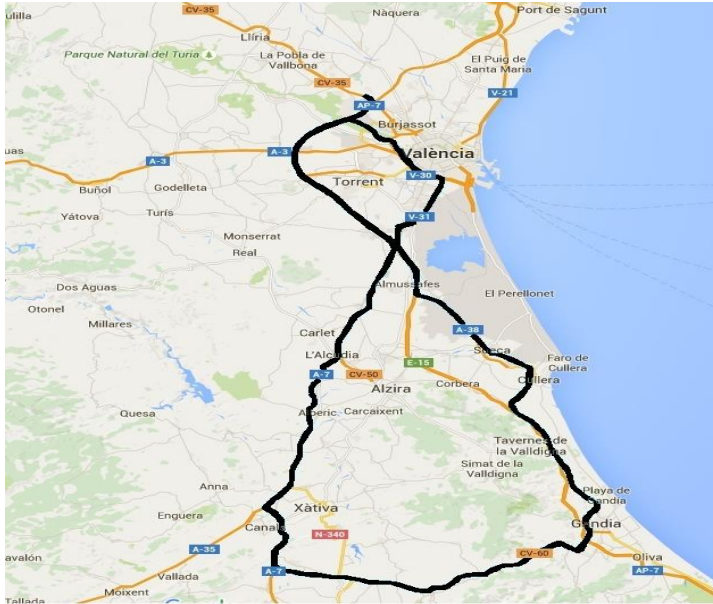


Figura 31. Ruta de los trayectos por carretera (Trayectos 1,2,3 y 4)



Figura 32. Carga del contenedor

- Trayecto 2, 3, 4. Ruta de transporte por carretera: se realizó un mismo trayecto circular para recoger de forma representativa las vibraciones de un transporte por carretera con diferentes perfiles de carretera (Figura 31).

Trayectos 2,3,4

- Salida: Paterna (Valencia)
- Llegada: Paterna (Valencia)
- Distancia recorrida:
- Camión semi-trailer con suspensión neumática
- Carga máxima: 3.500 Kg
- Carga monitorización: 0 Kg
- Ruta de transporte intermodal: se realizó la monitorización de un trayecto completo intermodal incluyendo carretera, tren y barco. Trayecto 5, 6, 7, 8 (Figura 33).



Figura 33. Ruta y trayectos del transporte intermodal

Trayecto 5

- Salida: Paterna (Valencia)/Llegada: Madrid-Abroñigal
- Distancia recorrida: 350 km
- Vehículo semi-trailer con suspensión mecánica

Trayecto 6

- Salida: Madrid-Abroñigal/Llegada: Sevilla-La Negrilla
- Distancia recorrida: 530 km
- Vehículo tren portacontenedores

Trayecto 7

- Salida: Sevilla/Llegada: Tenerife
- Distancia recorrida: 1.600 km
- Buque OPDR

Trayecto 8

- Salida: Tenerife/Llegada: Valencia
- Distancia recorrida: 2.500 km
- Buque VERÓNICA B

5.2.2. Disposición y parámetros de programación del instrumental de recogida y tratamiento de datos

5.2.2.1. Disposición del instrumental de recogida

En la ruta de testeo se utilizó un SAVER 9X30 y dos giróscopos ubicados en la parte derecha izquierda y parte derecha trasera de la zona de carga del vehículo según el plano en detalle de la Figura 34.

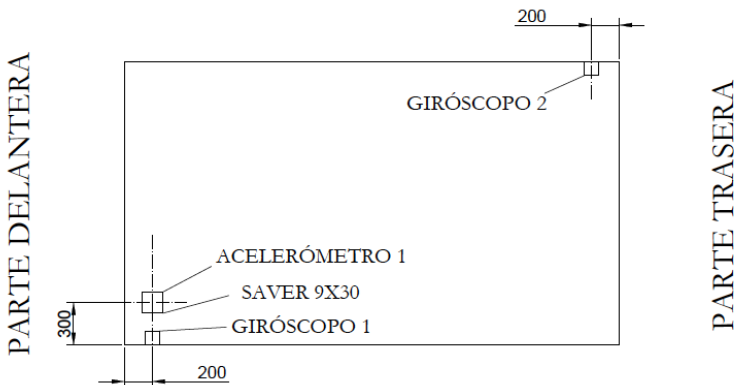


Figura 34. Plano de la monitorización de la furgoneta

En este caso los dispositivos se anclaron directamente sobre la base de la furgoneta tal y como se recoge en la Figura 35.



Figura 35. Detalle de ubicación del dispositivo de monitorización en la furgoneta

Las Tablas 12 y Tabla 13 recogen los dispositivos y canales utilizados y los parámetros de programación respectivamente.

Tabla 12. Dispositivos utilizados para registro en la monitorización

	Canales utilizados	Tipo de dispositivo conectado
SAVER 9X30-1	Canal 1	Acelerómetro 1 (interno)
	Canales 4,5	Giróscopo 1
	Canales,7,8	Giróscopo 2

Tabla 13. Parámetros de programación de los dispositivos utilizados para la monitorización de la ruta de testeo

	Parámetros	Eventos de señal	Eventos de tiempo
Almacenamiento de memoria	Tiempo de grabación de cada evento	4092 ms	4092 ms
	Frecuencia de muestreo	1000 Hz	1000 Hz
	Pre-trigger	25%	-
	Tiempo de muestreo	-	5 s
Canal 1	Máximo de escala	20 G	20 G
	Trigger-level	0.5 G	0.5 G
	Filtro	500 Hz	500 Hz
Canal 4,5,7,8	Máximo de escala	5 G	5 G
	Trigger-level	0.01 G	0.01 G
	Filtro	Sin filtro	Sin filtro

En el resto de las rutas se utilizó un contenedor cargado y los dispositivos de registro fueron colocados en la parte delantera y trasera del contenedor según el plano de la monitorización de la Figura 36.

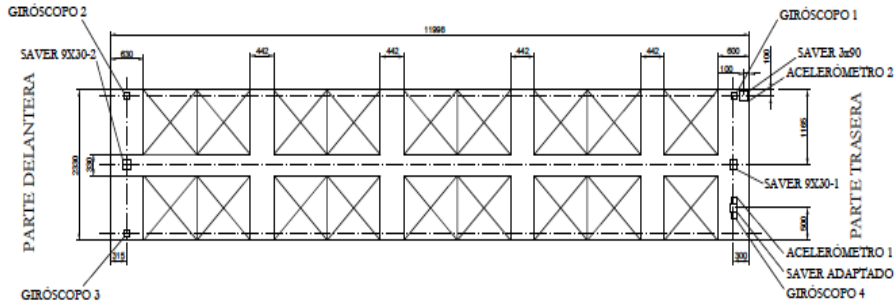


Figura 36. Plano de la monitorización del contenedor

La Tabla 14 recoge los canales utilizados y los dispositivos conectados.

Tabla 14. Dispositivos utilizados para registro en la monitorización

	Canales utilizados	Tipo de dispositivo conectado
SAVER 9X30-1	Canales 4,5,6	Giróscopo 1
SAVER 9X30-2	Canales 4,5,6	Giróscopo 2
	Canales 7,8,9	Giróscopo 3
SAVER Adaptado	--	Giróscopo 4 Acelerómetro 1
SAVER 3X90	--	Acelerómetro interno

La Figura 37 muestra el detalle de una de las conexiones giróscopo-saver.



Figura 37. Instalación de los registradores de vibraciones en el contenedor

En la Figura 38 se incluyen algunos detalles de la instalación en el contenedor.



Figura 38. Instalación de los registradores de vibraciones en el contenedor

5.2.2.2. Configuración de los dispositivos de registro

Estos dispositivos de monitorización y registro se configuraron en base a los parámetros que se incluyen en la Tabla 15 y Tabla 16. Siendo:

- Tiempo de grabación de cada evento: la duración de un paquete de medidas.
- Frecuencia de muestreo: identifica cuándo se toman los datos.
- Tiempo de muestreo: cada cuanto tiempo se inician los ciclos de medida.

Tabla 15. Datos de la configuración para los trayectos 2,3,4,5 y 6

		Parámetros	Eventos de señal	Eventos de tiempo
SAVER 3X90	Almacenamiento de memoria	Tiempo de grabación de cada evento	7500 ms	7500 ms
		Frecuencia de muestreo	1000 Hz	1000 Hz
		Pre-trigger	50%	-
		Tiempo de muestreo	-	36 s
	Canal 1	Máximo de escala	200 G	200 G
		Trigger-level	2 G	2 G
		Filtro	Sin filtro	Sin filtro
	Canal 2,3	Máximo de escala	200 G	Canales inactivos
		Trigger-level	2 G	
		Filtro	200 Hz	
SAVER 9X30	Almacenamiento de memoria	Tiempo de grabación de cada evento	4000 ms	10000 ms
		Frecuencia de muestreo	50 Hz	50 Hz
		Pre-trigger	50%	-
		Tiempo de muestreo	-	14 s
	Canal 1,2,3	Máximo de escala	CANALES INACTIVOS	Canales inactivos
		Trigger-level		
		Filtro		
	Canal 4,5,6,7,8,9	Máximo de escala	CANALES INACTIVOS	5 G
		Trigger-level		0.01 G
		Filtro		25 Hz

Tabla 16. Datos de la configuración para los trayectos 7 y 8

		Parámetros	Eventos de señal	Eventos de tiempo
SAVER 3X90	Almacenamiento de memoria	Tiempo de grabación de cada evento	7500 ms	7500 ms
		Frecuencia de muestreo	1000 Hz	1000 Hz
		Pre-trigger	50%	-
		Tiempo de muestreo	-	4 min
	Canal 1	Máximo de escala	200 G	200 G
		Trigger-level	2 G	2 G
		Filtro	Sin filtro	Sin filtro
	Canal 2,3	Máximo de escala	200 G	CANALES INACTIVOS
		Trigger-level	2 G	
		Filtro	200 Hz	
SAVER 9X30	Almacenamiento de memoria	Tiempo de grabación de cada evento	4000 ms	15000 ms
		Frecuencia de muestreo	50 Hz	50 Hz
		Pre-trigger	50%	-
		Tiempo de muestreo	-	2 min
	Canal 1,2,3	Máximo de escala	CANALES INACTIVOS	CANALES INACTIVOS
		Trigger-level		
		Filtro		
	Canal 4,5,6,7,8,9	Máximo de escala	CANALES INACTIVOS	5 G
		Trigger-level		0.01 G
		Filtro		25 Hz

5.2.2.3. Tratamiento de los datos

En primer lugar, se extraen los datos. En función del tipo de dispositivo, estos datos se extraen en distintos formatos y serán analizados, por tanto, con distintos software:

- Savers de Lansmont; formato propietario 'sxd', cuyos datos se almacenan en eventos (zonas temporales donde se han detectado datos relevantes). Estos datos serán tratados con un Software específico basado en MATLAB® debido a que para la adaptación de estos dispositivos al conectar giróscopos no se utilizan los facilitados por el fabricante.

- Saver adaptado; se extraen directamente de la tarjeta SD en formato de texto. Estos datos se almacenan de forma continua y se analizan con un Software desarrollado para este dispositivo basado en MATLAB®.

En la Figura 39 se incluye una imagen de una de las descargas de datos realizada.



Figura 39. Instalación de los registradores de vibraciones en el contenedor

En primer lugar, según el software correspondiente, se muestran mediante gráficas, las aceleraciones que se han sufrido durante el transporte en un dominio temporal. Seguidamente, mediante la Transformada de Fourier, se logra pasar la información del dominio temporal al dominio frecuencial. De esta manera, se obtienen aceleraciones para frecuencias determinadas.

$$F[f(t)] = F(w) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) * e^{-j\omega t} dt \quad (1)$$

Los datos obtenidos fueron analizados para determinar la densidad de potencia de los niveles de vibración asociada a una frecuencia determinada. Para representar todos las densidades de potencia de los niveles de vibración asociadas a todo el espectro de frecuencia (0-500 Hz) se utilizó la función de densidad espectral de potencia (PSD). Esto es, para estudiar con más claridad la información obtenida, se transforman las aceleraciones obtenidas (g) en PSD (g^2/Hz).

El método de cálculo utilizado para obtener la función PSD fue el de someter a cada registro de aceleración obtenido de 7500 ms a la transformada rápida de Fourier (FFT) y calcular su espectro de magnitud plegado G_{f_i} . La resolución en frecuencia de la FFT “ $\Delta f = s_f \cdot (FFTsize)^{-1}$ ” era de $\approx 0,000133$ Hz. El espectro de magnitud fue convertido a

espectro de potencia y normalizado en la función PSD dividiendo los espectros de potencia por Δf , y producir así la función PSD en G^2/Hz . Las funciones promediadas PSD finalmente obtenidas, son promedios lineales de las funciones PSD de todos los eventos o registros obtenidos y seleccionados.

$$\text{Promedio}(PSD) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n PSD_{f,i} = \frac{1}{2 * n * \Delta f} \sum_{i=1}^n G_{f,i}^2 \quad f = 0, \Delta f, 2\Delta f, \dots, \frac{FFT \text{ size} \Delta f}{2} \quad (2)$$

$$G_{f,i}^2 = 2 * \left\| \frac{FFT_{\Delta f} \{a_{i,t_1}, a_{i,t_2}, \dots, a_{i,t_{FFT \text{ size}}}\}}{FFT \text{ size}} \right\| \quad \frac{f}{\Delta f} = 0, 1, 2, \dots, \frac{FFT \text{ size}}{2} \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

Donde $G_{f,i}$ es el módulo del espectro de aceleración en “g” asociado con una frecuencia determinada del espectro “f” y un evento o registro determinado “i”, “n” es el número de eventos o registros seleccionados, “FFT size” es el número de instantes muestreados para un registro o evento determinado, “ $\Delta f = (\text{frecuencia de muestreo}) \cdot (FFT \text{ size}) - 1$ ” es la resolución del espectro de frecuencia y “ $a_{i,t}$ ” es la aceleración registrada en “g” para cada evento o registro determinado “i” en el tiempo “t”.

Los espectros analizados con el método descrito pueden ser usados para comparar los niveles de vibración y sus frecuencias según diversos trayectos, regiones y equipos logísticos. Los datos para cada trayecto fueron filtrados previamente a la aplicación del método de cálculo, ignorando aquellos registros cuyos valores fueran inferiores a $0,04 G_{\text{rms}}$. De este modo se eliminaban registros durante las paradas de los vehículos

Por tanto se obtiene una gráfica PSD para cada uno de los eventos relevantes y se realiza un promedio de todos los datos de cada uno.

De cada señal PSD se ha obtenido su valor eficaz G_{rms} . Este nos informa sobre la intensidad las señales de vibraciones axiales. Para el caso de las vibraciones angulares se aplican fórmulas matemáticamente análogas con sentido físico diferente. Esto es debido a que la naturaleza del dato de origen es distinto, registrándose desplazamientos angulares en lugar de desplazamientos lineales.

$$Grms_{\text{total}} = \sum_{i=1}^{n^{\text{tramos totales}}} Grms_{\text{tramo } i} \quad (4)$$

$$Grms = \left(10 * \log 2 * \frac{PSD_2}{10 * \log 2 + \frac{dB}{OCT}} \right) * \left(f_2 - \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^{\frac{dB}{OCT}} * f_1 \right) \quad (5)$$

$$dB = 10 * \log \left(\frac{PSD_2}{PSD_1} \right) \quad OCT = \frac{\log \left(\frac{f_2}{f_1} \right)}{\log 2} \quad (6)$$

Según Young (Young, 1993), para la simulación de las vibraciones producidas en el transporte se puede aplicar la siguiente fórmula:

$$I_T = I_0 \sqrt{T_0/T_T} \quad (7)$$

Donde:

I_T ; intensidad de la simulación en G_{rms} .

I_0 ; intensidad real en G_{rms} .

T_0 ; duración del viaje de transporte.

T_T ; duración de la simulación.

Con esta fórmula se obtiene la intensidad de señal que debemos aplicar a la simulación.

Para cada evento registrado se realizaron los siguientes cálculos tanto para aceleración lineal como aceleración angular:

- La raíz cuadrada del valor medio (RMS)
- La máxima aceleración instantánea (PEAK)
- El factor de cresta PEAK/RMS
- La función PSD del 100% de los eventos registrados

Para cada grupo de velocidad y trayecto se realizaron los siguientes cálculos:

- La función PSD
- Los valores RMS

El equipo de monitorización se parametriza de tal modo que se garantice una recogida de datos casi continua durante toda la monitorización, considerando que la memoria de almacenamiento es limitada. Sin embargo, la cantidad de datos que se recoge es enorme y además han de ser correctamente analizados. Por este motivo se han de utilizar soportes

software como en este caso se utilizó MATLAB®. La Figura 40 permite una visualización de los pasos seguidos para el tratamiento de los datos.

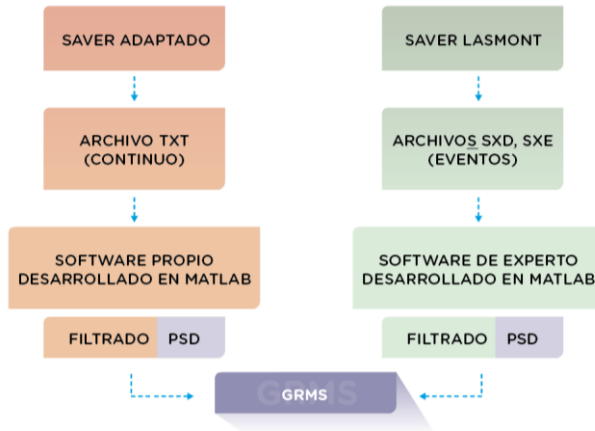


Figura 40. Esquema del procedimiento para el tratamiento de datos utilizado

Una de las labores más arduas es la del tratamiento de los datos. Sirva para ilustrar este tema la siguiente cuantificación de datos recogidos y tratados únicamente para el trayecto de muestreo. En este trayecto, la toma de datos se realiza a una frecuencia de muestreo determinada (1000Hz), lo que quiere decir que cada milisegundo (esto es el periodo, que es la inversa de la frecuencia; $1/1000$) toma un dato. Estos datos se van acumulando cada milisegundo hasta tener paquetes de medida de 4.092 datos. Esto equivale a 4.092 ms tomando datos de forma consecutiva. Si cada milisegundo toma un dato, cada 5 segundos se obtendrán 4.092 datos (un paquete de medida). Por tanto, en un día de monitorización; 24 horas, que son 86.400 segundos, supone 17.280 paquetes de 5 segundos, que equivalen a 70.709.760 datos. A la hora de trabajar, por cada uno de los paquetes de 4.092 se calcula su PSD. Con todas las PSD que salen (17.280) se revisan descartando aquellas que no aportan la información adecuada o simplemente no hay señal. Con los resultantes se calcula la PSD media. Por lo tanto, cada punto de la gráfica PSD media es el promedio de los valores para cada frecuencia de la PSD media en cada una de las PSD seleccionadas. Este proceso y la cantidad de datos gestionados en cada etapa se representa en la Figura 41.

En el caso de las vibraciones, cada uno de estos datos es una aceleración (g), en el caso de las medidas angulares (velocidad angular) es una velocidad angular (°/s).

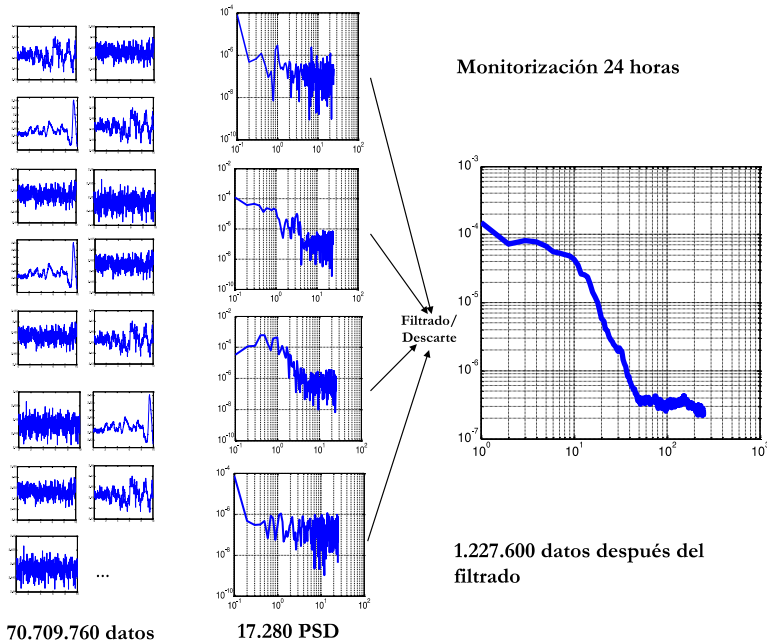


Figura 41. Datos procesados en una monitorización de 24 horas para el trayecto de muestreo

El total de datos obtenidos para cada uno de los trayectos, se incluyen en la tabla 17.

Tabla 17. Estructura de contenidos de las normas internacionales reconocidas para la evaluación de riesgos en el transporte

Trayecto	Duración	Nº Eventos total	Nº Eventos (filtrados)	Datos/canal
Trayecto 2	3 horas 10 minutos	814	178	89.000
Trayecto 3	3 horas	771	237	118.500
Trayecto 4	3 horas 15 minutos	835	224	112.000
Trayecto 5	5 horas 15 minutos	1.350	215	107.500
Trayecto 6	9 horas	2.314	207	103.500
Trayecto 7	3 días	2.160	930	697.500
Trayecto 8	5 días	3.600	1.395	1.046.250

5.3. PROTOCOLO DE EVALUACIÓN DE ENVASES Y EMBALAJES PARA LA DISTRIBUCIÓN DE LAS MERCANCÍAS

Con el fin de proponer un protocolo de evaluación de envases y embalajes capaz de integrar la velocidad angular como parámetro de relevancia, y que esté alineado con los protocolos normativos actuales, se ha realizado un estudio en profundidad de las normas existentes. Estas normas son las utilizadas en la actualidad de referencia para la evaluación de los riesgos en el transporte.

Se observa (Tabla 17) que las normas son de organismos distintos y por tanto, la estructura, contenidos y detalles sobre los protocolos a realizar es muy distinto de unas a otras.

Tabla 18. Estructura de contenidos de las normas internacionales reconocidas para la evaluación de riesgos en el transporte

UNE-EN ISO	ASTM	ISTA	EUMOS
1-Objeto y campo de aplicación 2-Normas para consulta 3-Términos y definiciones 4-Principio 5-Aparatos 6-Preparación de la muestra de ensayo 7-Acondicionamiento 8-Procedimiento 9-Informe del ensayo	1-Ámbito de aplicación 2-Referencias 3-Terminología 4-Importancia y uso 5-Aparatos 6-Muestreo, especímenes de prueba y unidades de prueba 7-Calibración y estandarización 8-Acondicionamiento 9-Procedimiento 10-Informe 11-Precisión y sesgo 12-Palabras clave	1-Visión general de procedimiento 2-Equipamiento 3-Antes de empezar el procedimiento 4-Secuencia de prueba del procedimiento. 5-Informe	1-Referencias normativas 2-Terminología 3-Ámbito de aplicación 4-Método de prueba 5-Evaluación de deformación 6-Certificación

De entre los numerosos riesgos se han acotado aquellas cuyo objetivo es la consideración de las vibraciones. Esta revisión se incluye en la Tabla 18.

Tabla 19. Detalle de las normas de referencia para la vibración del transporte

Norma	Vibración	Muestra ensayada	Equipo requerido	Hz
UNE-EN ISO 8318: 2003	Vertical sinusoidal	Embalaje completo y lleno o unidad de carga	Mesa vibratoria horizontal (con cierre para evitar movimientos laterales y/o longitudinales), acelerómetros axiales	3 Hz - 100 Hz
UNE-EN ISO 13355: 2003	Vertical aleatoria	Embalaje completo y lleno o unidad de carga	Mesa vibratoria (con barrera inferior y superior para evitar movimientos laterales y mantener la sobrecarga sobre la muestra), acelerómetros axiales, acondicionadores de señal y ordenador	3 Hz - 200 Hz
ASTM D 4728-06	Vertical u horizontal aleatoria	Unidades de envío llenas	Mesa de vibración de un eje de niveles de amplitud variable a lo largo del intervalo de frecuencias, controles electrónicos, acelerómetros axiales, acondicionadores de señal y ordenador	200 Hz
ISTA 6 – SAM SCLUB 2010	Vertical aleatoria	Producto envasado	Mesa de vibración con sistema de restricción de movimientos (excepto el vertical)	1.6 Hz - 200 Hz
ISTA 1A-1B 2001 1C-1D 2001 (1) 2A-2B 2011 (1)	Vertical o rotativo con desplazamiento fijo	Producto envasado	Equipo para ensayo de desplazamiento fijo vertical o rotativo	Según ciclos/minuto
ISTA 1E 2005 (1)	Vertical con desplazamiento fijo	Producto envasado	Equipo para un ensayo de desplazamiento fijo vertical o rotativo	Según ciclos/minuto
ISTA 1C-1D 2001 (2) 1E 2005 (2) 1G-1H 2001 2A-2B 2011 (2) 3E 2009 3F 2008 3H 2011	Vertical u horizontal aleatoria	Producto envasado	Mesa de vibración de un solo eje, con nivel controlado de amplitud variable continuo en el intervalo deseado de frecuencias, controles electrónicos, acelerómetros axiales, acondicionadores de señal y ordenador	Hasta 200 Hz
ISTA 2C 2011 3A 2008	Vertical u horizontal aleatoria bajo carga dinámica	Producto envasado	Mesa de vibración de un solo eje, niveles controlados de amplitud variable continua a lo largo del intervalo de frecuencias, controles electrónicos, acelerómetros axiales, acondicionadores de señal, ordenador y carga	Hasta 200 Hz

El análisis de las distintas estructuras y considerando que los protocolos han de ser, en lo posible, sencillos para facilitar la comprensión y aplicación por parte de los técnicos, se propone la siguiente estructura de contenidos:

1. Objeto: se incluye una descripción del objetivo pretendido del protocolo.
2. Alcance: en este apartado se describe la aplicación pretendida del ensayo en cuestión, los tipos de muestras sobre los que se puede aplicar y el ensayo al que se someten.
3. Referencias: se incluyen en este apartado aquellas normas u otro tipo de documentos necesarios para la correcta interpretación del protocolo en cuestión y en base a los cuales se ha desarrollado.
4. Procedimiento operativo: en este apartado se detalla el procedimiento a aplicar para llevar a cabo el ensayo. Para ello se incluye una descripción lo más descriptiva posible de los siguientes aspectos:
 - a. Útiles y equipos de ensayo
 - b. Toma de muestras
 - c. Acondicionamiento de muestras
 - d. Método de ensayo
5. Registros: se indica el formato de los documentos donde se quedarán recopilados los resultados, así como la persona responsable y el tiempo de conservación de los mismos.
6. Otros documentos de apoyo/consulta: se indicará la documentación de soporte y/o de interés para la correcta interpretación del protocolo de ensayo.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los objetivos e hipótesis de la presente tesis doctoral, justificados y detallados en los apartados anteriores, han sido desarrollados en esta investigación. Los resultados obtenidos y su discusión se incluyen en este capítulo.

6.1. RESULTADOS DE LOS TRAYECTOS DE TRANSPORTE POR CARRETERA

6.1.1. Resultados de la vibración angular en el trayecto circular por carretera

A continuación se exponen los gráficos PSD para cada tipo de vibración angular: pitch (Figura 42), roll (Figura 43) y yaw (Figura 44) para los tres trayectos circulares.

En la Figura 42 se observa que la respuesta en el perfil espectral es similar en los tres trayectos, varía únicamente en la intensidad (0.545 frente a 0.652 y 0.630).

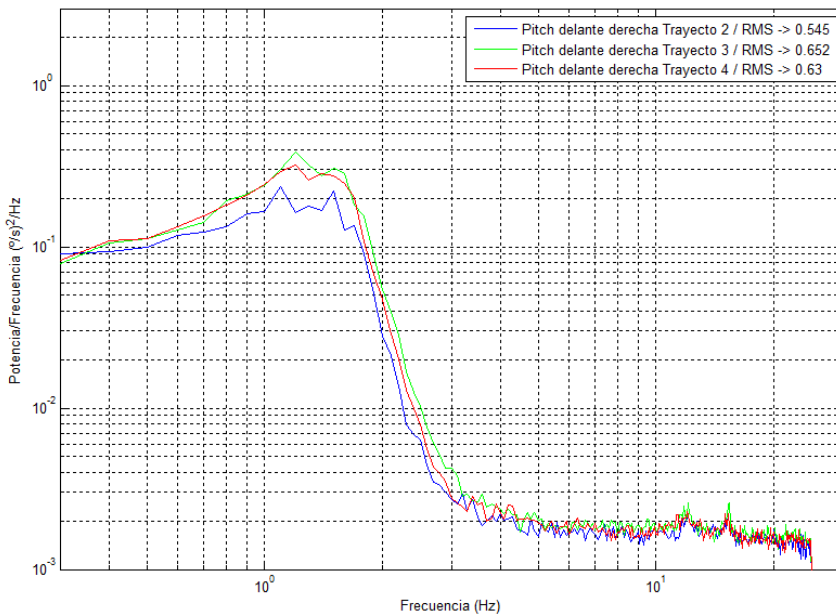


Figura 42. PSD comparativa de la vibración “pitch” en los trayectos circulares

En el primero de los casos se hizo en condiciones de lluvia, lo que puede ser el motivo de esta baja intensidad (conducción más suave). Destacar que a partir de los 7Hz el valor de densidad grms mínimo y prácticamente constante. Este valor mínimo se da en $\pm 1,5\text{Hz}$, lo que implica una velocidad de movimiento rotatorio relativamente lenta que concuerda bien con lo esperado y observado como cabeceo de un vehículo de carretera con suspensión neumática.

El escalón que se observa a 2Hz, disminuye dos órdenes de magnitud la señal. Esta disminución es el comportamiento típico de un filtro pasa baja. El máximo que se observa entre 1 y 2Hz también es típico en los filtros pasa baja que producen una rápida atenuación, puesto que la intensidad de la señal decae en poco más de 1Hz. En la Figura 43 se observa que la respuesta en el perfil espectral es similar en los tres trayectos, la intensidad es prácticamente la misma (0.728, 0.771 y 0.720). A pesar de las condiciones climatológicas y por tanto, de una conducción más ligera, en el caso de la vibración “roll” parece no afectar a dicha intensidad.

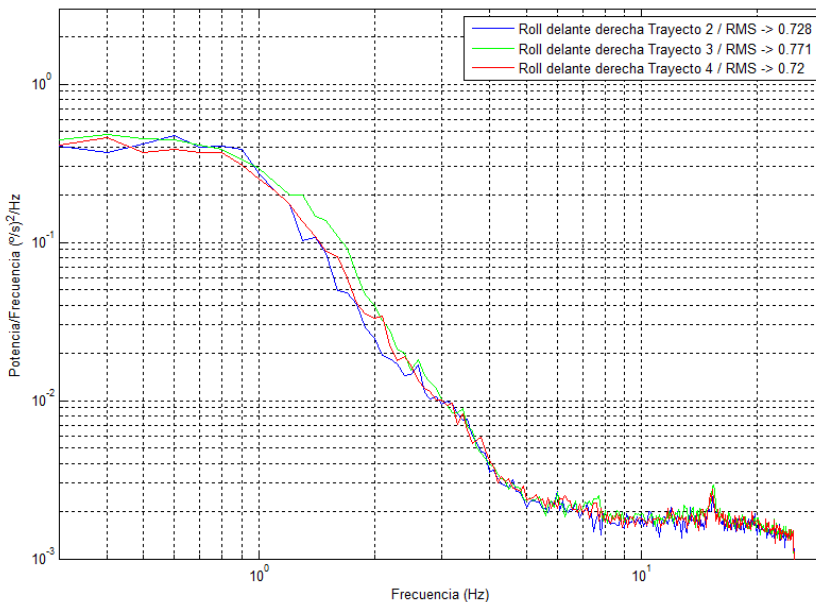


Figura 43. PSD comparativa de la vibración “roll” en los trayectos circulares

Destacar que a partir de los 7Hz el valor de densidad grms es prácticamente residual y constante. El valor mínimo se da por debajo de 1Hz. Esto implica un movimiento rotacional lento, que es coherente con los movimientos rotacionales “pesados” que pueden observarse en vehículos pesados como los trailers durante el transporte por carretera. Aunque de forma más suave que el caso anterior, también se puede ver que se ha registrado una caída de la densidad de dos órdenes de magnitud entre 0.9Hz y 9Hz, estando la mayor densidad de energía por encima de 1Hz.

En la Figura 44 se observa que la respuesta en el perfil espectral es idéntica en los tres trayectos, la intensidad es prácticamente la misma (1.509, 1.552 y 1.479). La respuesta en la gráfica decae dando como resultado casi una recta. En una primera aproximación se podría aproximar la respuesta del yaw a una recta. A pesar de las condiciones climatológicas y por tanto, de una conducción más ligera, en el caso de la vibración “yaw” parece no afectar a dicha intensidad. Destacar que en este caso no hay frecuencia de corte apreciable sino que hay una tendencia general a una reducción (atenuación) de dicha vibración.

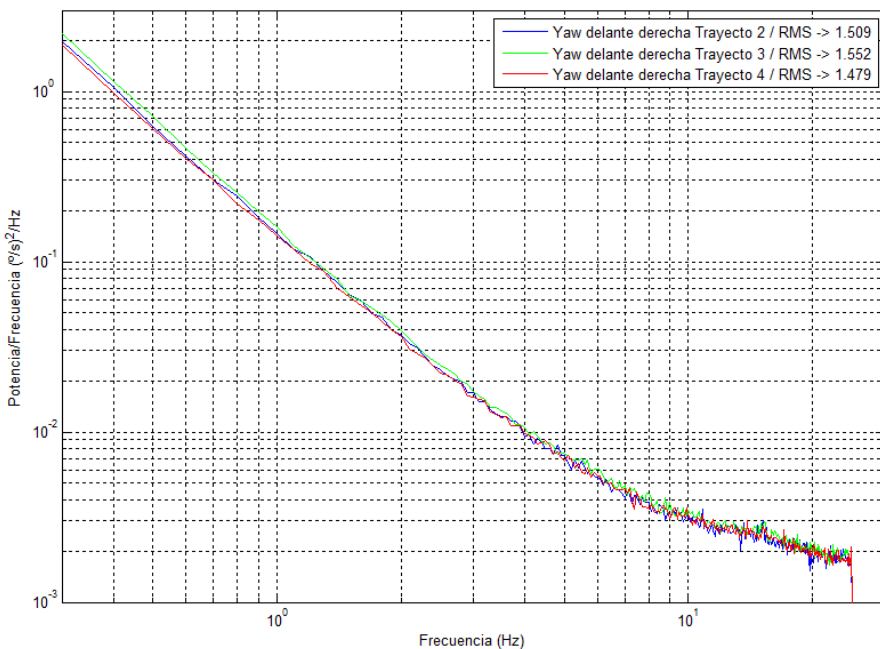


Figura 44. PSD comparativa de la vibración “yaw” en los trayectos circulares

Los valores máximos se dan en frecuencias muy bajas. Esto implica movimientos extremadamente lentos. Por tanto, es complicado que estos movimientos, tan lentos sobre el eje vertical, tengan efecto negativo alguno sobre el comportamiento dinámico de la carga. En este sentido el elevado valor grms comparado con el de pitch y roll no debe llevar a equívocos: un valor promedio mayor no implica mayor severidad.

Estos valores, por inéditos, no pueden compararse con datos procedentes de la bibliografía. El único caso que aporta valores de vibraciones angulares es en el trabajo realizado por Bernard (Bernard et al., 2011). No obstante no son comparables con los obtenidos en este trabajo por dos motivos; 1) los vehículos utilizados y rutas son distintas y 2) los valores de las vibraciones angulares se obtienen de forma indirecta a partir de estimaciones y simulaciones, mientras que en este caso se utilizó un *saver* que permite el registro directo de vibraciones angulares.

6.1.2. Resultados de la vibración angular en el trayecto circular por carretera comparado con el trayecto en carretera del transporte intermodal

En la Figura 45 y Figura 46 la respuesta en el perfil espectral y la intensidad es prácticamente la misma en los cuatro trayectos (tres trayectos circulares y un trayecto Valencia-Madrid). Esto puede deberse a que el tipo de vehículo es el mismo, si bien las vías son distintas para el trayecto circular y trayecto por carretera del transporte intermodal. Esto corrobora que lo que más efecto tiene sobre un PSD es la combinación del tipo de vehículo y superficie de rodadura. En el caso de la respuesta de la vibración “yaw” (Figura 47) si bien los espectros son similares, varía ligeramente su intensidad, siendo algo superior en el caso del trayecto circular que en el caso del trayecto Valencia-Madrid. Esto puede deberse a que el trayecto circular presenta mayor número de curvas. Por otro lado, el efecto dinámico es, como se ha comentado, mínimo sobre la carga. La densidad de energía del “pitch” sigue estando por encima de 2Hz, igual que el trayecto circular, sigue presentando un máximo entre 1 y 2Hz, también presenta una fuerte atenuación de dos órdenes de magnitud en poco más de 1Hz. El presentar la respuesta espectral con mayor intensidad por encima de 2Hz, implica que sus efectos se pueden apreciar a simple vista, por tratarse de oscilaciones de más de medio segundo de periodo.

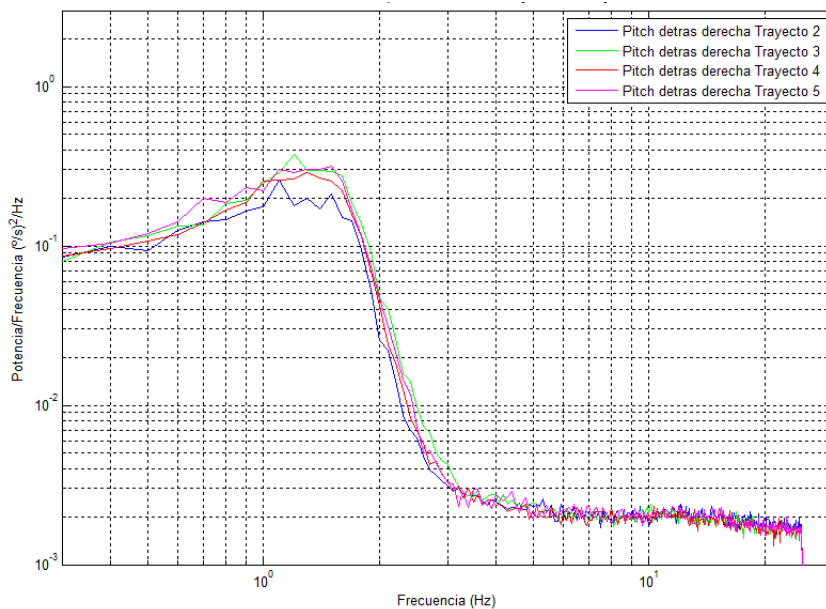


Figura 45. PSD comparativa de la vibración “pitch” de los trayectos por carretera circuito circular y trayecto Valencia-Madrid

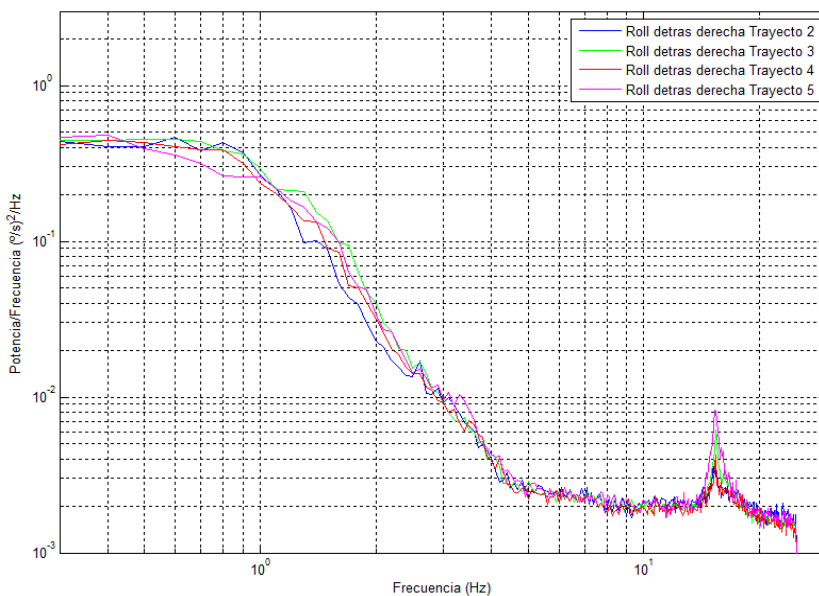


Figura 46. PSD comparativa de la vibración “roll” de los trayectos por carretera circuito circular y trayecto Valencia-Madrid

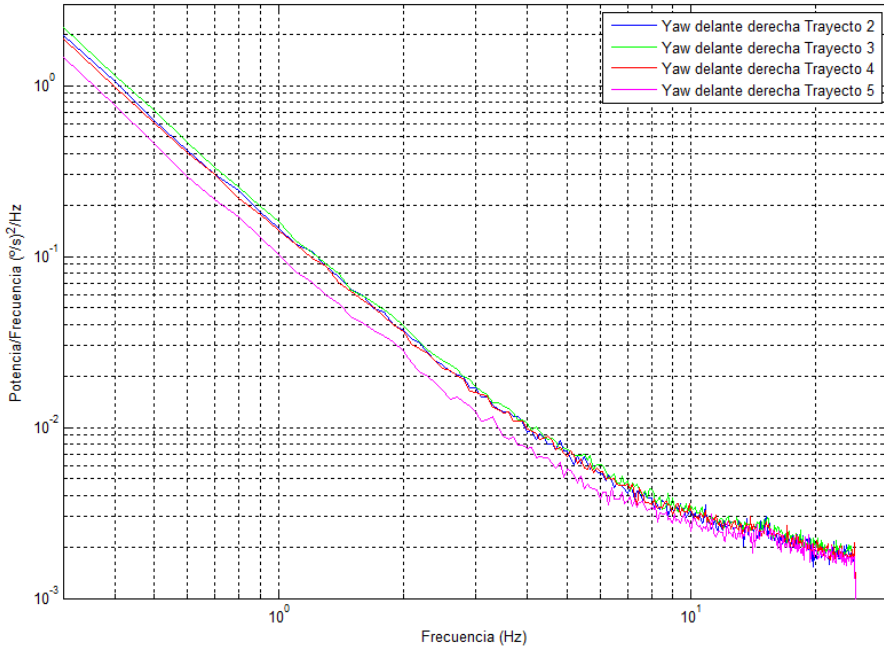
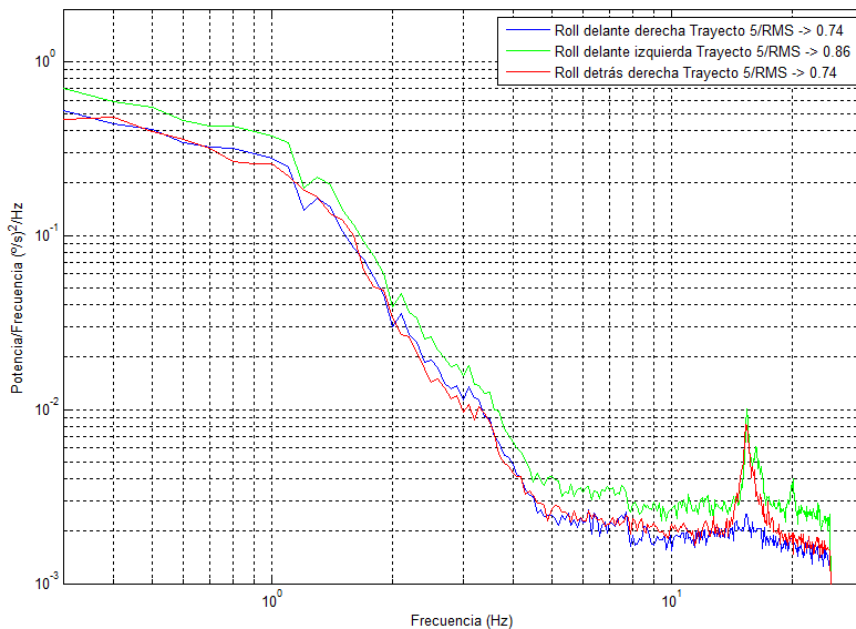
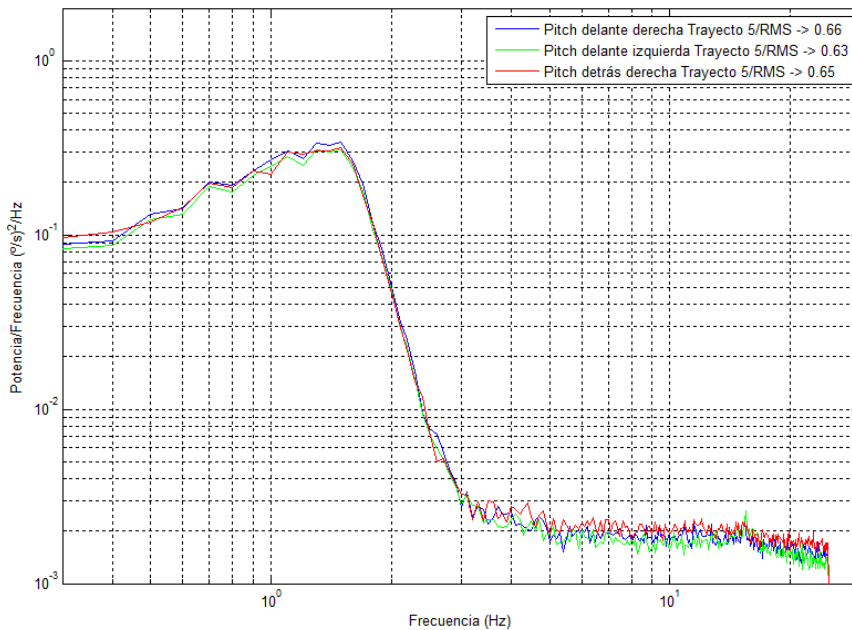


Figura 47. Comparación de las PSD de la vibración “yaw” de los trayectos por carretera circuito circular y trayecto Valencia-Madrid

Como se indica al principio de este apartado, la respuesta espectral del “roll” coincide con la del trayecto circular, presentando también una atenuación de dos órdenes de magnitud entre 1 y 5Hz, y presenta la mayor densidad de energía en el mismo tramo. Puntualmente, se puede observar que una resonancia presente entre ligeramente por encima de 10Hz, se ha amplificado frente al trayecto anterior, pero sigue siendo de poca importancia frente a la contribución de frecuencias más bajas.

6.1.3. Resultados de la vibración angular en distintos puntos de la superficie del contenedor en transporte por carretera

En la Figura 48 se muestra que tanto los espectros como la intensidad de las vibraciones en los tres puntos de muestreo son muy similares para los tres modos rotacionales. Las gráficas de los tres puntos registrados prácticamente se superponen, indicando que para futuras investigaciones sería suficiente con fijar un único registrador dentro del contenedor.



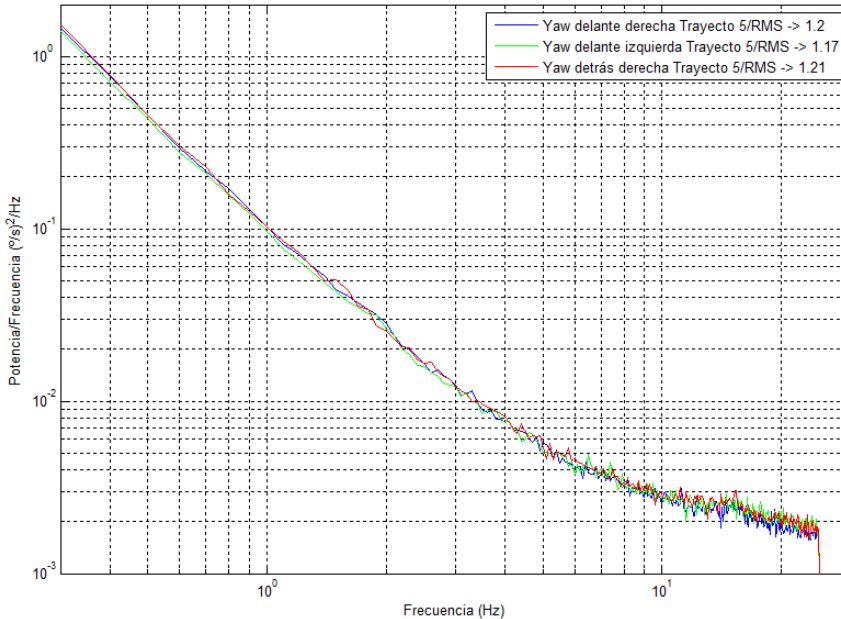


Figura 48. Comparación de las PSD de la vibración “pitch”, “roll” y “yaw” en distintas posiciones de la plataforma de carga del contenedor en el trayecto Valencia-Madrid

Es de interés la comparativa entre los tipos de vibración “pitch”, “roll” y “yaw” en un mismo punto de la superficie del contenedor (Figura 49). En este caso se seleccionó la parte delantera derecha del contenedor. Se observa que en un mismo punto se dan los tres tipos de vibración angular con distintas intensidades.

La comparativa realizada corrobora lo anteriormente comentado; la intensidad del “yaw” está frecuencias extremadamente bajas, sobre 1-2Hz, siendo este valor bastante más bajo que el de “pitch” y “roll”.

Al comparar las tres gráficas no se aprecia, a priori, que exista una relación directa entre los tres ejes, por lo que es necesario realizar el registro de los tres si se quiere caracterizar el movimiento de todos los ejes angulares

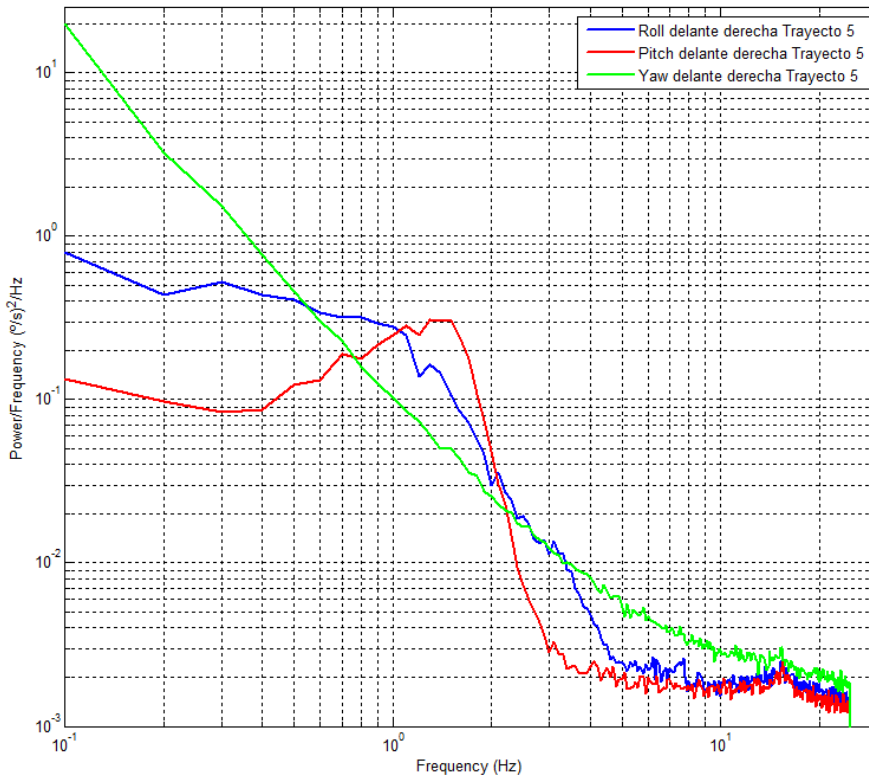


Figura 49. Comparación de las PSD de las vibraciones “pitch”, “roll” y “yaw” durante el transporte por carretera Valencia-Madrid

6.1.4. Resultados de la vibración angular para distintos anchos de banda espectrales en transporte por carretera

Con el fin de decidir el espectro o rango de datos que posteriormente se ha de reproducir en el equipo de ensayo se han de chequear las intensidades en distintos rangos. En la Figura 50 se comprueba que el ancho de banda 0,3-10Hz (área limitada por la línea discontinua) contiene prácticamente toda la energía del espectro del ancho de banda 0,3-25Hz (todo el área de la figura). Esto supone que simulando sólo el ancho de rango 0,3-10Hz se reproduce prácticamente toda la energía pero imponiendo los mínimos requerimientos posibles al equipamiento necesario para reproducirlo.

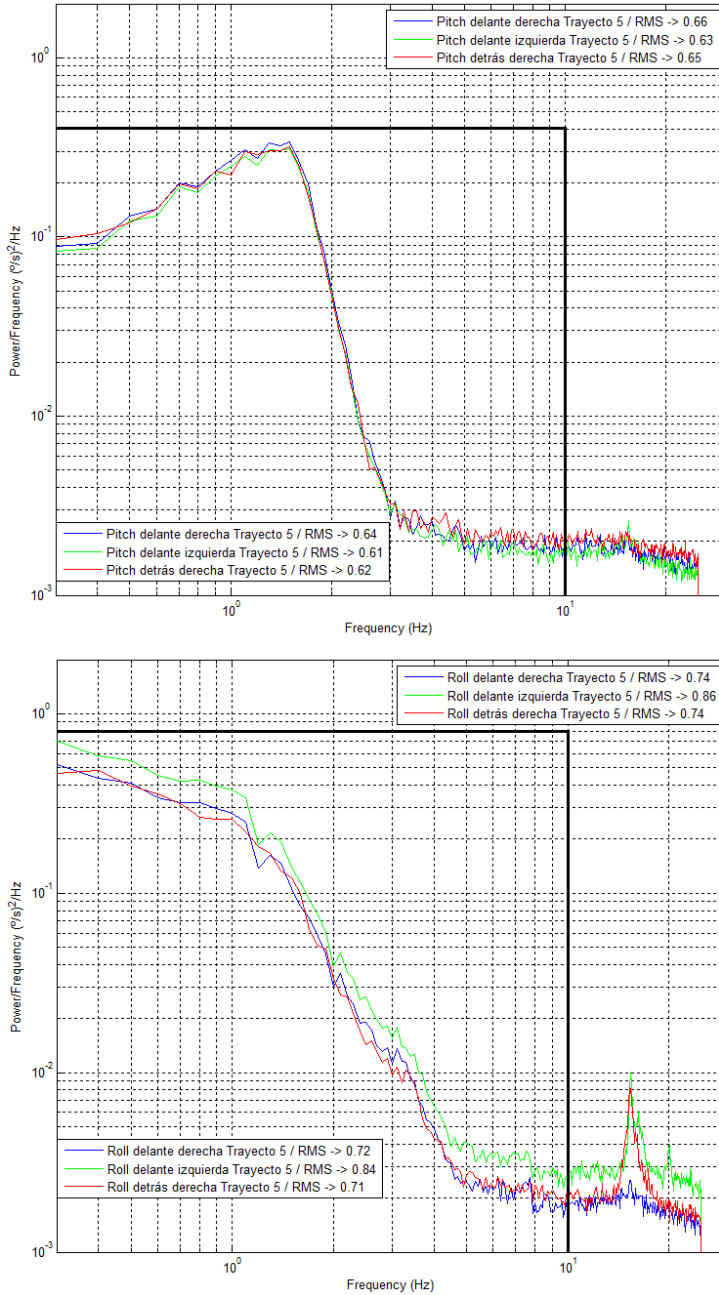


Figura 50. Comparación de las PSD de la vibración “pitch” y “roll” con dos anchos de banda (0,3-25Hz y 0,3-10Hz) durante el transporte por carretera

6.2. RESULTADOS DEL TRANSPORTE FERROVIARIO

6.2.1. Resultados de la vibración angular en el trayecto en tren Madrid-Sevilla

A continuación se exponen los gráficos PSD para cada tipo de vibración angular del trayecto en tren Madrid-Sevilla: pitch (Figura 51), roll (Figura 52) y yaw (Figura 53) para los tres trayectos circulares. El “Pitch” registrado se muestra principalmente por debajo de 3Hz y posteriormente se atenúa de forma muy suave. Además, muestra una intensidad menor que “roll”.

El “roll” muestra un claro pico, justo por encima de 1Hz, y la mayor intensidad de la energía por debajo de 3Hz, atenuándose dos órdenes de magnitud antes de 10Hz. En el transporte ferroviario, se puede observar, que la contribución del “roll” es más importante que la del “pitch”.

El registro del “yaw” muestra una resonancia muy marcada entre 1 y 2Hz, el resto de la gráfica presenta el mismo comportamiento registrado en el transporte por carretera, solo que de menor intensidad.

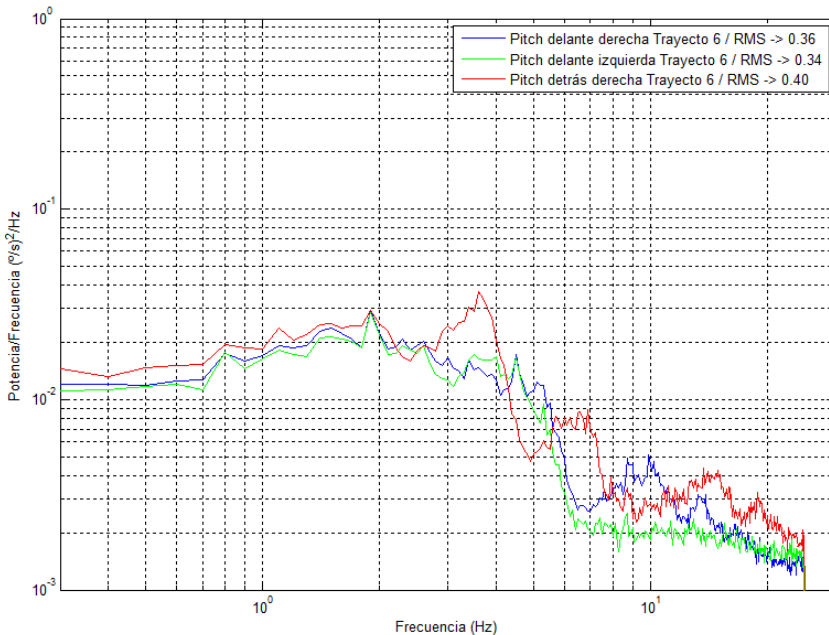


Figura 51. PSD de la vibración “pitch” del transporte ferroviario

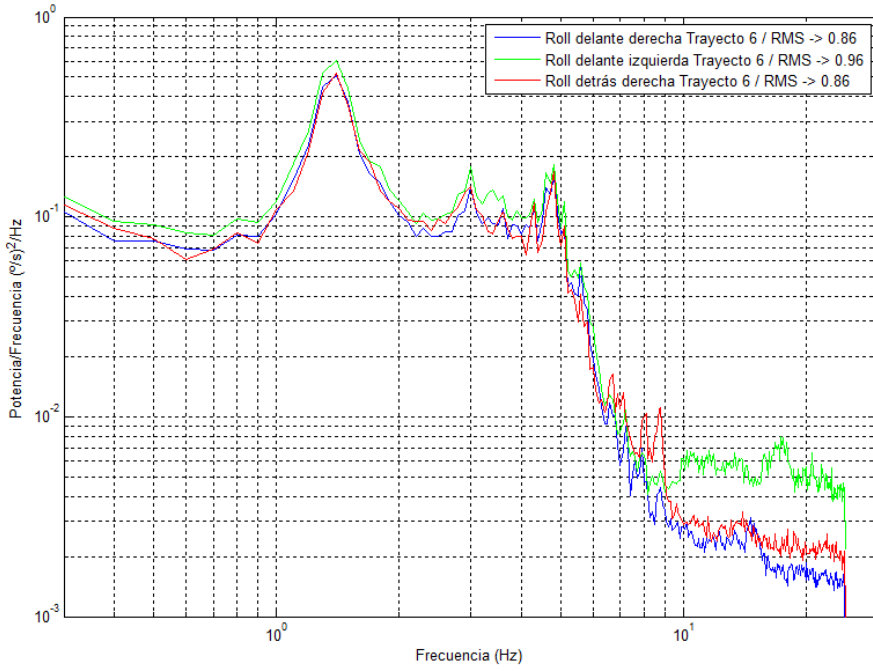


Figura 52. PSD de la vibración “roll” del transporte ferroviario para rango de frecuencia (0,3-25Hz)

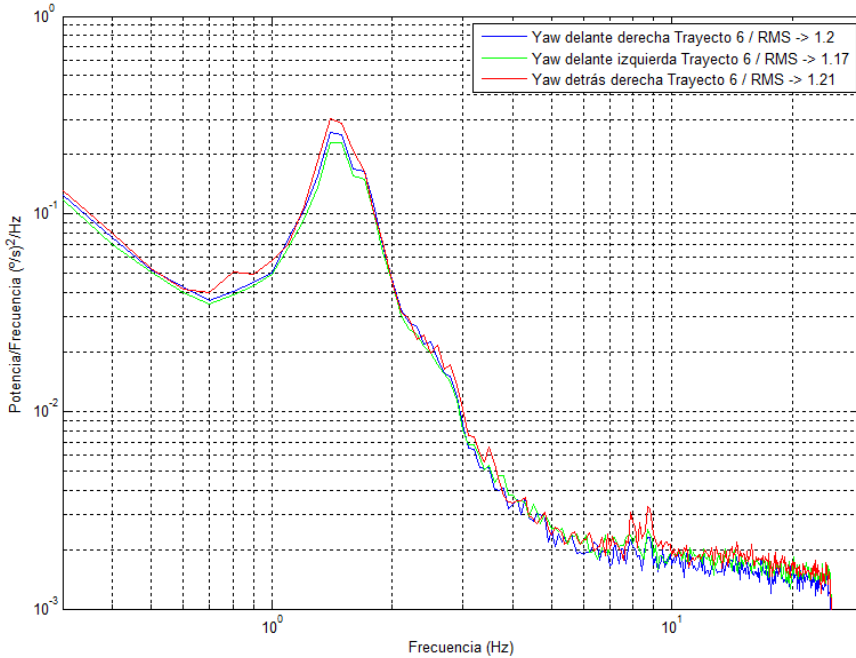


Figura 53. PSD de la vibración “yaw” del transporte ferroviario

Como se podía esperar a priori, los perfiles del transporte por carretera y ferroviarios a simple vista se puede apreciar que no tienen la misma forma en ninguno de ellos, aunque sí que presentan algunos rasgos en común. En las distintas figuras se observa que la componente principal de la energía está concentrada en el mismo rango frecuencial que en el transporte por carretera. No obstante, se tienen picos y resonancias distintas, debidas a la infraestructura propia de este modo de transporte. En las figuras anteriores se muestra que tanto los espectros como la intensidad de las vibraciones en los tres puntos de muestreo son muy similares para los tres modos rotacionales.

Si se comparan las vibraciones “pitch”, “roll” y “yaw” en un mismo punto de la superficie del contenedor (Figura 54) en el transporte ferroviario se observa lo mismo que en el caso del transporte por carretera y es que, en un mismo punto del contenedor, se dan los tres tipos de vibración angular con distintas intensidades. Al igual que en el caso del transporte por carretera, para futuras investigaciones sería suficiente registrar en un único punto. Tampoco es trivial encontrar una

relación directa entre los tres ejes de giro, que permitiese caracterizar uno de ellos en función de los otros dos.

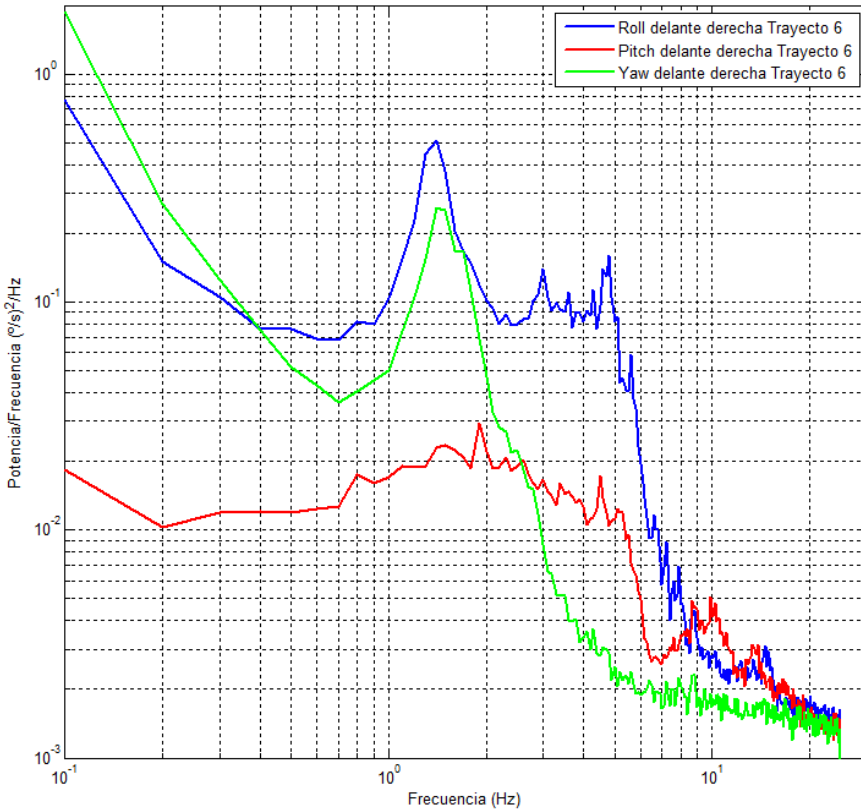


Figura 54. Comparación de las PSD de las vibraciones “pitch”, “roll” y “yaw” durante el transporte ferroviario

6.2.2. Resultados de la vibración angular para distintos anchos de banda espectrales en transporte ferroviario

Con el fin de decidir el espectro o rango de datos que posteriormente se ha de reproducir en el equipo de ensayo se han de chequear las intensidades en distintos rangos. En la Figura 55 se comprueba que el rango de 0,3-10Hz (área limitada por la línea discontinua) contiene prácticamente toda la energía del espectro del rango (0,3-25Hz) (toda el área de la figura). Esto supone que simulando sólo de 0,3-10Hz sería suficiente para reproducir todo el ancho de rango para los modos rotacionales pitch y roll.

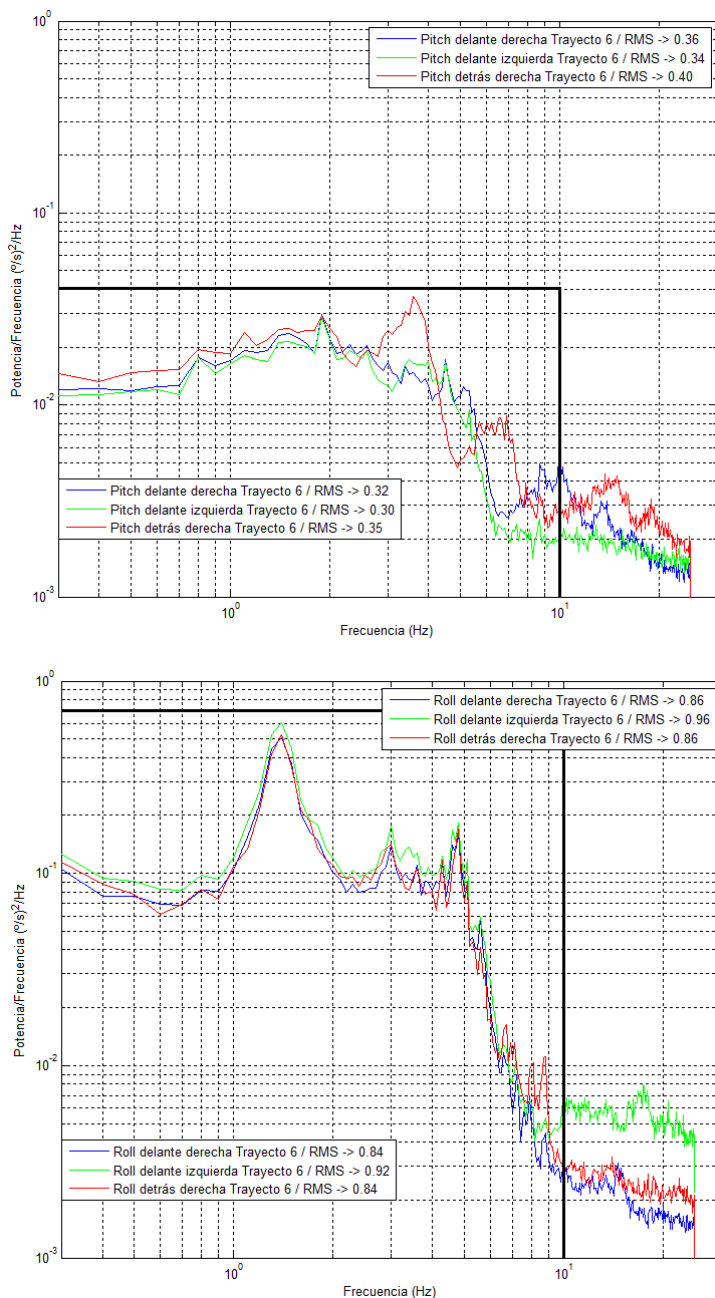


Figura 55. Comparación de las PSD de la vibración “pitch” y “roll” con dos anchos de banda ($0,3-25\text{Hz}$ y $0,3-10\text{Hz}$) durante el transporte ferroviario

6.3. RESULTADOS DEL TRANSPORTE MARÍTIMO

6.3.1. Resultados de la vibración angular en el trayecto en barco Sevilla-Tenerife-Valencia

Uno de los aspectos más relevantes de este trabajo es el registro y análisis de las vibraciones del transporte marítimo. Se distinguen además dos tipos de mar: mar bravo (océano), correspondiente al trayecto Sevilla-Tenerife y mar en calma (mediterráneo), correspondiente al trayecto Tenerife-Valencia.

La diferencia espectral entre mar en calma y mar bravo se aprecia en las frecuencias más bajas, esto cobra sentido si se observa la respuesta espectral de las olas puesto que el generador de los estímulos en el transporte marítimo es el mar (Figura 56).

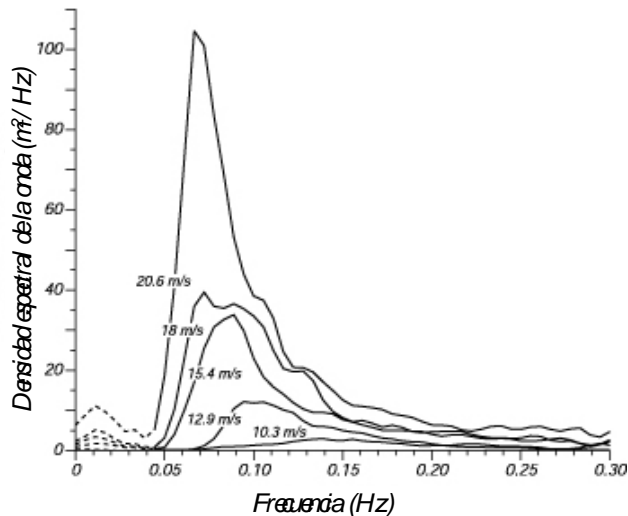


Figura 56. Respuesta espectral de las olas (Adaptado de Moskowitz, 1964)

A continuación se exponen los gráficos PSD para cada tipo de vibración angular del trayecto marítimo Sevilla-Tenerife y Tenerife-Valencia: pitch (Figura 57), roll (Figura 58) y yaw (Figura 59) para ambos trayectos. Destacar, antes del análisis, que el pitch y el roll están referidos al contenedor y no al transporte marítimo.

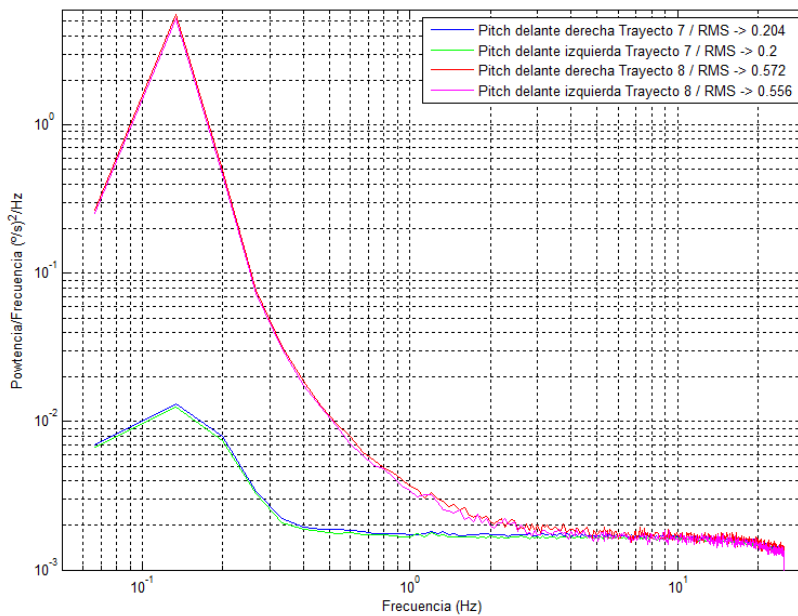


Figura 57. PSD de la vibración “pitch” del transporte marítimo

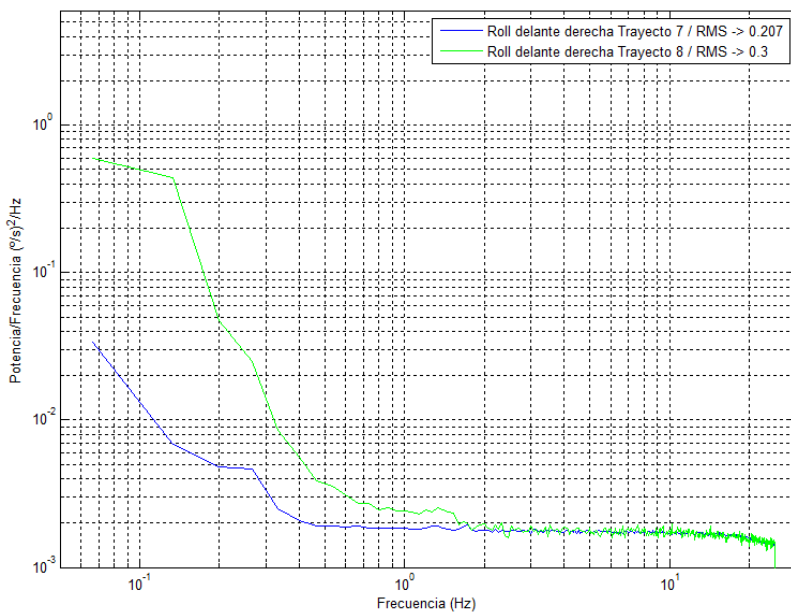


Figura 58. PSD de la vibración “roll” del transporte marítimo

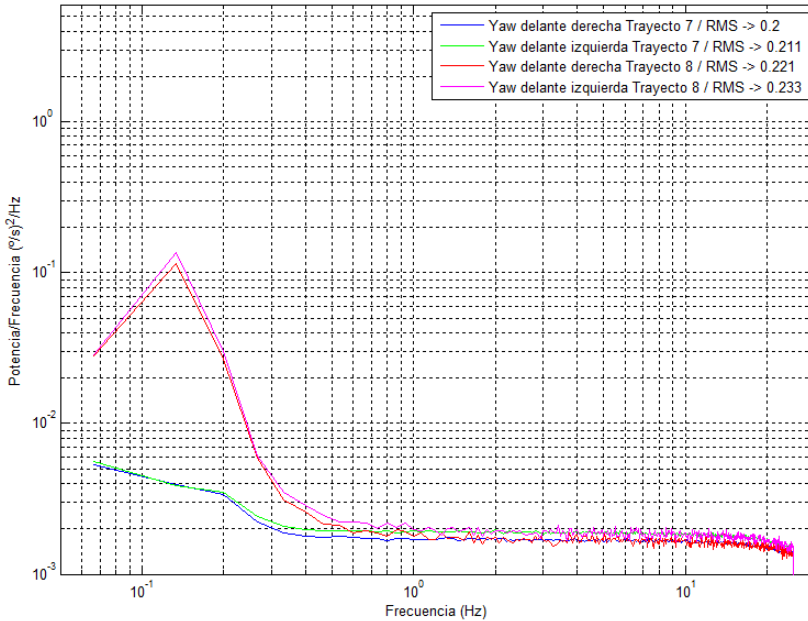


Figura 59. PSD de la vibración “yaw” del transporte marítimo

En las figuras se identifica claramente las diferentes respuestas de las vibraciones frente a un mar bravo (trayecto 7) y un mar en calma (trayecto 8). Sin embargo, las respuestas de las gráficas son contrarias. Esto se debe a que las condiciones atmosféricas del trayecto Tenerife-Valencia, trayecto 8 fueron adversas, con fuertes tormentas. En principio el mar en calma debía tener una respuesta inferior en intensidad a la mostrada para el mar bravo.

Asimismo se observa que en el caso del transporte marítimo las vibraciones angulares se producen a frecuencias muy bajas, inferiores a las de los otros modos de transporte terrestres, en torno a los 0,1Hz. Esto se debe al efecto de la respuesta espectral de las olas. Ésta tiene mucha amplitud en bajas frecuencias pero a mayores frecuencias es mucho menor.

En la comparación de las vibraciones “pitch”, “roll” y “yaw” en un mismo punto de la superficie del contenedor (Figura 60) en el transporte marítimo se observa lo mismo que en el caso del transporte por carretera y transporte ferroviario y es que, en un mismo punto del contenedor, se dan los tres tipos de vibración angular con distintas intensidades.

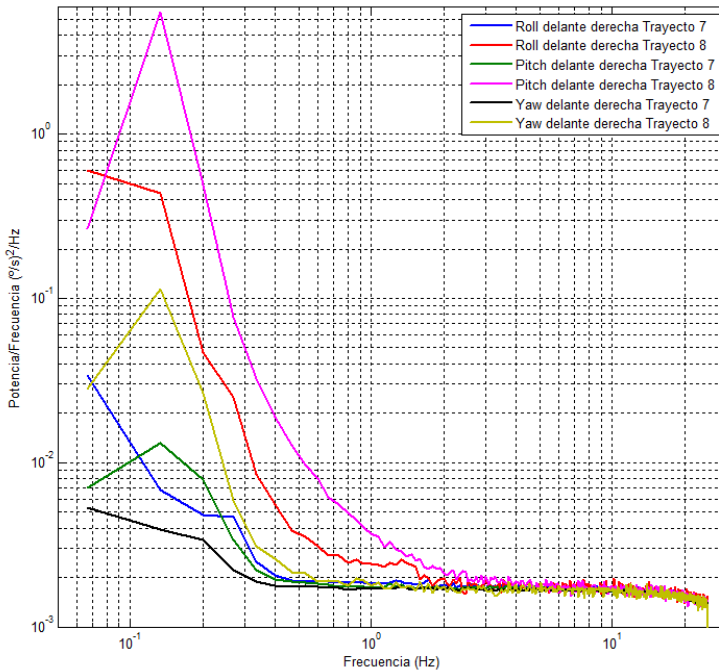


Figura 60. Comparación de las PSD de las vibraciones “pitch”, “roll” y “yaw” durante el transporte marítimo

Después de ver estos registros, e identificar la respuesta espectral que se da en el mar, se observa una que su energía está concentrada en un rango espectral, casi un décimo inferior a los otros dos modos de transporte registrado. Para futuras investigaciones sería conveniente realizar registros temporales más largos para poder tener mayor resolución frecuencial y una perfil más definido en el tramo donde se produce la mayor energía.

6.3.2. Resultados de la vibración angular para distintos anchos de banda espectrales en transporte marítimo

Para decidir el espectro o rango de datos que posteriormente se ha de reproducir en el equipo de ensayo se han de chequear las intensidades en distintos rangos. En la Figura 61 se comprueba que el rango de 0,05-10Hz (área limitada por la línea discontinua) contiene prácticamente toda la energía del espectro del rango (0,05-25Hz) (toda el área de la figura). Por tanto, simulando sólo de 0,05-10Hz sería suficiente para reproducir todo el ancho de rango para los modos rotacionales pitch y roll.

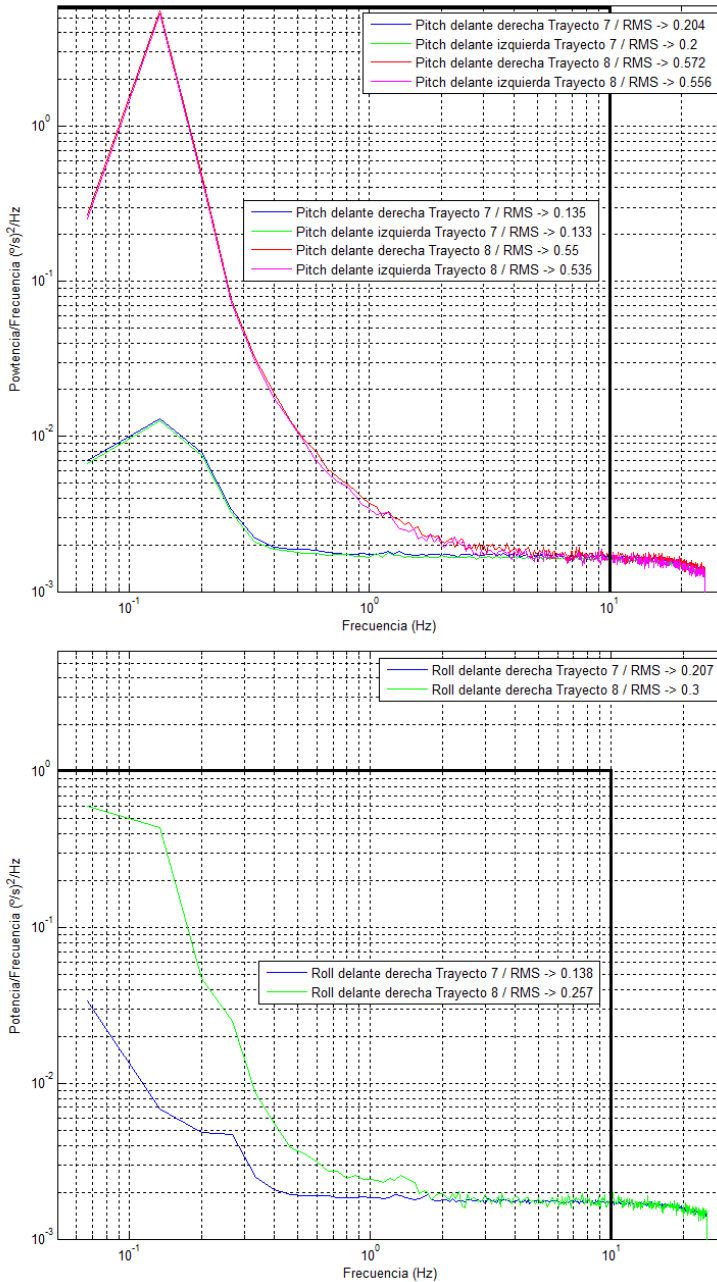


Figura 61. Comparación de las PSD de la vibración “pitch” y “roll” con dos anchos de banda (0,3-25Hz y 0,3-10Hz) durante el transporte marítimo

6.4. RESULTADOS DEL TRANSPORTE INTERMODAL

A continuación se exponen los gráficos PSD para cada tipo de vibración angular derivada del transporte intermodal: carretera (trayecto 5), ferroviario y marítimo. Pitch (Figura 62), roll (Figura 63) y yaw (Figura 64).

En su conjunto se aprecia que las respuestas espectrales presentan perfiles diferentes para los tres ejes según el modo de transporte. Pero aunque los perfiles son diferentes los rangos espectrales son parecidos.

Con respecto a la vibración “pitch” además de haber una respuesta frecuencial ésta es de distinta intensidad dependiendo del modo de transporte utilizado. En el experimento realizado la intensidad de esta vibración en el transporte marítimo es superior incluso a los transportes terrestres (carretera y ferroviario) bajo unas condiciones climatológicas adversas (olas de gran altura). En la comparativa de los otros dos modos de transporte se observa que esta vibración es de mayor relevancia en el transporte por carretera que en el transporte ferroviario. Esto se debe fundamentalmente a la infraestructura y vehículo utilizado.

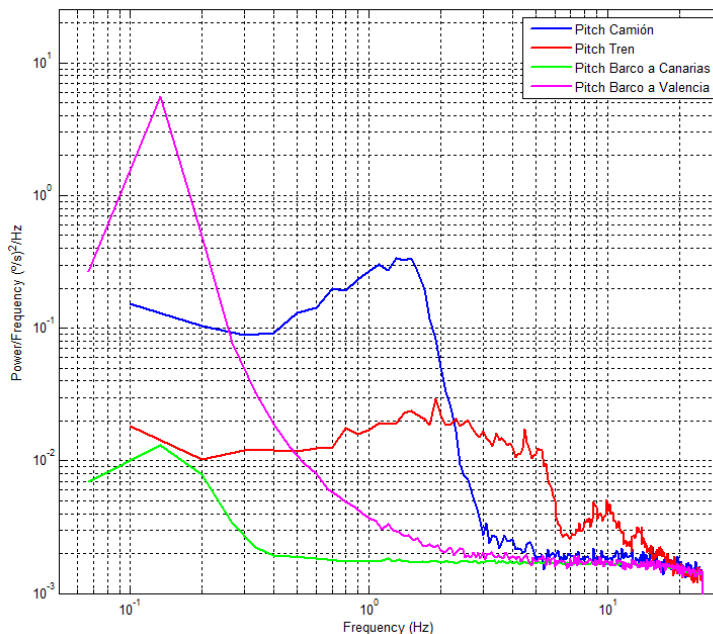


Figura 62. Comparativa de las PSD de las vibraciones “pitch” intermodal

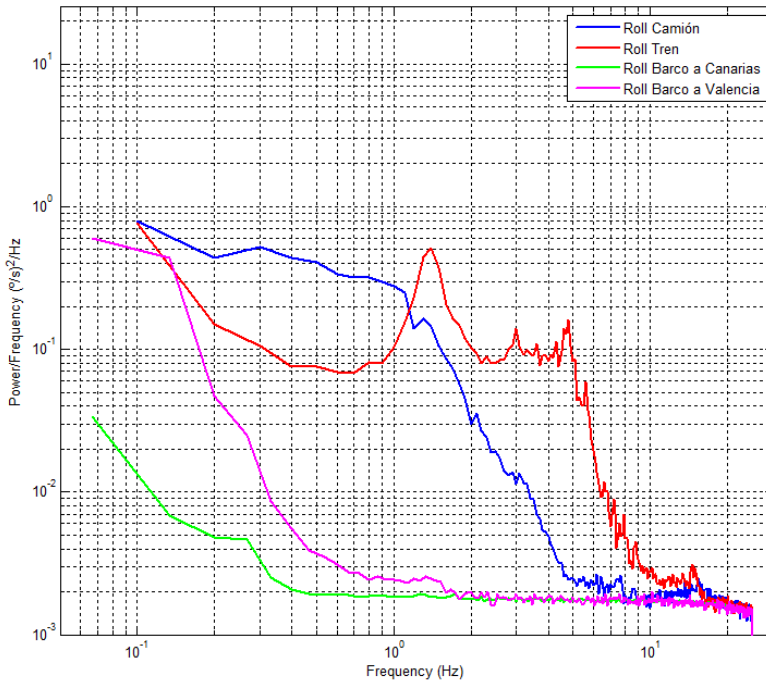


Figura 63. Comparativa de las PSD de las vibraciones “roll” intermodal

Con respecto a la vibración “roll” existe también una respuesta frecuencial de distinta intensidad dependiendo del modo de transporte utilizado y, por tanto, se comprueba que tiene lugar. En el experimento realizado el “roll” derivado del transporte por carretera y transporte ferroviario es mayor que incluso en el caso de condiciones adversas en el transporte marítimo. En la comparativa de los otros dos modos de transporte se observa que esta vibración es de mayor relevancia en el transporte por carretera que en el transporte ferroviario. Esto se debe fundamentalmente a la infraestructura y vehículo utilizado.

En la vibración “yaw” también hay una respuesta frecuencial de cierta intensidad en función del modo de transporte utilizado comprobándose así su existencia. En el experimento realizado, las vibraciones “yaw” del transporte por carretera y transporte ferroviario son de intensidad mucho mayor que en el caso del transporte marítimo. En la comparativa de los dos modos de transporte terrestre es el transporte por carretera el de mayores intensidades para este tipo de vibración.

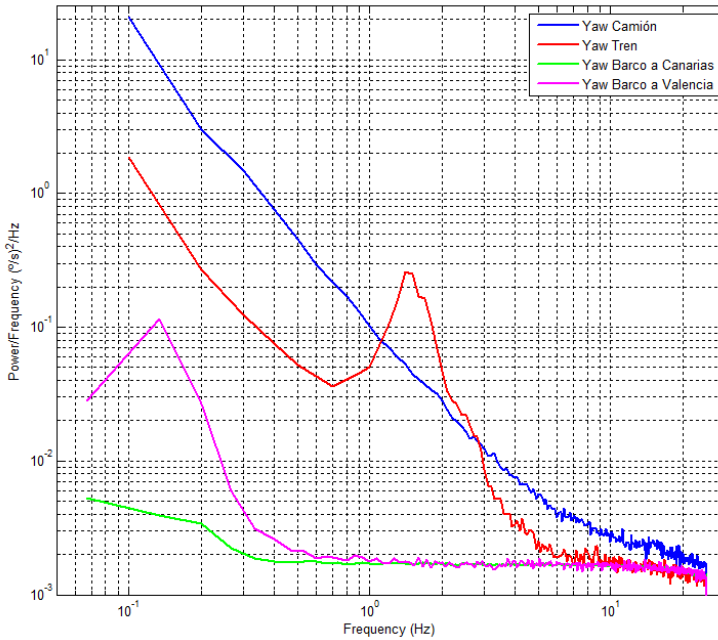


Figura 64. Comparativa de las PSD de las vibraciones “yaw” intermodal

6.5. RESULTADOS DEL PROTOCOLO DE EVALUACIÓN INCORPORANDO MODOS ROTACIONALES

6.5.1. Detalle del protocolo de evaluación con modos rotacionales

Tal y como se discutió en capítulos anteriores, si bien existen protocolos basados en normas internacionales, éstos no incorporan los modos rotacionales y cada uno tiene una estructura distinta. Con todo, se desarrolla a continuación el protocolo de evaluación diseñado para incorporar los modos rotacionales, que se han identificado en esta tesis como parámetros de relevancia a considerar en la simulación del transporte. Este protocolo considera como referencia para su desarrollo las normas siguientes:

- UNE-EN ISO 13355: 2003. Packaging - Complete, filled transport packages and unit loads. Vertical random vibration test.

- UNE-EN ISO 8318: 2003. Packaging – Complete, filled transport packages and unit loads-Sinusoidal vibration tests using a variable frequency.
- ASTM D4728-06. Standard Test Method for Random Vibration Testing of Shipping Containers.
- ASTM D999-01. Standard Test Methods for Vibration Testing of Shipping Containers.

La estructura del protocolo es la siguiente:

1. Objeto
2. Alcance
3. Importancia y uso
4. Referencias
5. Terminología
6. Equipos
7. Aspectos técnicos
8. Procedimiento operativo
 - 8.1 Útiles y equipos de ensayo
 - 8.2 Toma de muestras
 - 8.3 Acondicionamiento de muestras
 - 8.4 Previo Parámetros de ensayo
 - 8.5 Método de ensayo
 - 8.6 Criterios de aceptación
9. Registros
10. Anexos: perfiles de vibración. Datos de campo

A continuación se realiza una descripción de los contenidos y actividades incluidas en cada una de las fases de las cuales consta el protocolo.

1. Objeto

Se describe el objetivo del procedimiento y que es detallar el método de ensayo utilizado en un Laboratorio de Simulación del Transporte para llevar a cabo ensayos de vibración vertical aleatoria con pitch & roll en embalajes de expedición completos y llenos o unidades de carga.

2. Alcance

Este protocolo es de aplicación a muestras cuya naturaleza sean de embalajes de expedición completos y llenos o unidades de carga, que van a ser sometidas al ensayo de vibración vertical aleatoria con pitch & roll en un Laboratorio de Simulación del Transporte y al personal del mismo autorizado para realizar dicho ensayo.

3. Importancia y uso

En el entorno de distribución, las mercancías o unidades de carga para el transporte están expuestas a esfuerzos dinámicos complejos. Para obtener en el laboratorio el mismo tipo de daño que en la vida real, requiere someter a la unidad de carga de ensayo y su contenido a pruebas de vibraciones aleatorias. De esta manera, muchas resonancias presentes en productos y sus envases y embalajes son excitadas simultáneamente.

Los ensayos de vibración aleatoria deben basarse en datos de campo representativos. Cuando sea posible, los niveles de confianza se pueden mejorar mediante la comparación de los resultados de pruebas de laboratorio con los efectos reales que se producen en envíos de campo. Esta información de referencia puede consultarse en los Anexos incluidos en el protocolo, que recoge información relacionada con perfiles y niveles de vibración recomendados para ensayo, obtenidos de mediciones reales de campo.

La exposición a las vibraciones afecta al envase de envío, al embalaje interior, a los medios de cierre, y al producto o contenido. Estos ensayos permiten analizar la interacción entre estos componentes. La modificación del diseño o especificaciones de uno o varios de estos componentes puede ser utilizado para lograr un rendimiento óptimo en el entorno de distribución.

Los ensayos de vibración aleatoria se pueden realizar de forma simultánea añadiendo señales transitorias o periódicas para simular los esfuerzos producidos por las juntas de raíles, baches, etc. Las vibraciones aleatorias pueden realizarse en cualquiera ejes individual o simultáneo (vertical, horizontal, rotacional pitch, rotacional roll, o combinación de varios o todos). Cada eje tendrá un nivel de ensayo específico en función del entorno de distribución a simular.

4. Referencias

El presente procedimiento considera como referencia las normas:

- UNE-EN ISO 13355:2003: “Envases y embalajes. Embalajes completos y llenos y unidades de carga. Ensayo de vibración vertical aleatoria”
- EN 22206:1994: “Embalajes. Embalajes de expedición completos y llenos. Identificación de las diferentes partes para su ensayo. (ISO 2206:1987)”
- EN ISO 2233:2002: “Envases y embalajes. Embalajes de expedición completos y llenos y unidades de carga. Acondicionamiento para ensayos. (ISO 2233:2000)”
- UNE-EN ISO 2234:2003: “Envases y embalajes. Embalajes de expedición completos y llenos y unidades de carga. Ensayos de apilamiento usando una carga estática”

5. Terminología

Para la comprensión y correcta aplicación del protocolo es necesario definir de forma concreta algunos de los términos más utilizados.

Unidad de carga: pieza o conjunto de productos y/o embalajes que forman una unidad independiente de transporte (por ejemplo, cargas paletizadas o cargas unitarias)

Ancho de banda: diferencia, en Hz, entre los límites superior e inferior de una banda de frecuencia. Para los propósitos de estos ensayos, el ancho de banda se puede considerar equivalente a la resolución en frecuencia de un análisis espectral.

Cierre de lazo: condición de control en el que la entrada es modificada con el tiempo por el efecto de la salida o respuesta del sistema.

Media cuadrática: promedio del cuadrado de una función en un tiempo determinado.

Densidad espectral de potencia (PSD): Expresión de vibración aleatoria en términos de aceleración media cuadrática por unidad de frecuencia. Las unidades son g^2/Hz . Es el límite de la amplitud cuadrática media en una

banda de frecuencia dada rectangular dividida por el ancho de banda, cuando el ancho de banda se aproxima a cero.

Decibelios (dB): diez veces el logaritmo en base 10 del cociente de dos valores de PSD al cuadrado. Dos valores de PSD cuyo cociente sea dos, difieren en 3 dB. Dos valores de PSD cuyo cociente sea $1/2$, difieren en -3 dB.

Ecualización: ajuste o corrección de las características de amplitud de una señal de control electrónica a lo largo de un rango de frecuencia deseado para mantener un determinado espectro de salida de vibraciones y el nivel de energía deseado.

Ecualizador: instrumento utilizado para llevar a cabo la ecualización.

RMS global: la raíz cuadrada de la integral de la densidad espectral de potencia en todo el rango de frecuencia.

Vibraciones periódicas: oscilación cuya forma de onda se repite a incrementos iguales de tiempo.

Vibración aleatoria: oscilación cuya amplitud instantánea no está determinada de antemano para ningún instante de tiempo. Las amplitudes instantáneas de una vibración aleatoria son determinadas por una función de distribución de probabilidad, la integral de la misma sobre un rango de amplitud dado dará el porcentaje de tiempo probable en que la amplitud caerá dentro de ese rango. Si la vibración aleatoria presenta magnitudes instantáneas producidas de acuerdo con una distribución gaussiana o normal, se llama "Vibración aleatoria gaussiana o normal". La vibración aleatoria gaussiana tiene la propiedad de que el nivel de RMS es igual a la desviación estándar o 1 sigma, y por consiguiente la amplitud será siempre menor o igual a un valor de 3 sigma o 3 veces el valor del nivel RMS de la vibración, durante el 99.7% del tiempo.

Root-mean-square (RMS): La raíz cuadrada de la media cuadrática. En el caso particular de una onda senoidal, el valor RMS es 0,707 veces el valor de pico.

Sigma clipping de la señal de comando: Condición en la que la amplitud máxima de la unidad o de la señal de salida de un sistema de vibración está limitado a un valor de sigma, o múltiplo del valor RMS. Para un

valor de 3 sigma clipping, la amplitud máxima no superará 3 veces el valor rms.

Vibración sinusoidal: oscilación periódica que tiene una forma de onda sinusoidal de una sola frecuencia.

Espectro: definición de la magnitud de las componentes de frecuencia dentro de un rango de frecuencia especificado.

Grados de libertad estadísticos (DOF o GDL): en relación con el cálculo del PSD, los grados de libertad son una medida de la precisión estadística de la estimación de ese PSD. El número de GDL se determina por el ancho de banda del análisis (resolución en frecuencia) y el tiempo total de la muestra de señal analizada (determinada por la resolución en frecuencia y el número de promedios). El número de GDL se define por la fórmula $GDL = 2BT$, donde B es el ancho de banda del análisis en Hz, y T es la longitud total en segundos del registro o señal utilizada.

Función de transferencia: relación dinámica entre la salida y la entrada. En términos de un sistema de vibración, es la relación de respuesta de salida ante una entrada constante durante un rango de frecuencia determinado.

6. Equipos

En este apartado se describen los principales requisitos de los equipos necesarios para la aplicación del protocolo.

Sistema de vibración: El equipo de ensayo de vibración, deberá tener una plataforma de vibración con suficiente fuerza y rigidez para que las vibraciones aplicadas sean esencialmente uniformes sobre toda la superficie de ensayo, cuando esté cargada con la muestra de ensayo. La mesa de vibración se colocará sobre un mecanismo capaz de producir vibraciones individuales o simulatáneas en los diferentes ejes controlados, con niveles y amplitud variable específicas de forma continua en toda la gama de frecuencias deseada. Se utilizarán accesorios para restringir el movimiento no deseado de las muestras durante el ensayo.

Controles electrónicos: Los controles deben proporcionar la capacidad de generar entradas de comando del sistema de vibración necesarias para producir la densidad espectral de potencia deseada en la superficie de la mesa en la que está colocada la muestra de ensayo.

- Cierre de lazo: Se requiere un controlador de lazo cerrado automático, lo que permite al operador introducir datos PSD deseados. El controlador genera automáticamente las señales de comando necesarias para el sistema de vibración para lograr el PSD deseado manteniendo así el control de lazo cerrado. La señal de comando es automáticamente compensada para la muestra de ensayo y el sistema de vibración utilizado. Los sistemas generalmente incluyen un convertidor analógico-digital para el acondicionamiento de la señal de realimentación, un convertidor digital-analógico para producir las señales de comando, y un procesador digital con capacidad de análisis en tiempo real, software para el control de vibraciones aleatorias, un terminal de visualización de gráficos y almacenamiento de datos.
- Sigma clipping de la señal de comando: Los sistemas de vibración aleatorios suelen crear una señal de comando que sigue una distribución de Gauss. Muchos sistemas tienen una capacidad de aplicar un valor de “Sigma clipping”, que se emplea a veces para proteger el sistema de vibración o a la muestra de ensayo a elevadas amplitudes instantáneas que pueden causar daños inesperados.
- El análisis digital en tiempo real deberá proporcionar un mínimo de 60 grados estadísticos de libertad, y un ancho de banda máximo de análisis de 2 Hz.

Instrumentación: acelerómetros, giróscopos o unidades inerciales, acondicionadores de señal, analizadores, visualizadores de datos, dispositivos de almacenamiento, así como las técnicas de control descritas anteriormente son necesarios para medir y controlar los niveles de PSD en la superficie de la mesa. El sistema de instrumentación tendrá una precisión de $\pm 5\%$ en toda la gama de frecuencias especificadas en el ensayo.

7. Aspectos técnicos

La precisión de la instrumentación y equipos de prueba utilizados para controlar o monitorizar los parámetros del ensayo debe ser verificada periódicamente para asegurar que los niveles y las tolerancias de los ensayos deseados se mantienen en los rangos habituales.

El gráfico PSD a especificar y el nivel RMS de la señal de control debe basarse en normas de ensayo como ASTM o ISTA, o derivadas de las mediciones reales de campo o datos publicados de PSD obtenidos en los vehículos de transporte típicos en condiciones representativas de velocidad, carga, terreno, superficies de carretera, etc. Las mediciones de campo se deben registrar con precisión con equipos que tengan la respuesta de frecuencia y rango dinámico adecuado para evitar la atenuación o la contaminación de los niveles de energía a utilizar en los PSD. Varias medidas de campo independientes deberían realizarse para asegurar niveles de ensayo representativos. Estos datos deben reducirse luego a formato PSD y adaptados para el control adecuado del sistema de vibración. En ausencia de datos de PSD específicos, es recomendable utilizar los perfiles facilitados como anexos al protocolo.

Los niveles de la señal de comando reproducidos en la plataforma de vibración son el único punto de referencia común para la repetitividad de los ensayos entre varios sistemas o equipos de ensayo. Por lo tanto, se recomienda siempre que el control del ensayo de vibración se realice sobre la plataforma de vibración y no sobre la respuesta del espécimen de ensayo. Esta señal de realimentación es generada por un acelerómetro montado directamente en la mesa. La ubicación de montaje del acelerómetro debe estar lo más cercano posible al punto de actuación. La ubicación de montaje del giróscopo debe estar lo más cercano posible al punto de apoyo de rotación.

La señal de comando o accionamiento del sistema de vibración debe ser tratado con los controles electrónicos, como se describe en el apartado de equipos, para compensar la dinámica del espécimen a ensayar, la función de transferencia del sistema de ensayo, y la función de transferencia del sistema de control.

La densidad espectral de potencia del perfil de ensayo de vibración aleatoria no se desviará de los requisitos especificados en más de ± 6 dB en ninguna banda de análisis de frecuencia en todo el rango de frecuencia del ensayo. Se permitirá como máximo desviaciones de ± 6 dB en un ancho de banda acumulativo de 10 Hz. Además, el nivel general de RMS no se desviará más de 15% respecto al nivel especificado durante el ensayo. Si se utiliza el recorte de señal o “sigma clipping” en el comando, el nivel de corte utilizado no deberá ser inferior a 3 sigma.

8. Procedimiento operativo

8.1 Útiles y equipos de ensayo

Los equipos e instrumental necesario para realizar el protocolo son:

- Mesa Vibración Aleatoria
- Control hidráulico mesa de vibración vertical
- Equipo de Pitch & Roll
- Control hidráulico/neumático del pitch & roll
- Controlador
- Cámara Climática

8.2 Toma de muestras

La muestra de ensayo debe ser llenada normalmente con su contenido previsto. Pueden usarse contenidos simulados o sustitutivos, siempre que las dimensiones y propiedades físicas de tales contenidos sean lo más parecidas posible a las del contenido previsto. En ambos casos hay que asegurarse de que la muestra de ensayo está cerrada del mismo modo que el utilizado para su distribución.

En el caso de requerirse, los sensores (acelerómetros, etc) que se apliquen sobre la carga deberían instalarse con la mínima alteración posible de la muestra de ensayo.

8.3 Acondicionamiento de muestras

La muestra de ensayo debe acondicionarse de conformidad con una de las condiciones especificadas en la Norma EN ISO 2233:2002 (Tabla 19).

Se seleccionan las condiciones de temperatura y humedad relativa más apropiadas para el transporte y el almacenamiento de la muestra de ensayo que se va a ensayar.

Se aplican las condiciones durante un periodo mínimo que debe escogerse entre 4 h, 8 h, 16 h, 24 h, 48 h o 72 h o entre 1 semana, 2 semanas, 3 semanas o 4 semanas.

Si no se indican otras condiciones se utilizará la condición 23°C y 50%HR durante 24h.

Tabla 20. Condiciones atmosféricas propuestas en la norma EN ISO 2233:2002

Condición	Temperatura (°c)	Humedad relativa (%HR)
1	-55	-
2	-35	-
3	-18	-
4	5	85
5	20	65
6	20	90
7	23	50
8	30	85
9	30	90
10	40	-
11	40	90
12	55	30

La muestra de ensayo debe colocarse de forma que su parte superior, sus lados y al menos el 75% de su base estén expuestos libremente a la atmósfera de acondicionamiento. El periodo de acondicionamiento debe considerarse como comenzado 1h después de que se hayan establecido las condiciones especificadas.

8.4 Previo parámetros de ensayo

De manera previa a la realización del ensayo se definirán en base a cada tipología y circunstancia de la carga sobre la que aplicar el protocolo los principales parámetros de ensayo.

- 1) Establecer si es crítico para la aptitud al uso realizar el ensayo en las mismas condiciones atmosféricas a las utilizadas para el acondicionamiento o en condiciones similares.
- 2) Definir los criterios de aceptación (ver apartado 8.6)
- 3) Definir el perfil de vibración PSD, el valor RMS a utilizar y la duración del ensayo.
- 4) Definir si se va a utilizar carga superpuesta y el valor de la misma.
- 5) Identificar las caras de la muestra de ensayo (criterios definidos en las normas UNE-EN 22206:1994). Definir cada una de las caras que se van a ensayar.

8.5 Método de ensayo

Cuando sea crítico para la aptitud al uso, el ensayo debe realizarse en las mismas condiciones atmosféricas a las utilizadas para el acondicionamiento.

1. Se coloca la muestra de ensayo sobre la plataforma de ensayo con el centro de gravedad lo más próximo posible al centro de la mesa.
2. Se rodea la muestra con una barrera permitiendo el movimiento en una dimensión aproximada previamente predefinida.
3. Si se especifica una carga superpuesta el método de carga debe estar conforme con la norma ISO 2234:
 - 1) Método 1: apilamiento de embalajes idénticos a la muestra de ensayo. El número de embalajes de ensayo ha de ser tal que la masa total constituya una carga apropiada.
 - 2) Método 2: apilamiento de carga libre sobre plataforma de carga, rígida y plana.
4. Se pone en marcha el sistema hidráulico y el sistema hidráulico/neumático del pitch & roll
5. Se inicia el Controlador
6. Se selecciona el perfil de vibración a utilizar y la duración del ensayo.
7. Se lleva a cabo la definición de cada grado de libertad (DOF) con los que se quiera ensayar (vertical/pitch/roll)
8. Accionar el modo “Automático” del Control hidráulico/neumático del pitch & roll
9. Se inicia el ensayo.
10. Una vez terminado el ensayo se desconectan los distintos sistemas de alimentación y control
11. Se realiza una inspección visual de la muestra ensayada antes y después de sacarla de la mesa de vibración, con el fin de identificar si cumple o no los criterios de aceptación definidos.

8.6 Criterios de aceptación

Definir los criterios de aceptación. Deben establecerse con anterioridad al ensayo, y deberían tener en cuenta las condiciones de las muestras a su recepción. Se puede elegir cualquier criterio de aceptación que se adecue a los propósitos del cliente.

En muchos casos los criterios de aceptación pueden ser los siguientes:

Criterio 1 - El producto no sufre daño

Criterio 2 - El embalaje está intacto

Criterio 3 - Ambos criterios 1 y 2 conjuntamente

A menudo esto significa que el Embalaje y su contenido son aptos para la venta y uso al final del ciclo de distribución. Criterios de aceptación más detallados pueden permitir aceptar un cierto nivel de daño tanto a los embalajes como a los productos. La forma y contenido de los criterios de aceptación puede variar mucho dependiendo de cada situación particular. Los métodos utilizados pueden ir desde simples juicios PASA/No PASA a sistemas cuantitativos complejos

9. Registros

Las acciones realizadas durante el ensayo deben quedar registradas y este registro se ha de archivar por la persona responsable durante un periodo de tiempo de 5 años.

10. Anexos

Se pueden adjuntar al protocolo información y gráficas PSD sobre distintas tipologías de modos de transporte y trayectos determinados. De este modo esta información será de utilidad para seleccionar la severidad y perfiles a realizar por parte del equipo de vibración vertical con pitch&roll.

A continuación se incluyen las plantillas (Tabla 20 y Tabla 21) para la aplicación del protocolo desarrollado.

Tabla 21. Plantilla para la recepción y aceptación del embalaje a ensayar

DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA A ENSAYAR				
CÓDIGO INTERNO MUESTRA				
FECHA RECEPCIÓN				
CLIENTE				
PRODUCTO ENVASADO				
Tipo de producto				
Peso de producto por envase unitario (Kg)				
Requisitos específicos del producto				
CICLO DE DISTRIBUCIÓN A SIMULAR				
	Ruta	Distancia (km)	Tipo Vehículo	Duración (horas/días)
Transporte por carretera				
Transporte ferroviario				
Transporte marítimo				
ENVASE Y EMBALAJE				
	Envase primario	Envase secundario	Envase terciario (transporte)	
TIPO DE MATERIAL				
DIMENSIÓN EXTERIOR/INTERIOR				
PESO (kg)				
FOTO (adjuntar archivo gráfico en formato jpg de cada tipología envase)				
ACEPTACIÓN DE LA MUESTRA PARA EL ENSAYO				
Criterios de aceptación				
	Sí	No	Detalle	
¿Sufre daños el producto/muestra a ensayar?				
¿Está el embalaje intacto?				
¿Sufre daños el producto/muestra a ensayar así como el embalaje?				
VALORACIÓN DE LA MUESTRA PARA EL ENSAYO		PASA		
		NO PASA		

Tabla 22. Plantilla para la realización del ensayo y registros

ACONDICIONAMIENTO PREVIO			
Temperatura (°C)			
Humedad (%)			
Duración (horas/días)			
DEFINICIÓN PARAMETROS DE ENSAYO			
Condiciones atmosféricas necesarias			
Temperatura			
Humedad			
Otros			
Perfil de vibración			
PSD			
RMS			
Duración (horas/días)			
Equipos			
	Volumen ocupado	Duración (horas/ días)	Otros
Cámara Climática			
Mesa Vibración Aleatoria			
Equipo de Pitch & Roll			
Uso de carga superpuesta	SI		
	NO		
Caras a ensayar (UNE-EN 22206:1994)			
	1		
	2		
	3		
	4		
Incidencias durante el ensayo	SI	Detalle:	
	NO		
Registros			
Archivos generados(nombre)			
Fecha			
Ubicación			
Responsable			

6.4.2. Diferencias del protocolo de evaluación desarrollado con respecto otros protocolos

En el Capítulo 4 se realizó un análisis de los protocolos existentes que permiten simular vibraciones en el transporte.

Las principales diferencias del protocolo desarrollado con respecto a otros protocolos se detallan a continuación:

1. Estructura y contenidos. La estructura propuesta permite simplificar su interpretación así como incluye aspectos básicos derivados también de otros protocolos. Con respecto a otros protocolos, en este se integran todas las etapas del ensayo; acondicionamiento, apilamiento, idoneidad del embalaje para el ensayo y el ensayo en sí mismo de vibración vertical aleatoria.
2. Con respecto a las normas ISTA. En estas normas el protocolo únicamente indica cuáles son los ensayos a realizar y durante cuanto tiempo pero no se incluye el detalle del ensayo, sino que se referencian directamente otras normas donde se detallan los mismos. En el nuevo protocolo se indican los procedimientos a detalle.
3. Con respecto a las normas EUMOS. Estas normas, tal y como se indicó en el Capítulo 4, no recogen protocolos relativos a vibraciones, únicamente aceleraciones horizontales y por tanto, en este caso esa es precisamente la gran diferencia con respecto al nuevo protocolo.
4. Con respecto a las normas ASTM (ASTM D4728-06). En este caso no se indica como equipamiento necesario un equipo que simule Pitch & Roll. En este protocolo no se especifica que se precisen giróscopos o unidades inerciales para verificar los movimientos rotacionales de la mesa de vibración.
5. Con respecto a las normas UNE-EN ISO consideradas no se indica la necesidad de giróscopos para registrar los movimientos axiales rotacionales, ni tampoco que se utilice una mesa vibratoria con posibilidad de pitch & roll.

7. CONCLUSIONES

7. CONCLUSIONES

En este capítulo se repasan brevemente el contraste, tanto de las hipótesis principales como las de trabajo planteadas en las investigaciones realizadas en la presente tesis doctoral. Asimismo se valorará la validez de las tecnologías y procedimientos utilizados. Como ya se expuso, dichas investigaciones profundizan en la generación de nuevo conocimiento dentro del campo de la monitorización de los riesgos por vibraciones en el transporte de mercancías y en concreto, de las vibraciones angulares. Además se desarrolla un protocolo de ensayo que, basado en referentes internacionales, incorpora la evaluación de la vibración angular para la validación del sistema embalaje-producto de forma previa la distribución de las mercancías.

7.1. VERIFICACIÓN DE LAS HIPÓTESIS

Las hipótesis de la presente tesis doctoral han sido contrastadas mediante el diseño de los diferentes experimentos y posterior evaluación de resultados. Para una mejor comprensión se repasan y contrastan cada una de las hipótesis principales y las hipótesis de trabajo planteadas.

HP1. Los riesgos en la distribución y, en especial, el nivel de vibraciones y su tipo, dependen del tipo de transporte que se utilice.

Los tipos de vehículos utilizados para el transporte así como las superficies de transporte generan distintas vibraciones y por tanto, efectos diferentes sobre las mercancías transportadas. Por tanto, es necesaria, de forma previa a la simulación del transporte, conocer cuál es el modo utilizado para poder adaptar el ensayo a realizar.

HT1.1. Las respuestas espectrales son diferentes según el modo de transporte, estando sometidos a vibraciones con diferente magnitud y espectro.

En las Figuras 42, 51 y 57 se observa que los PSD de vibración angular pitch de los tres modos de transporte; carretera, tren y marítimo difieren tanto en distribución espectral como en energía, teniendo cada uno las intensidades máximas a distintas frecuencias. Esto verifica que la cantidad de energía depende del medio de transporte. Asimismo, los transportes presentan diferente perfil

espectral (distribución de las vibraciones según su frecuencia) según el modo de transporte utilizado. Por ejemplo, el transporte marítimo tiene casi toda la energía en frecuencias mucho más bajas que otros tipos de transporte.

HP2. Los métodos de monitorización de vibraciones verticales en el transporte son aplicables a la monitorización de los modos rotacionales.

El procedimiento de recogida de datos y la colocación de los sensores en el transporte deben ser similares a las comúnmente utilizadas para el registro de vibraciones verticales.

HT2.1. La caracterización de una ruta con un tipo de vehículo determinado es extrapolable a otra ruta similar con un vehículo similar.

Los PSDs producidos por un mismo tipo de carretera y un vehículo similar son muy parecidos. Esto se puede observar en las Figuras 42 y 43. El transporte autovía-nacional y el transporte autovía tiene calidades de firme similares y puesto que el camión que es la otra variable es el mismo (modelo, suspensión, carga ...) los registros son prácticamente los mismos.

Esto permite que datos de un tipo de carretera para un determinado tipo de vehículo puedan ser utilizados en situaciones de circunstancias (tipo de transporte y superficie) similares.

HT2.2. El número de repeticiones de los circuitos de transporte para la monitorización de los riesgos es aceptable que sea de dos, siempre que los registros obtenidos sean similares.

En la Figura 42, 43 y 44 se observan perfiles espectrales prácticamente idénticos en la ruta por carretera repetida tres veces. Esto permite demostrar que en el caso de la monitorización del transporte si dos registros de la misma ruta son muy similares se puede considerar como válidos, sin necesidad de realizar una tercera o sucesivas rutas, lo que representaría mayores costes y tiempo.

Además, se ha de tener en cuenta que en la monitorización del transporte, se cuenta con cientos de miles de datos tratados estadísticamente y no hay dudas con respecto a la dispersión de los mismos, realizar un contraste de dos rutas es suficiente para

descartar efectos debidos a circunstancias específicas de un trayecto individual (accidentes, atascos ...).

HT2.3. El contenedor o la plataforma de transporte se puede considerar un sólido rígido, al menos a efectos de los modos rotacionales; pitch, roll y yaw.

La primera aproximación en la simulación del transporte para vibraciones es que la plataforma de carga del vehículo se comporta de forma rígida y que por tanto, no hay variaciones a lo largo de su estructura. En la Figura 48 del transporte por carretera y en la Figuras 51, 52 y 53 de tren se comprueba que los valores registrados en tres posiciones diferentes del contenedor son prácticamente iguales. Esto permite concluir que la posición en un contenedor no es determinante del nivel de vibración angular. Se comprueba que sería suficiente el registro de las vibraciones en un único punto de la superficie del contenedor.

HP3. Para el registro de vibraciones angulares se ha de utilizar instrumental específico.

Actualmente los sistemas de monitorización de las vibraciones en el transporte utilizan sensores de aceleración con orientación cartesiana (triaxial) además de sistemas de alimentación y almacenamiento. En el caso de querer registrar vibraciones distintas de las verticales se ha de incorporar o diseñar un nuevo sistema de registro que incluya un sensor específico que detecte dichos movimientos y por tanto permita su identificación y cuantificación. Este sensor, para el caso de las vibraciones angulares, es un giróscopo que registra velocidades angulares.

HP4. En todos los medios de transporte se producen movimientos de pitch y roll.

Además de las vibraciones verticales, resulta evidente que en cualquier vehículo se producen movimientos de balanceo y cabeceo derivados principalmente de cómo es la superficie de transporte. No obstante son escasos los estudios que los identifiquen y cuantifiquen de forma clara y en magnitud.

HT4.1. Todos los modos de transporte presentan vibraciones angulares de diferente magnitud dependiendo del tipo de transporte que se trate.

En las Figuras del Capítulo anterior se aprecia que todos los modos de transporte estudiados (carretera, tren y marítimo) tienen pitch, roll y yaw. No obstante en algunos modos son de menor intensidad. Dependiendo del modo utilizado, la superficie sobre la cual se realiza el desplazamiento (carretera, vías y mar), entre otras causas, provocará la mayor o menor intensidad de movimientos rotacionales.

Para el caso del transporte por carretera, se ha comprobado que realmente existen los tres tipos de vibraciones angulares, si bien la vibración yaw es prácticamente irrelevante por su baja frecuencia en comparación con las vibraciones “pitch” y “roll”.

En el caso del transporte ferroviario es de interés la existencia de la vibración “yaw” en frecuencias similares a las del “roll”. No obstante, sería necesario una comprobación con equipos de seis grados de libertad para conocer exactamente el efecto dinámico real de dicha vibración sobre las cargas transportadas.

Asimismo, en el caso del transporte marítimo, a la vista de los resultados se observa que la dinámica del propio medio de transporte (buques de gran capacidad y dimensiones) provoca que aunque estas vibraciones se den a muy bajas frecuencias, la inclinación conseguida pueda afectar a la estabilidad de la mercancía transportada. En estos casos podría incluso ser, si cabe, más relevante la medición del ángulo de inclinación máximo, además de la vibración angular. Se aprecia también que en este modo de transporte es especialmente relevante la influencia de los fenómenos atmosféricos (tormentas) sobre la intensidad de las vibraciones angulares que se producen y por tanto, es más complejo caracterizar las rutas de transporte para este modo.

HP5. Las vibraciones de los modos rotacionales son reproducibles total o parcialmente en laboratorio.

Existen controladores y equipos de simulación capaces de reproducir los estímulos que se registran en el transporte tanto de vibraciones verticales como angulares.

HT5.1. Los fenómenos registrados son reproducibles en los equipos de laboratorio actuales para simulación del transporte con algunas adaptaciones y/o modificaciones.

Los laboratorios de simulación del transporte actual están enfocados a las vibraciones verticales o transversales. Por tanto sólo utilizan un único tipo de actuador axial o como mucho dos grados de libertad también axiales (vertical y horizontal). Sin embargo las vibraciones angulares pueden reproducirse si se cuenta con equipos que dispongan de alguno de los grados de libertad rotacionales como por ejemplo el equipo de vertical+pitch+roll de ITENE (3 DOF) o los hexápodos (6 DOF).

HT5.2. El método de simulación aleatorio empleado para vibraciones verticales se puede aplicar a los movimientos angulares.

La única variación en la aplicación del método estaría en la naturaleza de los datos a comunicar a los actuadores (en vibración angular se precisan varios actuadores) así como en los equipos utilizados y su interpretación, no existiendo variaciones relevantes en cuanto al método de simulación de los dos tipos de vibraciones.

HT5.3. No es necesario reproducir en laboratorio todo el espectro de vibraciones y reducirlo al rango de mayor energía, reproduciendo únicamente lo que resulta significativo para la simulación del transporte, lo que puede ser extrapolable también a vibraciones angulares.

En las Figuras 50 y 55 se muestra cómo únicamente representando las frecuencias con mayor energía se reproduce la totalidad de la energía de un ancho de banda mayor. Un espectro de vibraciones abarca datos de cero a infinito, siendo imposible su cálculo y su reproducción. Esto permite que al identificar rangos de valores realmente significativos para su simulación sea suficiente para la simulación. Estos rangos de valores han de considerar a su vez los valores relevantes para la vibración angular además de la vertical.

HP6. Es posible el diseño de un nuevo protocolo de ensayos que incorpore los modos de vibración rotacional: balanceo y cabeceo, utilizando como referencia los protocolos de ensayo actuales.

Los actuales protocolos recogidos en distintos estandar a nivel internacional son ampliamente conocidos por los expertos y técnicos del campo de la simulación del transporte. En este trabajo se ha desarrollado un protocolo que, partiendo de los referentes actuales permite simular las vibraciones angulares de modo representativo. En este caso es necesario disponer de un equipo de simulación de las vibraciones multiaxial. Tiene sentido por tanto, además de poner de manifiesto la necesidad de la consideración de la vibración angular como parámetro relevante, que éste se puede integrar de forma sencilla en un protocolo basado en lo reconocido hasta el momento. Se puede, por tanto, aplicar por parte de las empresas, los laboratorios y centros de ensayo.

7.2. VALIDEZ DE LAS TECNOLOGÍAS Y PROTOCOLOS UTILIZADOS

En relación a la validez de las tecnologías y protocolos utilizados se confirma que:

- En el caso del dispositivo para la monitorización que incorpora un giróscopo para la medición de la vibración angular, dicho dispositivo permite el registro de los modos rotacionales tanto del pitch, roll y yaw, quedando validado.
- En el caso del protocolo de simulación seguido para la ubicación y disposición de los dispositivos de registro, su ubicación trasera permite validar la hipótesis y conclusiones de numerosos estudios al respecto donde se identifica esta ubicación como la idónea para este tipo de trabajos. Asimismo, el anclaje de los dispositivos al contenedor directamente permite un reflejo más fiel de las vibraciones que la unidad de carga (sistema de embalaje-producto) podría sufrir en un entorno real.
- El software utilizado para el análisis de los datos basado en MATLAB® ha permitido generar algoritmos para el tratamiento de gran cantidad de datos recogidos en la monitorización de las rutas de transporte identificadas, así como una representación adecuada de las PSD necesarios para su interpretación.
- Los protocolos internacionales a partir de los cuales se ha basado el desarrollo del nuevo protocolo que incorpora la vibración angular se reconocen como válidos para dicho fin.

8. DESARROLLOS FUTUROS

8. DESARROLLOS FUTUROS

Las investigaciones de la presente tesis doctoral han servido para alcanzar los objetivos establecidos y contrastar las hipótesis planteadas. De los resultados obtenidos, surgen nuevas líneas de investigación que pueden, por un lado, mejorar y completar lo realizado y, por otro, seguir avanzando en el conocimiento de los riesgos derivados del transporte de mercancías, así como en la simulación de los mismos en laboratorio. Estas líneas de trabajo son:

- Ampliar los parámetros de registro en los dispositivos de toma de datos en la monitorización de los transportes, integrando los parámetros más críticos. Los actuales dispositivos recogen un amplio espectro de parámetros, si bien los más comunes son las aceleraciones y, en algunos casos, la temperatura y humedad. Además, muchos de estos dispositivos si bien disponen de entradas para poder conectar otros sensores, además de que para cada caso se ha de verificar cuáles son los sensores de los que se dispone, en muchas ocasiones son incompatibles los tipos de sensor y rango de trabajo, siendo muy difícil en algunas ocasiones conseguir registrar todos los parámetros necesarios. Así, esto sucede para el caso de la vibración angular, puesto que no se trata de un parámetro que los actuales dispositivos incorporan de serie, si bien en el desarrollo de este trabajo se ha realizado con un dispositivo adaptado a tal fin. Esto se debería corregir, no únicamente para el parámetro velocidad angular, sino para otros posibles, para tener un mejor registro y control de los riesgos en el transporte.
- Diseñar dispositivos de registro más completos, simplificar su uso y accesibilidad. Hasta el momento la monitorización del transporte se restringe a grupos punteros de investigación en el ámbito del transporte, la logística y el embalaje y a grandes corporaciones donde los movimientos de mercancías son elevados. Así, la simplificación de los actuales dispositivos en cuanto a su montaje, parámetros de registro, facilidad de uso e interpretación y análisis permitiría extender su aplicación a muchas empresas y por tanto, a muchas mercancías, conociendo

los posibles riesgos, minimizándolos por medio de un mejor embalaje o sistema de transporte y haciendo más eficiente la cadena de suministro.

- Armonizar y sistematizar los procesos y parámetros para la toma de datos en el transporte. En este trabajo se ha comprobado que hasta el momento las decisiones relativas a parámetros a analizar y los rangos a utilizar son propias de cada recorrido, mercancía, experiencia de los autores, disponibilidad de datos, entre otros. Llevar a cabo una armonización en los parámetros a registrar y evaluar, así como en los procedimientos de registro facilitaría las posibles comparativas y el conocimiento mejor de los resultados así como su aplicabilidad a realidades de transporte diferentes. Por ejemplo, para la monitorización del transporte marítimo serían necesarias muestras de mayor tamaño para poder tener mejor resolución frecuencial.
- Desarrollar inventarios de datos relativos a los riesgos en el transporte a disposición del público en general. A la hora de evaluar y mejorar los modos y sistemas de transporte y embalaje es preciso conocer los riesgos, por tanto, la información inicial sobre cómo son las rutas disponibles y los posibles riesgos a los que se somete la mercancía es clave para poder evitar pérdidas económicas, ambientales y de negocio. Por tanto, construir inventarios de datos sobre los riesgos sería un gran avance en esta área, siendo una inversión de retorno económico claro para las empresas. Esta línea de trabajo es de especial interés para el transporte marítimo donde la caracterización de las rutas es actualmente escasa y compleja. Además, sería conveniente en este modo de transporte registrar no sólo vibración angular sino inclinaciones.
- Mejorar los desarrollos software actuales de interpretación de las señales registradas. En la interpretación de las distintas señales se aplican algoritmos matemáticos complejos y de difícil acceso para la gran mayoría de los técnicos. No obstante, se ha de trabajar para conseguir una mayor formación de los técnicos de transporte y embalaje para incluir como parte de su proceso de toma de decisiones los análisis de los riesgos. Para ello una mejora y simplificación de los software actuales para la

interpretación de las señales recogidas sería un buen paso para poder lograrlo.

- Trabajar en la modificación de los estándares actuales para la simulación del transporte. En este trabajo se propone un protocolo basado en las normas actuales que supone una aportación novedosa a las mismas. El siguiente paso sería lograr un trabajo de los grupos de normalización para que este protocolo o sus posteriores evoluciones, pudieran construir un procedimiento internacionalmente reconocido y aplicado incorporando los modos rotacionales.
- Promover la implantación de protocolos de simulación previos al transporte de mercancías de manera sistemática por parte de las empresas. Actualmente son cada vez más las empresas que conocen y aplican mejoras en sus embalajes que consideran los posibles riesgos durante la distribución. No obstante, la gran mayoría sigue sin considerar estos riesgos en el diseño de los embalajes y sus circuitos de distribución, lo que conlleva ineficiencias en el embalaje y proceso de transporte.
- Validar el protocolo de ensayo para la simulación del transporte propuesta. Se trata de un desarrollo teórico que, si bien está realizado en base al análisis realizado de los actuales referentes internacionales así como en la experiencia propia en el campo, hay que llevar a cabo una validación con pruebas reales y cargas reales.
- Comprobar empíricamente los efectos sobre diferentes cargas y embalajes de las vibraciones angulares identificadas, comparadas con los efectos de las vibraciones verticales que actualmente se consideran.

9. BIBLIOGRAFÍA

9. BIBLIOGRAFÍA

Ainalis D., Rouillard V., Sek M. 2014. Issues with Combining Road Elevation Spectral Models and Vehicle. *Packaging Technology and Science*. DOI: 10.1002/pts.2101.

Affari. 2015. Tipos de contenedores. <http://www.affari.com.ar/conttt.htm> Consultado 28 Julio 2015.

Alcaraz J., De la Cruz E., Zabaleta J. 2015. Undercovered vibrations field measurement for unitized load on pallets. 27th IAPRI symposium on Packaging. Valencia, España.

Alimarket. 2014. Envase y Embalaje: Aunque tibio, retorna el crecimiento. *Revista Alimarket*. Publicaciones Alimarket. Diciembre.

Azzi A., Battini D., Persona A., Sgarbossa F. 2012. Packaging Design: General Framework and Research Agenda. *Packaging Technology and Science*; DOI: 10.1002/pts.993

Batt G. 2010. Use of Simultaneous Three Axis Vibration in Simulation of the Transport Environment. *ISTA Transport Packaging Forum 2010*

Bernard C., Laspalas A., González D., Liarte E., Jiménez M.A. 2010. *Packaging Technology and Science*; 23, 121-133.

Bernard C., Laspalas A., González D., Núñez J.L., Buil F. 2011. Transport vibration laboratory simulation: on the necessity of multiaxis testing. *Packaging Technology and Science*; 24, 1-14.

Bernard C., Laspalas A., Núñez J.L. 2012. Development of a multi-axis transport vibration test. 18th IAPRI World Packaging Conference. San Luis Obispo. California. USA.

BMVBS. 2012. *Verkehr in Zahlen 2012/2013*. 41. Jahrgang, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. Berlín.

Brandenburg R.K., Lee J.J. 1985. *Fundamentals of packaging engineering*. 2nd. Ed. Minnesota MN. MTS Systems Corp.

Böröcz P., Vastag G. 2015. Good Vibrations : Lessons from Packaging for the Global Supply Chain. In: *POMS 26th Annual Conference, Expanding POM research, teaching, and practice to help organizations,*

society, economics, and the environment. Production and Operations Management Society. Washington. ISBN 978-0-692-40828-5.

Böröcz P., Singh P., Singh J. 2015. Evaluation of Distribution Environment in LTL Shipment between Central Europe and South Africa. Journal of applied Packaging research; 7, 2, Article 3. <http://scholarworks.rit.edu/japr/vol7/iss2/3>.

Caldicott P.J. 1991. Distribution testing-Sine or Random. International Journal of Packaging Technology and Science; 4, 287-291.

Cenek P.D., Kean R.J., Kvatch I.A., Jamieson N.J. 2012. Freight transport efficiency: a comparative study of coastal shipping, rail and road modes. NZ Transport Agency research report 497.

CEOE (Confederación Española de Organizaciones Empresariales). 2013. Memorandum: El sector del transporte y la logística en España. Consejo del Transporte y la logística. CEOE.

Charles D. 1993. Derivation of environment descriptions and test severities from measured road transportation data. Journal of the Institute of Environmental Sciences; 37-42.

Chen C., Tomizuka M. 1995. Dynamic modeling of articulated vehicles for automated highway systems. Proceedings of the American Control Conference. Seattle, Washington.

Chonhenchob V., Singh S.P., Singh J., Sittipod S., Swasdee D., Pratheepthinthong S. 2010. Measurement and Analysis of Truck and Rail Vibration Levels in Thailand". Packaging Technology and Science; 23, 91-100.

Chonhenchob V., Sittipod S., Pratheepthinthong S., Rachtanapanun P., Singh P. 2006. Measurement analysis of distribution environment in Thailand: the case of produce distribution. 15th IAPRI World Conference on Packaging. Tokio.

Chonhenchob V., Singh S.P., Singh J.J., Stallings J., Grewal G. 2012. Measurement and Analysis of Vehicle Vibration for Delivering Packages in Small- Sized and Medium- Sized Trucks and Automobiles. Packaging Technology and Science; 25, 31-38.

CIGNA companies. 1989. Ports of the World; A Guide to Cargo Loss Control, 14th Edition.

COM. 2011. Libro Blanco del Transporte. Hoja de ruta hacia un espacio único europeo de transporte: por una política de transportes competitiva y sostenible. Bruselas. 28 noviembre.

COM. 2010. Hacia un espacio europeo de seguridad vial: orientaciones políticas sobre seguridad vial de la UE 2011-2020. Bruselas. 20 julio.

Colliers International. 2012. European Logistics Report- Issue 3. European Internal Demand Shifts. <http://www.colliers.com/~media/Files/EMEA/emea/research/industrial-and-logistics/european-industrial-and-logistics-internal-demand-shifts-issue-3.pdf>. Consultada 30 junio 2015.

Connolly D.P., Kouroussis G., Laghrouche O., Ho C.L., Forde M.C. 2014. Benchmarking railway vibrations – Track, vehicle, ground and building effects. Construction and Building Materials. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.042>.

Directiva 2014/47/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 3 de abril de 2014 relativa a las inspecciones técnicas en carretera de vehículos comerciales que circulan en la Unión y por la que se deroga la Directiva 2000/30/CE. Diario Oficial de la Unión Europea. 29 abril 2014.

European Union. 2010. Free movement of goods. Guide to the application of Treaty provisions governing the free movement of goods. European Commission. Enterprise and Industry. Bélgica. ISBN 978-92-79-13478-4.

IEEP (Institute European Environmental Policy). PACKAGING FOR SUSTAINABILITY: Packaging in the context of the product, supply chain and consumer needs” an IEEP report by Monkhouse C, Bowyer C, Farmer A. for INCPEN; 2004. <<http://www.incpen.org/docs/IEEPfinalreport.pdf>> Consultada 26 Junio 2015.

Directiva Europea 94/62/EC. European Parliament and Council Directive 94/62/EC of 20 December 1994 on Packaging and Packaging Waste; 1994. <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:31994L0062:EN:NOT>> Consultada 26 Junio 2015.

Ecoembes. 2015. Recomendaciones logísticas para el diseño e ingeniería de envases y embalajes. Madrid.

European Communities. 2002. EU intermodal freight transport. Key statistical data 1992-1999. Luxemburgo.

European Union. 2014. Cargo securing for road transport 2014 European best practices guidelines. Oficina de publicaciones de la Unisión Europea, Luxemburgo. ISBN 978-92-79-43665-9.

European Union. 2012. Road Transport. A change of gear. Bélgica.

Fiedler R. 1995. Testing for Package-Distribution Hazards. Part V. Distribution Packaging Technology. Institute of Packaging Proffessionals. Hendon, Virginia. USA.

García-Romeu M., Singh S.P., Cloquell-Ballester V. 2007. Measurement and analysis of vibration levels for truck transport in Spain as a function of payload, suspension and speed. Packaging Technology and Science; DOI: 10.1002/pts.798.

García-Romeu M. 2008. Contribución a la determinación y simulación de las vibraciones e impactos en operaciones de transporte y distribución de productos de consumo embalados. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.

García-Romeu M., Rouillard V., Sek M., Cloquell V. 2007. Monitoring the Evolution of Fatigue in Corrugated Paperboard under Random Loads. Applied Mechanics and Materials; 7-8, 159-164.

García-Romeu M., Singh P., Cloquell Ballester V.A. 2008. Measurement and analysis of vibration levels for truck transport in Spain as a function of payload, suspension and speed. Packaging Technology and Science; 21, 439-451.

Griffiths K. 2011. Simulating the Transport Environment for Packaging Testing Using a Multi Degree of Freedom Method. ISTA Transport Packaging Forum 2011.

Griffiths K., Shires D., White W., Keogh P.S., Hicks B.J. 2012. Correlation study using scuffing damage to investigate improved simulation techniques for Packaging vibration testing. Journal of Packaging Technology and Science. DOI: 10.1002/pts.1987.

Guzmán-Siller C., Kipp W., Martínez J., Flores-Saavedra A., Armendáriz-Almeida J. 2011. Vibration Test on Mexican Highways. 25th IAPRI Symposium on Packaging. Berlín. Alemania.

- Hanlon J.E., Kelsey R., Forcinio H. E. 1998. Handbook of Package Engineering. Third Edition. Technomic publications. Pensilvania. Estados Unidos.
- Hinsch T., Slaughter C., Craig L., Thompson F. 1993. Vibration of fresh fruits and vegetables during refrigerated truck transport. Transactions of the ASAE 1993; 36(4), 1039-1042.
- Hortal M., Alcaraz J. 2015. Embalajes optimizados para una distribución del medicamento óptima a un menor coste. Farmaindustria. (enviado para su publicación 27/11/2015).
- Hortal M. 2009. Tesis doctoral Propuesta metodológica para la disminución del impacto ambiental derivado de enases y su residuos mediante la combinación de instrumentos legales, normativos y ambientales. Universidad Politécnica de Valencia.
- IATA-DGR. 2015. International Air Transport Association- Dangerous Goods Regulation. www.iata.org. Consultado junio 2015.
- IMO- International Maritime Organisation. 2006. IMDG 2012-2014- Código marítimo internacional de mercancías peligrosas. ISBN 84-498-0777-8.
- ISTA. 2015. Guidelines for selecting and using ISTA® test procedures & projects. <http://www.ista.org/forms/ISTAGuidelines.pdf> Consultado 7 julio 2015.
- ISO 2631-1:1997/Amd1:2010. Evaluation of human exposure to whole-body vibration.
- Iwnicki S. 2006. Handbook of Railway Vehicle Dynamics. Taylor&FrancisGroup, LLC.
- Jarimopas B., Singh P., Saengnil W. 2005. Measurement and analysis of Truck Transport vibration levels and Damage to Packaged Tangerines during transit. Packaging Technology and Science; 18, 179-188.
- Joneson E. 2014. Trends in distribution simulation testing. International journal of advanced packaging technology; 2, 70-74. ISSN 2349-6665.
- Kipp W. 1998. PSD and SRS in simple terms. ISTA conference 1998. Orlando. United States.

Kipp W. 2000. Vibration Testing Equivalence. Safe Transit Association Conference. Orlando. Florida.

Kipp W. 2002. Preshipment testing strategies for global distribution. Worldpak 2002 at Michigan State University, East Lansing Michigan June 25, 2002.

Kipp W. 2005. Packaged-product laboratory testing to control distribution damage, packaging costs, and environmental impacts. IDS-Packaging Europe. <http://www.kippllc.com/PkgdProdLabTesting.pdf> accedido el 07 Julio 2015.

Kipp W. 2008. Random vibration testing of packaged-products: considerations for methodology improvement. Proceedings 16th IAPRI World Conference on Packaging. Bangkok, Tailandia.

Kouroussis G., Connolly D.P., Verlinden O. 2014. International Journal of Rail Transportation; 2 (2), 69-110.

Lamb M.J., Rouillard V., Sek M.A. 2012. Monitoring the evolution of damage in packaging systems under sustained random loads. Packaging Technology and Science; 25, 39-51.

Lee C.M., Goverdovskiy V.N. 2012. A multi-stage high-speed railroad vibration isolation system with “negative” stiffness. Journal of sound and vibration; 331, 914-921.

Lepine J., Rouillard V., and Sek M. 2015. Review Paper on Road Vehicle Vibration Simulation for Packaging Testing Purposes. Packaging Technology and Science. DOI: 10.1002/pts.2129.

Long M., Rouillard V., Lamb M. 2014. Evaluating the use of statistical estimates of vehicle geometric and inertial properties for use in numerical simulations. 8th Australasian Congress on Applied Mechanics: ACAM 8.

Lu F., Ishikawa Y., Kitazawa H., Satake T. 2010. Effect of Vehicle Speed on Shock and vibration levels in Truck Transport. Packaging Technology and Science; 23, 101-109.

Mariësse A.E., Van Sluisveld, Worrell E. 2013. The paradox of The paradox of packaging optimization – a characterization of packaging source reduction in the Netherlands. Resources, Conservation and Recycling; 73, 133– 142.

Ministerio de Fomento. 2014. Observatorio del Transporte y la logística en España. Informe anual 2013. Observatoriotransporte.fomento.gob.es.

Ministerio de Fomento. 2011. Acuerdo europeo sobre transporte internacional de mercancías peligrosas por carretera. ADR 2011. Centro de Publicaciones Secretaría General Técnica Ministerio de Fomento ©. <http://www.fomento.gob.es/AZ.BBMF.Web/documentacion/pdf/R16959.pdf>.

Ministerio de Empleo y Seguridad Social. 2014. Observatorio de las ocupaciones. 2014. Estudio prospectivo del sector logístico. Gestión de la Cadena de Suministro en España. <http://publicacionesoficiales.boe.es>. NIPO: 274-14-089-8.

Montero L. 2002. Logística e intermodalidad. Ed. Logis.Book y Fundació EMI-Manresa. ISBN 84-86684-18-8. Barcelona.

Moskowitz L. 1964. Estimates of the power spectrums for fully developed seas for wind speeds of 20 to 40 knots. Journal of Geophysical Research; 69 (24), 5161-5179.

Nayfeh A.H., Mook D., Marshall L.R. 1973. Nonlinear Coupling of Pitch and Roll Modes in Ship Motions. Journal Hydronautics; 7, 145-156.

Ostergard S. 1991. Packaging goals in transport quality. Proceedings of the 7th IAPRI World Conference on Packaging. Utrecht, Holanda.

Patuel E. 2015. El tráfico marítimo, clave en la estrategia de los operadores en comercio exterior. Transitarios y Aduanas. Revista Alimarket. <http://www.alimarket.es/noticia/189992/El-trafico-maritimo--clave-en-la-estrategia-de-los-operadores-en-comercio-exterior?news=true>. Consultado 14 Julio 2015.

Pierce C., Singh P., Burgess G. 1992. A comparison of leaf spring to air cushion trailer suspensions in the transportation environment. International Journal of Packaging Technology and Science; 5, 11-15.

Portos de Galicia. 2007. ABC de la intermodalidad. Placa 4S 2006-2007. P.I.C. SUDOE INTERREG III B.

Rissi G., Singh S.P., Burgess G., Singh J. 2008. Measurement and Analysis of Truck Transport Environment in Brazil. Packaging Technology and Science; 21, 231-246.

RID. 2011. Enmiendas al Reglamento relativo al Transporte Internacional de Mercancías Peligrosas por Ferrocarril (publicado en el «Boletín Oficial del Estado» del 20 al 26 de agosto de 1986), (RID 2011). Anejo al Convenio relativo a los Transportes Internacionales por Ferrocarril (COTIF), Berna 9 de mayo de 1980 (publicado en el «Boletín Oficial del Estado» de 18 de enero de 1986) adoptadas por la Comisión de expertos en el RID en Berna el 20 de mayo de 2010. BOE. 8 julio 2011.

Rodrigue JP., Comtois C., Slack B. 2013. *The Geography of Transport Systems* 3rd. Edition. Routledge. Nueva York. ISBN 978-0-415-82254-1.

Root D., Joneson E., Xueshan H. 2012. PRC-PSD vehicle random vibration Study. 18th IAPRI World Conference on Packaging. San Luis Obispo. California. USA.

Rouillard V., Sek M. 2003. Generating Road Vibration test schedules from pavement profiles for packaging optimisation. 21st IAPRI symposium. 18-21 Mayo. Valencia. España.

Rouillard V., Richmond R. 2007. A Novel Approach to Analysing and Simulating Railcar Shock and Vibrations. *Packaging Technology and Science*; 20, 17-26.

Rouillard V., Lamb M. 2008. On the Effects of Sampling Parameters When Surveying Distribution Vibrations. *Packaging Technology and Science*; 21, 467-477.

Rouillard V., Lamb M. 2009. On the Influence of Trigger Level in Distribution Vibration Surveys. *Packaging Technology and Science*; 22, 229-240.

Rouillard V., Sek M. 2005. The use of intrinsic mode functions to characterize shock and vibrations in the distribution environment. *Packaging Technology and Science*; 18(1), 39-51.

Rouillard V., Sek M. 2012. Creating Transport Vibration Simulation Profiles from Vehicle and Road Characteristics. *Packaging Technology and Science*. DOI: 10.1002/pts.1967.

Rouillard V. 2006. On the Synthesis of non-Gaussian Road Vehicle Vibrations. Tesis Doctoral. Universidad Monash. Australia.

Rouillard V. 2013. Some Observations on Heave Pitch and Roll. ISTA Transport Packaging Forum.

Rouillard V. 2014. Quantifying the Non-stationarity of Vehicle Vibrations with the Run Test. *Packaging Technology and Science*; 27, 203-219.

Root D. 1997. "6 Step Method for Cushioned Package Development", Lansmont Corporation, 17 Mandeville Ct., Monterey, CA 93940, www.lansmont.com. Consultada 26 Junio 2015.

Saito K. 2006. Intermittent Measurement of Loading Platform Vibration. 15th IAPRI World Conference on Packaging. Tokio.

Sek M.A. 2001. Optimisation of Packaging Design Through an Integrated Approach to the Measurement and Laboratory Simulation of Transportation Hazards. Proceedings of the 12th international Conference on Packaging, International Association of Packaging Research Institutes, Warsaw, Poland.

Sezer S., Atalay A.E. 2011. Dynamic modeling and fuzzy logic control of vibrations of a railway vehicle for different track irregularities. *Simulation Modelling Practice and Theory*; 19, 1873-1894.

Shires D. 2011. On the time compression (test acceleration) of broadband random vibration tests. *Packaging Technology and Science*; 8, 501-514.

Singh P., Marcondes J. 1992. Vibration levels in commercial truck shipments as a function of suspension and payload. *Journal of Testing and Evaluation*; 20 (6), 466-469.

Singh P., Burgess G., Marcondes J., Antle J. 1993. Measuring the package shipping environment in Refrigerated Ocean Vessels. *Packaging Technology and Science*; 6, 175-181.

Singh S.P, Burgess G., Rojnuckarin P. 1995. Test protocol for simulating truck and rail vibration and rail impacts in shipments of automotive engine racks. *Packaging Technology and Science*; 8(1), 33-41.

Singh J., Singh S.P., Joneson E. 2006. Measurement and Analysis of US Truck Vibration for Leaf Spring and Air Ride Suspensions, and Development of Tests to Simulate these Conditions. *Packaging Technology and Science*; 19, 309-323.

Singh P., Burgess G., Singh J., Kremer M. 2006. Measurement and Analysis of the Next-day Air Shipping Environment for Mid-sized and Lightweight Packages for DHL, FedEx and United Parcel Service. *Packaging Technology and Science*; 19, 227-235.

Singh S.P., Sandhu A.P.S., Singh J., Joneson E. 2007. Measurement and analysis of truck and rail shipping environment in India. *Packaging Technology and Science*; 20, 381-392.

Singh S.P., Joneson E., Singh J., Grewal G. 2008. Dynamic Analysis of Less-than-truckload Shipments and Test Method to Simulate This Environment. *Packaging Technology and Science*; 21, 453–466.

Singh J., Jaggia S., Saha K. 2012a. The Effect of Distribution on Product Temperature Profile in Thermally Insulated Containers for Express Shipments. *Packaging Technology and Science*. DOI:101002/pts.1985.

Singh P., Saha K., Singh J., Sandhu P.S. 2012. Measurement and Analysis of Vibration and Temperature Levels in Global Intermodal Container Shipments on Truck, Rail and Ship. *Packaging Technology and Science*; 25, 149-160.

Singh P., Singh J., Antle J., Topper E., Grewal G. 2014. Load Securement and Packaging Methods to Reduce Risk of Damage and Personal Injury for Cargo Freight in Truck, Container and Intemodal Shipments. *Journal of applied Packaging Research*, 6-1, Article 6. DOI:10.14448/japr.01.005.

Singh J., Singh P., Koushik S. 2015. Evaluation of Vibration Profiles for ULD Dollies at Air-Cargo Sorting Hubs. *Journal of Applied Packaging Research*; 7- 1, Artículo 2. DOI: 10.14448/japr.03.0002. Disponible: <http://scholarworks.rit.edu/japr/vol7/iss1/2>.

Smithers Pira. 2015. <http://www.smitherspira.com/services/distribution-testing/package-testing>. Consultada el 07 julio.

Smithers Pira. 2013. Global packaging market to reach \$975 billion by 2018. <http://www.smitherspira.com/news/2013/december/global-packaging-industry-market-growth-to-2018>.

Soleimani B., Ahmadi E. 2014a. Evaluation and analysis of vibration during fruit transport as a function of road conditions, suspension

system and travel speeds. *Engineering in Agriculture, Environment and food*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eaef.2014.08.002>.

Soleimani B., Ahmadi E. 2014b. Measurement and analysis of truck vibration levels as a function of packages locations in truck bed and suspension. *Computers and Electronics in Agriculture*; 109, 141-147.

TNS. 2006. El libro blanco del envase y embalaje. Ed. Salón Internacional del Embalaje, HISPACK-Fira de Barcelona. ISBN: 84-934050-3-5. Barcelona.

Trebilcock B. 2012. The pulse on pallets. *Modern Material Handling*. Noviembre.

UNO. 2012. Estudio de caracterización del sector del transporte y la logística en España. http://www.i-com.es/servicioprensa/uno/descargas/uno_estudio_presentacion_angel_davidlopez.pdf Consultada 28 Junio 2015.

Van Zeebroeck M., Van Linden V., Ramon H., De Baerdemaeker J., Nicolai B.M., Tijskens E. 2007. Review: Impact damage of apples during transport and handling. *Postharvest biology and Technology*; 45, 157-167.

Weber R. 2011. Design for Volume Optimization of Packaging for Durable Goods. *Packaging Technology and Science*; 24, 211-222.

Xing Y., Qian H., Peng Y., Zhu B., Meng H. 2014. The present situation and progress of vibration environment test technology. *Advanced Materials Research*; 986, 1696-1699.

Young D. 1993. Focused simulation. International Safe Transit Association. Lansing. Estados Unidos. www.ista.org.

Yuan S., Dejian Z., Xiangying Z., Tong L., Xiaoshan W., Dawei L., Jun P. 2006. Data acquisition for distribution environment in the region of South-Central of China. 15th IAPRI World Conference on Packaging.

Zhang L.W., Yang C.M., Meng X.W. 2010. Experimental Research on Vibration and Impact Performance of Crystal Pears Transport Packages *Journal of Packaging Engineering* 11, .

REFERENCIAS NORMATIVAS

ASTM D 642-00 (2005). Standard Test Method for Determining Compressive Resistance of Shipping Containers, Components, and Unit Loads. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, Estados Unidos.

ASTM D 999-01. Standard Test Methods for Vibration Testing of Shipping Containers. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, Estados Unidos.

ASTM D 4003-98 (2003). Standard Test Methods for Programmable Horizontal Impact Test for Shipping Containers and Systems. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, Estados Unidos.

ASTM D 4169-09. Standard Practice for Performance Testing of Shipping Containers and Systems. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, Estados Unidos.

ASTM D 4728-06. Standard Test Method for Random Vibration Testing of Shipping Containers. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, Estados Unidos.

ASTM D 5265-03. Standard Test Method for Bridge Impact Testing. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, Estados Unidos.

ASTM D 5276-98 (2004). Standard Test Method for Drop Test of Loaded Containers by Free Fall. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, Estados Unidos.

ASTM D 6055-96 (2002). Standard Test Methods for Mechanical Handling of Unitized Loads and Large Shipping Cases and Crates. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, Estados Unidos.

BS EN 15433-1: 2007. Transportation loads - Measurement and evaluation of dynamic mechanical loads - Part 1: General requirements. BSI British Standards. Bruselas, Bélgica.

BS EN 15433-2: 2007. Transportation loads - Measurement and evaluation of dynamic mechanical loads - Part 2: Data acquisition and general requirements for measuring equipment. BSI British Standards. Bruselas, Bélgica.

BS EN 15433-3: 2007. Transportation loads - Measurement and evaluation of dynamic mechanical loads - Part 3: Data validity check and data editing for evaluation. BSI British Standards. Bruselas, Bélgica.

BS EN 15433-4: 2007. Transportation loads - Measurement and evaluation of dynamic mechanical loads - Part 4: Data evaluation. . BSI British Standards. Bruselas, Bélgica.

BS EN 15433-5: 2007. Transportation loads - Measurement and evaluation of dynamic mechanical loads - Part 5: Derivation of Test Specifications. BSI British Standards. Bruselas, Bélgica.

BS EN 15433-6: 2007. Transportation loads - Measurement and evaluation of dynamic mechanical loads - Part 6: Automatic recording systems for measuring randomly occurring shock during monitoring of transports. BSI British Standards. Bruselas, Bélgica.

EUMOS 40511_2013. Test method for mounted poles used for cargo securing on commercial road vehicles and trailers. International Standard. Hanau, Germany.

EUMOS 40509_2012. Test method for load unit rigidity. Applicable for load units subjects to horizontal accelerations of 0 to 2g.. International Standard. Hanau, Germany.

EUMOS 40513_2014. Film edge forces. Test and measurement method. International Standard. Hanau, Germany.

ISTA 6 – SAMSClub 2010. Packaged-Products for Sam's Club Distribution System Shipment. International Safe Transit Association. Michigan, Estados Unidos.

ISTA 1A 2001. Packaged-Products 150 lb (68 kg) or Less. International Safe Transit Association. Michigan, Estados Unidos.

ISTA 1B 2001. Packaged-Products Over 150 lb (68 kg). International Safe Transit Association. Michigan, Estados Unidos.

ISTA 1C 2001. Extended Testing for Packaged-Products 150 lb (68 kg) or less. International Safe Transit Association. Michigan, Estados Unidos.

ISTA 1D 2001. Extended Testing for Packaged-Products over 150 lb (68 kg). International Safe Transit Association. Michigan, Estados Unidos.

ISTA 1E 2005. Unit Loads of Same Product. International Safe Transit Association. Michigan, Estados Unidos.

ISTA 1G 2001. Packaged-Products 150 lb (68 kg) or Less (Random Vibration). International Safe Transit Association. Michigan, Estados Unidos.

ISTA 1H 2001. Packaged-Products Over 150 lb (68 kg) (Random Vibration). International Safe Transit Association. Michigan, Estados Unidos.

ISTA 2A 2011. Packaged-Products 150 lb (68 kg) or Less. International Safe Transit Association. Michigan, Estados Unidos.

ISTA 2B 2011. Packaged-Products Over 150 lb (68 kg). International Safe Transit Association. Michigan, Estados Unidos.

ISTA 2C 2011. Furniture Packages. International Safe Transit Association. Michigan, Estados Unidos.

ISTA 3A 2008. Packaged-Products for parcel Delivery System Shipment 70 kg (150 lb) or Less. International Safe Transit Association. Michigan, Estados Unidos.

ISTA 3E 2009. Unitized Loads of Same Product. International Safe Transit Association. Michigan, Estados Unidos.

ISTA 3F 2008. Packaged products for Distribution Center to retail Outlet Shipment 100 lb (45 kg). International Safe Transit Association. Michigan, Estados Unidos.

ISTA 3H 2011. Products or Packaged-Products in Mechanically Handled Bulk transport Containers. International Safe Transit Association. Michigan, Estados Unidos.

UNE-EN ISO 8318: 2003. Envases y embalajes. Embalajes de expedición completos y llenos y unidades de carga. Ensayos de vibración sinusoidal usando una frecuencia variable. AENOR. Madrid, España.

UNE-EN 14149: 2004. Envases y embalajes. Embalajes de expedición completos y llenos y unidades de carga. Ensayos de choque por caída rotacional. AENOR. Madrid, España.

UNE-EN 15552: 2009. Envases y embalajes. Embalajes de expedición completos y llenos y unidades de carga. Esquemas de los ensayos de

ejecución para cadenas comunes de distribución. AENOR. Madrid, España.

UNE-EN 22248: 1994. Embalajes. Embalajes de expedición completos y llenos. Ensayo de choque vertical por caída libre. AENOR. Madrid, España.

UNE-EN 22876: 1994. Embalajes. Embalajes de expedición completos y llenos. Ensayo de volteo. AENOR. Madrid, España.

UNE-EN ISO 2234: 2003. Envases y embalajes. Embalajes de expedición completos y llenos y unidades de carga. Ensayos de apilamiento usando una carga estática. AENOR. Madrid, España.

UNE-EN ISO 2244: 2003. Envases y embalajes. Embalajes de expedición completos y llenos y unidades de carga. Ensayos impacto horizontal. AENOR. Madrid, España.

UNE-EN ISO 12048: 2001. Envases y embalajes. Embalajes de expedición completos y llenos. Ensayos de compresión y apilamiento utilizando una máquina de ensayo de compresión.. AENOR. Madrid, España.

UNE-EN ISO 13355: 2003. Envases y embalajes. Embalajes de expedición completos y llenos y unidades de carga. Ensayos de vibración vertical aleatoria. AENOR. Madrid, España.

